



ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2024. Т. 32, № 2

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Вестник Самарского Государственного Технического Университета

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Издается с августа 1993 г.

Выходит 4 раза в год

Серия

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2024. Том 32. № 2

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Главный редактор Ю.Э. Плешивцева (д.т.н., проф.)

Отв. секретарь серии О.С. Афанасьева (к.т.н.)

Редакционная коллегия:

А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)

В.И. Батищев (д.т.н., проф.)

С.Ю. Боровик (д.т.н., проф.)

Ю.В. Зубков (д.т.н., проф.)

Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)

Ю.Б. Казаков (д.т.н., проф.)

О.С. Колосов (д.т.н., проф.)

П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)

В.И. Лачин (д.т.н., проф.)

М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)

С.П. Орлов (д.т.н., проф.)

Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)

Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)

А.В. Стариков (д.т.н., проф.)

Е. Вааке (проф., Германия)

S. Luri (проф., Италия)

В. Nаске (проф., Германия)

М. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2024. Том 32. № 2)

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
443100, Самарская область, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Редактор Г.В. Загребина
Компьютерная верстка О.С. Афанасьева

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС 77-64449 от 31.12.2015.
Федеральная служба по надзору
в сфере связи, информационных
технологий и массовых
коммуникаций

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный
технический университет»
443100, Самарская область,
г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Телефон: (846) 337 04 43
E-mail: vest_teh@samgtu.ru
Факс: (846) 278 44 40

Подписано в печать 25.08.24
Выход в свет 16.09.24

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 27,27 п.л.
Уч.-изд. л. 26,62 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 119/24
Заказ № 339

Отпечатано в типографии Самарского
государственного технического университета

Адрес типографии:
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.
Корпус 8

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим группам научных специальностей: 2.3 – Информационные технологии и коммуникации; 2.2 – Электроника, фотоника, приборостроение и связь; 2.4 – Энергетика и электротехника. Полнотекстовый доступ к статьям журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru>) и на сайте <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

Подписной индекс в каталоге «Урал-Пресс» 18106
ISSN 1991-8542

© Авторы, 2024
© Самарский государственный
технический университет, 2024

Цена свободная

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Vestnik of
Samara
State
Technical
University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

Technical Sciences Series

2024. Vol. 32. Issue 2

Founder – Samara State Technical University

Editor-in-Chief Y.E. Pleshivtseva (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Execute Secretary O.S. Afanaseva (PhD Techn.)

Editorial board

A.M. Abakumov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E. Baake (Prof. Leibniz University of Hannover, Germany)

V.I. Batishchev (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S.Y. Borovik (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M. Forzan (Prof., University of Padua, Italy)

L.S. Kazarinov (Dr. Techn. Sci.)

Yu.B. Kazakov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

O.S. Kolosov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

P.K. Kuznetsov P. K. (Dr. Techn. Sci., Prof.)

V.I. Lachin (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M.Y. Livshits (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S. Lupi (Prof., University of Padua, Italy)

B. Nacke (Prof., Leibniz University of Hannover, Germany)

S.P. Orlov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L.D. Pevzner (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E.Y. Rapoport (Dr. Techn. Sci., Prof.)

A.V. Starikov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Yu.V. Zubkov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Edited by G. V. Zagrebina
Compiled and typeset by O. S. Afanaseva

The Editorial Board Address:

Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Phone: +7(846) 337 04 43

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

The journal is included in VINITI (<http://www.viniti.ru>) abstracts databases.

The full-text electronic version of journal is hosted by the web-site of scientific electronic library eLIBRARY.RU
and by the site SamGTU (<http://vestnik-teh.samgtu.ru>)
and by the site <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

The subscription index in Ural-Press catalogue 18106

ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и коммуникации

<i>Арсеньев Д.Г., Мисник А.Е., Шадухова М.А.</i> Интеллектуальная система поддержки принятия решений для управления процессом реабилитации пациентов после эндопротезирования суставов.....	6
<i>Золотарев М.А.</i> Методы многокритериальной оптимизации технологических объектов: систематический обзор научных публикаций за период 2013–2023 гг.	25
<i>Ковтун В.С.</i> Морфологический анализ системных исследований автоматических космических аппаратов в синергетически возмущающей среде	48
<i>Яковлева А.Е.</i> Интегральная оценка качества функционирования системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей.....	76

Энергетика и электротехника

<i>Базаров А.А., Колпаков Д.В., Штукатуров Н.Р.</i> Система индукционного нагрева массивных колец перед раскаткой	89
<i>Зубков Ю.В., Абакумов А.М., Абакумов О.А.</i> Оптимизация алгоритмов комбинированного управления электроприводами установок охлаждения природного газа	103
<i>Кочетков В.В., Мельников А.И., Кочетков Н.М.</i> Измерение импульсного тока при высоковольтных испытаниях с применением катушки Роговского с неинвертирующим интегратором	119
<i>Романова В.В., Батухтин А.Г., Хромов С.В., Суслов К.В.</i> Влияние качества электрической энергии на эксплуатацию основных элементов электродуговых плазменных систем термохимической подготовки топлива	129

Информационные технологии и коммуникации

УДК 004.89

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕАБИЛИТАЦИИ ПАЦИЕНТОВ ПОСЛЕ ЭНДОПРОТЕЗИРОВАНИЯ СУСТАВОВ

Д.Г. Арсеньев¹, А.Е. Мисник², М.А. Шалухова^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б

²Белорусско-Российский университет
Беларусь, 212000, г. Могилев, проспект Мира, 43

E-mail: darsenievasp@mail.ru, anton@misnik.by, shaluhova.m@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке интеллектуальной системы поддержки принятия решений, основанной на онтологическом подходе, технологиях машинного обучения и компьютерного зрения для управления процессом реабилитации пациентов после эндопротезирования суставов. Рассмотрены преимущества применения искусственного интеллекта и компьютерного зрения в медицинской практике, что позволяет повысить эффективность и точность реабилитационных мероприятий. Разработанная система использует цифрового двойника пациента, отражающего ключевые параметры его состояния и траекторию восстановления с момента первого взаимодействия с системой. Программно-инструментальная среда, на базе которой создана система, обеспечивает возможность удаленного наблюдения и корректировки плана реабилитации специалистами, что является значительным преимуществом по сравнению с традиционными методами. Система анализирует видеозаписи, выполняет анализ движений и адаптирует реабилитационные меры в зависимости от полученных данных о моторной активности пациента в реальном времени. Предложенный метод имеет потенциал для повышения точности и персонализации реабилитационных подходов, что способствует улучшению доступности и эффективности лечения. Интеграция элементов искусственного интеллекта в клиническую практику открывает перспективные направления для оптимизации реабилитационных процессов. Технологии компьютерного зрения и анализа траекторий движений пациента позволяют не только снизить нагрузку на специалистов, но и обеспечить более объективную оценку эффективности проводимых реабилитационных мероприятий.



© Автор(ы), 2024

¹ Дмитрий Германович Арсеньев, доктор технических наук, профессор, проректор по международной деятельности, главный научный сотрудник лаборатории «Интеллектуальные системы управления».

² Антон Евсеньевич Мисник, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечение информационных технологий», руководитель «Лаборатории кибер-физических систем».

^{1,2} Мария Александровна Шалухова, преподаватель-стажер кафедры «Программное обеспечение информационных технологий», аспирант.

Ключевые слова: компьютерное зрение, цифровой двойник, онтологический подход, мета-ассоциативные графы, траекторный анализ.

Введение

Развитие и интеграция методов искусственного интеллекта в системы поддержки принятия решений открывает новые возможности для повышения эффективности, гибкости и вычислительных способностей таких систем. Системы, широко использующие методы искусственного интеллекта, способны обрабатывать большие объемы информации, извлекать знания, делать выводы и предоставлять пользователям обоснованные рекомендации для принятия решений, а также лишены проблемы ограниченной рациональности, оптимальности и когнитивных искажений, свойственных человеку [1].

Организационная сложность объектов, требующих создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений, как правило, вытекает из их функциональных особенностей, отсутствия или невозможности построения точной модели либо количества активных элементов, входящих в объект. Для выбора оптимального решения из набора альтернатив специалисту требуется достаточный для решения задачи когнитивный ресурс, способный обработать всю входящую информацию, проанализировать все доступные для выбора варианты и последствия.

Интеллектуальные системы поддержки принятия решений характеризуются высокой структурированностью, способностью учитывать большее число внутренних и внешних факторов, что позволяет не только принимать обоснованное решение, но и в явном виде указывать на факты и события, послужившие основанием выбора [2].

В современных условиях наращивания объемов и накопления информации происходит активный процесс цифровизации сфер человеческой деятельности. Соответственно, возрастает потребность в системах, способных адекватно обработать растущий объем разнородной информации. Однако, несмотря на существенное развитие методов машинного обучения и искусственного интеллекта, интеллектуальные системы поддержки принятия решений в ряде важнейших отраслей, включая медицину, пока не находят широкого практического применения. Классические медицинские системы, как правило, являются информационными системами, созданными для перехода на электронный документооборот, с возможными дополнениями в виде узкоспециализированных модулей, не обладающими в достаточной степени ассистивными функциями [1–3]. Среди ключевых проблем создания и внедрения классических систем поддержки решений, в том числе решений медицинских задач, выделяются сложность интеграции в рабочий процесс, последующей технической поддержки и актуализации знаний, ограниченная применимость систем, основанных на статистической обработке данных. Для данных, обрабатываемых системой, существует проблема конфиденциальности и защиты персональных данных, что накладывает дополнительные технические и юридические ограничения [4].

Среди областей медицины, нуждающихся в разработке систем поддержки принятия решений, отдельно выделяется реабилитация. Реабилитация играет важную роль в системе здравоохранения наряду с профилактикой, лечением и паллиативной помощью при различных заболеваниях, она способна сгладить негативные последствия патологических состояний, включая острые и хронические заболевания, а также последствия травм. Как правило, реабилитационные мероприятия дополняют другие методы лечения и включают в себя целый ком-

плекс мер, усложняя задачу построения классических систем поддержки принятия решений [2–4].

Обязательным условием эффективной поддержки принятия решений является наличие качественных данных. Применение искусственного интеллекта, компьютерного зрения и дополненной реальности для получения данных о состоянии опорно-двигательного аппарата человека, а также контроля его изменений на основе последующего анализа, является новым направлением в медицинской практике.

Рассматривается интеллектуальная система поддержки принятия решений для управления процессом реабилитации пациентов после эндопротезирования суставов, реализованная в рамках программно-инструментальной среды на основе онтологического подхода и использующая для сбора обрабатываемых данных технологии компьютерного зрения и дополненной реальности.

Снижая нагрузку на специалистов, анализируя и интерпретируя данные, такая система может обрабатывать большие объемы информации и выдавать подробные заключения, а также предлагает рекомендации по функциональной коррекции опорно-двигательного аппарата пациента. Применение методов компьютерного зрения для распознавания и анализа движений пациента и интеллектуальных технологий для построения индивидуальных планов реабилитации, а также оценки эффективности реабилитационных мер в комплексе обеспечивает научную новизну исследования и способно повысить эффективность и качество реабилитационного процесса.

Технологии компьютерного зрения в системах поддержки принятия решений

Технологии компьютерного зрения представляют собой одно из наиболее динамично развивающихся направлений в современной информационной индустрии. Развитие этих технологий направлено на создание методов и алгоритмов, позволяющих машинам воспринимать, анализировать и интерпретировать визуальную информацию из окружающего мира. Внедрение компьютерного зрения в производственные процессы и системы управления значительно повышает их производительность благодаря возможностям круглосуточной работы, отсутствию усталости от рутинных операций и высокой точности, что существенно ускоряет производственные циклы.

Для построения алгоритмов компьютерного зрения чаще всего применяются сверточные нейронные сети (CNN), которые на сегодняшний день являются наиболее эффективными для работы с графическими данными. Эти сети способны автоматически обучаться иерархическим представлениям данных, что делает их идеальными для обработки и анализа изображений. CNN состоят из нескольких слоев свертки и подвыборки, что позволяет им выявлять сложные паттерны и особенности в данных [5].

Одной из первых глубоких сверточных сетей, созданной для улучшения результатов в задачах компьютерного зрения, была AlexNet. Она построена на основе пространственной корреляции в изображении с использованием сверточных слоев и рецептивных полей. Для решения проблемы переобучения в AlexNet применялись функция активации ReLU и метод исключения выборочных нейронов (dropout) в процессе обучения.

Другая значимая архитектура, изменившая подходы к компьютерному зрению, – VGG. В этой сети впервые использовались сверточные фильтры 3×3 , ко-

торые объединялись для эмуляции крупных рецептивных полей. Этот подход позволил значительно улучшить качество распознавания изображений и нашел применение в более поздних архитектурах, таких как Inception и ResNet.

Архитектура Inception предложила концепцию параллельных сверточных слоев с различными размерами фильтров в одном уровне, что позволяет эффективно выявлять паттерны разного масштаба. ResNet, в свою очередь, предложила использование остаточных блоков для решения проблемы затухания градиента, что позволяет строить очень глубокие сети без потери качества обучения.

С развитием больших данных и улучшением вычислительных мощностей исследователи продолжают создавать все более сложные архитектуры. EfficientNet, например, использует метод составного коэффициента для масштабирования, что обеспечивает преимущество в точности и эффективности по сравнению с другими архитектурами, которые применяют методы случайного масштабирования. Эта сеть демонстрирует высокую эффективность при переносе обучения и может быть успешно использована в различных областях, включая медицинскую диагностику [5, 6].

Современные исследования также сосредоточены на гибридных моделях, сочетающих сверточные нейронные сети с рекуррентными (например, LSTM) для решения задач, связанных с последовательной обработкой данных. Такие подходы особенно эффективны для распознавания действий в видеопоследовательностях, обеспечивая точное и своевременное выявление событий [7, 8].

Технологии компьютерного зрения находят широкое применение в самых различных сферах. В производственных процессах они позволяют автоматизировать контроль качества продукции и управление робототехникой. В медицине компьютерное зрение используется для диагностики заболеваний на основе анализа медицинских изображений, таких как рентгеновские снимки и МРТ.

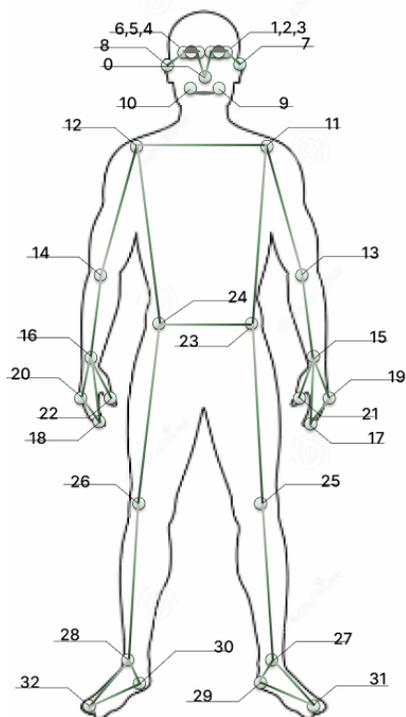
Технологии компьютерного зрения для задач анализа движений человека

Используя компьютерное зрение для анализа изображений человека, можно решить следующие группы задач: распознавание лиц (определение личности, оценка пола и возраста, этнической принадлежности), эмоций (определение эмоционального состояния по выражению лица, отслеживание факторов изменения эмоций по мимике лица), анализ поз и жестов (определение позы и положения тела, распознавание жестов и движений, отслеживание перемещений и действий в пространстве), обнаружение и выделение, оценка антропометрических параметров человека (рост, вес, телосложение), отслеживание направления внимания и взгляда [8].

Детектирование позы человека является актуальной задачей, решение которой позволяет получать данные о положении частей тела. Полученные данные возможно использовать для анализа, включая оценку характера действий и качества движений, взаимодействия с объектами реального мира и дополненной реальности. Существует множество различных подходов для решения задачи детектирования позы, которые можно разделить на две основные группы: подходы, использующие маркеры, и безмаркерные подходы.

Метод видеозахвата фиксирует изменения в положении конечности с помощью опорных точек, используемых в качестве маркеров (рис. 1). Анализ траектории движения опорных точек показывает изменения углов движения, которые

соответствуют траектории движения конечностей субъекта во время выполнения заданного движения.



- Нос (0)
- Правый глаз (3 ключевые точки): Внутренняя (1), Центральная(2), Внешняя (3)
- Левый глаз (3 ключевые точки): Внутренняя (4), Центральная (5), Внешняя (6)
- Уши (2 ключевые точки): Правое (7), Левое (8)
- Рот (2 ключевые точки): Правый угол (9), Левый угол (10)
- Плечо (2 ключевые точки): Правое (11), Левый (12)
- Локоть (2 ключевые точки): Правый (13), Левый (14)
- Запястье (2 ключевые точки): Правая (15), Левая (16)
- Костяшка мизинца (2 ключевые точки): Правая (19), Левая (20)
- Костяшка указательного пальца (2 точки): Правая (17), Левая (18)
- Костяшка большого пальца (2 точки): Правая (21), Левая (22)
- Бедро (2 ключевые точки): Правая (23), Левая (24)
- Колено (2 ключевые точки): Правая (25), Левая (26)
- Лодыжка (2 ключевые точки): Правая (27), Левая (28)
- Пятки (2 ключевые точки): Правая (29), Левая (30)
- Указатель стопы (2 ключевые точки): Правая (31), Левая (32)

Рис. 1. Карта опорных точек тела человека

Рассмотрим вектор, соединяющий левое плечо и левый локоть. Вектор будет иметь начальную точку в координатах, которые представляют положение левого плеча (x_1, y_1) , и конечную точку в координатах, которые представляют положение левого локтя (x_2, y_2) . Чтобы построить вектор между этими точками, нужно вычислить разность между координатами x и y для каждой точки:

$$x_2 - x_1 = \partial x ;$$

$$y_2 - y_1 = \partial y .$$

Эти значения и будут координатами вектора, соединяющего левое плечо и левый локоть. Далее необходимо рассчитать длину вектора по формуле

$$len = \sqrt{(\partial x^2 + \partial y^2)} .$$

Получив расстояние между начальной и конечной точками вектора, можем вычислить угол между вектором и осью x , используя формулу

$$angle = \arctg(\partial y, \partial x) .$$

Формула вычисляет угол между вектором и осью x в радианах.

Построение векторов по ключевым точкам и их взаимное расположение предоставляют данные для анализа позы и движений человека как в статике, так и в динамике. Используя векторы, соединяющие ключевые точки, можно извлечь дополнительную информацию о кинематике и кинетике человеческого тела; например, возможно определить относительное положение различных сегментов тела.

Динамический анализ состояния векторов включает расчет скоростей и ускорений отдельных частей тела, что позволяет исследовать динамические аспекты движения, такие как траектории конечностей и другие временные характеристики движений.

Данный подход может быть применен в биомеханике, спортивной науке, реабилитации и других областях, связанных с исследованием человеческого движения.

Постановка задачи для разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений

Для разработки системы были выделены следующие этапы постановки задачи: анализ предметной области, определение целей и задач системы, анализ пользователей и их потребностей, выбор методов принятия решений, а также разработка архитектуры и компонентов системы [1–3].

Предметной областью работы системы является функциональная реабилитация пациентов, перенесших эндопротезирование суставов. Разработанную систему после некоторого расширения возможно использовать при реабилитации и коррекции функциональных особенностей опорно-двигательного аппарата.

Нарушения работы опорно-двигательного аппарата являются одним из основных факторов, обуславливающих общую потребность в реабилитационных услугах: на них приходится подавляющее большинство потребностей в реабилитационных мероприятиях для детей и более половины случаев обращений среди взрослого населения. Важно отметить, что чем старше население, тем выше распространенность нарушений опорно-двигательного аппарата, что является фактором роста потребности в реабилитационных услугах на фоне общего увеличения доли населения старшей возрастной группы и роста продолжительности жизни; это обеспечивает устойчивую потребность в применении программно-аппаратных средств, осуществляющих управление процессом функциональной реабилитации и поддержку реабилитации [9–12].

Процесс функциональной реабилитации включает несколько периодов, разделенных на этапы, которые для достижения адекватного результата должны следовать друг за другом непрерывно (рис. 2). Подходы на выделяемых этапах, как правило, носят как стационарный, так и амбулаторный характер. Под функциональной реабилитацией далее будем понимать лечебную физкультуру как наиболее доступный из методов функциональной реабилитации с доказанной эффективностью [11].

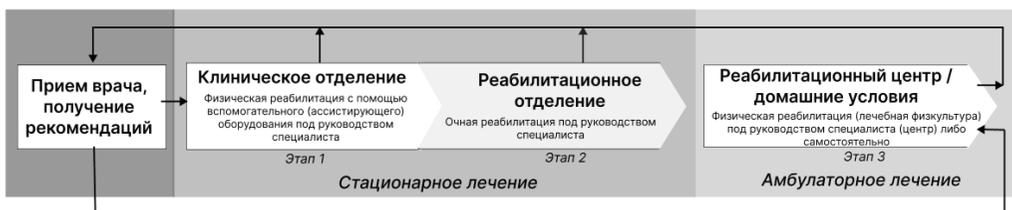


Рис. 2. Структура процесса физической реабилитации

Осуществление непрерывности процесса функциональной реабилитации часто осложняется недоступностью реабилитационных центров, а также необходимостью обеспечения постоянного медицинского сопровождения пациента в ам-

булаторном периоде. Система управления функциональной реабилитацией опорно-двигательного аппарата позволит врачу контролировать функциональное восстановление опорно-двигательного аппарата пациента как при стационарном лечении, так и в амбулаторных условиях, на расстоянии, тем самым расширив формат взаимодействия врача и пациента и повысив эффективность распределения рабочего времени специалиста. Предлагаемый подход основан на использовании технических и программных средств. Интеграция средств поддержки принятия решений в общий процесс физической реабилитации разрабатывается с целью сдерживания растущей потребности в своевременном доступе к реабилитационным услугам.

Рассмотрев специфику процесса функциональной реабилитации, выделим основные задачи разрабатываемой системы:

- оценка прогресса восстановления подвижности прооперированного в ходе выполнения мероприятий по функциональной реабилитации;

- контроль выполнения индивидуального плана реабилитационных упражнений в процессе физической реабилитации в амбулаторном периоде;

- составление и дальнейшая корректировка индивидуального плана, оценка корректности ранее выбранных реабилитационных упражнений, проводимая на основе фиксируемых данных;

- оценка эффективности примененного индивидуального плана функциональной реабилитации;

- поддержка взаимодействия между разработанными модулями системы и мобильными устройствами.

Пользователями системы являются специалисты (врачи, реабилитологи) и пациенты. В амбулаторный период физической реабилитации правильность составления индивидуального плана функциональных реабилитационных занятий может контролироваться либо медицинским работником в онлайн-режиме, либо с помощью программно-аппаратных средств, позволяющих объективно отслеживать изменения в опорно-двигательном аппарате по заданным параметрам. Использование информационно-измерительных и управляющих систем для управления процессом функциональной реабилитации и сопровождения как части процесса физической реабилитации позволит врачам выполнять свои обязанности по контролю хода восстановления в том числе в удаленном формате, сохраняя объективную оценку эффективности лечения. Оценка может проводиться с использованием специализированного программного и аппаратного обеспечения, очно либо дистанционно.

Для решения поставленных задач предлагается использовать систему управления процессом функциональной реабилитации и сопровождения, основанной на применении программно-технических средств, которые созданы на основе технологий компьютерного зрения и дополненной реальности.

Отметим, что способности систем, разрабатываемых на основе искусственного интеллекта, к управлению процессом функциональной реабилитации и контролю рекомендаций в квазиреальном времени, способности их адаптации и модификации в соответствии с текущим состоянием пациента являются важным преимуществом, позволяющим создать персонализированную траекторию восстановления и эффективный план дальнейшего лечения.

Онтологический подход к разработке интеллектуальной системы поддержки принятия решений

Стратегия разработки динамических развивающихся систем управления заключается в том, чтобы свести к минимуму участие разработчиков программного обеспечения. Для реализации данного подхода нами была разработана программно-инструментальная среда, позволяющая специалистам в предметной области проектировать онтологию и бизнес-процессы.

Выбор онтологического подхода обусловлен спецификой работы по разработке и поддержке системных и информационно-аналитических процессов в сложных кибер-физических системах.

Мета-ассоциативный граф, являющийся основой для разработки онтологии в нашей программно-инструментальной среде, представляет собой набор направленных отображений множества во множество, с понятиями вершины и метавершины, обобщенными до понятия узла метаграфа, и определением узла, дополненным именем и наборами событий и методов, принадлежащими узлу. Его приложением является моделирование отношений данных и процессной составляющей, что повышает универсальность проектирования онтологий [13, 14].

Для создания онтологии в рамках предметной области системы был использован модуль онтологического инжиниринга программно-инструментальной среды на основе мета-ассоциативного графа, который включает в себя процессную составляющую в виде методов и событий. Онтологическое представление позволяет представить конфигурацию интеллектуальной системы поддержки принятия решений, которая впоследствии может быть дополнена и расширена (рис. 3).

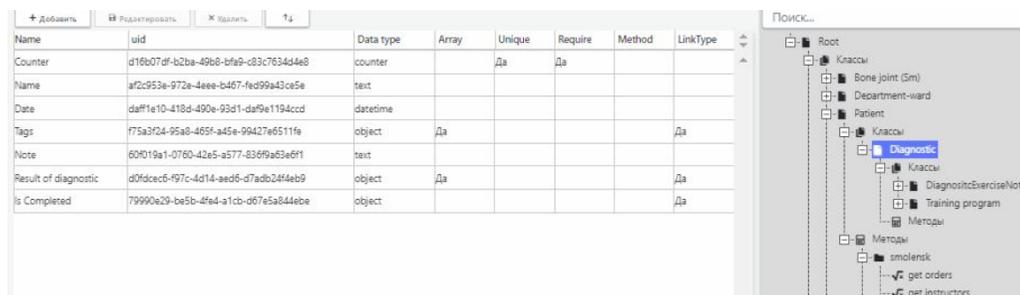


Рис. 3. Модуль онтологического инжиниринга

Основной целью организации и контроля восстановления пациентов после замены суставов является создание и внедрение систем сопровождения физической реабилитации. Такие системы должны обеспечивать функции контроля скорости восстановления пациента и соблюдения им индивидуального плана занятий в процессе физической реабилитации.

Рассмотрим схему прототипа интеллектуальной системы (рис. 4). Разрабатываемая интеллектуальная система предполагает использование мобильных устройств, оснащенных камерой (планшет или мобильный телефон), для получения видеоряда и их взаимодействие с серверным модулем системы, отвечающим за анализ полученных данных.

Для авторизованных пациентов приложение предоставляет возможность собирать данные о выполняемых упражнениях и отслеживать действия пациента, оказывая интеллектуальную помощь в выполнении реабилитационных упражне-

ний. Пациент получает разработанный комплекс упражнений в виде плана реабилитации, оптимизированного с учетом его индивидуальных физических особенностей.

Мобильное приложение для специалистов по реабилитации позволяет просматривать данные по группам пациентов в зависимости от их статуса или диагноза, данные отдельных пациентов без статуса (до первичной функциональной диагностики), планы реабилитации и рекомендуемые комплексы упражнений.

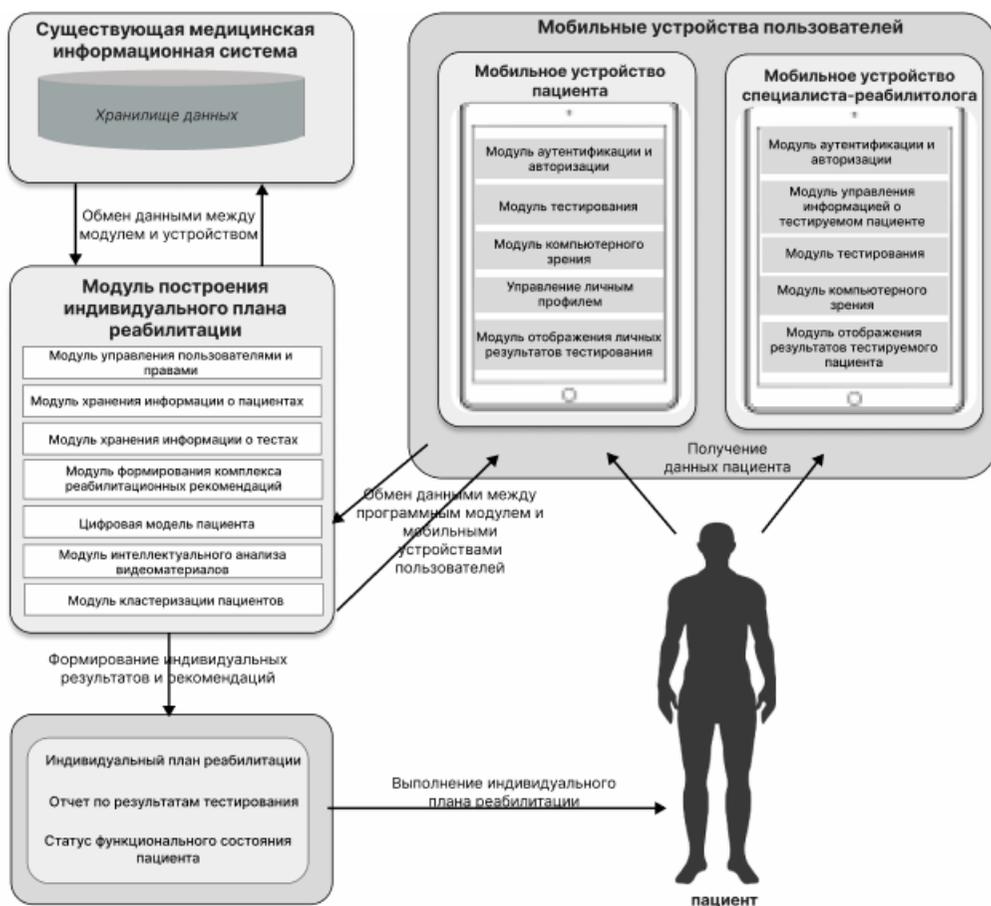


Рис. 4. Взаимодействие модулей системы

Для получения данных о положении мобильного устройства в пространстве используются встроенные в мобильное устройство датчики – гироскоп и акселерометр. Измерения, проводимые этими датчиками, оказывают влияние на итоговую точность определения положения опорных точек пациента. В дальнейшем исследовании планируется рассмотреть влияние различных факторов на полученные итоговые измерения, включая степень освещенности помещения при получении видеоряда, разрешение камеры, ее положение и удаленность от объекта, а также погрешности используемых встроенных датчиков. В целом система предоставляет пользователям удобный интерфейс, позволяющий собирать и анализировать данные и получать своевременные рекомендации по особенностям

актуального реабилитационного периода и восстановительным упражнениям на основе физических особенностей.

Разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений для управления процессом реабилитации пациентов после эндопротезирования суставов

Для корректной работы разрабатываемой системы необходимо качественное изменение состояния опорно-двигательного аппарата в пространстве. Данное изменение может также получить количественную оценку, основанную на наборе однозначно описывающих параметров, которые характеризуют изменения состояния опорно-двигательного аппарата. Применение комплексной оценки, сочетающей качественные и количественные методы, позволяет всесторонне исследовать процесс изменения состояния опорно-двигательного аппарата и обеспечить корректное функционирование разрабатываемой системы. Для используемого метода функциональной диагностики используется учет кинематических параметров, которые позволяют определить особенности и форму движений, отследить и записать данные о соответствии положения опорных точек тела при выполнении восстановительных упражнений, а также являются дополнительным источником данных для корректирования индивидуального плана реабилитационных занятий [15–19].

Работа над исследованием ведется совместно с Федеральным государственным бюджетным учреждением «Федеральный центр травматологии, ортопедии и эндопротезирования» Министерства здравоохранения Российской Федерации (г. Смоленск) – медицинским центром, внедряющим передовой опыт в клинической практике и специализирующимся на оказании высокотехнологичной медицинской помощи больным с заболеваниями опорно-двигательного аппарата. На сегодняшний день центром оказана помощь более чем 36 819 пациентам из 72 субъектов Российской Федерации. Для измерения параметров опорно-двигательного аппарата в центре используется метод гониометрии – метод регистрации относительных движений опорно-двигательного аппарата человека с использованием медицинского гониометра, размещенного на определенном участке тела. Применение прототипа системы позволяет проводить диагностику удаленно, а также решает проблему дискомфорта пациента при контактном получении измерений, используя технологию компьютерного зрения.

В применяемой методике функциональной диагностики важнейшим параметром является максимально достигаемый угол сгибания сустава, используя который, специалист по восстановительной терапии определяет возможное отклонение от нормы и назначает план реабилитационных мероприятий, оценивая эффективность и необходимость корректировки упражнений ЛФК.

После замены сустава пациентам доступны различные варианты реабилитации, выбор которых зависит от их потребностей и прогресса в восстановлении. Для пациентов, проходящих восстановление после эндоскопической замены суставов, доступны несколько основных сценариев реабилитационных мероприятий: занятия в группе, индивидуальные занятия, индивидуальные занятия с инструктором при использовании специальных тренажеров. Групповые занятия подходят для пациентов без особенностей реабилитационного периода, а также позволяют им взаимодействовать друг с другом и получать коллективную поддержку в процессе восстановления. Необходимость в индивидуальных занятиях с инструктором возникает случае необходимости учета дополнительных особен-

ностей опорно-двигательного аппарата и прогресса конкретного пациента. Индивидуальные занятия с инструктором с использованием специализированных ассистивных тренажеров являются наиболее дорогостоящим вариантом, назначаемым в раннем послеоперационном периоде либо при возникновении существенных особенностей реабилитации. Сравнивая результаты тестов на подвижность сустава, врачи-реабилитологи относят пациента к определенной группе реабилитации, разрабатывая план на весь реабилитационный период. Однако опорно-двигательный аппарат человека является сложной системой, темпы восстановления которой могут носить индивидуальный характер, требующий сочетания различных сценариев реабилитационных мероприятий в процессе восстановления, а также дополнительных временных затрат на корректировку и обоснование исходного плана реабилитации от специалиста.

Применение разработанного прототипа системы поддержки принятия решений благодаря фиксации параметров пациента в динамике позволяет существенно повысить доступность и обоснованность индивидуализации, а также сократить временные затраты на составление документации благодаря цифровизации. Проводя кластеризацию пациентов и учитывая исходные параметры, система осуществляет построение индивидуальных планов реабилитации и предлагает оптимальную модификацию рекомендуемой программы реабилитации исходя из возрастной группы пациента, уровня двигательной активности, антропометрических параметров и оценки хода восстановления прооперированного сустава исходя из достигаемых углов сгибания.

Координаты исходных точек положения сустава в пространстве получают с помощью покадрового анализа видеоряда тестового упражнения. Для определения угла методикой функциональной диагностики выделяются опорные точки; затем в зависимости от тестируемого узла определяются векторы связи. Для построения векторов между ключевыми точками можно использовать их координаты. Каждый вектор будет иметь в качестве начальной одну из ключевых точек и в качестве конечной – другую. В результате получаемой измерительной информацией можно считать положение опорных точек тела человека и углы сгибания его суставов, полученные после обработки видеоряда (см. рис. 1).

Серверная часть обеспечивает хранение данных, выполнение интеллектуальной обработки и отображение результатов в приложениях пользователей (пациентов и реабилитологов). Загружаемая в систему видеoinформация может подвергаться предварительной обработке для повышения ее качества за счет снижения аддитивного влияния гауссовского шума (рис. 5).



Рис. 5. Обработка системой полученного видеоряда

Для отслеживания процесса восстановления пациента используется цветное кодирование, присваивающее полученному измерению угла сгибания прооперированного сустава в соответствии с его отклонением от референсных значений, указанных в графике реабилитации, цветовой код:

- зеленый: состояние пациента устойчиво находится в пределах референсных значений, реабилитация проходит успешно;
- желтый: состояние пациента незначительно отклоняется от референсных значений, пациенту требуется внести изменения в процесс реабилитации;
- красный: состояние пациента значительно отклоняется от референсных значений, требуется внимание врача для оценки ситуации.

Цветовой код позволяет отслеживать ход восстановления и вносить необходимые коррективы. Данные, накопленные в профиле пациента, подвергаются интеллектуальному анализу и сравниваются с референсными значениями, характерными для каждого этапа запланированной реабилитационной программы, что позволяет объективно оценить прогресс в восстановлении пациента и скорректировать реабилитационные мероприятия для сокращения времени реабилитации с достижением необходимых характеристик движения сустава.

На основе данных составляется и при необходимости обновляется план реабилитации пациента в соответствии с индивидуальной траекторией восстановления (рис. 7).



Рис. 7. Сформированный системой индивидуальный план реабилитации после эндопротезирования сустава

Оценивая степень совпадения индивидуального плана реабилитации, полученного в ходе цифрового моделирования, и фактических результатов, рассмотрим группу пациентов, прошедших эндоскопическую замену коленного сустава и восстановительный период с использованием прототипа системы поддержки принятия решений ($n = 46$) и без него ($n = 34$). Можно отметить хорошую прогностическую способность системы: в группе пациентов, использующих систему поддержки принятия решений ($n = 46$), у 39 пациентов оправдался прогноз предсказанного темпа реабилитации, у 4 человек показатели функционального восстановления показали результат лучше спрогнозированного. В связи с различными внешними причинами и персональными особенностями реабилитационного периода у некоторых пациентов реабилитация проходила длительнее спрогнозированной ($n = 3$). В группе пациентов, проходивших реабилитацию без использования системы поддержки принятия решений, на основе общих рекомендаций, результаты таковы: 19 пациентов восстанавливались штатно, 6 пациентов опережали план восстановления и 9 пациентов восстанавливались медлен-

нее прогноза. Для объективной оценки продолжается сбор данных о ходе восстановления пациентов, проходящих реабилитацию с использованием прототипа системы и без нее. Однако уже на текущем этапе специалисты-реабилитологи отмечают положительное влияние использования прототипа системы поддержки принятия решений на соблюдение рекомендаций по полученной программе восстановления, связывая это с повышением степени осведомленности пациента о функциональном состоянии опорно-двигательного аппарата и непосредственным вовлечением пациента в процесс реабилитации.

Заключение

Описан подход и разработана интеллектуальная система поддержки принятия решений, предназначенная для управления процессом реабилитации пациентов после эндопротезирования суставов. Система, интегрирующая технологии искусственного интеллекта, компьютерного зрения и онтологический подход, представляет собой комплексное решение для повышения эффективности реабилитационных мероприятий. Применение разработанной системы позволяет адаптировать процесс реабилитации к индивидуальным особенностям каждого пациента. Система способна, основываясь на анализе видеоданных, в реальном времени отслеживать динамику восстановления функций опорно-двигательного аппарата, адаптируя реабилитационные планы в соответствии с текущими потребностями пациента, что не только способствует более быстрому восстановлению, но и минимизирует риск возможных осложнений.

Одним из преимуществ разработанной системы является ее способность к дистанционному мониторингу, что делает реабилитационные услуги более доступными для широкого круга пациентов, включая тех, кто проживает в удаленных или малообеспеченных регионах. Это обстоятельство особенно актуально в условиях современного мира, где мобильность и доступность медицинских услуг играют решающую роль в обеспечении высокого качества жизни населения. Кроме того, внедрение интеллектуальных систем в процесс реабилитации способствует снижению нагрузки на медицинский персонал и оптимизации работы реабилитационных центров. По мере накопления опыта и данных система продолжит совершенствоваться, обеспечивая все более точное и эффективное вмешательство, что, в свою очередь, предоставит возможность для дальнейшего развития и интеграции новых функциональных возможностей.

Следует отметить, что результаты исследования подтвердили значительный потенциал применения разработанной системы в клинической практике. Ожидается, что дальнейшее развитие и адаптация системы позволят не только улучшить качество реабилитационного процесса, но и существенно сократить экономические издержки, связанные с длительным лечением и реабилитацией пациентов. Планируется расширение функциональности системы путем интеграции дополнительных модулей и технологий, включая использование виртуальной и дополненной реальности для тренировки пациентов, применение более сложных алгоритмов машинного обучения для анализа больших данных и предсказания исходов реабилитации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иванов К.А., Благовещенский И.Г., Благовещенский В.Г. [и др.]. Модели и методы машинного обучения для проектирования систем поддержки принятия решений // Сборник научных докладов научно-практической конференции с международным участием, по-*

- священной 100-летию со дня рождения И.К. Петрова «Современные проблемы автоматизации технологических процессов и производств». Курск: Университетская книга, 2023. С. 192–200.
2. *Marakas G.M.* Decision support systems in the 21st century. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.
 3. *Musen M.A., Middleton B., Greenes R.A.* Clinical decision-support systems // Biomedical informatics: computer applications in health care and biomedicine. Cham: Springer International Publishing, 2021. Pp. 795–840.
 4. *Kamenov K., Mills J.A., Chatterji S., Cieza A.* Needs and unmet needs for rehabilitation services: a scoping review // Disability and Rehabilitation. 2019. 41(10). Pp. 1227–1237. <https://doi.org/10.1080/09638288.2017.1422036>
 5. *Shah S., Tembhurne J.* Object detection using convolutional neural networks and transformer-based models: a review // Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2023. Vol. 10 (1). P. 54.
 6. *Wang J. et al.* NGCU: A new RNN model for time-series data prediction // Big Data Research. 2022. Vol. 27. Pp. 100296.
 7. *Hoang V.T., Jo K.H.* Practical Analysis on Architecture of EfficientNet // 14th International Conference on Human System Interaction (HSI), Gdańsk, Poland, 2021. Pp. 1–4. doi: 10.1109/HSI52170.2021.9538782
 8. *Киселев Ю.В., Богомолов И.А., Розалиев В.Л., Баклан В.А.* Анализ подходов, методов и решений для детектирования позы человека. Выбор инструмента для задачи определения эмоционального состояния человека по его позе // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 6. С. 41–47. doi: 10.17513/snt.39629
 9. *Cieza A., Causey K., Kamenov K., Hanson S.W., Chatterji S., Vos T.* Global estimates of the need for rehabilitation based on the Global Burden of Disease study 2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019 // The Lancet. 2020. 396 (10267). Pp. 2006–2017.
 10. *Hartvigsen J., Hancock M.J., Kongsted A.* What low back pain is and why we need to pay attention // The Lancet, 2018. 391. Pp. 2356–2367.
 11. *Кустова А.В., Хозяинова С.С., Абусева Г.Р. [и др.]* Реабилитационные технологии у пациентов после тотального эндопротезирования крупных суставов нижних конечностей: наукометрический анализ // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2024. Т. 101, № 1. С. 54–61. doi: 10.17116/kurort202410101154.
 12. *Намазов А.К., Намазов К.А.* Физическая реабилитация как важнейший компонент в системе медицинской реабилитации // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. 2019. Т. 14, № 2. С. 903–907.
 13. *Мисник А.Е.* Применение метаграфов для онтологического инжиниринга сложных систем // Прикладная информатика. 2022. Т. 17, № 2(98). С. 120–132. doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-120-132.
 14. *Borisov V.V., Misnik A.E.* Ontological Engineering of Interrelated Processes in Complex Cyber-Physical Systems // In Proceedings of the Sixth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”. ИТИ 2022. Ed: Kovalev S., Sukhanov A., Akperov I., Ozdemir S. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 566. Springer, Cham, 2022. doi: 10.1007/978-3-031-19620-1_39
 15. *Borisov V.V., Misnik A.E., Velkov A.A., Shalukhova M.A.* Application of Computer Vision Technologies to Reduce Injuries in the Athletes’ Training // In Proceedings of the Seventh International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”. ИТИ 2023. Ed: Kovalev S., Kotenko I., Sukhanov A. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 777. Springer, Cham, 2023. doi: 10.1007/978-3-031-43792-2_14
 16. *Devanne M., Wannous H., Berretti S., Pala P., Daoudi M., Del Bimbo A.* 3D human action recognition by shape analysis of motion trajectories on riemannian manifold // Transactions on Systems Man and Cybernetics, 2015. Vol. 7(45). Pp. 1340–1352. doi: 10.1109/TCYB.2014.2350774.
 17. *Wang J., Qiu K., Peng H., Fu J., Zhu J.* AI coach: Deep human pose estimation and analysis for personalized athletic training assistance // In Proceedings of the 27th ACM international conference on multimedia. 2019. Pp. 374–382. doi: 10.1145/3343031.3350910
 18. *Терехин А.Д., Ильшов О.Р., Степанов А.В.* Система оценивания спортивных упражнений по нейросетевому анализу видеоряда // Прикладная математика и вопросы управления. 2022. № 1. С. 75–86. doi: 10.15593/2499-9873/2022.1.04

19. *Костенко Е.В., Петрова Л.В., Мартынов М.Ю., Погонченкова И.В.* Эффективность реабилитации с виртуальной реальностью и биологической обратной связью в восстановлении функции кисти после инсульта // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски. 2023. Т. 123, № 3–2. Рр. 68–75.

Статья поступила в редакцию 01 июня 2024 г.

MANAGING THE REHABILITATION OF PATIENTS FOLLOWING JOINT REPLACEMENT USING REMOTE SUPPORT TOOLS

D.G. Arseniev¹, A.E. Misnik², M.A. Shalukhova^{1,2}

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 B, Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

² Inter-state educational institution of higher education “Belarusian-Russian university”
43, Mira Ave, Mogilev, 212000, Belarus

E-mail: darsenievasp@mail.ru, anton@misnik.by, shaluhova.m@yandex.ru

Abstract. *The article considers the approach to the development of an intelligent decision support system based on artificial intelligence technologies to manage the rehabilitation process in patients who have undergone joint endoprosthesis surgery. The paper focuses on the advantages of using complex intelligent systems in various industries requiring personalised approaches to the object, including medicine. The prospects for their further development are considered. The creation of a digital twin reflecting the key parameters of the object and its development trajectory from the moment of the first interaction with the system is proposed. The system, developed on the basis of software and instrumental environments, provides the possibility of remote observation and correction of the recovery plan by specialists, which represents a significant advantage compared to traditional methods. In order to ensure the adaptability of the system and the actualisation of the proposed solutions, control over the patient's condition and adaptation of treatment programmes is achieved by means of periodic and unscheduled checking of the object indicators. This is achieved by comparing the indicators obtained as a result of video data analysis with the normalised indicators of the system. The developed system analyses video recordings, performs movement analysis and adapts rehabilitation measures depending on the obtained data on the patient's motor activity in real time. The proposed method offers the potential to enhance the precision and personalisation of rehabilitation approaches, thereby facilitating greater accessibility and efficacy in treatment. The integration of artificial intelligence elements into clinical practice presents a promising avenue for optimising rehabilitation processes.*

Keywords: *computer vision, digital twin, ontological approach, meta-associative graphs, trajectory analysis.*

REFERENCES

1. Ivanov K.A., Blagoveshchenskij I.G., Blagoveshchenskij V.G. [i dr.]. Modeli i metody mashinnogo obucheniya dlya proektirovaniya sistem podderzhki prinyatiya reshenij [Models and methods of machine learning for designing decision support systems] // Sb. nauchnyh dokladov nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchenoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya I.K. Petrova «Sovremennye problemy avtomatizacii tekhnologicheskikh processov i proizvodstv». Kursk: Universitetskaya kniga, 2023. S. 192–200. (In Russian).
2. Marakas G.M. Decision support systems in the 21st century. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.



© The Author(s), 2024

¹ Dmitry G. Arseniev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

² Anton E. Misnik (PhD. Sci. (Techn.)), Associate Professor.

^{1,2} Maria A. Shalukhova, Trainee Teacher, Postgraduate Student.

3. *Musen M.A., Middleton B., Greenes R.A.* Clinical decision-support systems // Biomedical informatics: computer applications in health care and biomedicine. Cham: Springer International Publishing, 2021. Pp. 795–840.
4. *Kamenov K., Mills J.A., Chatterji S., Cieza A.* Needs and unmet needs for rehabilitation services: a scoping review // Disability and Rehabilitation. 2019. 41(10). Pp. 1227–1237. <https://doi.org/10.1080/09638288.2017.1422036>
5. *Shah S., Tembhurne J.* Object detection using convolutional neural networks and transformer-based models: a review // Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2023. Vol. 10 (1). Pp. 54.
6. *Wang J. et al.* NGCU: A new RNN model for time-series data prediction // Big Data Research. 2022. Vol. 27. P. 100296.
7. *Hoang V.T., Jo K.H.* Practical Analysis on Architecture of EfficientNet // 14th International Conference on Human System Interaction (HSI), Gdańsk, Poland, 2021. Pp. 1–4. doi: 10.1109/HSI52170.2021.9538782
8. *Kiselev Yu.V., Bogomolov I.A., Rozaliev V.L., Baklan V.A.* Analiz podhodov, metodov i reshenij dlya detektirovaniya pozy cheloveka. Vybór instrumenta dlya zadachi opredele-niya emocional'nogo sostoyaniya cheloveka po ego poze [Analysis of approaches, methods and solutions for human pose detection. Selection of a tool for the task of determining the emotional state of a person by his pose] // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2023. № 6. Pp. 41–47. doi: 10.17513/snt.39629. (In Russian).
9. *Cieza A., Causey K., Kamenov K., Hanson S.W., Chatterji S., Vos T.* Global estimates of the need for rehabilitation based on the Global Burden of Disease study 2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019 // The Lancet. 2020. 396(10267). Pp. 2006–2017.
10. *Hartvigsen J., Hancock M.J., Kongsted A.* What low back pain is and why we need to pay attention // The Lancet, 2018. 391. Pp. 2356–2367.
11. *Kustova A.V., Hozyainova S.S., Abuseva G.R. [i dr.]* Reabilitacionnye tekhnologii u pa-cientov posle total'nogo endoprotezirovaniya krupnyh sustavov nizhnih konechnostej: naukoemicheskij analiz [Rehabilitation technologies in patients after total endoprosthesis of large joints of the lower limbs: a scientometric analysis] // Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoj fizicheskoj kul'tury. 2024. V. 101, № 1. Pp. 54–61. doi: 10.17116/kurort202410101154. (In Russian).
12. *Namazov A.K., Namazov K.A.* Fizicheskaya reabilitaciya kak vazhnejshij komponent v sisteme medicinskoj reabilitacii [Physical rehabilitation as the most important component in the system of medical rehabilitation] // Zdorov'e – osnova chelovecheskogo potentsiala: problemy i puti ih resheniya. 2019. V. 14, № 2. Pp. 903–907. (In Russian).
13. *Misnik A.E.* Primenenie metagrafov dlya ontologicheskogo inzhiniringa slozhnyh sistem [Metagraphs for ontological engineering of complex systems] // Prikladnaya informatika. 2022. V. 17, № 2(98). Pp. 120–132. doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-120-132. (In Russian).
14. *Borisov V.V., Misnik A.E.* Ontological Engineering of Interrelated Processes in Complex Cyber-Physical Systems // In Proceedings of the Sixth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”. IITI 2022. Ed: Kovalev S., Sukhanov A., Akperov I., Ozdemir S. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 566. Springer, Cham, 2022. doi: 10.1007/978-3-031-19620-1_39
15. *Borisov V.V., Misnik A.E., Velkov A.A., Shalukhova M.A.* Application of Computer Vision Technologies to Reduce Injuries in the Athletes' Training // In Proceedings of the Seventh International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”. IITI 2023. Ed: Kovalev S., Kotenko I., Sukhanov A. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 777. Springer, Cham, 2023. doi: 10.1007/978-3-031-43792-2_14
16. *Devanne M., Wannous H., Berretti S., Pala P., Daoudi M., Del Bimbo A.* 3D human action recognition by shape analysis of motion trajectories on riemannian manifold // Transactions on Systems Man and Cybernetics, 2015. Vol. 7(45). Pp. 1340–1352. doi: 10.1109/TCYB.2014.2350774
17. *Wang J., Qiu K., Peng H., Fu J., Zhu J.* AI coach: Deep human pose estimation and analysis for personalized athletic training assistance // In Proceedings of the 27th ACM international conference on multimedia. 2019. Pp. 374–382. doi: 10.1145/3343031.3350910
18. *Teryohin A.D., Ilyalov O.R., Stepanov A.V.* Sistema ocenivaniya sportivnyh upravlene-nij po nejrosetevomu analizu videoryada [The system of estimation of sports exercises according to the neural network analysis of a video series] // Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya. 2022. № 1. C. 75–86. doi: 10.15593/2499-9873/2022.1.04. (In Russian).

19. *Kostenko E.V., Petrova L.V., Martynov M.Yu., Pogonchenkova I.V.* Effektivnost' reabilitacii s virtual'noj real'nost'yu i biologicheskoy obratnoj svyaz'yu v vosstanovlenii funkcii kisti posle insulta [Effectiveness of rehabilitation with virtual reality and biofeedback in recovery of hand function after stroke] // Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova. Specvypuski. 2023. T. 123, № 3–2. Pp. 68–75. (In Russian).

Original article submitted 01.06.2024

УДК 001.891.3

МЕТОДЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ЗА ПЕРИОД 2013–2023 ГГ.

*М.А. Золотарев*¹

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: maksimsam@mail.ru

Аннотация. Представлен проведенный в соответствии с рекомендациями PRISMA систематический обзор опубликованных в открытых источниках в 2013–2023 гг. научных статей, посвященных приложениям методов многокритериальной оптимизации. Рассматриваются основные методы оптимизации относительно набора конфликтующих целевых функций, таких как энергетическая эффективность, точность достижения конечных состояний, экономическая целесообразность, надежность функционирования, соблюдение экологических стандартов и др. Особое внимание уделено теоретическим основам и практическим применениям этих методов, направленным на повышение эффективности технологических процессов и улучшение качества принимаемых решений. Основная цель обзора – проанализировать текущее состояние исследований в этой области, выявить тенденции и ограничения в использовании многокритериальных методов для оптимизации конкретных технологических процессов и объектов. Исследование показало, что несмотря на значительный прогресс в разработке теоретических основ многокритериальной оптимизации количество работ, направленных на применение этих методов в реальных технологических задачах, остается ограниченным. В статье подчеркивается важность дальнейших исследований и разработок, направленных на адаптацию методов оптимизации к специфическим особенностям технологических процессов. Этот обзор направлен на более глубокое понимание современных тенденций и проблем, связанных с применением методов многокритериальной оптимизации для совершенствования технологических процессов, что способствует развитию исследований в этой перспективной области.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, систематический обзор, алгоритмы оптимизации, эволюционные алгоритмы, минимаксная свертка, генетический алгоритм NSGA-II, методы математического программирования, технологические объекты.

Введение

Многокритериальная оптимизация (МКО) технологических объектов представляет собой актуальное междисциплинарное направление научных исследований. Разработка математических моделей, алгоритмов и методов оптимизации в этой области играет ключевую роль в успешном решении разнообразных прак-

 © Автор(ы), 2024

¹ Максим Александрович Золотарев, аспирант кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

тических задач. Интеграция методов математического моделирования, теории управления и многокритериальной оптимизации имеет существенное значение при решении конкретных прикладных задач, связанных с технологическими процессами, поскольку такой подход позволяет эффективно использовать ресурсы и стабильно поддерживать высокую эффективность функционирования объектов при снижении затрат и минимизации потерь.

В условиях возрастающих требований к эффективности и экономичности процессов, а также в связи с необходимостью поиска оптимальных решений для сложных технических систем значение данных исследований неуклонно растет. Отражением этого является заметное увеличение числа публикаций, посвященных многокритериальной оптимизации, за последние годы. На рис. 1 показана динамика роста опубликованных статей с 2013 по 2023 годы в трех наиболее авторитетных и доступных базах данных (IEEE Explore, Science Direct, Google Scholar), рассматриваемых в данном систематическом обзоре.

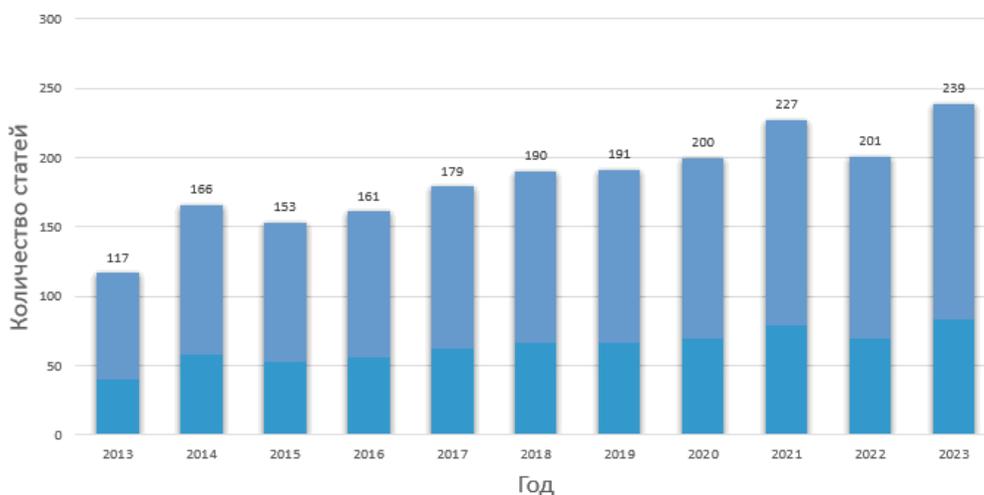


Рис. 1. Общее количество статей, опубликованных в 2013–2023 гг.

Для дальнейшего анализа в представленном систематическом обзоре методы многокритериальной оптимизации разделены на три основные группы (рис. 2) [1].

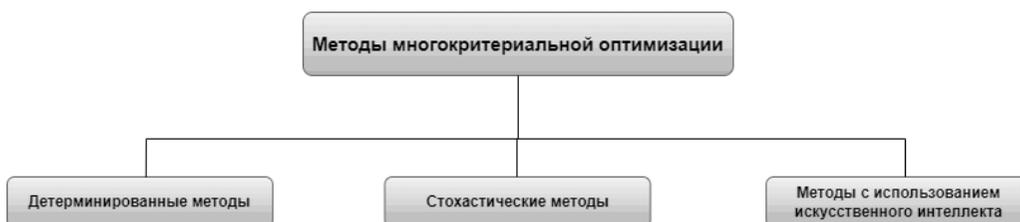


Рис. 2. Классификация методов многокритериальной оптимизации

Детерминированные методы оптимизации применяются для определения экстремумов целевых функций, гарантируя предсказуемость результатов, которые не подвержены случайным вариациям. Эти методы строго следуют заданным алгоритмам, что обеспечивает их воспроизводимость при повторении

с идентичными входными данными. С помощью детерминированных методов особенно эффективно решаются различные задачи линейного и нелинейного программирования, в которых математические модели известны, а критерии оптимизации описываются дифференцируемыми функциями. Детерминированные методы находят широкое применение в различных сферах, включая инженерию и экономику, благодаря возможности поиска глобальных оптимальных решений с высокой точностью, в том числе в сложных и критических приложениях.

Стохастические методы многокритериальной оптимизации основаны на использовании алгоритмов, использующих случайные процессы для поиска оптимальных решений, обеспечивая более широкий охват анализируемого пространства решений. Эти методы особенно эффективны для решения широкого спектра задач, когда традиционные детерминированные методы могут быть неэффективны или неприменимы. В отличие от детерминированных методов, которые используют точные математические модели и алгоритмы для нахождения оптимального решения, стохастические методы работают с вероятностными и трудно формализуемыми моделями. К числу стохастических методов относятся эволюционные алгоритмы, роевой интеллект, алгоритмы эвристической оптимизации, методы случайного поиска и др. [2]. Стохастические методы являются мощным инструментом для решения сложных оптимизационных задач, предлагающим компромисс между точностью и вычислительной эффективностью.

Методы оптимизации с использованием искусственного интеллекта (ИИ) применяются для решения задач оптимизации, которые могут быть слишком сложными или не иметь аналитического решения с использованием традиционных методов. В последние годы наблюдается повышенный интерес к методам обучения с подкреплением (ОСП) и глубокого обучения (ГО). ОСП относится к области, связанной с обучением оптимальным стратегиям принятия решений в многокритериальных задачах, где используются такие подходы, как, например, аппроксимация функции ценности [3–5]. В свою очередь, ГО применяет нейронные сети для обучения фронта Парето в задачах МКО, особенно с входными данными высокой размерности. Алгоритмы оптимизации с использованием ИИ в отличие от детерминированных и стохастических методов способны обучаться на данных, извлекать сложные закономерности и адаптировать свои параметры для улучшения результатов оптимизации. Таким образом, методы на основе ИИ могут применяться в различных областях, таких как управление, финансы, медицина, логистика, благодаря возможности решать высокоразмерные и сложные задачи в изменяющихся условиях и при наличии неопределенности.

Методы многокритериальной оптимизации прочно закрепились в различных секторах экономики, медицине, энергетике и социальных системах. За последнее десятилетие было опубликовано значительное количество обзоров и исследований, посвященных применению МКО к широкому спектру объектов и систем. Тем не менее наблюдается явный недостаток обзоров исследований, направленных на многокритериальную оптимизацию технологических объектов и процессов.

В связи с этим цель настоящего исследования заключается в систематизации существующих знаний в области МКО, актуализации представления о текущем состоянии этого важного направления научной деятельности и выявлении наиболее эффективных методик, успешно применяемых к технологическим объектам в последние годы. Целью представленного обзора является выявление современных тенденций и проблем, связанных с применением методов многокри-

териальной оптимизации для совершенствования технологических объектов и процессов, что способствует развитию исследований в этой перспективной области.

1. Методика исследования

Систематические обзоры играют ключевую роль в синтезе научных знаний, обеспечивая всеобъемлющий анализ существующих исследований в конкретной области. Такие обзоры служат фундаментом для формирования гипотез и направлений будущих исследовательских проектов, а также способствуют решению вопросов, которые не были полностью рассмотрены в рамках единичных исследований. Для того чтобы систематический обзор обладал высокой информативностью и был востребован в научном сообществе, он должен быть строго структурирован и детализирован. Особенно важно сформулировать цели и обосновать ограничения при выборе научных источников, подробно описать методику проведения отбора и анализа публикаций, а также обобщить полученные результаты, включая классифицирующие характеристики рассмотренных исследований и выводы мета-анализа. Для структурирования и детализации систематических обзоров используют современные рекомендации по отчетности, такие как метод PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), который предоставляет исследователям руководство по созданию высококачественных систематических обзоров. Эти рекомендации помогают стандартизировать процессы составления обзоров, повышая прозрачность и повторяемость результатов, что, в свою очередь, способствует более эффективному и обоснованному использованию результатов исследований в научном сообществе.

Систематический обзор, который проводится в соответствии с рекомендациями PRISMA, должен включать 27 элементов отчетности, содержащих описание критериев включения и исключения исследований, детализацию результатов поиска источников информации, методы анализа данных, синтез результатов выбора, обобщение ключевых выводов, ограничение исследований, представление результатов в графической форме, информацию о финансировании исследований и конфликтах интересов и др. Общие положения методики PRISMA изложены в статьях [6–8].

При составлении настоящего систематического обзора применялись 15 из 27 элементов расширенного контрольного списка PRISMA: название, аннотация, обоснование, цели, критерии приемлемости, источники информации, поиск, отбор исследований, процесс сбора данных, данные, синтез результатов, характеристики исследования, результаты исследования, обсуждение, выводы. Применяемые элементы позволили сфокусировать внимание на ключевых аспектах, необходимых для формирования полноценного обзора, таких как выборка исследований, оценка их качества, анализ данных. Некоторые элементы PRISMA не использовались, поскольку они не актуальны для тематики исследования и не имеют прямого отношения к проведенному анализу.

2. Выбор ключевых слов

В соответствии с рекомендациями PRISMA для поиска статей в выбранных базах данных необходимо сформулировать набор ключевых слов, которые являются основополагающими при составлении выборки публикаций и определяют стратегию исследования. Ключевые слова, лежащие в основе поиска, должны

быть достаточно общими, чтобы гарантировать, что ни одна статья, представляющая интерес, не будет пропущена. Однако чтобы избежать чрезмерной обобщенности и повысить точность поиска, для большинства ключевых слов использовались также их синонимы с учетом возможных альтернативных вариантов. Например, для термина «многокритериальная оптимизация» использовались ключевые слова multi-objective (многоцелевая), multi-criteria (многокритериальная) и vector (векторная) оптимизация. Для определения типа задач использовались ключевые слова: optimal control (оптимальное управление), optimal design (оптимальное проектирование), parameter optimization (параметрическая оптимизация). Для выделения объектов и систем (object (объект), system (система)), функция состояния которых зависит не только от времени, но и от пространственных координат, использовались ключевые слова distributed parameters (распределенные параметры), parameters evolving over time and space coordinates (параметры, изменяющиеся во времени и пространственных координатах).

Для формирования расширенного поискового запроса использовались булевы операторы. Оператор OR применялся для объединения синонимов и альтернативных написаний, обеспечивая охват различных вариантов ключевых терминов. Дополнительно применялся оператор AND для уточнения запроса путем соединения основных ключевых слов, гарантируя релевантность полученных результатов.

3. Выбор баз данных

Поиск опубликованных журнальных статей и докладов на конференциях проводился в следующих базах данных: ScienceDirect, Google Scholar и IEEE Xplore. В процессе поиска использовались ключевые слова, которые вводились в соответствующие поисковые интерфейсы указанных баз данных. Количество используемых ключевых слов было ограничено внутренними правилами и условиями каждой из этих баз данных.

4. Критерии включения публикаций в обзор и исключения из него

В качестве основного программного обеспечения для работы с публикациями использовалось широко известное ПО Mendeley [9], позволяющее организовывать, аннотировать и извлекать статьи по заданному пользователем шаблону. С использованием широких возможностей Mendeley, включая импорт PDF-файлов, отобранные исследования были детально проанализированы, а данные из них были перенесены в универсальную программу для работы с электронными таблицами Excel для уточнения и структурирования при последующем анализе.

Расширенные функции обработки данных и вычислительные возможности Excel позволили выполнять расчеты, генерировать статистику и создавать визуальные представления. Для оптимизации процесса отбора исследований использовался специализированный веб-инструмент для систематических обзоров – Rayyan [10], который предоставляет возможность эффективно фильтровать, оценивать и просматривать статьи, ускоряя процесс принятия решения о включении исследований в систематический обзор или исключении из него.

Отбор публикаций, найденных в базах данных, по ключевым словам проводился исходя из следующих критериев:

– тематическая принадлежность (рассматривались только статьи, посвященные проблемам многокритериальной оптимизации);

- использование конкретных методов (описание применения конкретных методов многокритериальной оптимизации технологических объектов);
 - качество исследования (публикация статей в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах и конференциях, достоверность используемых методов и адекватность полученных результатов);
 - год публикации (исследования, опубликованные в период с 2013 по 2023 гг.);
 - отношение к технологическим объектам или процессам.
- Следующие статьи исключались из обзора:
- статьи, полный текст которых недоступен;
 - дублирующие статьи, сообщающие об одной и той же работе;
 - обзорные статьи;
 - статьи, в которых не описаны методы, используемые для многокритериальной оптимизации.

5. Отбор исследований

В результате поиска по ключевым словам в базах данных было найдено 714 публикаций в ScienceDirect, 455 публикаций в IEEE Xplore и 985 публикаций в Google Scholar. Процесс отбора публикаций для систематического обзора, алгоритм которого представлен на рис. 3, включает четыре этапа.

1. Первый этап заключался в выявлении всех потенциально релевантных исследований из баз данных и отсеивании дублирующих публикаций. В результате на первом этапе было выделено 1648 публикаций.

2. На втором этапе решение о включении публикации в обзор принималось на основе ее названия и содержания аннотации. В результате на втором этапе отбора было выделено 204 статьи.

3. На третьем этапе отобранные исследования подвергались более тщательной оценке с использованием следующих критериев включения: год публикации, наличие полнотекстовых статей и отношение исследований к технологическим объектам. В результате на третьем этапе отбора было выделено 173 статьи.

4. На четвертом этапе проводился детальный анализ отобранных статей, включающий оценку качества исследований. В результате для проведения систематического обзора было выделено 35 публикаций.

Данные исследования демонстрируют, что лишь незначительная доля научных работ непосредственно связана с тематикой, рассматриваемой в данном обзоре. Конкретно в систематический обзор включено только 2 % статей.

На рис. 4 представлено распределение по странам отобранных для исследования публикаций в период 2013–2023 гг. Гистограмма, позволяющая оценить географическую локализацию исследований, показывает, что наиболее активно исследования в области многокритериальной оптимизации технологических объектов проводили такие страны, как Китай, Италия, Иран и Россия.

На рис. 5 представлена круговая диаграмма, демонстрирующая распределение отобранных исследований по трем базам данных: ScienceDirect, IEEE Xplore и Google Scholar. Каждый сектор диаграммы соответствует количеству исследований, отобранных из соответствующей базы данных для проведения систематического обзора. Из рисунка видно, что распределение публикаций по базам данных можно считать практически равномерным.

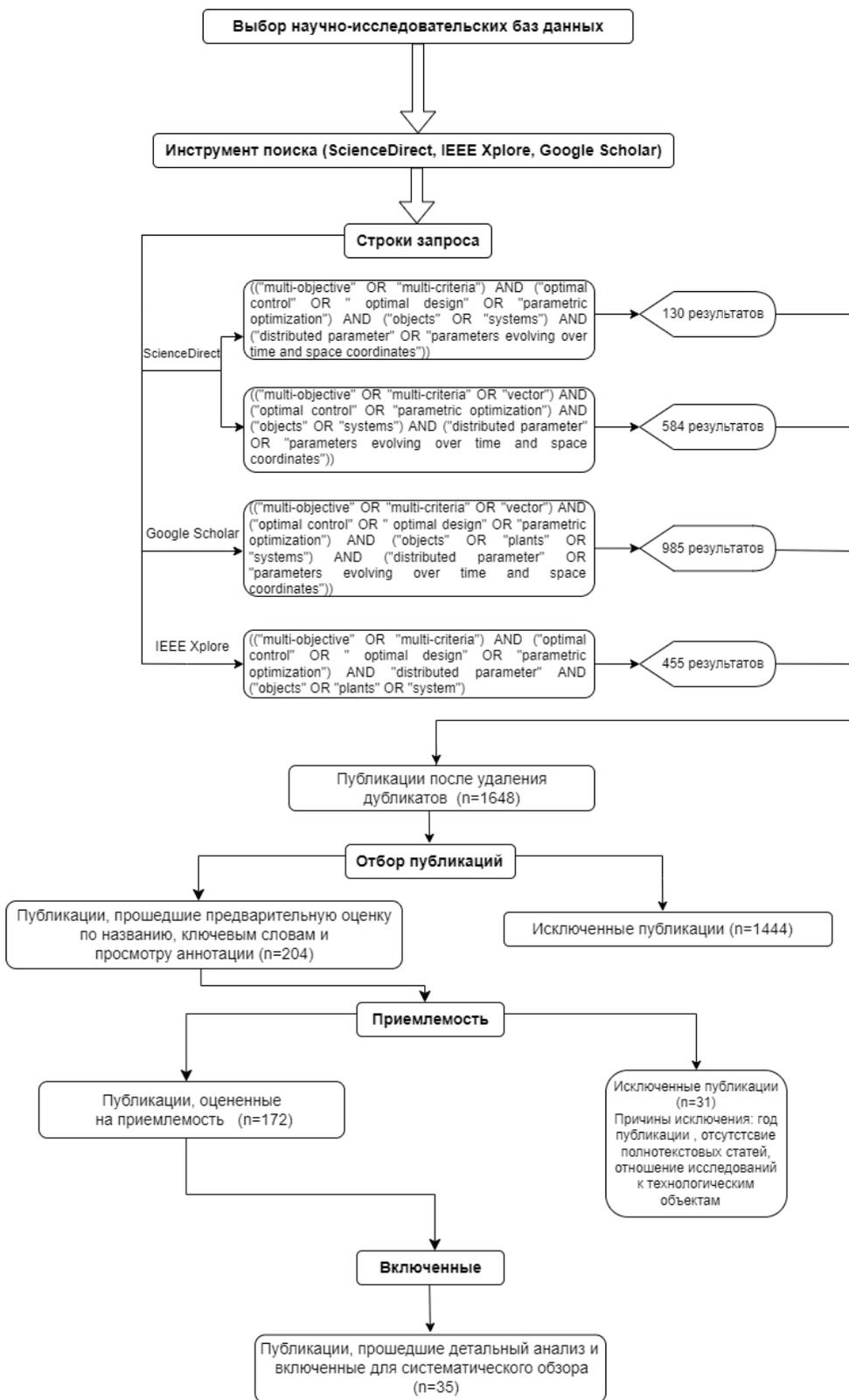


Рис. 3. Блок-схема алгоритма отбора публикаций для систематического обзора

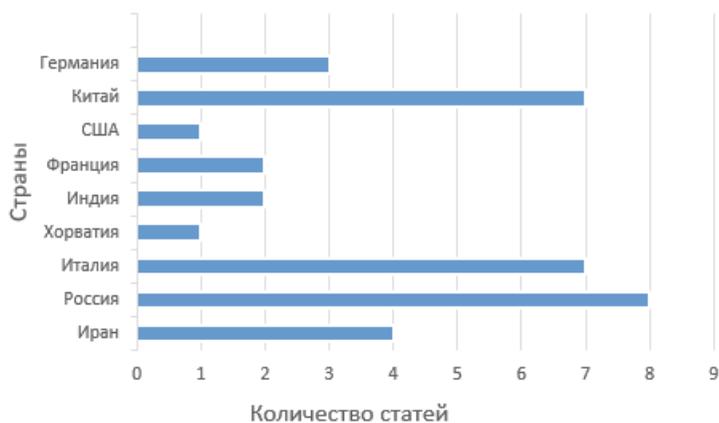


Рис. 4. Распределение отобранных исследований по странам

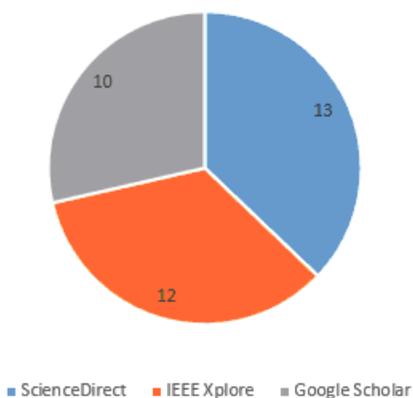


Рис. 5. Распределение отобранных исследований по базам данных

6. Обзор методов многокритериальной оптимизации

В данном разделе проводится подробный анализ и сравнение различных методов многокритериальной оптимизации, представленных в отобранных статьях. Рассматриваются основные принципы и особенности каждого метода, а также их преимущества и недостатки. Проводится сравнение эффективности применения этих методов в рассмотренных исследованиях для оптимизации технологических объектов с различными характеристиками целевых функций.

6.1. Детерминированные методы

6.1.1. Метод линейного программирования

Метод линейного программирования (ЛП) применяется для решения задач оптимизации, где целью является максимизация или минимизация линейной функции переменных при условии, что эти переменные подчиняются некоторым ограничениям. Метод линейного программирования в своей стандартной форме не используется напрямую для решения задач многокритериальной оптимизации, поскольку предназначен для задач с единственным критерием. Однако существуют подходы и методы, которые адаптируют линейное программирование для многокритериальной оптимизации.

В исследовании [11] была разработана модель целочисленного линейного программирования (ЦЛП), предназначенная для оптимизации проектирования

и функционирования децентрализованных электростанций (ДЭС) с учетом различных направлений энергопотребления. В качестве основных критериев рассматривались минимизация общих годовых затрат (J_1), минимизация выбросов углекислого газа (CO_2) (J_2) и уровня зависимости потребителей от общей энергосистемы (J_3). В процессе решения задачи учитывались ограничения на количество доступной биомассы (Bio_D) для переработки, а также граничные условия для обеспечения периодического режима работы в системах хранения энергии. Модель была разработана с учетом временного горизонта в один год и с временным шагом 12 часов, что позволило не только адекватно отобразить суточные колебания спроса и доступности энергии, но и сократить количество оптимизационных переменных с 52 860 (при временном шаге 1 час) до 4 380 (при временном шаге 12 часов). Процесс оптимизации выполнялся в ПО MATLAB с использованием функции `fmincon`, предназначенной для поиска минимума ограниченной нелинейной многомерной функции, и занял около 24 часов. Результаты оптимизации позволили выявить влияние выбранных критериев на структуру и стратегию эксплуатации электростанций и получить заметное преимущество ДЭС по сравнению с централизованной энергосистемой с точки зрения выбросов и самообеспечения. В частности, показано, что можно сократить выбросы до 400 т $\text{CO}_2/\text{Год}$ (по сравнению с централизованным сценарием), а зависимость потребителей от основной энергосистемы может быть снижена до уровня менее 20 %.

В целом метод линейного программирования является мощным инструментом для решения однокритериальных оптимизационных задач. Однако методы многокритериальной оптимизации позволяют применять ЛП для поиска решений, которые учитывают несколько критериев одновременно, когда есть возможность преобразования многокритериальных задач в эквивалентные задачи с единственным критерием или ранжированными критериями. Следует отметить при этом, что задачи ЛП предполагают линейное описание объектов, а это значительно сужает область их применимости. Существуют другие недостатки и ограничения использования ЛП в различных многокритериальных задачах: определение корректных весов для каждого критерия или нормализации критериев при свертке в одну целевую функцию может быть сложным и субъективным процессом; порядок оптимизации критериев может существенно повлиять на конечное решение; часто требуется определение допустимых пределов изменения дополнительных критериев.

6.1.2. Метод ϵ -ограничений

Метод ϵ -ограничений сводит задачи многокритериальной оптимизации к задаче однокритериальной оптимизации на основании выделения одного наиболее важного критерия, по которому будет производиться дальнейшая оптимизация, при ограничении всех остальных частных критериев. Метод ϵ -ограничений позволяет найти набор Парето-оптимальных решений, которые представляют собой компромисс между различными целями с учетом их приоритетов и ограничений.

В исследовании [12] рассматривается задача многокритериального оптимального планирования распределенной энергетической системы на твердооксидных топливных элементах с использованием солнечной энергии. В качестве критериев оптимизации в работе рассматриваются годовые эксплуатационные расходы энергетической системы и объем выбросов углерода. Авторами был применен метод ϵ -ограничений для идентификации недоминируемых множеств

оптимальных стратегий в условиях многокритериального выбора. В процессе исследования для каждого из критериев оптимальности были определены идеальная и неидеальная точки с помощью методов однокритериальной оптимизации. Затем одна из целевых функций может быть дискретизирована на отдельных интервалах и преобразована в ограничения. В результате другой критерий должен быть оптимизирован с учетом этих ограничений, заданных в виде неравенств. Результаты исследования подтвердили, что найденные оптимальные точки представляют собой глобальные оптимумы. В каждом конкретном случае результаты оптимизации могут быть получены с использованием предложенной в исследовании модели, что позволяет отобразить все возможные решения на границе Парето. В исследовании для выбора оптимального решения из Парето-оптимального множества использовались три хорошо известных подхода: метод линейного программирования для многомерного анализа предпочтений (LINMAP), техника упорядочивания предпочтений по сходству с идеальным решением (TOPSIS) и энтропия Шеннона.

Основными недостатками этого метода являются сложность и субъективность определения предпочтений между критериями и выбора максимально допустимых значений частных критериев и ограничений, накладываемых на эти частные критерии. Основными достоинствами метода ϵ -ограничений являются возможность сведения задачи многокритериальной оптимизации к задаче однокритериальной оптимизации и относительная простота процедуры реализации метода.

6.1.3. Метод минимаксной свертки критериев

Одним из эффективных способов свертки критериев для решения задачи многокритериальной оптимизации является минимаксная свертка. В результате применения этого вида свертки на результат решения задачи оптимизации оказывает влияние тот частный критерий, которому соответствует наибольшее значение функции. Таким образом, в данном случае решение принимается с учетом наиболее «слабого» критерия. При этом минимаксная свертка позволяет учитывать все необходимые критерии для поиска оптимального решения без введения весовых коэффициентов.

В статьях [13–16] предлагается конструктивная технология многокритериальной оптимизации процессов управления техническими объектами с распределенными параметрами, базирующаяся на однокритериальной версии в виде минимаксной свертки нормализуемых критериев качества. Развиваемый подход основан на переходе к эквивалентной форме вариационной задачи с ограничениями, решение которой априори является Парето-эффективным. Анализ проводился применительно к детерминированной модели объекта, описываемой бесконечной системой дифференциальных уравнений относительно временных мод разложения управляемой величины в ряд по собственным функциям начально-краевой задачи. Дальнейшие процедуры предварительной параметризации управляющих воздействий и последующей редукции к специальной задаче полубесконечного программирования позволили найти искомые экстремали с использованием их чебышевских свойств и фундаментальных закономерностей предметной области. В исследовании [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] представлен пример многокритериальной оптимизации температурных режимов индукционного нагрева металлических полуфабрикатов перед операциями пластического деформирования в технологических комплексах обработки металла давлением при неполном объеме информации об объекте управления. В качестве

целей оптимизации рассматриваются минимизация энергопотребления при нагреве и потери металла из-за образования окалины, а также точность приближения результирующего температурного распределения к заданному.

Одним из основных недостатков метода минимаксной свертки в задачах многокритериальной оптимизации является необходимость нормализации критериев и дополнительного решения задачи по каждому из минимизируемых критериев [17].

6.2. Стохастические методы

6.2.1. Генетический алгоритм NSGA-II

Генетический алгоритм NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) представляет собой усовершенствованную версию оригинального алгоритма NSGA и является эволюционным методом многокритериальной оптимизации, который был разработан Э.Х. Си и Р.К. Беном в 2000 г. для решения задач с несколькими целевыми функциями. Алгоритм основан на принципах естественного отбора и генетических операторов, таких как скрещивание и мутация, для поиска оптимальных решений в пространстве параметров [18, 19].

В исследовании [20] предлагается две вариации метода NSGA-II для отслеживания динамических Парето-оптимальных границ. Влияние частоты изменений в задаче и доля добавленных случайных или мутировавших решений являются параметрами, которые систематически изучаются для оценки эффективности разработанных процедур отслеживания. Предложенные процедуры NSGA-II применены в исследовании к сложной задаче планирования гидротермальной мощности с двумя конфликтующими критериями. В первой вариации предлагаемого динамического NSGA-II (DNSGA-II-A) авторы вводят новые случайные решения при каждом изменении задачи. При этом ζ % новой популяции заменяется случайно созданными решениями. Это позволяет вводить новые (случайные) решения при каждом изменении проблемы. Этот метод может оказаться более эффективным в задачах, претерпевающих значительные изменения в целях и ограничениях. Во второй версии (DNSGA-II-B) вместо введения случайных решений ζ % популяции заменяется мутациями существующих решений (выбранных случайным образом), что по принципу похоже на ГА на основе гипермутации для одноцелевой оптимизации. Таким образом, новые решения, вводимые в популяцию, связаны с существующей популяцией.

В статье [21] авторы проводят многокритериальную оптимизацию устойчивого состояния двухкамерных микробных топливных элементов (МТЭ), предназначенных для одновременного возобновляемого производства электроэнергии и очистки сточных вод. Генетический алгоритм NSGA-II используется для одновременной максимизации плотности мощности, достижимой плотности тока и коэффициента удаления отходов на основе математической модели ацетатного двухкамерного МТЭ. В работе подробно исследованы три задачи двухкритериальной оптимизации и одна задача трехкритериальной оптимизации. Результаты решения трех двухкритериальных задач оптимизации показали, что максимальные значения плотности мощности, коэффициента удаления отходов и плотности тока не могут быть получены одновременно. Максимальные значения плотности мощности, коэффициента удаления отходов и плотности тока, соответствующие идеальной точке, составляют $3,82 \text{ Вт}\cdot\text{м}^2$, $0,97$ и $14,88 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ соответственно. Графический анализ фронта Парето с помощью диаграмм уровней показал, что решения, ближайšie к идеальной точке, обеспечивают значения критериев в диапазонах $2,84\text{--}3,25 \text{ Вт}\cdot\text{м}^2$ для плотности мощности, $0,69\text{--}0,78$ для коэффициента

удаления отходов и $10,82\text{--}12,19 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ для максимально достижимой плотности тока. Таким образом, результаты показывают, что интегрированная методология многокритериального генетического алгоритма NSGA-II обеспечивает перспективный подход для получения приемлемого компромисса между конфликтующими критериями для оптимальной работы МТЭ.

Другой пример, описывающий методику применения генетических алгоритмов для решений многокритериальной задачи, предложен в статьях [22, 23]. В работе представлена система парового риформинга метана с применением CO_2 -реформера, который может производить сингаз из смеси метана CH_4 и углекислого газа CO_2 . Для оптимизации процесса с точки зрения максимальной производительности по водороду и минимизации выбросов углекислого газа используется генетический алгоритм с недоминируемой сортировкой NSGA-II. Реализация алгоритма метода NSGA-II в пакете MATLAB с помощью библиотеки Genetic Algorithm позволила определить множество Парето-оптимальных решений. В этом алгоритме оптимизации каждая точка множества Парето, представляющая собой хромосому, ассоциируется с набором переменных для принятия решений при заданном наборе входных ограничений (например, ограничений на температуру на входе каждого реактора) [23].

В статье [24] проводился анализ и оптимизация ключевых энергетических и экономических показателей гибридной системы, основанной на сочетании твердооксидных топливных элементов и микрогазотурбин для производства тепловой энергии. Оптимизация осуществлялась с использованием генетического алгоритма NSGA-II. Для процесса оптимизации были выбраны два основных критерия: энергетическая эффективность системы и общая экономическая стоимость. Результаты оптимизации свидетельствуют о значительном повышении общей энергетической эффективности системы до 62,5 % и сокращении срока окупаемости до 6,3 лет.

В работах [25–33] исследуется применение модифицированного генетического алгоритма NSGA-II в рамках решения векторных задач оптимизации для различных сфер промышленности. В [26] авторы демонстрируют применение NSGA-II для решения проблем оптимизации в сфере водородной энергетики. В [27] этот алгоритм оптимизации применяется при проектировании интеллектуального оптимального контроллера.

В статье [34] исследуется задача многокритериальной оптимизации параметров процесса литья под давлением. Оптимизация осуществляется с использованием генетического алгоритма с ограниченной недоминируемой сортировкой. В качестве критериев оптимизации в работе рассматриваются: максимальная разница объемной усадки между всеми полостями пресс-формы ($D_{\text{shr}}(x)$), себестоимость производства деталей ($V(x)$) и время цикла литья под давлением ($T_{\text{cycle}}(x)$). Данный алгоритм основан на классификации индивидов в популяции в соответствии с концепциями Парето-оптимальности и недоминирования. Всем недоминируемым особям в популяции присваивается ранг 1. Затем оставшиеся особи повторно классифицируются, и недоминируемые решения получают ранг 2. Процедура классификации продолжается до тех пор, пока все особи в популяции не будут проранжированы. В результате особи с более низким рангом оказываются выше особей с более высоким рангом в иерархии популяции.

Основным преимуществом генетического алгоритма NSGA-II в задачах многокритериальной оптимизации является быстрая сходимость к Парето-

оптимальному фронту благодаря эффективным операторам отбора, кроссовера и мутации [35]. Алгоритм использует концепцию недоминируемой сортировки для классификации решений в популяции по уровням недоминируемости, что позволяет эффективно идентифицировать оптимальные Парето-решения. Генетические алгоритмы позволяют искать оптимальное решение в пространстве поиска более эффективно, чем традиционные методы оптимизации. В [28, 31, 32] был проведен анализ применения методов эволюционной оптимизации в приложении к задачам однокритериальной оптимизации, а также к задачам векторной оптимизации.

Однако, как и любой метод, генетические алгоритмы обладают своими недостатками. В исследованиях [36, 37] авторы указывают, что в задаче многокритериальной оптимизации с четырьмя и более целевыми функциями наблюдается проблема нехватки вычислительных мощностей для введения новых членов популяции в поколение, тем самым возникает застой в производительности алгоритма многокритериальной эволюционной оптимизации. Более того, представление крупномасштабного Парето-оптимального фронта сопровождается экспоненциальным ростом размера популяции, что существенно усложняет и замедляет алгоритм за счет значительного и не всегда приемлемого увеличения объема вычислений. С практической точки зрения поиск Парето-оптимальных множеств, содержащих тысячи и десятки тысяч решений, и выбор из них оптимального решения представляют часто задачи не менее простые, чем изначальная задача многокритериальной оптимизации.

Для решения описанных сложностей при поиске и анализе Парето-оптимальных множеств авторами предлагаются различные подходы. Первый подход заключается в использовании эволюционных алгоритмов для нахождения только части оптимального по Парето фронта (метод эволюционной оптимизации на основе опорных точек, «поиск светового луча»). В [37] показано, что для задач с 10 и 20 критериями найти частичный фронт, соответствующий определенной информации о предпочтениях, возможно. Несмотря на то, что размер частичного фронта идентичен размеру полного фронта Парето, близость целевых точек при представлении желаемого частичного фронта помогает не подвергать доминированию часть популяции, тем самым высвобождая вычислительные ресурсы для поиска и хранения новых и лучших решений.

В статье [37] предложен метод выявления и устранения избыточных целевых функций в многокритериальных задачах оптимизации. Автор отмечает, что при явно выраженном конфликте целевых функций их оптимизация относительно некоторых случайно созданных решений может привести к хорошему компромиссному решению. Это объясняется тем, что для решений, близких к Парето-оптимальному фронту, конфликт между целевыми функциями сглаживается и оптимум одной функции становится близким к оптимуму другой. В этом случае целевые функции, демонстрирующие положительно коррелирующую взаимосвязь в полученных решениях NSGA-II, идентифицируются как избыточные и исключаются из дальнейшего рассмотрения. Затем процедура многокритериальной оптимизации с использованием эволюционных алгоритмов и линейного/нелинейного анализа главных компонент повторяется с оставшимися (не избыточными) целевыми функциями. Данная комбинированная процедура продолжается до тех пор, пока дальнейшее сокращение числа целевых функций не станет невозможным.

Как показано в [38], модифицированный генетический алгоритм NSGA-II, отличающийся от простого генетического алгоритма GA способом использования оператора селекции, может применяться в комбинации с методом конечных элементов (FEM). Реализация оптимизационной процедуры была рассмотрена в приложении к оптимизационной процедуре индукционного нагрева графитового диска и алюминиевой цилиндрической заготовки.

6.2.2. Генетический алгоритм SA-MNSGA

SA-MNSGA – это генетический алгоритм, основанный на классическом NSGA-II и включающий периодическую миграцию популяции новых особей, которые изменяют генетическое наследие текущей популяции. Данный алгоритм разработан сравнительно недавно, однако успел себя зарекомендовать при решении задач многокритериальной оптимизации электромагнитных процессов. Особенностью SA-MNSGA является использование многокритериальной недоминируемой сортировки для оценки и выделения таких решений, которые не уступают по всем критериям другим решениям, что тем самым формирует Парето-оптимальный фронт [39].

В работе [40] авторы сравнивают природный алгоритм оптимизации μ -ViMO и алгоритм эволюционной оптимизации SA-MNSGA на примере решения задачи многоцелевой оптимизации соленоида, используемого для характеристики термомагнитных наножидкостей для магнитно-жидкостной гипертермии.

Генетический алгоритм SA-MNSGA обладает высокой скоростью сходимости и устойчивостью к локальным оптимумам благодаря использованию метаэвристического алгоритма Simulated Annealing. Это позволяет улучшить качество получаемых решений и сократить время работы алгоритма. Однако среди недостатков SA-MNSGA можно выделить высокую вычислительную сложность, требующую больших вычислительных ресурсов. Кроме того, подбор оптимальных параметров для алгоритма может потребовать дополнительных усилий и времени.

6.2.3. Алгоритм ViMO

ViMO – алгоритм оптимизации, основанный на биогеографии, в котором каждое решение рассматривается как среда обитания (вектор проектирования).

В [40] применяется многокритериальная версия алгоритма ViMO, основанная на определении обобщенной пригодности, которое учитывает одновременно две или более целевых функций за счет использования концепции ранжирования решений без доминирования в целевом пространстве и на расстоянии вытеснения. Результаты, представленные в [40], показывают, что метод μ -ViMO дает хорошую аппроксимацию фронта Парето.

Алгоритм ViMO работает на основе принципов естественного отбора и мутации, что обуславливает его быструю сходимость в ЗМО к оптимальному решению. Однако основным недостатком алгоритма ViMO является склонность к преждевременной сходимости к локальным оптимумам из-за использования случайного поиска.

6.2.4. Алгоритм роя частиц

Алгоритм роя частиц является популяционным методом, аналогичным генетическим алгоритмам. Он итеративно оценивает целевую функцию для каждой частицы и корректирует ее скорость для достижения оптимального решения. Идеи создания алгоритма основаны на анализе поведения стай птиц или роев насекомых. Каждая частица в той или иной степени притягивается к наилучшему местоположению, которое она нашла на данный момент, а также к наилучшему

местоположению, которое нашел любой член роя [41]. После нескольких шагов популяция может объединиться вокруг одного места, или объединиться вокруг нескольких мест, или продолжить движение.

В статье [42] рассматривается многокритериальная оптимизация угольной электростанции, включающая установку для улавливания CO_2 . Авторы в работе для построения процедуры робастной многокритериальной оптимизации используют алгоритм роя частиц, а в качестве критериев оптимизации рассматривают максимизацию энергетической и эксергетической эффективности и минимизацию времени реакции на изменение нагрузки. Благодаря оптимизации двух критериев энергетическая и эксергетическая эффективности улучшаются на 1,16 % и 1,53 % соответственно, а время отклика уменьшается на 4,14 %.

Другой пример, описывающий методику применения роя частиц для решения многокритериальной задачи, предложен в статье [43]. В работе проведена многокритериальная оптимизация параметров процесса литья под давлением крышки маслоохладителя дизельного двигателя. В качестве критериев оптимизации рассматриваются: время срабатывания затвора клапана, температура прессформы, время цикла литья под давлением. Алгоритм работает по принципу инициализации роя частиц в случайном порядке в пространстве поиска. В результате деформация уменьшилась примерно на 4 мм, а напряжение распределяется более равномерно по всему изделию. Пиковое усилие зажима снижено с 760 до 470 т, что делает выбор станка более гибким и снижает стоимость производства. Предложенный метод многокритериальной оптимизации, основанный на алгоритме роя частиц, демонстрирует высокую точность и эффективность в прогнозировании реакций материала на деформацию и усилие зажима.

Достоинством алгоритма роя частиц является способность исследования большого пространства поиска решений и обеспечение сходимости к глобальному оптимуму. Однако основным недостатком алгоритма является ограниченная способность адаптации к динамическим изменениям его параметров (количества частиц, коэффициентов ускорения и т. д.), что может сильно влиять на эффективность поиска; при этом не всегда настройка параметров является тривиальной задачей.

6.3. Методы многокритериальной оптимизации с использованием искусственного интеллекта

Метод многокритериального адаптивного оптимизационного управления с прогнозированием модели (МАО-МРС) представляет собой инновационный подход к управлению динамическими системами, который объединяет в себе элементы многокритериальной оптимизации, адаптивного управления и прогнозирования моделей. Адаптивное управление предполагает способность системы изменять свою стратегию в зависимости от внешних воздействий и внутренних параметров. Прогнозирование модели включает в себя использование математических моделей для предсказания будущего поведения системы на основе доступных данных. Этот метод позволяет эффективно управлять сложными системами в условиях неопределенности и изменяющейся динамики. Для прогнозирования моделей и обеспечения адаптивного управления используются алгоритмы машинного обучения, которые позволяют учитывать динамические изменения в системе и принимать решения на основе актуальных данных.

В статье [44] авторы применяют метод МАО-МРС для оптимизации процесса обжига оксида цинка во вращающейся печи. Процедура оптимизации, основанная на методе разряженной идентификации, проходит в несколько этапов:

- создается имитационная модель вычислительной гидродинамики (CFD модель);
- решается задача разреженной регрессии для получения редуцированной модели;
- разрабатывается двухуровневая система управления, включающая оптимизацию в реальном времени (RTO) и управление с прогнозированием модели (MPC).

На уровне RTO решается оптимизационная задача для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик и минимально возможного потребления ресурсов. Для вращающейся печи при формулировании многокритериальной задачи оптимизации учитываются два критерия: минимальный расход угля и обеспечение максимального качества продукции. Полученные с помощью метода градиентного спуска оптимальные решения задачи на уровне RTO передаются на уровень MPC для нахождения управляющего сигнала $u(t)$ в текущем времени, который обеспечивает движение по заданной траектории $r(t)$ (полученной с уровня RTO). Результаты экспериментов показали, что предложенный метод позволяет улучшить эффективность управления вращающейся печью и снизить потребление угля на 10 %.

7. Результаты исследования

В рамках проведенного систематического обзора были выделены три основные тенденции в подходах к решению задач многокритериальной оптимизации: детерминированные, стохастические методы и методы с использованием ИИ. Частота использования методов и алгоритмов многокритериальной оптимизации может быть проанализирована с помощью диаграммы (рис. 6). Согласно проведенному систематическому обзору, из общего числа отобранных исследований:

- *детерминированные методы были использованы в 8 работах;*
- стохастические методы были представлены в 26 работах;
- методы с применением искусственного интеллекта были использованы в одной работе.

Методы многокритериальной оптимизации широко используются в различных областях и отраслях, где необходимо учитывать несколько критериев принятия решений одновременно. Исследование выделило пять основных областей, в которых применялись методы многокритериальной оптимизации: энергетика, технологическая безопасность, металлургия, космическая инженерия и электротехника. Распределение научных публикаций по указанным областям представлено на рис. 7.

Проведенный систематический обзор показал, что в области многокритериальной оптимизации отсутствует универсальный метод, который мог бы быть применен для оптимизации конкретных технологических процессов и объектов. Научное сообщество провело множество исследований в данной области, в результате которых были предложены различные методы решения многокритериальных задач; однако количество работ, направленных на применение этих методов в реальных технологических задачах, остается ограниченным. В связи с этим выбор подходящего метода многокритериальной оптимизации для решения конкретной задачи может оказаться затруднительным. Для более полного понимания данной проблематики и выбора наиболее подходящего метода оптимизации необходимо проведение дополнительных исследований, направленных на срав-

нительный анализ эффективности различных методов в реальных технологических задачах.

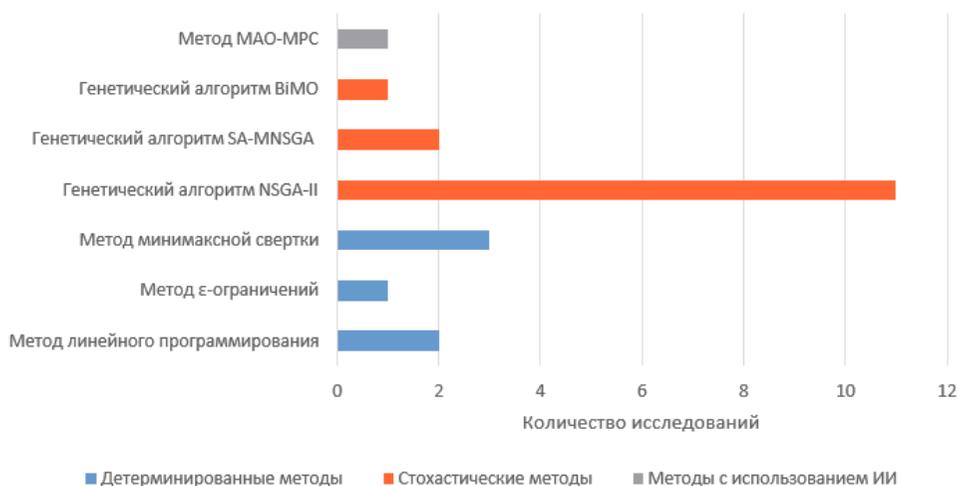


Рис. 6. Распределение методов и алгоритмов многокритериальной оптимизации

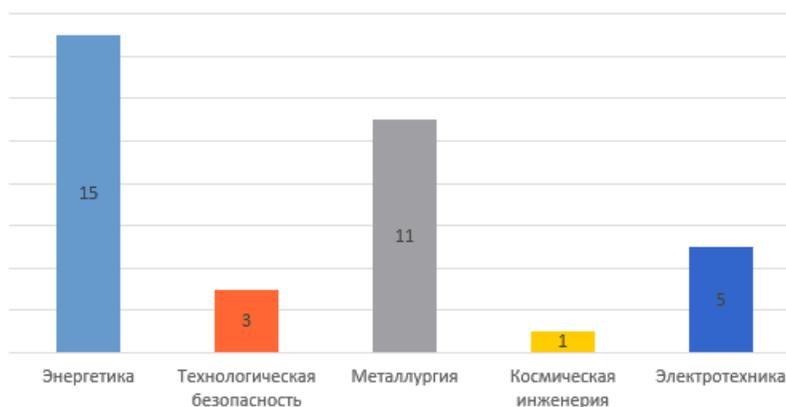


Рис. 7. Распределение публикаций по областям применения

Заключение

Многокритериальная оптимизация технологических объектов представляет собой активно развивающуюся область, ориентированную на предоставление предприятиям и исследователям эффективных инструментов для принятия оптимальных решений, учитывающих одновременно несколько конфликтующих целевых функций. Эта методология находит широкое применение в различных сферах деятельности, таких как энергетика, машиностроение, металлургия и другие.

Основная цель систематического обзора заключалась в том, чтобы представить обширный анализ существующих исследований в области многокритериальной оптимизации технологических объектов. В рамках обзора были выделены различные методы и подходы, применяемые при решении задач многокритериальной оптимизации технологических объектов (детерминированные, стохастические и методы с применением ИИ). Результаты показали, что наиболее широко

применяемыми методами оптимизации являются на настоящий момент стохастические методы, в частности генетические алгоритмы, за которыми следуют детерминированные методы и методы с использованием искусственного интеллекта.

Представленный систематический обзор обобщает сведения о представленных в открытой печати за последнее десятилетие исследований, что помогает выявить существующие достижения, проблемы и пробелы в области многокритериальной оптимизации технологических объектов и ориентировать направления дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Zaizi, Ezzahra F., Qassimi S., Rakrak S.* Multi-objective optimization with recommender systems: A systematic review // *Information Systems*. 2023. Vol. 117. P. 44.
2. *Ehrgott M.* Vilfredo Pareto and multi-objective optimization // *Document Mathematica*. 2012. Pp. 447–453.
3. *Zavala J. Jordi, Cadenas E., Campos-Amezcuca R.* Multi-criteria optimal design of small wind turbine blades based on deep learning methods // *Energy*, 2024. Vol. 293. P. 15.
4. *Golkarnarenji G., Naebe M., Badii K., Milani A., Bab-Hadiashar A., Jazar R., Khayyam H.* Multi-Objective Optimization of Manufacturing Process in Carbon Fiber Industry Using Artificial Intelligence Techniques // *IEEE Access*. 2019, № 7. Pp. 576–588.
5. *Veisi O., Shakibamanesh A., Rahbar M.* Using intelligent multi-objective optimization and artificial neural networking to achieve maximum solar radiation with minimum volume in the archetype urban block // *Sustainable Cities and Society*, 2022. P. 64.
6. *Rethlefsen M., Kirtley Sh., Waffenschmidt S., Ayala A.* PRISMA-S: an extension to the PRISMA statement for reporting literature searches in systematic reviews // *Journal of the Medical Library Association*. 2021. P. 19.
7. *Alvine Boaye Belle, Yixi Zhao.* Evidence-based decision-making: On the use of systematicity cases to check the compliance of reviews with reporting guidelines such as PRISMA 2020 // *Expert Systems with Applications*. 2023. Vol. 217. P. 18.
8. *Page M.J., Moher D., Bossuyt P.M., Boutron I., Hoffmann T.C., Mulrow C.D., Shamseer L.* PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews // *The BMJ*. 2021. Vol. 372. P. 37.
9. Reference management software Mendeley: official site. <https://www.mendeley.com> (Date of the application 10.04.2024).
10. Tool intelligent systematic review Rayyan. <https://www.rayyan.ai> (accessed 15.03.2024).
11. *Fonseca J., Commenge J.-M., Camargo M., Falk L., Gil I.* Multi-criteria Optimization for the Design and Operation of Distributed Energy Systems Considering Sustainability Dimensions // *Energy*, 2021. P. 16.
12. *Rui Jing, Xingyi Zhu, Zhiyi Zhu, Wei Wang.* A multi-objective optimization and multi-criteria evaluation integrated framework for distributed energy system optimal planning // *Energy conversion and Management China*. 2018. № 166. Pp. 445–462.
13. *Rapoport E.Y., Pleshivtseva Y.E.* Multi-Objective Control of Distributed Parameter Systems in the Case of Interval Uncertainty of the Plant Characteristics // *Optoelectron. Instrument. Proc.* 2019. № 55. Pp. 317–330.
14. *Rapoport E.Y., Pleshivtseva Y.E.* Technology of solving multi-objective problems of control of systems with distributed parameters // *Optoelectron. Instrument. Proc.* 2017. № 53, Pp. 316–328.
15. *Ранопорт Э.Я., Плевшивцева Ю.Э.* Метод многокритериальной оптимизации управляемых систем с распределенными параметрами // *Труды СПИИРАН*. Вып. 60. 2018. С. 64–96.
16. *Rapoport E., Pleshivtseva Yu.* Multi-Objective Control of Distributed Parameter Systems in the Case of Interval Uncertainty of the Plant Characteristics. *Optoelectronics // Instrumentation and Data Processing*. 2019. № 55. Pp. 317–330.
17. *Мацунин К.Ю., Мацунин Ю.К.* Векторная оптимизация с равнозначными и приоритетными критериями // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 2017. № 6. С. 80–99.
18. *Wang Zhe, Cai Wenjian, Hong Wei, Shen Suping, Huizhu Yang, Han Fenghui.* Multi-objective optimization design and performance evaluation of a novel multi-stream intermediate fluid va-

- porizer with cold energy recovery // *Energy Conversion and Management*. 2019. № 195. Pp. 32–42.
19. *Cho Sunghyun, Kim Minsu, Lee Jaewon, Han Areum, Na Jonggeol, Moon Il*. Multi-objective optimization of explosive waste treatment process considering environment via Bayesian active learning // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 117. Pp. 24.
 20. *Deb K., Rao N., Karthik S*. Dynamic Multi-objective Optimization and Decision-Making Using Modified NSGA-II: A Case Study on Hydrothermal Power Scheduling // *International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. 2013. Vol. 4403.
 21. *Yang K., He Y., Ma Z*. Multi-objective steady-state optimization of two-chamber microbial fuel cells // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2017. № 25. Pp. 1000–1012.
 22. *Osat M., Shojaati F., Hafizi A*. A multi-objective optimization of three conflicting criteria in a methane tri-reforming reactor // *International journal of hydrogen energy*. 2023, № 48, Pp. 6275–6287.
 23. *Han Ja-Ryoung*. Multiobjective Optimization of a Hydrogen Production System with Low CO₂ Emissions // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013. № 51. Pp. 2644–2651.
 24. *Sanaye S., Katebi A*. 4E analysis and multi objective optimization of a micro gas turbine and solid oxide fuel cell hybrid combined heat and power system // *Journal of Power Sources*. 2014. № 247. Pp. 294–306.
 25. *Bertani R. et al*. Multi-objective design of a magnetic fluid hyperthermia device // *IECON 2015 – 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Yokohama. Japan. 2015. Pp. 3603–3608.
 26. *Pleshivtseva Yu., Di Barba P., Rapoport E., Nacke B., Nikanorov A., Lupi S. et al*. Multi-objective optimization of induction heaters design based on numerical coupled field analysis // *International Journal of Microstructure and Materials Properties*. 2014. № 9. P. 6.
 27. *Nyallang S., Tolj I., Sivakumar P*. Multi-objective optimization of a metal hydride reactor coupled with phase change materials for fast hydrogen sorption time // *The Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 71. P. 18.
 28. *Di Barba P., Pleshivtseva Yu., Rapoport E., Forzan M., Lupi S. et al*. Multi-objective optimization of induction heating processes: Methods of the problem solution and examples based on benchmark model // *International Journal of Microstructure and Materials Properties*. 2013. № 8. Pp. 357–372.
 29. *Pleshivtseva Yu., Popov A., Forzan M., Sieni E*. Multi-Objective Optimization of Induction Surface Hardening Process // *IECON 2018 – Annual Conference of the IEEE Industrial Electronic Society*. 2018. Pp. 3515–3520.
 30. *Плешивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я., Наке Бернард, Никаноров А.Н., Попов А.В*. Проектирование индукционных установок на основе решения задач многокритериальной оптимизации // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2016. № 24 (2). С. 47–57.
 31. *Pleshivtseva Yu., Rapoport E., Nacke B., Nikanorov A. et al*. Design concepts of induction mass heating technology based on multiple-criteria optimization. COMPEL // *The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 2017. № 36. Pp. 386–400.
 32. *Di Barba P., Dughiero F., Forzan M., Mognashi M.E., Sieni E*. Induction heating of a graphite disk: a benchmark for multi-physics platform for multi-objective design // *Proceedings of XVIII International UIE-Congress "Electrotechnologies for Material Processing"*. Hannover, 2017. Pp. 520–525.
 33. *Kampouropoulos K., Andrade F., Sala E., Espinosa A.G., Romeral L*. Multiobjective Optimization of Multi-Carrier Energy System Using a Combination of ANFIS and Genetic Algorithms // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018. № 9. Pp. 2276–2283.
 34. *Cheng J., Liu Z., Tan J*. Multiobjective optimization of injection molding parameters based on soft computing and variable complexity method // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. № 66. Pp. 907–916.
 35. *Di Barba Paolo*. Basic Principles of Optimal Design of Electromagnetic Devices and Multi-objective Optimization // *ASM Handbbook Induction Heating and Heat Treatment*. 2014. Pp. 359–365.
 36. *Xiao Song, Liu G., Zhang K., Jing Y., Duan Jiaheng, Barba Paolo, Sykulski J*. Multi-Objective Pareto Optimization of Electromagnetic Devices Exploiting Kriging With Lipschitzian Optimized Expected Improvement // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2018. Pp. 1–4.
 37. *Deb K*. Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms: An Introduction. Wiley, New York, 2014.

38. *Behroozsarand A., Ebrahimi H., Zamaniyan A.* Multiobjective Optimization of Industrial Autothermal Reformer for Syngas Production Using Nonsorting Genetic Algorithm II // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013. № 48. Pp. 16.
39. *Opriş I., Cenuşă V.-E., Norişor M., Darie G., Alexe F.-N., Costinaş S.* Parametric optimization of the thermodynamic cycle design for supercritical steam power plants // *Energy Conversion and Management*, 2020. Vol. 208. P. 19.
40. *Di Barba P., Mognaschi M.-E., Dughiero F., Forzan M., Sieni E.* Multi-Objective Optimization of a Solenoid for MFH: A Comparison of Methods // *ECON 2018 – 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2018. Pp. 3336–3340.
41. *Материн П.В., Секаев В.Г.* Системное описание алгоритмов роевого интеллекта // *Теоретический и прикладной научно-технический журнал. Программная инженерия*. 2013. С. 39–45.
42. *Mofidipour E., Babelahi M.* New procedure in solar system dynamic simulation, thermodynamic analysis, and multi-objective optimization of a post-combustion carbon dioxide capture coal-fired power plant // *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 224. P. 15.
43. *Zhang J., Wang J., Lin J., Guo Q., Chen K., Ma L.* Multiobjective optimization of injection molding process parameters based on Opt LHD, EBFNN, and MOPSO // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. № 85, Pp. 2857–2872.
44. *Ke Wei, Keke Huang, Chunhua Yang, Weihua Gui.* Multi-Objective Adaptive Optimization Model Predictive Control: Decreasing Carbon Emissions from a Zinc Oxide Rotary Kiln // *Engineering*. 2023. № 27. Pp. 96–105.

Статья поступила в редакцию 14 июня 2024 г.

ETHODS OF MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL OBJECTS: A SYSTEMATIC REVIEW OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS FOR THE PERIOD 2013–2023

*M.A. Zolotarev*¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: maksimsam@mail.ru

Abstract. *The article presents a systematic review of scientific articles devoted to applications of multi-criteria optimization methods, published in open sources in 2013-2023, conducted in accordance with the PRISMA recommendations. The main optimization methods with respect to a set of conflicting objective functions, such as energy efficiency, accuracy of achieving final states, economic feasibility, reliability of operation, compliance with environmental standards, etc. are considered. Particular attention is paid to the theoretical foundations and practical applications of these methods aimed at increasing the efficiency of technological processes and improving the quality of decisions. The main objective of the review is to analyze the current state of research in this area, to identify trends and limitations in the use of multi-criteria methods for optimization of specific technological processes and objects. The study showed that, despite significant progress in the development of the theoretical foundations of multi-criteria optimization, the number of works aimed at applying these methods to real technological problems remains limited. The article emphasizes the importance of further research and development aimed at adapting optimization methods to the specific features of technological processes. This review aims to provide a deeper understanding of current trends and issues related to the application of multi-objective optimization methods to improve technological processes, thereby contributing to the development of research in this promising area.*

Keywords: *multi-criteria optimization, systematic review, optimization algorithms, evolutionary algorithms, minimax convolution, NSGA-II genetic algorithm, mathematical programming methods, technological objects.*

REFERENCES

1. *Zaizi, Ezzahra F., Qassimi S., Rakrak S.* Multi-objective optimization with recommender systems: A systematic review // *Information Systems*. 2023. Vol. 117. P. 44.
2. *Ehrgott M.* Vilfredo Pareto and multi-objective optimization // *Document Mathematica*, 2012, Pp. 447–453.
3. *Zavala J. Jordi, Cadenas E., Campos-Amezcuca R.* Multi-criteria optimal design of small wind turbine blades based on deep learning methods // *Energy*, 2024. Vol. 293. P. 15.
4. *Golkarnarenji G., Naebe M., Badii K., Milani A., Bab-Hadiashar A., Jazar R., Khayyam H.* Multi-Objective Optimization of Manufacturing Process in Carbon Fiber Industry Using Artificial Intelligence Techniques // *IEEE Access*. 2019, № 7. Pp. 576–588.
5. *Veisi O., Shakibamanesh A., Rahbar M.* Using intelligent multi-objective optimization and artificial neural networking to achieve maximum solar radiation with minimum volume in the archetype urban block // *Sustainable Cities and Society*, 2022. P. 64.
6. *Rethlefsen M., Kirtley Sh., Waffenschmidt S., Ayala A.* PRISMA-S: an extension to the PRISMA statement for reporting literature searches in systematic reviews // *Journal of the Medical Library Association*. 2021. P. 19.
7. *Alvine Boaye Belle, Yixi Zhao.* Evidence-based decision-making: On the use of systematicity cases to check the compliance of reviews with reporting guidelines such as PRISMA 2020 // *Expert Systems with Applications*. 2023. Vol. 217. P. 18.



© The Author(s), 2024

¹ *Maksim A. Zolotarev, Postgraduate Student.*

8. *Page M.J., Moher D., Bossuyt P.M., Boutron I., Hoffmann T.C., Mulrow C.D., Shamseer L.* PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews // *The BMJ*. 2021. Vol. 372. P. 37.
9. Reference management software Mendeley: official site. <https://www.mendeley.com> (Date of the application 10.04.2024).
10. Tool intelligent systematic review Rayyan. <https://www.rayyan.ai> (accessed 15.03.2024).
11. *Fonseca J., Commenge J.-M., Camargo M., Falk L., Gil I.* Multi-criteria Optimization for the Design and Operation of Distributed Energy Systems Considering Sustainability Dimensions // *Energy*, 2021. P. 16.
12. *Rui Jing, Xingyi Zhu, Zhiyi Zhu, Wei Wang.* A multi-objective optimization and multi-criteria evaluation integrated framework for distributed energy system optimal planning // *Energy conversion and Management China*. 2018. № 166. Pp. 445–462.
13. *Rapoport E.Y., Pleshivtseva Y.E.* Multi-Objective Control of Distributed Parameter Systems in the Case of Interval Uncertainty of the Plant Characteristics // *Optoelectron. Instrument. Proc.* 2019. № 55. Pp. 317–330.
14. *Rapoport E.Y., Pleshivtseva Y.E.* Technology of solving multi-objective problems of control of systems with distributed parameters // *Optoelectron. Instrument. Proc.* 2017. № 53, Pp. 316–328.
15. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Metod mnogokriterial'noj optimizacii upravlyaemyh sistem s raspredelennymi parametrami [Method of multicriterial optimization of controlled systems with distributed parameters] // *Trudy SPIIRAN*. Vyp. 60. 2018. P. 64–96. (In Russian).
16. *Rapoport E., Pleshivtseva Yu.* Multi-Objective Control of Distributed Parameter Systems in the Case of Interval Uncertainty of the Plant Characteristics. *Optoelectronics // Instrumentation and Data Processing*. 2019. № 55. Pp. 317–330.
17. *Mashunin K.Yu., Mashunin Yu.K.* Vektornaya optimizaciya s ravnoznachnymi i prioritetnymi kriteriyami [Vector optimization with equal and priority criteria] // *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*. 2017. № 6. Pp. 80–99. (In Russian).
18. *Wang Zhe, Cai Wenjian, Hong Wei, Shen Suping, Huizhu Yang, Han Fenghui.* Multi-objective optimization design and performance evaluation of a novel multi-stream intermediate fluid vaporizer with cold energy recovery // *Energy Conversion and Management*. 2019. № 195. Pp. 32–42.
19. *Cho Sunghyun, Kim Minsu, Lee Jaewon, Han Areum, Na Jonggeol, Moon Il.* Multi-objective optimization of explosive waste treatment process considering environment via Bayesian active learning // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 117. Pp. 24.
20. *Deb K., Rao N., Karthik S.* Dynamic Multi-objective Optimization and Decision-Making Using Modified NSGA-II: A Case Study on Hydrothermal Power Scheduling // *International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. 2013. Vol. 4403.
21. *Yang K., He Y., Ma Z.* Multi-objective steady-state optimization of two-chamber microbial fuel cells // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2017. № 25. Pp. 1000–1012.
22. *Osat M., Shojaati F., Hafizi A.* A multi-objective optimization of three conflicting criteria in a methane tri-reforming reactor // *International journal of hydrogen energy*. 2023. № 48. Pp. 6275–6287.
23. *Han Ja-Ryoung.* Multiobjective Optimization of a Hydrogen Production System with Low CO₂ Emissions // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013. № 51. Pp. 2644–2651.
24. *Sanaye S., Katebi A.* 4E analysis and multi objective optimization of a micro gas turbine and solid oxide fuel cell hybrid combined heat and power system // *Journal of Power Sources*. 2014. № 247. Pp. 294–306.
25. *Bertani R. et al.* Multi-objective design of a magnetic fluid hyperthermia device // *IECON 2015 – 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Yokohama. Japan. 2015. Pp. 3603–3608.
26. *Pleshivtseva Yu., Di Barba P., Rapoport E., Nacke B., Nikanorov A., Lupi S. et al.* Multi-objective optimization of induction heaters design based on numerical coupled field analysis // *International Journal of Microstructure and Materials Properties*. 2014. № 9. P. 6.
27. *Nyallang S., Tolj I., Sivakumar P.* Multi-objective optimization of a metal hydride reactor coupled with phase change materials for fast hydrogen sorption time // *The Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 71. P. 18.
28. *Di Barba P., Pleshivtseva Yu., Rapoport E., Forzan M., Lupi S. et al.* Multi-objective optimisation of induction heating processes: Methods of the problem solution and examples based on benchmark model // *International Journal of Microstructure and Materials Properties*. 2013. № 8. Pp. 357–372.

29. *Pleshivtseva Yu., Popov A., Forzan M., Sieni E.* Multi-Objective Optimization of Induction Surface Hardening Process // IECON 2018 – Annual Conference of the IEEE Industrial Electronic Society. 2018. Pp. 3515–3520.
30. *Pleshivtseva Yu.E., Rapoport E.Ya., Nake Bernard, Nikanorov A.N., Popov A.V.* Proektirovanie indukcionnyh ustanovok na osnove resheniya zadach mnogokriterial'noj optimizacii [Design of induction units based on solving multicriterial optimization problems] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2016. № 24 (2). Pp. 47–57.
31. *Pleshivtseva Yu., Rapoport E., Nacke B., Nikanorov A. et al.* Design concepts of induction mass heating technology based on multiple-criteria optimization. COMPEL // The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. 2017. № 36. Pp. 386–400.
32. *Di Barba P., Dughiero F., Forzan M., Mognashi M.E., Sieni E.* Induction heating of a graphite disk: a benchmark for multi-physics platform for multi-objective design // Proceedings of XVIII International UIE-Congress "Electrotechnologies for Material Processing". Hannover, 2017. Pp. 520–525.
33. *Kampouropoulos K., Andrade F., Sala E., Espinosa A.G., Romeral L.* Multiobjective Optimization of Multi-Carrier Energy System Using a Combination of ANFIS and Genetic Algorithms // IEEE Transactions on Smart Grid. 2018. № 9. Pp. 2276–2283.
34. *Cheng J., Liu Z., Tan J.* Multiobjective optimization of injection molding parameters based on soft computing and variable complexity method // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. № 66. Pp. 907–916.
35. *Di Barba Paolo.* Basic Principles of Optimal Design of Electromagnetic Devices and Multi-objective Optimization // ASM Handbbok Induction Heating and Heat Treatment. 2014. Pp. 359–365.
36. *Xiao Song, Liu G., Zhang K., Jing Y., Duan Jiaheng, Barba Paolo, Sykulski J.* Multi-Objective Pareto Optimization of Electromagnetic Devices Exploiting Kriging With Lipschitzian Optimized Expected Improvement // IEEE Transactions on Magnetics. 2018. Pp. 1–4.
37. *Deb K.* Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms: An Introduction. Wiley, New York, 2014.
38. *Behroozsarand A., Ebrahimi H., Zamaniyan A.* Multiobjective Optimization of Industrial Autothermal Reformer for Syngas Production Using Nonsorting Genetic Algorithm II // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2013. № 48. Pp. 16.
39. *Oprîş I., Cenuşă V.-E., Norişor M., Darie G., Alexe F.-N., Costinaş S.* Parametric optimization of the thermodynamic cycle design for supercritical steam power plants // Energy Conversion and Management, 2020. Vol. 208. Pp. 19.
40. *Di Barba P., Mognaschi M.-E., Dughiero F., Forzan M., Sieni E.* Multi-Objective Optimization of a Solenoid for MFH: A Comparison of Methods // ECON 2018 – 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2018. Pp. 3336–3340.
41. *Materin P.V., Sekaev V.G.* Sistemnoe opisanie algoritmov roevogo intellekta [System description of swarm intelligence algorithms] // Teoreticheskij i prikladnoj nauchno-tekhnicheskij zhurnal. Programmaya inzheneriya. 2013. Pp. 39–45.
42. *Mofidipour E., Babelahi M.* New procedure in solar system dynamic simulation, thermodynamic analysis, and multi-objective optimization of a post-combustion carbon dioxide capture coal-fired power plant // Energy Conversion and Management. 2020. Vol. 224. P. 15.
43. *Zhang J., Wang J., Lin J., Guo Q., Chen K., Ma L.* Multiobjective optimization of injection molding process parameters based on Opt LHD, EBFNN, and MOPSO // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. № 85. Pp. 2857–2872.
44. *Ke Wei, Keke Huang, Chunhua Yang, Weihua Gui.* Multi-Objective Adaptive Optimization Model Predictive Control: Decreasing Carbon Emissions from a Zinc Oxide Rotary Kiln // Engineering. 2023. № 27. Pp. 96–105.

Original article submitted 04.06.2024

УДК 519.8

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В СИНЕРГЕТИЧЕСКИ ВОЗМУЩАЮЩЕЙ СРЕДЕ

В.С. Ковтун¹

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)
Россия, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Ленина, 4А

E-mail: Vladimir.S.Kovtun@rscce.ru

Аннотация. Рассмотрено использование нового методологического когнитивно-вариабельного синергетического² (КВС) подхода к анализу проблематики теории системных исследований, проводимых на борту автоматических космических аппаратов (АКА) [1]. В методологической основе КВС-подхода лежат кибернетическая [2] и синергетическая [3] теории управления динамическими системами, а также методология проактивного управления функционированием сложных технических объектов (СЛО), базирующаяся на концепции комплексного моделирования СЛО. Известны результаты ранее проведенного морфологического анализа проблематики теории системно-кибернетических исследований движения динамических систем, представленные в виде морфологического дерева, которое содержит четыре ветви (моделирование – анализ – наблюдение – выбор) и листья (частные задачи) [4]. Число задач определено взаимодействием управляющей системы (среды) с четырьмя типами воздействий возмущающей среды – детерминированной, стохастической, целенаправленной и с неизвестными характеристиками – при формировании входных воздействий на систему управления. В основе КВС-подхода лежит использование при управлении динамическими системами нового типа среды – синергетически возмущающей. Для отображения новой среды и задач на морфологическом дереве анализа проблематики дополнительно к существующим задачам системно-кибернетических исследований вводятся новые листья – частные задачи системно-синергетических исследований. Парадигма анализа проблематики сформирована на основе знаний, опыта управления и системных исследований, направленных на решение проблемы обеспечения ресурсами бортовых систем (БС) АКА и устойчивости их функционирования в процессе полета.

Целеполагание нового методологического подхода к анализу проблематики теории системных исследований направлено на рациональное использование основных структурно-функциональных ресурсов БС, получение синергетических ресурсов и предотвращения отказов, вызванных расчетными и нерасчетными аномальными процессами. Далее синергетическим будет называться такой вид ресурсов, который формируется спонтанной самоорганизацией процессов в системах управления и трансформируется в целенаправленную самоорганизацию в объективно суще-



© Автор(ы), 2024

¹ Владимир Семенович Ковтун, кандидат технических наук, главный специалист по верификации и сертификации космической техники.

² Когнитивно-вариабельный синергетический – «знание вариантов самоорганизации»; когнитивный – от лат. *cognitio* – знание, познание; вариабельный – от англ. *variable* – изменчивый, способный иметь варианты; синергетический – от греч. *συν* – приставка со значением совместности + *ἔργον* – деятельность).

ствующих многоместных отношениях, описывающих синергетические взаимодействия и взаимосвязи при движении процессов в условиях синергетически возмущающей внешней среды [5, 6].

Ключевые слова: *возмущающая среда, морфологический анализ, кибернетическая теория управления, синергетическая теория управления, когнитивно-вариабельный синергетический подход, автоматический космический аппарат, синергетические ресурсы.*

Введение

При системно-кибернетическом подходе к проектированию и разработке бортовых систем алгоритмы и методы управляющих систем (управляющих сред) создаются для управления функционированием динамических систем (объектов управления) в условиях стационарного характера движения процессов и при детерминированном состоянии возмущающей среды [3]. В наземных комплексных испытаниях систем управления не учитываются нестационарные движения, обусловленные синергетическими явлениями, приводящими к появлению новых связей в управляющей и возмущающей средах. Дальнейшее ресурсное обеспечение систем управления строится поддержанием их надежности путем сохранения неизменности параметров состояния и управления, predeterminedных техническими условиями эксплуатации. Создаются квазизамкнутые системы управления, предполагающие стационарное движение в объектах управления на всем интервале эксплуатации. В общесистемном подходе к созданию управляющих систем должно быть учтено воздействие всех параметров (связей) управляющей и возмущающих сред, но некоторые факторы не учитываются преднамеренно (как величины более высоких порядков малости), а остальные неизвестны на момент создания систем.

При системно-синергетическом подходе алгоритмы и методы, разработанные для управляющих систем, корректируются по результатам мониторинга их состояния из-за возникновения новых связей в условиях нестационарного характера движения процессов в динамических системах. Расход и регенерация ресурса – это изменение вещественной формы материального объекта, зависящее от взаимодействия физических полей и отображаемое свойствами, оцениваемыми параметрическими характеристиками процессов. Испытания, проводимые с материальными объектами АКА на протяжении всего их жизненного цикла, есть не что иное, как силовые взаимодействия информационно-энергетических полей, определенные связями между процессами. При этом синергетические явления в БС и их естественное ресурсное обеспечение зависят от данных взаимодействий.

В обоих подходах к управлению динамическими системами движение описывается дифференциальными уравнениями, а управление – интегралами движения. Принципиальное различие заключается в поиске интегралов движения с параметрами «неизменных связей» в динамической системе – кибернетическая теория управления, и преднамеренном или случайном введении интегралов движения в структуру динамической системы в процессе ее функционирования – синергетическая теория управления. Изначально планируемое «стационарное движение» постепенно трансформируется из-за диссипации внутренней энергии в объекте управления в «нестационарное движение» за пределами некоторого интервала времени, когда «проинтегрированная ошибка отступления от системного подхода» выводит работу системы управления за рамки заданных условий

эксплуатации. Если этот интервал больше или равен запланированному сроку эксплуатации системы управления, то задача системой выполнена, иначе – нет. Принципиальная разница в рассматриваемых подходах к управлению: в кибернетике свойства рассматриваются априори для стационарного движения процессов в системах управления, а в синергетике – апостериори для нестационарного движения процессов в системах управления.

Таким образом, надежностью систем управления подтверждается их ресурсное обеспечение при стационарном движении процессов в объектах управления (кибернетическая теория управления – КТУ). В ином случае ресурсное обеспечение зависит от живучести – свойства систем управления выполнять свои функции в условиях нестационарного движения процессов в объектах управления со связями, изменяющимися во времени (синергетическая теория управления – СТУ).

В.Н. Калинин, одним из основоположников школы системно-кибернетических исследований динамических систем в ВКА им. А.Ф. Можайского, проведен морфологический анализ проблематики системно-кибернетических исследований с учетом воздействия на системы управления четырех типов возмущающей среды: детерминированной (α), стохастической (β), целенаправленной (γ) и с неизвестными характеристиками (δ) [3]. Результаты исследований представлены в виде морфологического дерева с четырьмя ветвями, отображающими фундаментальные проблемы (моделирование – анализ – наблюдение – выбор), которые лежат в основе системно-кибернетических исследований, и листьями-задачами, решение которых на различных этапах жизненного цикла АКА позволяет обеспечить оптимальное управление сложными динамическими системами, включающее в себя и обеспечение надежности систем.

Родоначальник синергетической концепции теории управления динамическими системами в России А.А. Колесников полагал, что синергетику необходимо рассматривать в контексте развития системно-кибернетического подхода, «...она отражает идеологию единства процессов самоорганизации и управления, т.е. представляет собой симбиоз кибернетики и синергетики» [4]. В отличие от классической кибернетики, где рассматриваются стационарные движения нелинейных процессов в открытых динамических системах, в синергетике изучаются нестационарные движения процессов с возникновением кооперативных, когерентных связей, которые формируют новые структурные и функциональные свойства самоорганизующихся систем.

На основе знаний и опыта управления АКА как сложными техническими системами на базе синергетической теории управления разработан когнитивно-вариабельный синергетический (КВС) подход к решению задач системных исследований и управления, обеспечивающий живучесть систем при нестационарном движении процессов в динамических системах. В рамках этого подхода для исследования нестационарных нелинейных процессов вводится понятие среды пятого типа – «синергетически возмущающей» («сигма среда»- σ), в которую погружены системы управления. В результате на четырех ветвях морфологического дерева, представляющего результаты анализа проблематики теории системно-кибернетических исследований, формируются новые листья-задачи системно-синергетических исследований.

Целью решения этих задач является обеспечение живучести бортовых систем в условиях нестационарного движения процессов в объектах управления с получением дополнительно к номинальным структурно-материальным ресур-

сам бортовых систем, синергетических ресурсов, а также предотвращение непредвиденных отказов за счет превентивных мер, разрабатываемых на базе системных исследований кооперативных, когерентных и самосогласованных изменений состояний (движений) динамических систем, вызванных новыми связями.

Формирование синергетически возмущающей среды

Формирование синергетически возмущающей среды производится путем изменения состава существующей внешней среды, воздействующей на систему управления образовавшимися энергетическими, вещественными и информационными связями, возникающими при спонтанном или целенаправленном переходе от стационарного движения динамических систем к нестационарному движению в результате взаимодействия систем.

При разработке системы управления любой алгоритм управления строго и недвусмысленно определен в каждом конкретном случае (выполняется свойство детерминированности) на протяжении всего срока службы квазизамкнутой системы при стационарном движении процессов. На весь жизненный цикл техническими условиями эксплуатации определены многоместные отношения между прямыми и обратными связями в системе управления, учитывающие одновременное воздействие на объект управления множества управляющих (УВ) $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ и возмущающих воздействий (ВВ) $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m\}$ [3, 5].

Однако в любой момент времени в силу различных причин объективного и субъективного характера может быть осуществлен переход от стационарного к нестационарному движению процессов в объекте управления. Этот переход проиллюстрирован одним из многочисленных примеров управления реальными бортовыми системами геостационарного АКА с фазированной антенной решеткой (ФАР) [7], которая представлена как объект управления (ОУ1). При разработке квазизамкнутой системы управления для ОУ1 управляющей подсистемой УП1 формируется воздействие U_1 в виде электрических УВ для питания токовых контуров в отдельных модулях ФАР. В качестве факторов внешней детерминированной возмущающей среды, воздействующих на ФАР, учитываются: ВВ потока солнечного излучения, падающего на поверхность АКА, E_C ; ВВ ионизирующего излучения космического пространства, Φ_e , Φ_p ; ВВ от радиационных поглощенных доз электронов (D_e), протонов (D_p) и суммарной дозы ($D_{\text{сум}}$). При этом собственный магнитный момент ФАР за счет симметрично расположенного на панелях контуров разнонаправленного протекания тока в приемо-передающих модулях ФАР, состоящих из панелей, взаимно скомпенсирован и равен нулю. Таким образом инициируется квазистационарное движение электрических и электромагнитных процессов в модулях ФАР.

Для поддержания ориентации аппарата в качестве исполнительных органов системы управления движением применяются электродвигатели-маховики (ЭДМ) (ОУ2). Управление системой ЭДМ штатно осуществляется от управляющей подсистемы УП2 прямоугольно-частотными импульсами, определяющими направление и скорость вращения маховиков. При этом систему управления погружают в детерминированную возмущающую среду, в которой компонентами возмущающего момента являются моменты от сил гравитации и светового давления. Двигатели-маховики парируют действия указанных внешних моментов на корпус АКА (поддерживая тем самым ориентацию) и накапливают кинетический

момент до предельного значения в области располагаемого значения. Системы управления, включающие указанные ОУ, вещественно и функционально объединены корпусом АКА.

О стихийном спонтанном формировании синергетически возмущающей среды наблюдатель судит по заметному увеличению интенсивности накопления кинетического момента в системе ЭДМ при поддержании заданной орбитальной ориентации АКА. Согласно закону управления кинетическим моментом АКА в условиях воздействия внешних моментов [8], причиной является увеличение главного вектора момента внешних возмущающих сил, действующих на корпус аппарата. Гравитационную составляющую момента можно принять за постоянную величину (для примера будем рассматривать АКА – геостационарный спутник связи (ГСС)). Аэродинамическая составляющая момента работает только на малых высотах и для ГСС равна нулю. Момент от сил светового давления существенно меняется только в период высокой солнечной активности. Моменты, создаваемые метеорными потоками и частицами космического мусора, постоянны, и их можно относительно легко определить по результатам внешних наблюдений за космическим пространством. Таким образом, при отсутствии солнечной активности увеличение могло произойти только за счет магнитной составляющей главного вектора возмущающего момента, имеющей тот же порядок величин, что и гравитационная составляющая. Расчетными методами с использованием синергетических наблюдений [9] определяют величину и направление действия магнитного возмущающего момента [10]. Далее необходимо установить систему и/или ее элементы, в которой произошло формирование собственного магнитного момента. Кроме рассмотренной системы электропитания ФАР таким местом на борту АКА (например) могут быть токовые контуры на панелях солнечных батарей (СБ) [10]. После определения места формирования и параметров собственного магнитного момента от ФАР или СБ с использованием специальных тестовых синергетических наблюдений [10] (определения места и характера воздействия возмущающей системы на среду) производится оценивание влияния указанной возмущающей среды на работу остальных систем (воздействия возмущенной среды на системы).

Кроме дополнительного возмущающего момента, действующего на корпус аппарата, особое внимание необходимо обратить на устройства, содержащие постоянные магниты и электромагниты (например, электроклапаны с магнитными катушками и др.). Взаимодействие их с собственным магнитным моментом на борту аппарата будет вызывать появление дополнительных механических нагрузок в виде действующих механических моментов в местах крепления устройств и т.д. При этом, несмотря на небольшие порядки малости величин указанных моментов, из-за длительного воздействия они могут существенно влиять на ресурс или приводить к отказам элементов систем, например путем разрушения целостности микросхем, не рассчитанных на дополнительную механическую нагрузку.

В общем случае свое влияние синергетически возмущающая среда может оказывать и на возмущающие факторы, которые воздействовали на систему управления до ее формирования. Так, например, в результате влияния возмущающего момента, сформированного взаимодействием приобретенного магнитного момента с магнитным полем постоянного магнита или электромагнита, может произойти изменение конфигурации привода, встроенного в подвижные элемен-

ты конструкции аппарата, за счет непредвиденного его движения. Это изменит тензор инерции аппарата, что повлияет на значение гравитационного момента.

Наблюдается влияние собственных магнитных моментов на борту АКА на характер воздействия ионизирующего излучения космического пространства (протонов и электронов высоких энергий) в элементах радиотехнических изделий и т.д. Необходимо отметить также, что рассмотрен пример одинарного формирования на борту АКА синергетически возмущающей среды (от одной системы). Синергетически возмущающая среда может формироваться и более сложно, многокомпонентно от нескольких систем, с наложением нескольких процессов. Таким образом, необходимо проводить оценку изменения всех факторов внешней среды при их взаимодействии с факторами синергетически возмущающей среды, тем самым формируя новое множество воздействий внешней возмущающей среды:

$$\Xi^\sigma = \{\xi_1^\sigma, \dots, \xi_m^\sigma\}.$$

Формирование множества полностью согласуется с системным подходом к созданию и эксплуатации динамических систем (объектов управления), в основе которого выделяются два основных правила [2]:

- все объекты рассматриваются как системы;
- учитываются все факторы воздействия систем на среду и среды на системы, где среда – совокупность элементов, окружающих систему и не входящих в ее состав, но оказывающих на нее воздействие.

Синергетические взаимосвязи и взаимодействия, возникающие при совместной работе нескольких объектов управления, т. е. в действующей системе, влияют на окружающую среду, которая при этом становится синергетически возмущенной, т. е. на нее воздействует система. Но, в свою очередь, эта среда, являясь синергетически возмущенной системой, воздействует на смежные системы управления и для них уже является синергетически возмущающей.

Погружение системы управления в синергетически возмущающую среду

Погружение системы управления в синергетически возмущающую среду производится путем целенаправленного включения во множества элементов входных воздействий $(B \times B)V^\sigma$ элементов (связей) этой среды

$$V^\sigma \subseteq B(U) \times B(\Xi^\sigma),$$

где $B(U)$ – булеан множества управляющих воздействий, $B(\Xi^\sigma)$ – булеан множества возмущающих воздействий.

Запись $B \times B$, проведенная через декартово произведение булеанов (B) рассматриваемых множеств, – это самый общий случай, т. к. булеан включает в свой состав как пустое множество, так различные подмножества множества, от которого берется булеан. При этом имеют право на существование не только парные воздействия – один элемент из одного множества, а другой из другого. Бывают и другие $B \times B$ как более простые, так и более сложные. Например, UB есть, а VB нет, и наоборот. Постоянно наблюдается несколько видов возмущающих воздействий. Для UB также можно предусмотреть такую ситуацию.

Разработка математической модели, учитывающей погружения систем управления в синергетически возмущающую среду, позволяет выстраивать новые отношения между системными процессами в нестационарных режимах их

функционирования. Формально отношения можно задавать различным образом: перечислением, графом, сетью, алгебраическими равенствами и неравенствами и т. д. В частности, задать такие отношения можно взвешенным функциональным мультиграфом, вершины которого определяют процессы, взвешенные ресурсами элементов системы, а дуги – отношения между процессами, заданные входными воздействиями ($B \times B$) на элементы систем [5].

Если, например, базовые системные процессы (БП) на борту АКА, погруженные в синергетически возмущающую среду, рассматривать в виде множества $\Pi^\sigma = \{\Pi_j^\sigma, j=1,2,\dots,J\}$, где j – обозначение текущего номера БП, то график бинарных отношений между элементами множества имеет вид

$$R_j^\sigma \subseteq \Pi_j^\sigma \times \Pi_j^\sigma, j=1,2,\dots,J.$$

При этом между подмножествами пар бинарных отношений БП производится взаимодействие через $B \times B$ V_j^σ , которые определяются декартовым произведением булеанов множеств УВ (U_j) и ВВ (Ξ_j^σ):

$$V_j^\sigma \subseteq B(U_j) \times B(\Xi_j^\sigma), \langle \Pi_j r(V_j^\sigma) \Pi_j \rangle, r(V_j^\sigma) \in R_j^\sigma.$$

Введение мультиграфов для описания отношений между процессами при исследовании систем управления позволяет использовать при построении математических моделей класс матриц инцидентий. При этом в каждом из мультиграфов установлены материальные, энергетические и информационные связи между процессами в объектах управления. Кроме них существуют связифакторы, оказывающие внешнее синергетическое влияние на основные процессы [5].

Далее приведен пример процесса погружения ранее рассмотренной системы управления ЭДМ в синергетически возмущающую среду, сформированную системой управления ФАР.

Среда становится синергетически возмущенной в случае нарушения электрообеспечения одного или нескольких контуров цепей питания, расположенных на панелях ФАР. Причиной могут быть удары мелких частиц космического мусора, порождающие плазму, которая вызывает короткие замыкания или разрывы в электрических соединениях. Процесс стационарного движения в ФАР переходит в стадию нестационарного стихийного движения, которое характеризуется появлением собственного (нескомпенсированного) магнитного момента на борту АКА. Этот момент, взаимодействуя с магнитным полем Земли (МПЗ), воздействует в виде возмущающего момента на корпус АКА. Для поддержания требуемой ориентации АКА система управления ЭДМ, помимо парирования действия гравитационного момента и момента от сил светового давления, вынуждена осуществлять парирование действия магнитного возмущающего момента. Таким образом, система ЭДМ принудительно стихийно переходит в нестационарный режим работы в результате появления на борту АКА воздействия от синергетически возмущенной среды.

На борту возник случай спонтанно самоорганизованного управления БС в условиях синергетически возмущающей среды. Действие среды носит стихийный характер, который идентифицируется как аномальный процесс. В результате действия дополнительного возмущающего магнитного момента на корпус АКА происходит ускоренный расход ресурса ЭДМ. Кроме того, система разгрузки ЭДМ от накопленного кинетического момента, содержащая магнитные исполни-

тельные органы (МИО), становится менее эффективной (не справляется), так как кинетический момент накапливается быстрее противодействующего ему разгрузочного момента. Это приводит к вынужденному применению реактивных двигателей (РД) для указанной разгрузки ЭДМ, тем самым производится нерасчетный расход рабочего тела.

В данном случае парирование негативного действия синергетически возмущающей среды является одним из примеров целенаправленного управления, которое производится через синергетические наблюдения с целью определения мест разрыва контуров и дальнейшего отключения от электропитания панелей, содержащих неуравновешенные магнитные моменты. Если самоорганизация синергетически возмущающей среды приводит не к ускорению накопления кинетического момента в системе ЭДМ, а к его замедлению, указанные отключения не производят. При этом контролируют процесс разгрузки и в случае перехода от разгрузки к накоплению кинетического момента в результате действия синергетической составляющей магнитного управляющего момента производят отключения магнитонеуравновешенных контуров.

Другим способом целенаправленного погружения управляющей системы ЭДМ в синергетически возмущенную среду является наведенное движение тока в контурах, расположенных на панелях ФАР. Его можно организовать таким образом, что магнитные моменты будут однонаправлены в двух вариантах с разными знаками (\pm) векторов в связанном базисе АКА. Известно, что кинетический момент, накопленный в системе ЭДМ, неизменен в инерциальном пространстве. Необходимо определить управляющий магнитный момент от взаимодействия магнитных моментов с МПЗ при его расположении в том же базисе инерциального пространства и далее направить вектор управляющего магнитного момента противоположно вектору накопленного кинетического момента в системе ЭДМ за счет разворота токовых контуров [7]. В таком случае будет осуществляться разгрузка системы ЭДМ от накопленного кинетического момента, т. е. управление U_2 токовыми контурами ФАР (см. [7]) выполняет функцию МИО. Для прекращения действия управляющего магнитного момента на корпус АКА необходимо выполнить разнонаправленные развороты токовых контуров, обеспечивающих «магнитонейтральную» ФАР. Таким образом, функционирующая ФАР может одновременно играть роль управляющей системы по разгрузке ЭДМ от накопленного кинетического момента через приложение и снятие действия разгрузочного магнитного момента.

Синергетически возмущающую среду (σ) позволяет выделить в отдельный вид возмущающих сред то обстоятельство, что она существует в условиях проявления системных законов самоорганизации при нестационарном движении процессов, имеющих динамическую природу, т. е. проявляющихся при возникновении новых синергетических взаимосодействий, изменяющихся со временем. До этого нестационарное движение динамических систем при возникновении новых синергетических взаимосодействий, изменяющихся со временем, как и сами синергетические взаимосодействия, не рассматривались в качестве формователей возмущающей среды.

Из приведенного примера следует, что синергетически возмущающая среда описывается на основе апостериорной информации о состоянии динамических систем после изменения стационарного характера движения процессов в одной из систем управления на нестационарный. В этом она существенно отличается от других видов сред, формируемых на основе априорных сведений о них [3, 11].

При этом формирование синергетически возмущающей среды производится с использованием синергетических наблюдений, в конкретном примере за магнитными моментами, возникающими на борту АКА.

Получить максимально полную информацию о характеристике объекта управления и проконтролировать ее достоверность позволяет сопоставление вычислений по измеренным параметрам процессов в различных системах, одновременно функционирующих на борту АКА по различным физическим законам. Если значения параметров, рассчитанные разными способами, равны, то это дает полную гарантию их достоверности на основе сходимости процессов разной природы при синергетическом взаимодействии систем.

При недостаточности бортовых измерений для получения достоверной информации указанным способом исследования переносятся на физическое макетирование ситуации. Для этого используется материальное (предметно-стендовое) моделирование работы бортовых систем. На основе натурных исследований создается математическая модель реального объекта путем ее верификации через оценивание – установление степени соответствия математической модели объекта значениям показателей натурной модели. В этом случае о достоверности свидетельствует полное соответствие показателей движения процессов, приобретенных предметно-модельным путем, информации о движении процессов в работающих БС. Верифицированная натурно-математическая модель используется для прогноза работы БС.

Статистические и вероятностные модели здесь не работают. Следовательно, синергетически возмущенная среда не относится к стохастически возмущенной, так как не может быть представлена множеством допустимых значений, имеющих вероятностный характер.

Далее рассмотрено существующее различие между целенаправленностью действий на динамическую систему: с одной стороны детерминированной внешней среды (типа α) и/или целенаправленной возмущающей среды (типа γ), и с другой стороны – синергетически возмущающей среды. В том и другом случае целенаправленность – это функциональная тенденция, ориентированная на достижение системой некоторого состояния, выражаемого целью. В первом случае целенаправленности цель задается извне, а способы достижения цели формируются управляющей подсистемой. Во втором случае целенаправленность – это способность к выбору в зависимости от внутренней цели: «...цель выступает как определяющая сущность процесса, а его истинное понимание состоит в самоуправлении и самоорганизации в соответствии с поставленной целью» [4].

На основе вышеизложенного становится очевидным, что синергетически возмущающую среду нельзя отнести к индифферентному типу и неизвестной среде (тип δ). Для системы управления, погруженной в синергетически возмущающую среду, важно, известна или неизвестна среда. В конкретном случае, какими бы ни были причины, приводящие к нестационарности движения, их надо распознать по совокупности вновь проявивших себя признаков.

Выводы: вновь введенная синергетически возмущающая среда не соответствует ни одному из существующих до этого способов описания разновидностей возмущающей среды; математические модели (методы), построенные на априорных сведениях о внешней среде, не могут быть использованы для решения исследовательских задач, связанных с синергетически возмущающей средой и построенных на синергетических наблюдениях.

Особенности построения и разновидности задач системных исследований в условиях синергетически возмущающей среды

В [3] обозначены четыре фундаментальные проблемы системных исследований (ветви морфологического дерева), в которых представлены разновидности частных задач (листьев) с учетом возмущающих сред четырех типов: детерминированной (α), стохастической (β), целенаправленной (γ) и с неизвестными характеристиками (δ), стационарно воздействующих на движение динамических систем. При этом на основе проведенного анализа отмечается, «...что при всем калейдоскопическом разнообразии задач, возникающих при изучении тех или иных реальных объектов, каждая из этих задач может быть отнесена к одной из четырех фундаментальных проблем (моделирование – анализ – наблюдение – выбор), лежащих в основе системно-кибернетических исследований».

При погружении управления динамическими системами в синергетически возмущающую среду (σ) появляются новые частные задачи, которые дополняют задачи системно-кибернетических исследований динамическими связями от синергетических взаимодействий. Далее на примерах исследований единства процессов самоорганизации и управления БС АКА раскрывается техническая целесообразность решений такого рода задач по четырем фундаментальным проблемам, направленным на получение синергетических ресурсов и повышение устойчивости функционирования систем.

Первая проблема – моделирование (А). Заключается в построении модели изучаемого реального объекта управления в системно-кибернетических терминах, «... в виде некоторой абстрактной системы, отображающей все свойства изучаемого объекта, взаимодействующего со средой, и позволяющей получить необходимую информацию об этом объекте» [3].

При проведении системно-кибернетических исследований выделяются два вида моделей – концептуальные (А1) и математические (А2). В свою очередь, концептуальные подразделяются на два типа моделей – интуитивные и логико-вербальные, а математические включают в себя два типа моделей – аналитические и алгоритмические (или имитационные) [3]. При рассмотрении в моделировании динамических систем синергетической составляющей к 8 морфологическим разновидностям концептуальных $A1\alpha$, $A1\beta$, $A1\gamma$, $A1\delta$ и математических $A2\alpha$, $A2\beta$, $A2\gamma$, $A2\delta$ моделей для определенных ранее типов возмущающих сред добавляются еще два вида моделей, учитывающих синергетически возмущающую среду: $A1\sigma$; $A2\sigma$.

Примером концептуальной интуитивной синергетической модели может служить модель переменной системы – регулятора процессов [7], представленная множеством понятий когнитивно-синергетического подхода к системным исследованиям характеристик БС АКА как открытых, нелинейных сложных технических систем и связей между ними. Модель обуславливает создание и функционирование систем управления БС, одновременно выполняющих при синергетическом взаимодействии несколько функций. Рассмотренная синергетическая энергетическая взаимосвязь между двумя системами управления в виде магнитных моментов токовых контуров в цепях электропитания приемо-передающих модулей ФАР, взаимодействующих с МПЗ и кинетическим моментом в системе ЭДМ, позволяет использовать систему управления (СУ) ФАР в качестве МИО системы управления движением и навигации (СУДН). Тем самым СУ ФАР наделена свойством варибельности, позволяющим ей стать системой-регулятором сразу для двух физических процессов: управления радиосигналами спутниковой

связи в ФАР и управления кинетическим моментом в системе ЭДМ. Получен дополнительный функциональный синергетический ресурс исполнительных органов СУДН для разгрузки ЭДМ от накопленного кинетического момента, который может заменить или дополнить существующий.

Примером концептуального логико-вербального моделирования служит мета-модель развивающейся текущей ситуации на борту АКА, обусловленная самоорганизацией БС и содержащая информацию о потенциально существующих возможностях управления состоянием аппарата в различных условиях реализации номинальных и аномальных процессов [5]. Создание концептуальной мета-модели позволяет перейти от предметной формализованной модели к следующим этапам моделирования – формально-математическому и материально-функциональному моделированию, в ходе которых учитываются индивидуальные особенности движения процессов на борту АКА. При этом расчет ресурсного обеспечения производится на основе комплексного анализа первичных причинно-следственных топологических и функциональных номинальных связей между БС и их элементами, а также синергетических свойств, выявленных в результате реализации на практике двойственных взаимосвязанных процессов декомпозиции-агрегирования (объединения, укрупнения) тех или иных бортовых подсистем в БС. Наличие синергетических свойств позволяет использовать созданные на их основе синергетические ресурсы для дублирования существующих и создания новых структурно-функциональных, материальных и энергетических ресурсов БС.

К синергетически-аналитическим относится расчетная модель определения расхода рабочего тела (РТ) в электроракетных стационарных плазменных двигателях по значениям разрядных тока и напряжения [12]. Моделирование позволяет верифицировать процесс расхода РТ электроракетных двигателей из объемов хранения и подачи, тем самым проводить контроль герметичности объемов по допустимому уровню микротечи. Синергетические информационные взаимосвязи между процессами позволяют получить синергетический ресурс РТ, сохраняющий структурно-функциональные и материальные ресурсы за счет исключения из применения негерметичных объемов.

Математическое моделирование синергетических температурных воздействий на энергопроизводящий процесс в электрохимических аккумуляторах (ЭХБ) АКА [13] является примером алгоритмического типа модели. Моделирование позволяет определять тепловую мощность холодильника, которую необходимо подводить для поддержания оптимальной температуры в зоне электрохимической реакции ЭХБ. В результате эксплуатации аккумуляторов в оптимальном температурном диапазоне продлевается длительность их работы при сохранении разрядной емкости. Тем самым формируется синергетический ресурс ЭХБ.

Вторая проблема – анализ (В). Заключается в исследовании свойств, присутствующих рассматриваемой системе. В этой проблеме выделяются три подпроблемы [3].

В1. Анализ структуры системы. Предметом анализа структуры синергетической системы является исследование кооперативного и когерентного поведения ее компонентов. Вводится дополнительный вид структурного анализа $V1\sigma$ в синергетически возмущающей среде. Примером такого вида исследований может служить рассмотренная ранее структура системного построения ФАР космического базирования для решения задач обеспечения радиолокации и персональ-

ной спутниковой связи [6]. Структурные системные перестроения конфигурации ФАР в процессе эксплуатации позволяют использовать ее за счет синергетической информационной и энергетической взаимосвязи между различными системными процессами в качестве МИО системы управления ориентацией АКА для разгрузки ЭДМ от накопленного кинетического момента. Синергетический ресурс сохраняет материальный ресурс РТ ракетных двигателей (РД) за счет «безрасходного» выполнения динамического режима разгрузки ЭДМ, т. е. выполнения динамической операции без использования РД.

В2. Исследование свободных движений и реакций системы. В СТУ предметом анализа являются поведение и свойства синергетических динамических систем при их самоорганизации в отсутствие внешних управляющих воздействий. При этом на первый план выдвигаются исследования обмена динамических систем с внешней средой энергией, веществом и информацией. Системные законы самоорганизации имеют динамическую природу, т. е. формируют нестационарные движения динамических систем при появлении синергетических взаимодействий, изменяющихся со временем. Вследствие этого наряду с существующими морфологическими вариантами задач анализа при системно-кибернетических исследованиях $V2 \alpha$, $V2 \beta$, $V2 \gamma$, $V2 \delta$ появляется новый вариант синергетического анализа свободных движений и реакций системы в синергетически возмущающей среде $V2 \delta$. Примером данного вида анализа являются исследования дуговых разрядных процессов в анод-катодном промежутке электроракетного стационарного плазменного двигателя (СПД) [12]. Анализу подвергаются аномальные синергетические явления в виде бросков разрядного тока (тока анода) (БТА), вызванных уменьшением электрического сопротивления анод-катодного промежутка. При этом анализ выявляет причины аномалии, вызывающей уменьшение сопротивления. Реакция системы электроракетных двигателей на события БТА защищает аппаратуру питания и управления СПД от аномально больших токов. Синергетический ресурс аппаратуры питания и управления увеличивает продолжительность работы ее элементов (электронных радиоизделий) за счет сокращения времени аномальных режимов работы.

В3. Исследование вынужденных движений и реакций системы. В КТУ центральное место занимает анализ множеств достижимости, исследование топологической структуры которых позволяет оценить такие свойства системы, как управляемость, чувствительность и др. [3]. В СТУ изначально создаются избыточные степени свободы, определяющие дополнительные возможности в свойствах будущей системы, а затем эти степени свободы редуцируются в процессе управления, перенацеливая движения систем на желаемые диссипативные структуры, представляющие собой некоторые динамические состояния – аттракторы систем [4]. При этом свойства и направление этого процесса определяются не только внешними управляющими воздействиями, но и внутренней динамикой нелинейной системы, зависящей от синергетических взаимодействий и информационных взаимосвязей между элементами системы. В СТУ априорная информация о системе и среде требует постоянного обновления. Поэтому целесообразно установить различия между четырьмя морфологическими вариантами проблемы анализа $V3 \alpha$, $V3 \beta$, $V3 \gamma$, $V3 \delta$ системно-кибернетических исследований и новым вариантом $V3 \sigma$ системных исследований в синергетически возмущающей среде.

Примером может служить анализ «множества достижимости» проведения маневров АКА на витке с использованием тяговых модулей (ТМ), содержащих

электроракетные стационарные плазменные двигатели (СПД). Каждый ТМ рассматривается как уникальное устройство, в СПД которого расход РТ зависит от многих степеней свободы разрядного процесса. При этом макроскопические свойства синергетически сложного разрядного процесса в СПД определяются двумя электродинамическими параметрами порядка – разрядными напряжением и током. Задачей анализа является определение пороговой чувствительности расхода РТ по электродинамическим параметрам, обеспечивающим удельный импульс тяги. Целью анализа является минимизация расхода РТ путем выбора на маневр группы ТМ, СПД которых на момент включения обладают максимальным удельным импульсом тяги, и тем самым поддержание максимального синергетического ресурса РТ [1]. При этом синергетический ресурс РТ, использованный для выполнения динамической части программы полета АКА, заменяет и тем самым сохраняет материальный ресурс РТ, который был бы израсходован в тех же целях без применения предлагаемого метода выбора ТМ на маневр, включающего исследование вынужденных движений и реакций ТМ при функционировании в составе системы электроракетных двигателей.

Третья проблема – наблюдение (С). «...Заключается в поиске алгоритма наблюдения через оценивание состояния динамической системы в заданный момент времени на основе регистрации и исследования реакции системы» [3].

Если обозначить этот алгоритм через A_0 , то в общем виде его можно рассматривать как отображение A_0 : «реакция» \rightarrow «состояние, t_H ».

В рамках рассматриваемой проблемы выделяют две подпроблемы [3]:

С1. Наблюдение состояния динамической системы при отсутствии управляющего воздействия – свободной реакции системы:

A_{0CB} : «свободная реакция» \rightarrow «состояние, t_H ».

С2. Наблюдение состояния динамической системы при известном (заданном или подлежащем выбору в интересах задачи наблюдения) управляющем (тестовом) воздействии – вынужденной реакции системы:

A_{0BH} : «вынужденная реакция» \rightarrow «состояние, t_H ».

В прикладных задачах наблюдения важную роль играет также выбор момента времени оценки состояния t_H . Рассматриваются три варианта этого задания.

В первом из них $t_H = t_0$ – оценка состояния системы в начальный момент времени. Во втором при $t_H = t$ – оценка текущего состояния динамической системы. В третьем $t_H > t$ – оценка состояния системы в будущем, это задача прогнозирования.

Различают два вида алгоритма наблюдений: 1) системно-кибернетические A_0 , построенные на оценивании соответствия объекта нормам по измеренным параметрам процессов в системных объектах; 2) системно-синергетические A_0^s – оценивание параметров процессов, недоступных измерениям в одних системных объектах, связанных с внешней средой, по измерениям параметров процессов, отражающих физические, энергетические и материальные воздействия и отображающих информационные взаимодействия в других системных объектах, связанных с первыми объектами и внешней средой [8]. Принципы построения соответствующих алгоритмов наблюдения существенно отличаются друг от друга. В связи с этим различают и соответствующие три варианта проблемы наблюдения.

Первый вариант (C0) – оценка начального состояния динамической системы. Различают две версии варианта этой проблемы: первая C01 – исследование свободной реакции системы, а вторая C02 – исследование вынужденной реакции, которая является ответом либо на известное управляющее воздействие, либо на специально организуемое исследователем (наблюдателем) тестовое воздействие.

Оценка начального состояния при $t_H = t_0$:

– оценивание начального состояния при исследовании свободной реакции динамической системы. Варианты решения задач этого задания при системно-кибернетических наблюдениях C01 α , C01 β , C01 γ , C01 δ начального состояния, разрабатываемые в соответствии с четырьмя типами возмущающей среды (α , β , γ , δ), дополняются вариантом решения задачи для динамической системы, погруженной в синергетически возмущающую среду C01 σ . Примером могут служить наблюдаемые начальные условия по накопленному вектору кинетического момента $K(t_0)$ в системе электродвигателей маховиков (свободной реакции системы) на момент включения тяговых модулей (ТМ) системы электроракетных двигателей для проведения маневра. От начальных условий зависит выбор состава ТМ при выполнении динамической операции [1]. Начальные условия зависят от внешних силовых факторов, воздействующих на АКА. Синергетически возмущающей является среда орбитального полета, в которой на АКА действуют моменты от внешних сил (гравитационных, светового давления и других), приводящих к накоплению кинетического момента в процессе поддержания орбитальной ориентации с использованием системы ЭДМ. По значению параметра порядка – вектору кинетического момента $K(t_0)$ в системе ЭДМ – на основе математического моделирования можно оценивать внешние возмущения, действующие на АКА. По результатам наблюдения указанных начальных условий производится выбор ТМ, обеспечивающих совмещение режимов коррекции орбиты и разгрузки ЭДМ от накопленного кинетического момента [14]. Тем самым приобретается синергетический ресурс по РТ за счет исключения режима специально выделяемой разгрузки ЭДМ с использованием РД;

– оценивание начального состояния при исследовании вынужденной реакции динамической системы. Варианты решения задач при системно-кибернетических наблюдениях C02 α , C02 β , C02 γ , C02 δ начального состояния, разрабатываемые в соответствии с четырьмя типами возмущающей среды (α , β , γ , δ), дополняются вариантом решения аналогичной задачи для динамической системы, «погруженной» в синергетически возмущающую среду C02 σ . Примером наблюдения, относящегося к типовому варианту решения задачи C02 σ , является принудительный выбор вектора кинетического момента $K'(t_0)$ в системе ЭДМ в качестве начального условия для проведения маневра на ТМ [15], от которого зависит продолжительность их работы. Для этого использовались направленные действия управляющих моментов, обусловленных силами светового давления на поверхность СБ и взаимодействием магнитного поля Земли с собственным магнитным моментом СБ [16]. Критерием оценочного суждения по результатам наблюдения было число включений ТМ. Целью решения задачи являлось получение синергетического ресурса в системе электроракетных двигателей путем минимизации числа включений ТМ при проведении маневров с соблюдением одних и тех же условий приобретения характеристической скоро-

сти АКА, т. е. на выполнение одной и той же динамической операции меньшим расходом ресурса.

Второй вариант (С1) – оценка текущего состояния при $t_H = t$. Различают две версии варианта этой проблемы: первая С11 – исследование свободной реакции системы, а вторая С12 – исследование вынужденной реакции:

– оценивание текущего состояния при исследовании свободной реакции динамической системы. Варианты решения задач при системно-кибернетических наблюдениях С11 α , С11 β , С11 γ , С11 δ текущего состояния, разрабатываемые в соответствии с четырьмя типами возмущающей среды ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$), дополняются вариантом решения аналогичной задачи для динамической системы, «погруженной» в синергетически возмущающую среду С11 σ . Наблюдение, относящееся к типовому варианту С11 σ , раскрывается в методе синергетических наблюдений собственного магнитного момента солнечных батарей для разгрузки ЭДМ от накопленного кинетического момента. Производятся синергетические наблюдения магнитных моментов \vec{L}_m токовых контуров СБ посредством измерения суммарного вектора кинетического момента аппарата. Целью наблюдений является определение величины и направления собственного магнитного момента СБ для применения управляющего момента \vec{M}_m от взаимодействия \vec{L}_m с МПЗ при разгрузке ЭДМ от накопленного кинетического момента [10]. Наблюдения проводятся в режиме поддержания штатной орбитальной ориентации АКА – геостационарного спутника связи. Назначаются два интервала измерений, на которых осуществляются измерения текущих значений векторов кинетического момента в системе ЭДМ. Первый интервал измерений выбирается на теневой, а другой – на освещенной Солнцем части орбиты. Разница в значениях кинетического момента позволяет за счет специальной математической обработки динамических параметров АКА вынести оценочные суждения о величине и направлении \vec{L}_m , формируемых токовыми контурами СБ. В последующем «безрасходная» разгрузка ЭДМ от накопленного кинетического момента позволяет получить синергетический ресурс РТ РД за счет замены их применения в этих же целях;

– оценивание текущего состояния при исследовании вынужденной реакции динамической системы. Варианты решения при системно-кибернетических наблюдениях С12 α , С12 β , С12 γ , С12 δ текущего состояния, разрабатываемые в соответствии с четырьмя типами возмущающей среды ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$), дополняются вариантом решения аналогичной задачи для динамической системы, «погруженной» в синергетически возмущающую среду С12 δ . Вынужденной реакцией системы управления движением АКА следует считать разгрузку системы ЭДМ от накопленного кинетического момента с использованием РД, так как при достижении предельных значений области S располагаемых его значений система ЭДМ перестает быть работоспособной. При системно-кибернетических наблюдениях разгрузку осуществляют при достижении годографом текущих значений вектора-функции кинетического момента системы ЭДМ, поверхности области S . Таким образом, наблюдение ведется с учетом причинного способа самоорганизации разгрузки СГ. Если решать эту же задачу в синергетически возмущающей среде, за счет учета взаимосвязей и взаимодействий бортовых систем, а также наблюдения за влиянием на процесс накопления кинетического момента факторов внешней среды, то разгрузку необходимо проводить направляемым (целевым) способом. При этом необходимо либо исключить применение в этих целях

РД и использовать моменты внешних сил [16], либо использовать РД с максимальными значениями коэффициентов эффективности разгрузочных моментов [1]. В каждом случае будет получен синергетический ресурс РТ, использованный для выполнения динамической части программы полета АКА, заменяющий и тем самым сохраняющий материальный ресурс РТ, который был бы израсходован в тех же целях.

Третий вариант (С2) – оценка будущего состояния при $t_H > t$. Различают две версии варианта этой проблемы: первая С21 – исследование свободной реакции системы, а вторая С22 – исследование вынужденной реакции:

– оценивание будущего состояния при исследовании свободной реакции динамической системы. Варианты решения задач при системно-кибернетических наблюдениях С21 α , С21 β , С21 γ , С21 δ будущего состояния, разрабатываемые в соответствии с четырьмя типами возмущающей среды (α , β , γ , δ), дополняются вариантом решения аналогичной задачи для динамической системы, «погруженной» в синергетически возмущающую среду С21 σ . В рамках решения задачи С21 σ разработан метод поддержания трехосной ориентации АКА с ЭДМ и целевой нагрузкой в виде бортового радиотехнического комплекса спутниковой связи [16]. Техническим результатом метода является сохранение штатной ориентации АКА в условиях отсутствия информации от приборов, измеряющих параметры углового движения АКА. Таким образом, обеспечивается синергетический ресурс по продолжительности работы гироскопических измерителей вектора угловой скорости, звездных и других датчиков внешней информации;

– оценивание будущего состояния при исследовании вынужденной реакции динамической системы. Варианты решения задач при системно-кибернетических наблюдениях С22 α , С22 β , С22 γ , С22 δ будущего состояния, разрабатываемые в соответствии с четырьмя типами возмущающей среды (α , β , γ , δ), дополняются вариантом решения аналогичной задачи для динамической системы, «погруженной» в синергетически возмущающую среду С22 σ . Примером решения задачи типа С22 σ служит модернизированный метод поддержания трехосной ориентации системой управления движением АКА с ЭДМ и целевой нагрузкой [17, 18]. В отличие от ранее рассмотренных действий метода решения задачи С21 σ , для обеспечения поддержания устойчивой трехосной ориентации АКА в орбитальной системе координат выполняется смещение кинетического момента ЭДМ, ось вращения которого направлена по оси OZ и в штатной ориентации совпадает с направлением вектора орбитальной угловой скорости. Для этой цели включением РД создается такой управляющий момент вынужденной реакции динамической системы, наличие которого приводит к изменению (смещению) кинетического момента по указанной оси на требуемую величину в пределах области S располагаемого кинетического момента в системе ЭДМ. В результате ось OZ становится стабилизированной осью, относительно которой строится гироскопическая орбита для управления АКА [8]. При этом поддержание ориентации становится более устойчивым, что приводит к увеличению продолжительности интервалов управления угловым движением АКА по прогнозируемым значениям кинетического момента ЭДМ. Тем самым уменьшается число необходимых корректировок расхождений между прогнозируемыми и реальными значениями кинетического момента ЭДМ. В свою очередь, это приводит к увеличению синергетического ресурса приборов, участвующих в измерении параметров углового движения АКА, по числу включений и продолжительности работы.

Четвертая проблема – выбор (D). Заключается в целенаправленном выборе тех или иных альтернативных элементов, определяющих свойства и поведение рассматриваемой системы [3]. Проблема делится на две подпроблемы (D1, D2).

D1. Выбор структурных характеристик (параметров) системы для обеспечения желательных свойств системы.

К настоящему времени структура процесса управления космическими полетами, в том числе АКА, достаточно детально проработана и подтверждена на практике, а для ее реализации созданы средства и методы, образующие контуры системы управления полетом [19]. Информационное обеспечение процесса в контуре управления полетом, включающее планирование полета, реализацию разработанного плана, контроль (наблюдение) полета, принятие решения по результатам контроля и реализацию принятого решения, гарантирует желательные свойства АКА как сложной технической системы. При этом выбор структурных и ресурсных характеристик АКА напрямую зависит от информационно-командного обеспечения.

Ресурсное обеспечение полета зависит от того, как спланированы входные воздействия на БС с учетом управляющих и возмущающих воздействий. Использование системно-кибернетических исследований БС установлены четыре множества решений задач планирования, определяющих выбор структурно-функциональных характеристик систем управления полетом при входных воздействиях в составе вариантов детального плана полета АКА $D1\alpha$, $D1\beta$, $D1\gamma$, $D1\delta$ в зависимости от того, в какую возмущающую среду «погружено» планирование орбитального полета. Каждое из множеств детального плана является функциональным. При этом можно провести оценивание элементов множеств по некоторому критериальному правилу. В данном случае оценивание производится по ресурсному обеспечению полета, а критерием является располагаемое полетное время (РПВ)¹ [20].

В зависимости от вариантов детального плана в условиях космического полета АКА присутствуют постоянные входные воздействия на процессы в БС, приводящие к изменению показателей равномерности и интенсивности выработки ресурсов систем [21]. Управление ресурсами бортовых систем АКА на n - x этапах, $\mathcal{E}_n = 1, 2, \dots, \mathcal{E}_N$, $[t_0, t_k] \mathcal{E}_n$, для наглядности представлено в виде линейных ориентированных графов (орграфов – org) по числу компонент множества интегрального полетного ресурса (ИПР)

$$R_S = \{G, W_a, W_{sb}, R_u, R_a, R_c, R_h, R_z, R_b, R_d, R_e, R_f, R_k\}, \quad (1)$$

включающего ресурсы бортовых систем управления движением и навигации (R_u), бортовых цифровых вычислений (R_a), управления бортовой аппаратурой (R_c), обеспечения теплового режима (R_h), ориентации СБ (R_z), служебного канала управления (R_b), объединенной двигательной установки (R_d), энергоснабжения (R_e), сбора бортовой информации (R_f) и элементов конструкции (R_k) аппарата; рабочего тела электроракетных двигателей (G), генераторов (W_{sb}) и аккумуляторов электроэнергии (W_a) (рис. 1).

¹ Располагаемое полетное время – интервал полетного времени АКА или его системы, в течение которого обеспечивается выполнение номинальной программы полета до полного расхода ресурса аппарата или системы [20].

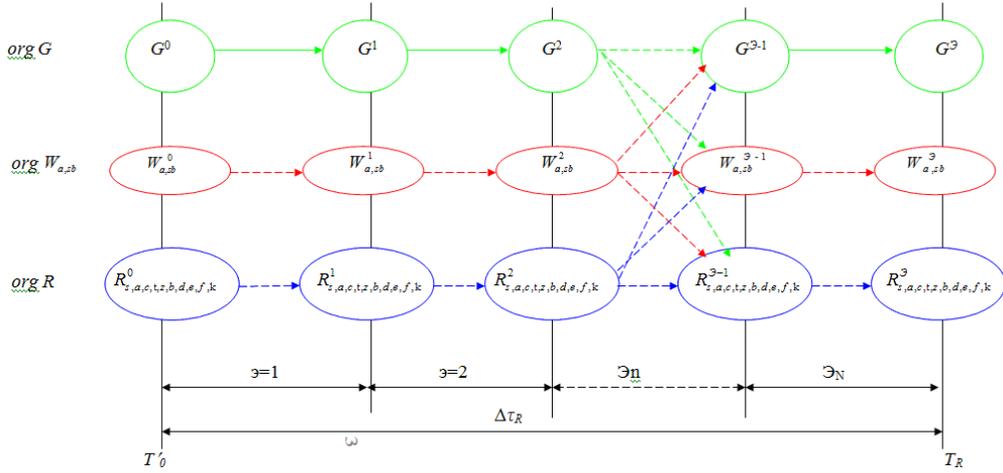


Рис. 1. Линейный оргграф расхода полетного ресурса АКА: переходными стрелками между линиями оргграфов условно показаны направления возможного перераспределения ресурсов БС при погружении управления полетом в синергетически возмущающую среду

Если проводить отчет РПВ с начала штатной эксплуатации аппарата на орбите T_0 и вести до расчетного момента завершения его полета T_R , то первоначальный прогноз на успешную реализацию программы полета (ПП) зависит от выполнения условий по РПВ, определяемому по каждой системе $(\Delta\tau_{r(s,a,c,h,z,b,d,e,f,k)})$, а также по энергоресурсам $(\Delta\tau_{W_{a, sb}})$ и РТ $(\Delta\tau_G)$:

$$\begin{aligned} & (\Delta\tau_{r(s,a,c,h,z,b,d,e,f,k)}, \Delta\tau_G, \Delta\tau_{W_{a, sb}}) \geq \Delta\tau_R, \\ & \Delta\tau_{r(s,a,c,h,z,b,d,e,f,k)} = \Delta\hat{\tau}_{r(s,a,c,h,z,b,d,e,f,k)} - \Delta\tilde{\tau}_{r(s,a,c,h,z,b,d,e,f,k)}, \quad \Delta\tau_G = \Delta\hat{\tau}_G - \Delta\tilde{\tau}_G, \\ & \Delta\tau_{W_{a, sb}} = \Delta\hat{\tau}_{W_{a, sb}} - \Delta\tilde{\tau}_{W_{a, sb}}, \quad \Delta\tau_R = T_R - T_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta\hat{\tau}_{r(s,a,c,h,z,b,d,e,f,k)}$, $\Delta\hat{\tau}_G$, $\Delta\hat{\tau}_{W_{a, sb}}$ – запасы располагаемого полетного времени по ресурсам бортовых систем, РТ и источникам электроэнергии на момент отделения аппарата от ракеты; $\Delta\tilde{\tau}_{r(s,a,c,t,z,b,d,e,f,k)}$, $\Delta\tilde{\tau}_G$, $\Delta\tilde{\tau}_{W_{a, sb}}$ – израсходованная часть располагаемого полетного времени по ресурсам бортовых систем, РТ и источникам электроэнергии на этапе тестовых проверок до ввода аппарата в штатную эксплуатацию.

При этом определяется множество начального ИПР на момент времени T_0 :

$$R_s^0 = \{G, W_a, W_{sb}, R_s, R_a, R_c, R_h, R_z, R_b, R_d, R_e, R_f, R_k\}^0.$$

По завершении n -го этапа управления (ϑ_n) производится количественная накопительная оценка изменения ресурсных показателей множества (1) (см. рис. 1):

$$\Delta R^{\vartheta_n} = \{G, W_a, W_{sb}, R_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}\}^{\vartheta_n}.$$

Далее определяется множество остаточного ИПР в конце каждого этапа:

$$\Delta R_{\Sigma}^{\vartheta_n} = \{G^0 - G^{\vartheta_n}, W_a^0 - W_a^{\vartheta_n}, W_{sb}^0 - W_{sb}^{\vartheta_n}, R_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}^0 - R_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}^{\vartheta_n}\}^{\vartheta_n}. \quad (3)$$

По значениям элементов множества (3) и коэффициентам расхода ресурса $(k_G, k_{W_a}, k_{W_{sb}}, k_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k})$ на единицу полетного времени определяют текущее РПВ по РТ, источникам электроэнергии и ресурсам БС:

$$\Delta \tau_G^{\mathcal{E}_n} = \frac{1}{k_G} (G^0 - G^{\mathcal{E}_n}) \quad ; \quad \Delta \tau_{W_a}^{\mathcal{E}_n} = \frac{1}{k_a} (W_a^0 - W_a^{\mathcal{E}_n}) \quad ; \quad \Delta \tau_{W_{sb}}^{\mathcal{E}_n} = \frac{1}{k_{sb}} (W_{sb}^0 - W_{sb}^{\mathcal{E}_n}) \quad ;$$

$$\Delta \tau_{R_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}}^{\mathcal{E}_n} = \frac{1}{k_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}} \left(R_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}^0 - R_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}^{\mathcal{E}_n} \right).$$

Линии орграфов отображают состояние остаточных полетных ресурсов динамических систем, бортовой энергетики и РТ по РПВ, при этом наглядно проявляются орграфы минимальных рангов критического пути, определяющие РПВ АКА:

$$\text{org} \left(\tau_{\min}^{\mathcal{E}_n} \right) = \min \left(\Delta \tau_G^{\mathcal{E}_n}, \Delta \tau_{W_a}^{\mathcal{E}_n}, \Delta \tau_{W_{sb}}^{\mathcal{E}_n}, \Delta \tau_{R_{s,a,c,h,z,b,d,e,f,k}}^{\mathcal{E}_n} \right). \quad (4)$$

Для увеличения длины орграфа критического пути по РПВ на этапе \mathcal{E}_n вводится множество вариантов детального плана полета АКА, «погруженного» в синергетически возмущающую среду $D1 \sigma$. При этом производится формирование критерия управления РПВ для орграфа минимального ранга согласно постулату С.В. Микони: «...критерий можно рассматривать как цель, измеряемую в некоторой шкале» [22].

В качестве примера рассматривается формирование критерия минимизации затрат РТ (G) электроракетных двигателей на этапе за счет синергетического ресурса для увеличения критического пути РПВ АКА. Для этого производится:

1. Построение интервальной шкалы $G(\tau)$ оценки прогноза расхода РТ G_x на момент времени τ_x окончания этапа планирования ПП от начального момента времени τ_{x0} , с определением начального ресурсного запаса РТ ΔG_x :

$$G_x = G_{x0} - k_g(\tau) \Delta \tau, \quad G(\tau) \in [G_x, G_{x0}], \quad \Delta G_x = G_{x0} - G_0; \quad \Delta \tau = \tau_x - \tau_{x0},$$

где G_{x0} – масса РТ в баллонах хранения на момент начала прогноза τ_{x0} ; G_0 – остаток РТ в элементах конструкции средств хранения и подачи («незабор») на момент завершения эксплуатации электроракетной двигательной установки АКА; $k_g(\tau) = \hat{k}_g(\tau) \vee \tilde{k}_g(\tau)$ – коэффициент расхода РТ на выполнение ПП в единицу полетного времени с применением $\tilde{k}_g(\tau)$ или без применения $\hat{k}_g(\tau)$ методов управления БС в синергетически возмущающей среде с целью получения синергетического ресурса

$$\hat{k}_g(\tau) = \frac{\Delta \hat{G}_x}{\Delta \tau}, \quad \tilde{k}_g(\tau) = \frac{\Delta \tilde{G}_x}{\Delta \tau},$$

где $\Delta \hat{G}_x$, $\Delta \tilde{G}_x$ – затраты РТ на интервале $\Delta \tau$ при выполнении ПП без использования и с использованием указанных методов управления БС.

2. Постановка однокритериальной задачи минимизации расхода РТ относительно нижней границы шкалы для $m-x$ вариантов плана ПП за счет использования методов получения синергетического ресурса РТ:

$$k_{g_m}(\tau) \rightarrow \min, \quad k_{g_m}(\tau) \in \left[\tilde{k}_{g_m}(\tau), \hat{k}_g(\tau) \right]_m, \quad m \in \overline{1, M}.$$

Минимизация коэффициента расхода РТ $k(\tau)_{g_m} \rightarrow \min$ за счет получения синергетического ресурса отвечает требованию целевой функции критерия максимизации $\Delta G_x \rightarrow \max$ ресурсного запаса РТ по завершению работы на интервале $\Delta \tau$.

При выполнении динамической операции на этапе без расхода РТ $\Delta \tilde{G}_x = 0$ продолжительность критического пути орграфа РПВ по рассматриваемому ресурсному параметру увеличится на время продолжительности этапа. В противном случае значение указанного времени будет прямо пропорционально количеству сохраненного на этапе РТ.

В процессе полета АКА происходит постепенное перераспределение остаточных полетных ресурсов (3) (см. рис. 1). В результате очередные компоненты ИПР (1) начинают формироваться в виде орграфов критического пути. Для них аналогичным образом производится постановка однокритериальных задач получения синергетического ресурса для увеличения РПВ АКА.

Таким образом осуществляется последовательная процедура формирования многокритериальной оценки эффективности управления РПВ АКА с учетом синергетического ресурсного потенциала по всем параметрам ИПР на последовательные однокритериальные оценки.

D2. Проблема управления: выбор управляющего воздействия из заданного множества допустимых альтернатив для обеспечения желательного процесса управления. С системно-кибернетической точки зрения «...проблема управления D2 можно интерпретировать как нахождение совокупности двух (!) алгоритмов, первый из которых является алгоритмом наблюдения, т. е. позволяет по зафиксированной реакции определить состояние системы в требуемые моменты времени, а второй является собственно алгоритмом управления и определяет управляющее воздействие как функцию времени и указанного состояния» [3].

Алгоритм управления может быть представлен в виде следующего отображения:

A_c : «состояние» \rightarrow «управляющее воздействие».

Решение проблемы управления D2 производится в виде пары алгоритмов $\langle A_o, A_c \rangle$ наблюдения A_o и управления A_c в зависимости от четырех типов возмущающей среды, разделенных по множествам задач D2 α , D2 β , D2 γ , D2 δ .

В случае применения системно-синергетического подхода к проблеме D2 ее решение производится в виде пары алгоритмов $\langle A_o^\sigma, A_c^\sigma \rangle$ синергетических наблюдений A_o^σ [9] и переменного управления A_c^σ [20].

Синергетические наблюдения позволяют за счет учета информационно-энергетических взаимосвязей заменять измеряемые параметры одних систем вычисляемыми параметрами на основе измерений в других системах. В случае недостаточного количества измеренной информации в БС для анализа процессов при выполнении номинальных операций информация дополняется наблюдениями в специально созданных контролируемых условиях функционирования систем (тестовых проверках БС). При этом учитываются как структурные взаимоотношения между системами, так и энергетические и информационные взаимосвязи между разными физическими процессами на борту АКА (электродинамическими, бародинамическими, механическими, электрическими, магнитодинамическими и др.).

Синергетические наблюдения являются новым методом научного исследования свойств бортовых процессов, позволяющим проводить наблюдения за функционированием БС и расходом бортовых ресурсов КА в условиях недостатка информации, а также верифицировать значения параметров через другие, измеренные во взаимосвязанных физических процессах.

В отличие от КТУ, где система управления рассматривается как совокупность управляющей подсистемы и объекта управления – динамической системы, в СТУ объект управления (т. е. динамическая система) одной системы управления может выступать в роли управляющей подсистемы в другой системе управления [7]. Принцип варибельности построения системы управления заключается в том, что ее управляющая подсистема может одновременно управлять несколькими динамическими системами за счет существующих между ними синергетических информационно-энергетических связей, т. е. движение одной динамической системы является управляющим воздействием для другой. В условиях космического полета это позволяет получать синергетический ресурс систем управления по продолжительности работы за счет выявления дополнительных функциональных резервов для управляющих подсистем.

Таким образом, в условиях «погружения» систем управления БС АКА в синергетически возмущающую среду необходимо проводить их дополнительные исследования решением частных задач множества $D2\sigma$. При этом вводится обобщенное понятие регулятора движения процессов в динамической системе, которым является материальный объект, управляющий этим процессом через воздействие в условиях влияния синергетически возмущающей среды. Материальным объектом может быть управляющая подсистема или объект управления смежной системы.

При проведении морфологической структуризации системных исследований по проблеме $D2$ второй элемент пары алгоритмов $\langle A_o, A_c \rangle$ зависит от взаимосвязи движения и реакции системы. В [3] подвергаются структуризации два варианта этой подпроблемы управления – $D2p$ и $D2s$.

Взаимосвязь движения и реакции системы на практике фиксируется измерительными устройствами. Это означает, что искомым алгоритм управления A_o зависит от состава применяемых измерителей. Вследствие этого решение рассматриваемых подпроблем управления $D2p$ и $D2s$ обычно производится с учетом принципа разделения на два этапа: на первом из них решается проблема наблюдения – задача нахождения алгоритма A_o , а на втором – строится алгоритм управления A_c в предположении, что состояние системы известно. Этапы реализуются последовательно друг от друга, после чего их результаты объединяются.

Вариант $D2p$ программного управления «...основан на предположении, что состояние системы точно известно в некоторый начальный момент времени и управляющее воздействие формируется как некоторая функция этого состояния и времени» [3]. С учетом вариантов возмущающей среды решение проблемы программного управления динамической системой представлено в КТУ четырьмя морфологическими разновидностями множеств задач: $D2p\alpha$, $D2p\beta$, $D2p\gamma$, $D2p\delta$.

Использование КВС подхода к морфологическому анализу проблематики теории системных исследований предполагает формирование пятой разновидности множества задач программного управления $D2p\sigma$. Связано это с тем, что их

решение производится в виде пары алгоритмов $\langle A_o^\sigma, A_c^\sigma \rangle$ синергетических наблюдений A_o^σ [9] и переменного управления A_c^σ [20]. С помощью синергетических наблюдений формируются начальные условия, с учетом которых производится выбор варианта управления динамической системой. Например, от начальных условий по вектору кинетического момента в системе ЭДМ при проведении маневра с использованием системы электроракетных двигателей с осями тяг, расположенных под углом к осям связанного базиса, зависит выбор номера двигателя для первоначального включения и последующих включений на маневре [15]. При этом указанные начальные условия формируются по результатам синергетических наблюдений за воздействием на АКА внешних возмущающих моментов, парирование которых осуществляется системой ЭДМ при поддержании заданной ориентации аппарата. Дальнейшее управление кинетическим моментом в системе ЭДМ в процессе проведения маневра осуществляется с учетом начальных условий.

Вариант D2s управления при полной информации о состоянии объекта управления «...формируется ... как управление с обратной связью – как функция текущего состояния» [3]. С учетом вариантов возмущающей среды решение проблемы управления при полной информации о состоянии объекта управления представлено в КТУ четырьмя морфологическими разновидностями множеств задач: $D2s\alpha$, $D2s\beta$, $D2s\gamma$, $D2s\delta$.

Использование синергетических наблюдений при формировании закона управления приводит к формированию пятой разновидности множества задач $D2s\sigma$.

При этом синергетические наблюдения позволяют обеспечить регулирование процессов в объектах управления с учетом полной информации об их состоянии. Связано это с использованием для оценивания одного и того же объекта управления информационных и энергетических его взаимосвязей со смежными, одновременно работающими системами. Например, параметрами порядка, по которым ведется управление стационарным электроракетным плазменным двигателем, являются разрядные ток и напряжение [9]. При этом произвести косвенную оценку технического состояния двигателя можно по измеренным значениям ускорения, которое приобретает АКА от воздействия тяги двигателя; по измерениям параметра кинетического момента в системе ЭДМ при взаимодействии момента от тяги двигателя с управляющим моментом, создаваемым ЭДМ [1]; по изменению бародинамических параметров (давлению и температуре) газообразного рабочего тела в расходной емкости, из которой производится забор, позволяющих определять секундный массовый расход РТ в двигателе для оценки его тяги. Получить максимально достоверную (полную) информацию о номинальной производящей характеристике объекта управления – тяге электроракетного двигателя – и проконтролировать ее значения позволяет сопоставление вычислений по измеренным параметрам процессов в различных системах, одновременно функционирующих на борту АКА по различным физическим законам. Если значения тяги, рассчитанные разными способами, равны, то это дает полную (абсолютную) гарантию достоверности контролируемого параметра. Далее по тяге и ее удельному импульсу проводится оптимизация управления по критерию расхода массы рабочего тела на выполнение типовой динамической полетной операции – проведение маневра АКА [1].

В результате проведенного анализа проблематики теории системных исследований АКА в синергетически возмущающей среде представлено морфологическое дерево, содержащее четыре ветви (моделирование – анализ – наблюдение – выбор) (рис. 2), на которых находятся 15 листьев – частных σ -задач, представляющих системно-синергетические исследования.

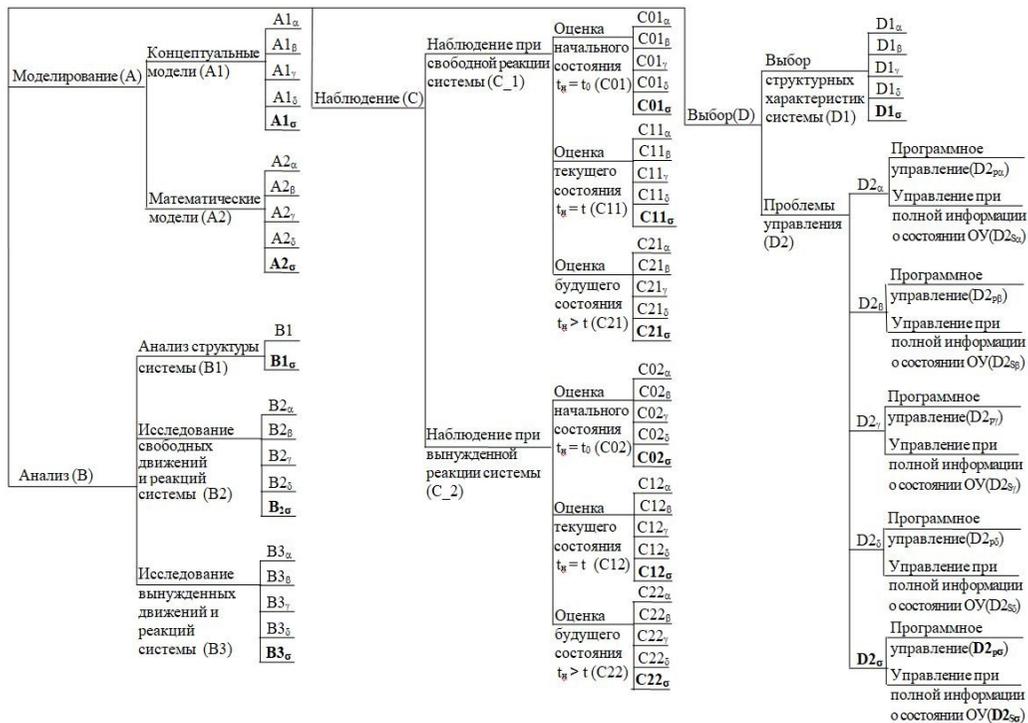


Рис. 2. Морфологическое дерево анализа системно-кибернетических и системно-синергетических исследований систем управления АКА

При проведении системно-кибернетических исследований число листьев – частных задач будет зависеть от степени структуризации априорных сведений о внешней среде. В данном случае морфологическая структура включает 57 таких задач. Следуя методике структуризации морфологического дерева, предложенной В.Н. Калининым [3], возмущающую среду с неизвестными характеристиками (δ) можно рассматривать как среду с нечетким описанием ($\delta 1$), с неизвестностью ($\delta 2$), с комбинированным описанием неопределенных факторов ($\delta 3$) и т. д., как это предлагается в монографии [11]. При многообразии динамических систем различной природы исследователь может для достоверного анализа оправданно проводить дополнительную декомпозицию представленных системно-кибернетических исследовательских задач-листьев на сохраненных ветвях морфологического дерева.

Выводы

В качестве итога морфологической структуризации проблематики теории системных исследований движения динамических систем в АКА отмечается, что морфологическая схема проведения системно-кибернетических исследований, представленная в виде дерева, имеющего четыре ветви (моделирование – ана-

лиз – наблюдение – выбор) с размещением 57 листьев – частных задач, дополнена 15 системно-синергетическими частными задачами при управлении динамическими системами в условиях синергетически возмущающей «сигма-среды», включающими: моделирование $A1\sigma$, $A2\sigma$; анализ $B1\sigma$, $B2\sigma$; $B\sigma$; наблюдение $C01\sigma$, $C02\sigma$; $C11\sigma$, $C12\sigma$; $C21\sigma$, $C22\sigma$; выбор $D1\sigma$, $D2\sigma$; $D2p\sigma$, $D2s\sigma$.

В развитие математической теории динамических систем применительно к управлению полетом АКА производится перевод управления из стохастически возмущающей в синергетически возмущающую среду. Переход осуществляется за счет синергетических наблюдений, позволяющих, с одной стороны, перевести множество допустимых ВВ стохастической среды во множество известных синергетических ВВ, и с другой стороны, дополнить их новыми синергетическими ВВ, которые до этого относились к среде с неизвестными характеристиками. При этом максимально достоверную информацию о процессах, происходящих в БС, позволяет получить идентификация параметров порядка самоорганизации движения динамических систем, которая производится на основе разных физических принципов.

Решение новых задач по каждому из объектов управления (динамических систем), которыми являются бортовые системы АКА, позволяет вывести ресурсное обеспечение полета на новый уровень, дополнив его на базе существующего структурно-функционального ресурса синергетическими ресурсами, а также обеспечив предупреждение отказов бортовых систем в условиях развития в них аномальных расчетных и нерасчетных процессов. Ощутимым результатом в ресурсном обеспечении полета АКА явилось наличие представленных в статье синергетических ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковтун В.С., Платонов В.А., Богачёв А.В. Методика обеспечения полета автоматических космических аппаратов «Ямал» синергетическим ресурсом рабочего тела электроракетных двигателей // Космическая техника и технологии. 2023. № 4 (43). С. 88–103.
2. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М., 2005. 291 с.
3. Калинин В.Н. Морфологический анализ проблематики теории системных исследований // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 1 (24). С. 89–107.
4. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. М.: КомКнига, 2006.
5. Ковтун В.С. Когнитивная агрегативно-поточковая метамодель процесса управления полетом автоматического космического аппарата // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2020. Т. 28, №3. С. 35–60. doi: org/10.14498/tech.2020.3.3.
6. Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В. Байпасность как атрибут живучести автоматических космических аппаратов в аномальных полетных ситуациях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т. 14, № 4. С. 17–37.
7. Ковтун В.С., Павлов А.Н. Когнитивно-синергетический подход к проектированию автоматических космических аппаратов с бортовыми системами, обладающими свойствами вариабельности // MMRIST 2020. Модели и методы исследования информационных систем на транспорте 2020. Санкт-Петербург. Сборник материалов семинара опубликован в CEUR под номером 2803 (urn:nbn:de:0074-2803-0).
8. Раушенбах Б.В., Токарь Е.Н. Управление ориентацией космических аппаратов. М.: Наука, 1974. 594 с.
9. Ковтун В.С. Метод проведения синергетических наблюдений процессов на борту космического аппарата // Известия вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 11. С. 995–1002. doi: 17586/0021-3454-2020-63-11-995-1002.

10. Патент RU 2176972 С1. МКИ В 64 G 1/24 / *Ковтун В.С., Банит Ю.Р.* Способ определения магнитного момента солнечных батарей космического аппарата с системой силовых гироскопов // *Изобретения*. 2001. № 35.
11. *Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.
12. *Ковтун В.С., Севастьянов Д.Н., Пищулин В.А., Фомин Л.В., Бедин Б.И.* Определение расхода ксенона в электроракетных плазменных двигателях при эксплуатации космического аппарата «Ямал» // *Известия РАН. Энергетика*. 2009. № 1. С. 59–66.
13. *Ковтун В.С., Лобанов В.Б., Городецкий А.А.* Моделирование тепловых процессов, протекающих в никель-водородных аккумуляторных батареях с общим корпусом при эксплуатации космического аппарата на геостационарной орбите // *Известия РАН. Энергетика*. 2007. № 4. С. 22–40.
14. Патент RU 2112713 С1. МКИ В 64 G 1/24 / *Ковтун В.С., Платонов В.Н.* Способ управления космическим аппаратом с помощью реактивных исполнительных органов при поддержании заданной ориентации // *Изобретения*. 1998. № 16.
15. *Ковтун В.С.* Методы управления геостационарным спутником с помощью маховиков и электроракетных плазменных двигателей // *Космонавтика и ракетостроение*. 2009. № 55. С. 60–68.
16. Патент RU 2196710 С2. МКИ В 64 G 1/28, 1/44 / *Богачев А.В., Ковтун В.С., Платонов В.Н.* Способ формирования управляющих моментов на космический аппарат с силовыми гироскопами и поворотными солнечными батареями и система для его осуществления // *Изобретения*. 2003. № 2.
17. Патент RU 2341419 С2. В64 G 1/28 / *Банит Ю.Р., Ковтун В.С., Беляев М.Ю., Платонов В.Н.* Способ поддержания трехосной ориентации космического аппарата с силовыми гироскопами и целевой нагрузкой // *Изобретения*. 2008. № 35.
18. Патент RU 2356802 С2. МПК В64 G 1/00/ *Платонов В.Н., Беляев М.Ю., Банит Ю.Р., Ковтун В.С.* Способ поддержания трехосной ориентации космического аппарата с силовыми гироскопами и целевой нагрузкой // *Изобретения*. 2009. № 15.
19. *Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е.* Управление космическими полетами. Ч. 1. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 477 с.
20. *Ковтун В.С.* Применение методик переменного управления полетом автоматических космических аппаратов для рационального использования ресурсов бортовых систем // *Космонавтика и ракетостроение*. 2017. № 4 (97). С. 143–157.
21. *Ковтун В.С., Павлов А.Н., Соколов Б.В., Павлов Д.А., Воротягин В.Н.* Методика оперативной оценки интенсивности и равномерности расходования ресурсов бортовых систем автоматических космических аппаратов // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2020. № 4. С. 62–68.
22. *Микони С.В.* Теория принятия управленческих решений. СПб., М., Краснодар: Лань, 2015.

Статья поступила в редакцию 01 марта 2024 г.

MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF SYSTEM STUDIES OF AUTOMATIC SPACE APPLICATIONS IN A SYNERGETICALLY DISTURBING ENVIRONMENT

V.S. Kovtun¹

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia (RSC Energia)
4A, Lenin st., Korolev, Moscow Region, 141070, Russian Federation

E-mail: Vladimir.S.Kovtun@rsce.ru

Abstract. *The article considers the use of a new methodological cognitive-variable synergetic (CVS) approach to the analysis of the problems of the theory of systems research conducted on board automated spacecraft (AS) [1]. The methodological basis of the CVS approach is based on cybernetic [2] and synergetic [3] theories of dynamic systems management, as well as the methodology of proactive management of the functioning of complex technical objects (STO), based on the concept of integrated modeling of STO [2]. The results of the previously conducted morphological analysis of the problems of the theory of systemic cybernetic studies of the movement of dynamic systems are known, presented in the form of a morphological tree containing four branches (modeling-analysis-observation-choice) and leaves (particular tasks) [4]. The number of tasks is determined by the interaction of the control system (environment) with four types of effects of the disturbing environment – deterministic, stochastic, purposeful and with unknown characteristics - in the formation of input effects on the control system. The CVS approach is based on the use of a new type of environment in the management of dynamic systems – synergetically disturbing. To display the new environment and tasks on the morphological tree of problem analysis, in addition to the existing tasks of systemic cybernetic research, new leaves are introduced - particular tasks of systemic synergetic research. The paradigm of problem analysis is formed on the basis of knowledge, management experience and system research aimed at solving the problem of providing resources for on-board AS systems and the stability of their functioning during flight.*

The goal-setting of a new methodological approach to the analysis of the problems of the theory of systems research is aimed at the rational use of the main structural and functional resources of the BS, obtaining synergetic resources and preventing failures caused by calculated and non-calculated abnormal processes. Further, synergetic will be called such a type of resources that is formed by spontaneous self-organization of processes in management systems and transformed into purposeful self-organization in objectively existing multi-place relationships describing synergetic interactions and interrelations during the movement of processes in a synergetically disturbing external environment [5,6].

Keywords: *disturbing environment, morphological analysis, cybernetic control theory, synergetic control theory, cognitive variable synergetic approach, automatic spacecraft, synergetic resources.*

REFERENCES

1. Kovtun V.S., Platonov V.A., Bogachyov A.V. Metodika obespecheniya polyota avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov «Yamal» sinergeticheskimi resursami rabochego tela elektroraketnykh dvigatelej [Methodology for ensuring the flight of Yamal automatic spacecraft with a synergetic resource of the working fluid of electric rocket engines] // Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. 2023. № 4(43). Pp. 88–103. (In Russian).



© The Author(s), 2024

¹ Vladimir S. Kovtun (PhD. Sci. (Techn.)).

2. *Ohtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M.* Intellektual'nye tekhnologii monitoringa sostoyaniya i upravleniya strukturnoj dinamikoj slozhnyh tekhnicheskikh obektov [Intelligent technologies for monitoring the state and management of structural dynamics of complex technical objects]. M., 2005. 291 p. (In Russian).
3. *Kalinin V.N.* Morfologicheskij analiz problematiki teorii sistemnyh issledovanij [Morphological analysis of the problems of the theory of systemic research] // Trudy SPIIRAN. 2013. Vyp. 1 (24). Pp. 89–107. (In Russian).
4. *Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza [Synergetic methods of control of complex systems: theory of system synthesis]. M.: KomKniga, 2006. (In Russian).
5. *Kovtun V.S.* Kognitivnaya agregativno-potokovaya metamodel' processa upravleniya polyotom avtomaticheskogo kosmicheskogo apparata [Cognitive aggregative-streaming meta-model of the flight control process of an automatic spacecraft] // Vestn. Samarsk. gosud. un-ta. Ser. Tekhnich. nauki. 2020. V. 28, № 3. Pp. 35–60. doi: org/10.14498/tech.2020.3.3. (In Russian).
6. *Akhmetov R.N., Makarov V.P., Sollogub A.V.* Bajpasnost' kak atribut zhivuchesti avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov v anomal'nyh polyotnyh situacijah [Bypass As an attribute of survivability of automatic spacecraft in abnormal flight situations] // Vestn. Samarsk. gosud. aerokosmich. un-ta. 2015. V. 14, № 4. Pp. 17–37. (In Russian).
7. *Kovtun V.S., Pavlov A.N.* Kognitivno-sinergeticheskij podhod k proektirovaniyu avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov s bortovymi sistemami, obladayushchimi svojstvami variabel'nosti [Cognitive synergetic approach to the design of automatic spacecraft with onboard systems with variability properties] // MMRIST 2020. Modeli i metody issledovaniya informacionnyh sistem na transporte 2020. Sankt-Peterburg. Sbornik materialov seminarov opublikovan v CEUR pod nomerom 2803 (urn:nbn:de:0074-2803-0). (In Russian).
8. *Rauschenbach B.V., Tokar E.N.* Upravlenie orientaciej kosmicheskikh apparatov [Spacecraft orientation control]. M.: Nauka, 1974. 594 p. (In Russian).
9. *Kovtun V.S.* Metod provedeniya sinergeticheskikh nablyudenij processov na borte kosmicheskogo apparata [Method of conducting synergetic observations of processes on board a spacecraft] // Izv. Vuzov. Priborostroenie. 2020. V. 63, № 11. Pp. 995–1002. doi: 17586/0021-3454-2020-63-11-995-1002. (In Russian).
10. Patent RU 2176972 S1. MKI B 64 G 1/24 / *Kovtun V.S., Banit Yu.R.* Sposob opredeleniya magnitnogo momenta solnechnyh batarej kosmicheskogo apparata s sistemoj silovyh girkopov [A method for determining the magnetic moment of solar panels of a spacecraft with a system of power gyroscopes] // Izobreteniya. 2001. № 35. (In Russian).
11. *Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M.* Kvalimetriya modelej i polimodel'nyh kompleksov [Qualimetry of models and polymodel complexes]. M.: RAN, 2018. 314 p. (In Russian).
12. *Kovtun V.S., Sevastyanov D.N., Pishchulin V.A., Fomin L.V., Bedin B.I.* Opredelenie raskhoda ksenona v elektroraketnyh plazmennyyh dvigatelyah pri ekspluatatsii kosmicheskogo apparata «Yamal» [Determination of xenon consumption in electric rocket plasma engines during spacecraft operation Yamal] // Izvestiya RAN. Energetika. 2009. № 1. Pp. 59–66. (In Russian).
13. *Kovtun V.S., Lobanov V.B., Gorodetsky A.A.* Modelirovanie teplovyh processov, protekayushchih v nikel'-vodorodnyh akkumulyatornyh batareyah s obshchim korpusom pri ekspluatatsii kosmicheskogo apparata na geostacionarnoj orbite [Modeling of thermal processes occurring in nickel-hydrogen batteries with a common body during operation of a spacecraft in geostationary orbit] // Izvestiya RAN. Energetika. 2007. № 4. Pp. 22–40. (In Russian).
14. Patent RU 2112713 S1. MKI B 64 G 1/24 / *Kovtun V.S., Platonov V.N.* Sposob upravleniya kosmicheskim apparatom s pomoshch'yu reaktivnyh ispolnitel'nyh organov pri podderzhanii zadannoj orientatsii [A method for controlling a spacecraft using reactive actuators while maintaining a given orientation] // Izobreteniya. 1998. № 16. (In Russian).
15. *Kovtun V.S.* Metody upravleniya geostacionarnym sputnikom s pomoshch'yu mahovikov i elektroraketnyh plazmennyyh dvigatelej [Methods of controlling a geostationary satellite using flywheels and electric rocket plasma engines] // Kosmonavtika i raketostroenie. 2009. № 55. Pp. 60–68. (In Russian).
16. Patent RU 2196710 S2. MKI B 64 G 1/28, 1/44 / *Bogachev A.V., Kovtun V.S., Platonov V.N.* Sposob formirovaniya upravlyayushchih momentov na kosmicheskij apparat s silovymi girkopami i povоротnymi solnechnymi batareyami i sistema dlya ego osushchestvleniya [Method of generating control moments for a spacecraft with power gyroscopes and rotary solar panels and a system for its implementation] // Izobreteniya. 2003. № 2. (In Russian).
17. Patent RU 2341419 S2. B64 G 1/28 / *Banit Yu.R., Kovtun V.S., Belyaev M.Yu., Platonov V.N.* Sposob podderzhaniya tryohosnoj orientatsii kosmicheskogo apparata s silovymi girkopami

- i celevoj nagruzkoj [A method for maintaining the triaxial orientation of a spacecraft with power gyroscopes and a target load] // Izobreteniya. 2008. № 35. (In Russian).
18. Patent RU 2356802 S2. MPK V64 G 1/00/ *Platonov V.N., Belyaev M.Yu., Banit Yu.R., Kovtun V.S.* Sposob podderzhaniya tryohosnoj orientacii kosmicheskogo apparata s silovymi giroskopami i celevoj nagruzkoj [A method for maintaining the three-axis orientation of a spacecraft with power gyroscopes and a target load] // Izobreteniya. 2009. № 15. (In Russian).
 19. *Solovyov V.A., Lysenko L.N., Lyubinsky V.E.* Upravlenie kosmicheskimi polyotami [Space Flight Control]. Ch.1. M.: MGТУ im. N.E. Baumana, 2009. 477 p. (In Russian).
 20. *Kovtun V.S.* Primenenie metodik variabel'nogo upravleniya polyotom avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya racional'nogo ispol'zovaniya resursov bortovyh sistem [Application of methods of variable flight control of automatic spacecraft for the rational use of onboard systems resources] // Kosmonavtika i raketostroenie. 2017. № 4 (97). Pp. 143–157. (In Russian).
 21. *Kovtun V.S., Pavlov A.N., Sokolov B.V., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N.* Metodika operativnoj ocenki intensivnosti i ravnomernosti rashodovaniya resursov bortovyh sistem avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov [Methodology for the operational assessment of the intensity and uniformity of the expenditure of resources onboard systems of automatic spacecrafts] // Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina. 2020. № 4. Pp. 62–68. (In Russian).
 22. *Mikoni S.V.* Teoriya prinyatiya upravlencheskikh reshenij [Theory of managerial decision-making]. SPb., M., Krasnodar: Lan', 2015. (In Russian).

Original article submitted 01.03.2024

УДК 004.962

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

А.Е. Яковлева¹

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: nastya-yakovleva-97@mail.ru

Аннотация. Предложено использовать метод оценки эффективности (Data Envelopment Analysis) системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей, который основан на решении задачи дробно-линейного программирования при анализе множества однородных производственных объектов. Этот метод применяется для интегральной оценки качества обслуживания роботизированных транспортных средств по заданным ключевым параметрам функционирования. В качестве основных параметров эффективности системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей выбраны: коэффициент технической готовности, эксплуатационная скорость, время простоя в техническом обслуживании и ремонте, среднесуточная продолжительность работы автомобиля, средний месячный пробег транспортного средства, остаточный ресурс автомобиля, удельная стоимость эксплуатационного и технического обслуживания и удельное грузоперемещение. Решение систем линейных уравнений позволяет определить положение каждого анализируемого объекта относительно границы эффективности в многомерном пространстве параметров. Выполнено решение задачи Банкера – Чарнеса – Купера. Получены наборы целевых изменений параметров роботизированных автомобилей, которые переводят объекты на границу эффективности. Проведен анализ параметров посредством построения диаграмм производственных возможностей в многомерном пространстве. На двух периодах эксплуатации системы роботизированных автомобилей для агропромышленного предприятия рассчитан индекс Малмквиста для оценки динамики эффективности функционирования.

Ключевые слова: роботизированный автомобиль, цифровой двойник, метод оценки эффективности, виртуальный ввод в эксплуатацию, индекс Малмквиста.

Введение

Разработка систем роботизированных автомобилей (РА) в настоящее время использует технологию виртуального ввода в эксплуатацию [1]. Это позволяет на этапе проектирования сложных технических объектов провести моделирование сценариев эксплуатации изделий в различных условиях. Такой подход позволяет перейти от профилактического и регулярного технического обслуживания к прогнозному (предсказательному) техническому обслуживанию роботизированных автомобилей [2]. Чтобы поддерживать высокий уровень эксплуатационной го-



© Автор(ы), 2024

¹ Анастасия Евгеньевна Яковлева, ассистент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами».

товности и надежности автомобиля, необходимо постоянно контролировать состояние его деталей и механизмов. Здесь важна информация о рабочих параметрах механических и электронных компонентов автомобиля, получаемая в реальном времени.

Анализ этих данных помогает предотвратить отказы, поломки и ситуации, когда движение становится опасным из-за возникновения скрытых дефектов датчиков или «плавающих» ошибок в электронных компонентах механических узлов автомобиля. Этот метод диагностики особенно важен для беспилотных автомобилей, так как отсутствие водителя не позволяет определить текущее состояние автомобиля во время движения.

Такой анализ данных проводится в сочетании с моделированием процессов эксплуатации на цифровых двойниках агрегатов и подсистем роботизированных автомобилей [3–5]. Цифровой двойник автономного автомобиля – это точная модель, которая описывает все характеристики автомобиля и процессы, связанные с его созданием и использованием. Эта модель позволяет анализировать и прогнозировать работу механизмов беспилотного автомобиля.

При разработке беспилотной транспортной системы автомобилей КАМАЗ используется моделиориентированный подход (Model Driven Development), использующий киберфизические модели для сбора информации о показателях надежности элементов, систем и механизмов транспортного средства [6–8]. Затем проводится анализ собранной информации и формулируются дальнейшие рекомендации по срокам проведения технического обслуживания и ремонта.

В настоящее время на стадии эксплуатации успешно внедряется концепция централизованного хранения эксплуатационной параметрической информации о работе компонент или узлов изделия. Данные, полученные от электронных систем изделия, передаются в центральное хранилище эксплуатационной информации без участия оператора с помощью технологии «Интернет вещей». Эта информация впоследствии используется для оценки и прогнозирования работоспособности и надежности изделия или его компонентов, определения необходимости технического обслуживания или ремонта. Эта задача решается с использованием интеллектуальной системы диагностики роботизированных сельскохозяйственных автомобилей (РСА) [9].

Анализ проводимых исследований и моделирования на цифровых двойниках дает множество вариантов проектных решений. В дальнейшем при реальной эксплуатации приходится принимать решения о реализации того или иного сценария эксплуатации, подбирать наиболее эффективные технические параметры для РСА. В настоящей статье предлагается использовать метод Data Envelopment Analysis (DEA) [10, 11], который основан на решении задачи дробно-линейного программирования, для оценки множества вариантов проектных и эксплуатационных решений относительно системы РСА. Рассматривается функционирование системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей (СРСА) семейства КАМАЗ с точки зрения организации технического обслуживания и ремонта.

Методика оценки системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей

Особенность методики DEA состоит в том, что не рассматриваются какие-либо конкретные критерии и не определяются функции, связывающие входные и выходные переменные объектов. Вместо этого для каждого исследуемого объ-

екта DMU создается некоторый набор параметров, описывающих функционирование этого объекта.

Алгоритм анализа эффективности виртуальных испытаний системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей представлен на рис. 1.

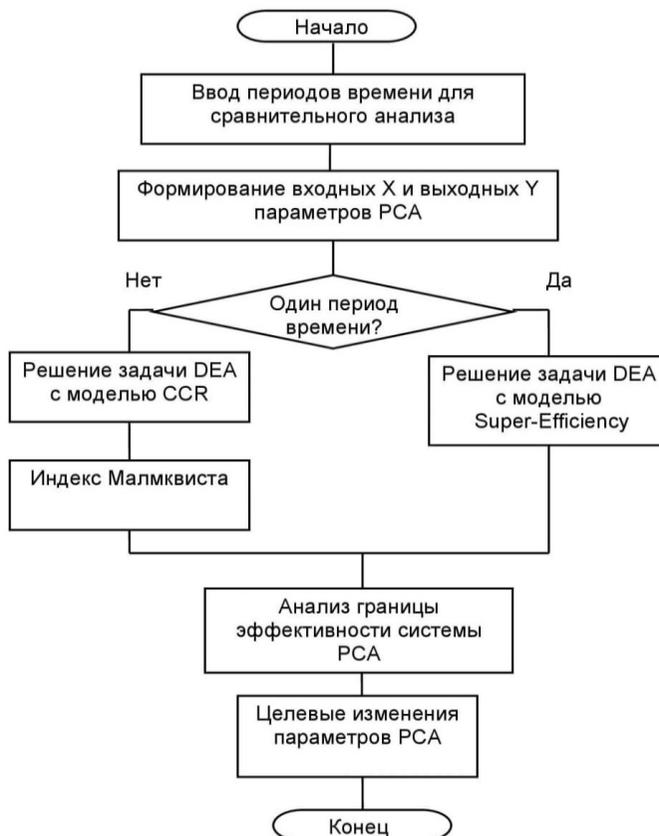


Рис. 1. Алгоритм анализа эффективности виртуальных испытаний

Процедура анализа базируется на использовании двух моделей метода DEA:

- 1) модель CCR Чарнеса – Купера – Родеса;
- 2) модель ВСС Банкера – Чарнеса – Купера.

Первая модель позволяет рассчитать индекс Малмквиста для оценки эффективности в последовательные периоды времени, то есть оценить эволюцию системы PCA. На основе второй модели определяется граница «суперэффективности», то есть ориентир для развития PCA.

Математическая постановка задачи формулируется следующим образом. Для оценки системы роботизированных автомобилей из PA_n , $n = 1, \dots, N$ необходимо задать входной вектор параметров $x_n = (x_{n1}, \dots, x_{nM})$ и выходной вектор $y_n = (y_{n1}, \dots, y_{nK})$. Далее для N оцениваемых PA формируется матрица $X = (x_{nm})$, $m = \overline{1, M}$ с размерностью $M \times N$ и матрица $Y = (y_{nk})$, $k = \overline{1, K}$ с размерностью $K \times N$ с данными для всех объектов [12].

Задача анализа при оценке эффективности работы СПСА на множестве разных сценариев при использовании метода DEA сводится к нахождению миниму-

ма критерия эффективности θ (задача Банкера – Чарнеса – Купера) с постоянным эффектом масштаба (CRS) [14]:

$$\begin{aligned} \min_{\theta, \lambda} & (\theta), \\ -y_n + Y\lambda & \geq 0, \\ \theta x_n - X\lambda & \geq 0, \\ e\lambda = 1, \quad \lambda & \geq 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где θ – интегральный критерий эффективности исследуемого объекта $\theta \in (0;1]$, e – вектор-строка с единичными элементами, X – матрица входов, Y – матрица выходов, x_n и y_n – вектор-столбцы индивидуальных входов и выходов для n -го роботизированного автомобиля в X и Y соответственно, λ – полуположительный вектор (фактор взвешивания), $\lambda_n \geq 0, \forall i = 1, \dots, N$.

Решением системы уравнений (1) является набор целевых изменений параметров в многомерном пространстве относительно границы эффективности. Позиция объекта относительно границы позволяет не только оценить его эффективность, но и определить величину изменений параметров, которые выводят объект на границу. Если рассматриваются сценарии с двумя или более периодами работы СРСА, то выполняется решение задачи Чарнеса – Купера – Родеса и рассчитывается индекс Малмквиста, характеризующий динамику эффективности процесса.

Оценка эффективности функционирования системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей

Любая техническая система в процессе эксплуатации подвергается воздействию негативных факторов, снижающих эксплуатационную надежность. Выбор факторов (параметров) для анализа является ключевой задачей для оценки эксплуатационной надежности элементов и систем автомобиля, а также автомобиля в целом. Решение задач для моделей проводилось с использованием программы PIM DEASoft версии 3 [12].

Ключевые показатели эффективности KPI (Key Performance Indicators) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Ключевые показатели эффективности

Обозначение	Показатель эффективности
<i>Входные параметры</i>	
X1	Коэффициент технической готовности, %
X2	Эксплуатационная скорость (скорость перемещения РА на маршрутах при выполнении производственных задач), км/час
X3	Время простоя в ТОиР, дн.
X4	Среднесуточная продолжительность работы автомобиля, час
X5	Средний месячный пробег РА, тыс. км/месяц
<i>Выходные параметры</i>	
Y1	Остаточный ресурс автомобиля, тыс. час
Y2	Удельная стоимость эксплуатационного и технического обслуживания, руб/т
Y3	Удельное грузоперемещение, т/км

В табл. 2 и табл. 3 приведены значения параметров 10 роботизированных автомобилей (РА) для двух периодов эксплуатации: 2020 и 2021 гг.

Таблица 2

Значения входных параметров в 2020 и 2021 гг.

РА	Входные параметры									
	X1, %		X2, км/час		X3, дн.		X4, час.		X5, тыс. км/месяц	
	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021
R1	0,93	0,93	28	27	2,1	2,1	16	16	13	14
R2	0,88	0,89	32	32	2,4	2,5	18	18	12,7	13
R3	0,89	0,88	34	33	2,6	2,7	20	20	14	15
R4	0,99	0,995	37	35	3,1	3	14	15	15,2	15,5
R5	0,92	0,96	42	40	2	1,5	15	15,5	11,3	11,6
R6	0,86	0,86	39	39	1,9	1,9	13	14	14,8	14
R7	0,85	0,87	40	41	2,3	2,1	19	19,7	12,1	14,2
R8	0,97	0,98	33	35	2,8	1,4	17	18	15	16
R9	0,94	0,97	29	30	3	1,6	18	20	13,4	14,8
R10	0,91	0,9	30	39	2,9	3	20	20	11,8	11

Таблица 3

Значения выходных параметров в 2020 и 2021 гг.

РА	Выходные параметры					
	Y1, тыс. час		Y2, руб/т		Y3, т/км	
	2020	2021	2020	2021	2020	2021
R1	16,3	16,5	7,7	8	0,17	0,18
R2	18	18	10,2	10,1	0,21	0,2
R3	17	17,3	9	9,2	0,33	0,34
R4	16,7	17	11,5	11,3	0,14	0,13
R5	15,2	17,2	12,8	14,5	0,22	0,26
R6	17,5	18	8,23	7,9	0,14	0,14
R7	18,1	17,1	9,71	9,5	0,21	0,2
R8	16,4	17,5	12,4	8,3	0,19	0,2
R9	15,6	16	13	7,1	0,31	0,15
R10	19	18,1	11,9	10,1	0,26	0,37

Основная задача моделирования – определение для каждого j -го автомобиля целевых изменений δ_{jl} его параметров для выхода на границу эффективности:

$$\delta_{jl} = \frac{P_{jl}^T - P_{jl}^D}{P_{jl}^D} \times 100\%,$$

где P_{jl}^D – измеренное значение параметра; P_{jl}^T – целевое значение.

В результате анализа в PIM-DEAsoft были получены целевые значения изменения параметров для СПСА в 2020 г., которые следует выполнить, чтобы получить повышение эффективности в 2021 г. (табл. 4).

Целевые значения изменений параметров РА в 2020 г.

РА	Изменение параметров, %							
	X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2	Y3
R1	-14,31	3,49	3,49	1,88	-11,53	0	19,96	11,86
R2	2,2	2,2	2,2	-4,97	1,13	0	0	0
R3	21,28	10,42	21,28	-0,73	5,87	5,25	66,13	0
R4	-5,36	8,5	-28,94	8,5	-10,1	0	0	37,11
R5	7,03	-21,76	45,21	17,24	32,59	9,12	0	0
R6	16,95	-18,72	28,51	28,51	-3,19	0	9,1	25,55
R7	4,06	-19,75	5,26	-4,63	5,26	0	5,88	0,94
R8	-3,43	0,18	0,18	0,18	-13,42	0	0	31,04
R9	10,21	24,71	5,72	24,71	4,1	34,24	0	0
R10	7,19	18,66	-3,89	-0,55	18,66	0	0	0

Программа DEAsoft предоставляет графические данные, которые позволяют анализировать все объекты и разные комбинации входных и выходных параметров, в виде графиков расположения DMU в многомерном пространстве. Чтобы облегчить анализ, PIM DEASoft предлагает возможность изучения различных срезов этого параметрического пространства:

- один вход – один выход;
- два входа – один выход;
- два выхода – один вход.

На рис. 2 представлена диаграмма PPS (Production Possibility Set) в пространстве параметров X2 и Y3. Чтобы в 2021 г. достичь границы эффективности в результате ТОиР, автомобилю R6 требуется:

- 1) увеличить удельное грузоперемещение на 0,3 т/км при неизменной скорости эксплуатации;
- 2) уменьшить скорость эксплуатации до 28 км/час при неизменном удельном грузоперемещении.

Уменьшение скорости приведет к увеличению остаточного ресурса автомобиля и уменьшению времени простоя на ТОиР за счет снижения частоты отказов и выходов из строя агрегатов РА. Кроме того, движение роботизированного сельскохозяйственного автомобиля с повышенной скоростью по грунтовым дорогам между полями и зернохранилищами приведет к увеличению износа агрегатов автомобиля.

Таким образом, целесообразно увеличить удельное грузоперемещение за счет более полной загрузки кузовов РА.

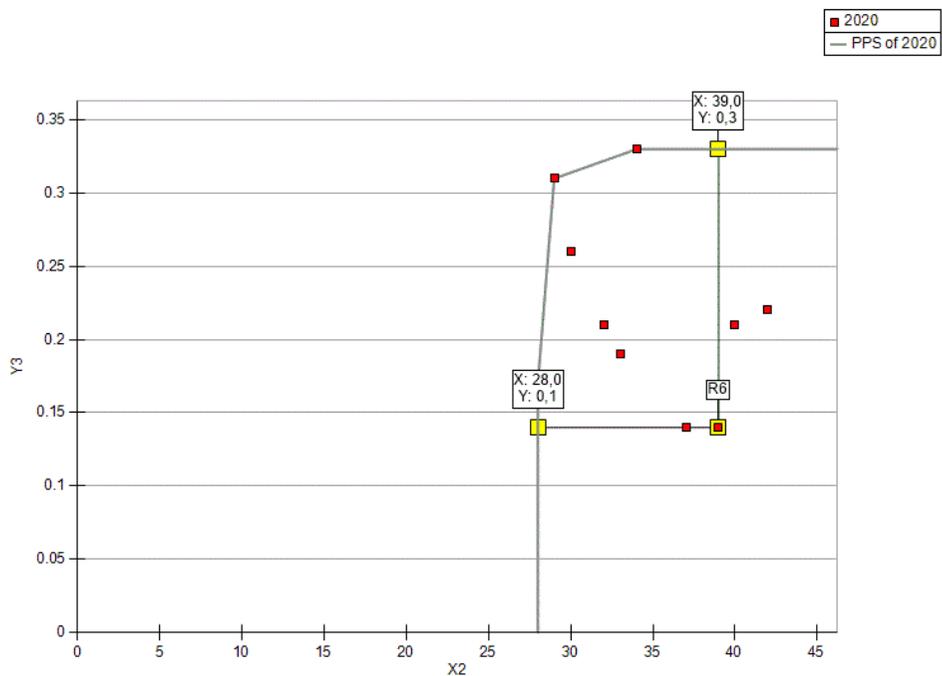


Рис. 2. Целевые изменения параметров X2 и Y3 для выхода автомобиля R6 на границу эффективности

На рис. 3 показано, что в 2021 г. автомобиль R3 стал ближе к границе эффективности, чем в 2020 г., относительно входных параметров – коэффициента технической готовности X1 и времени простоя X3 на техническом обслуживании и ремонте, а также выходного параметра Y2 – удельной стоимости эксплуатационного и технического обслуживания.

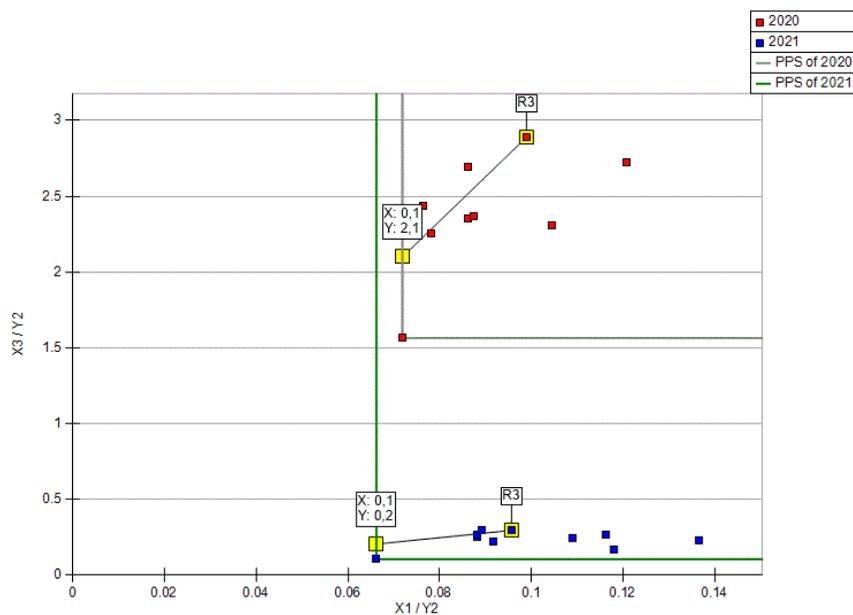


Рис. 3. Расположение границ эффективности в 2020 и 2021 гг.

Аналогичным образом можно получить информацию о целевых изменениях всех параметров системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей.

Интегральная оценка качества функционирования роботизированных автомобилей с применением индекса Малмквиста

Важной задачей является сравнение эффективности системы РСА на различных периодах времени. Это связано с тем, что изменения условий эксплуатации, износ агрегатов и другие временные факторы могут привести к неэффективности работы некоторых роботизированных автомобилей. Предлагается использовать методику сравнения, основанную на расчете индекса Малмквиста.

Индекс Малмквиста дает возможность оценивать развитие объектов на двух периодах времени. В статье используется методология DEA-Malmquist, которая основана на моделях CCR_{input} и описана следующим образом [15–17]:

$$MI(y_{t+1}, x_{t+1}, y_t, y_t) = \frac{D_{CRS}^{t+1}(y_{t+1}, x_{t+1})}{D_{CRS}^t(y_t, x_t)} \left[\frac{D_{CRS}^t(y_{t+1}, x_{t+1})}{D_{CRS}^{t+1}(y_{t+1}, x_{t+1})} \times \frac{D_{CRS}^t(y_t, x_t)}{D_{CRS}^{t+1}(y_t, x_t)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где x_t и x_{t+1} – входные векторы; y_t и y_{t+1} – выходные векторы в периоды t и $t+1$; D_{CRS}^t , D_{CRS}^{t+1} – input-ориентированные функции дистанции по отношению к технологии производства в периоды времени t и $t+1$; CRS показывает, что рассматривается постоянный эффект масштаба.

Индекс Малмквиста (2) может быть представлен как произведение:

$$MI = EC \cdot TC,$$

где MI – индекс Малмквиста; EC – технический прогресс; TC – изменение эффективности.

В табл. 5 представлены значения показателей TC, EC и MI для роботизированных сельскохозяйственных автомобилей в 2020 и 2021 гг.

Таблица 5

Значения показателей TC, EC и MI для РСА (2020–2021 гг.)

DMU	TC	EC	TFPG (MI)
R1	1	1	1
R2	1	1	1
R3	1	1	1
R4	1,03	1	1,03
R5	1	1	1
R6	1	1	1
R7	1	0,98	0,98
R8	1,03	1	1,03
R9	1	0,99	0,99
R10	1	1	1

Из табл. 5 видно, что прогресса ($MI > 1$) достигли роботизированные автомобили R4 и R8. У роботизированных автомобилей R7 и R9 фактор производительности снизился ($MI < 1$), а у большей части РА остался неизменным ($MI = 1$).

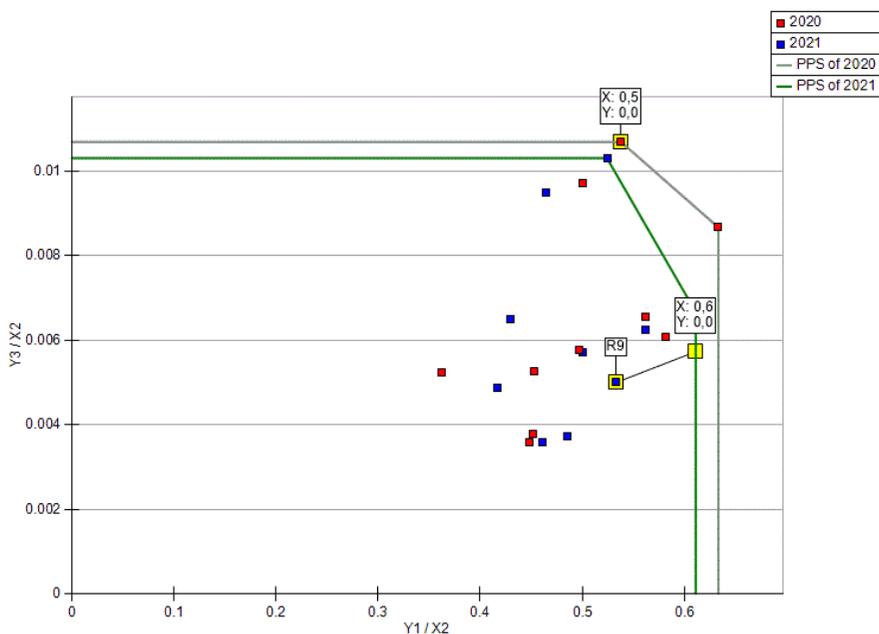


Рис. 4. Положение РА R9 относительно границы эффективности в двух периодах времени

Этот вывод подтверждается и анализом графика границ эффективности для двух периодов (рис. 4). Роботизированный автомобиль R9 в 2020 г. находился на границе эффективности, а в 2021 г. его эффективность снизилась за счет изменения целевых показателей следующих параметров: эксплуатационной скорости X2 (скорости перемещения РА на маршрутах при выполнении производственных задач) и выходных параметров – остаточного ресурса автомобиля Y1 и удельного грузоперемещения Y3.

Заключение

Метод DEA позволяет проводить комплексную оценку эффективности системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей благодаря возможности рассмотрения большого числа параметров и развития различных сценариев. Применение данного метода возможно как при виртуальном вводе в эксплуатацию РСА, так и при планировании реальных производственных работ на предприятиях. Использование индекса Малмквиста помогает более детально проанализировать систему РСА в различные периоды времени и оценить принятые проектные и организационные решения. Полученные с помощью моделей данные служат основой для формулирования правил принятия решений по техническому обслуживанию.

Перспективным направлением дальнейших исследований является применение многоэтапных моделей DEA для сравнительного анализа сложных систем [18, 19]. Обычные модели DEA рассматривают производственные объекты как системы типа «черный ящик», в которых известны только входы и выходы. Функции преобразования входов в выходы неизвестны, или их определение затруднено. Это приводит к тому, что невозможно использовать важные промежуточные ключевые параметры. Это часто приводит к невозможности разграниче-

ния и идентификации того, какая именно часть производственного объекта ответственна за его общую неэффективность.

В многоэтапных моделях ДЕА появляется возможность разделить общую структуру на несколько отдельных объектов анализа (от двух до пяти). Применительно к рассматриваемой в статье задаче такой подход можно использовать, представив производственный процесс в СРСА как два этапа: а) формирование группы эксплуатируемых РСА с учетом их технических и эксплуатационных характеристик; б) эксплуатация с оценкой эффективности получения конечного результата при определенной стратегии технического обслуживания РСА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Novak P., Kadera P., Wimmer M.* Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study // In: Proc. 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. IEEE Xplore, 2017. Pp. 1–4.
2. *Щербakov М.В., Сай Ван К.* Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0 // Программные продукты и системы. 2020. № 2. С. 186–194.
3. *Сусарев С.В., Сидоренко К.В., Морев А.С., Гашенко Ю.В.* Принципы построения систем управления роботизированных транспортных средств с автономным и дистанционным режимом управления // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XXI Международной конференции. Т. 2. Самара: Офорт, 2019. С. 107–110.
4. *Губанов Н.Г., Одинцов В. П., Михеев Ю. В., Ахтямов Р. Н., Морев А. С.* Архитектура системы диагностики и прогнозирования технического состояния роботизированного транспортного средства // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XXI Международной конференции. Т. 2. Самара: Офорт, 2019. С. 171–174.
5. *Яковлева А.Е., Сусарев С.В., Щербина В.Г.* Разработка диагностической системы прогнозирования технического состояния автономного транспортного средства // Сборник статей IX Международной научно-практической конференции «Наука и просвещение: актуальные вопросы, достижения и инновации». Пенза, 2022. С. 46–49.
6. *Berrada J.* Modeling Transportation Systems involving Autonomous Vehicle: A State of the Art // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 27. Pp. 215–221.
7. *Daigle M.* Model-based prognostics. Prognostics Center of Excellence, Intelligent Systems Division, NASA Ames Research Center. 2014. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/da58/cbbf188590845e9bf3caf0e3d2bd3f3f6723.pdf> (дата обращения 10.02.2024).
8. *Schulte P.Z., Spenser D.A.* On-Board model-based fault diagnosis for autonomous proximity operations // Proceedings of the 69th International Astronautical Congress (IAC), Bremen, Germany, 1–5 October 2018, IAC-18-C1.5.11x45016. 2018. Pp. 1–15.
9. *Орлов С.П., Сусарев С.В., Пугачев А.И.* Интеллектуальная система диагностики агрегатов роботизированного автомобиля КАМАЗ // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XXI Международной конференции. Т. 2. Самара: Офорт, 2019. С. 92–95.
10. *Cooper W.W., Seiford L.M., Zhu J.* Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations. Handbook on Data Envelopment Analysis. Boston, MA: Springer, 2011. Pp. 1–39.
11. *Sowlati T., Paradi J.C.* Establishing the "practical frontier" in data envelopment analysis // Omega. 2004. Vol. 32 (4). Pp. 261–272.
12. *Яковлева А.Е., Сусарев С.В., Орлов С.П.* Анализ эффективности роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей // Системы управления и информационные технологии. 2021. № 3 (85). С. 94–100.
13. *Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K.* 2007 Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software. Springer-Verlag, 2007. 492 p.
14. PIM-DEA. Home page. URL: <http://www.deasoftware.co.uk/> (дата обращения 10.02.2024).
15. *Учайкин Р.А., Орлов С.П.* Сравнительная оценка эффективности компьютерной техники в подразделениях промышленного предприятия // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 28. № 1. С. 74–86.

16. *Сусарев С.В.* Модели оценки эффективности технического обслуживания роботизированных транспортных средств // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 28. № 4. С. 62–76.
17. *Лисситса А., Бабичева Т.* Теоретические основы анализа продуктивности и эффективности сельскохозяйственных предприятий // Discussion paper. Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe. Halle (Saale), Deutschland. 2003. No. 49. 39 p.
18. *Izadikhah M., Tavana M., Di Caprio D., Santos-Arteaga F.J.* A novel two-stage DEA production model with freely distributed initial inputs and shared intermediate outputs // Expert Systems With Applications. 2018. Vol. 99. Pp. 213–230.
19. *Шапошников А.М., Ратнер С.В.* Эволюция методологии анализа среды функционирования: литературный обзор // Экономический вестник ИПУ РАН. 2023. № 1. С. 67–90.

Статья поступила в редакцию 19 марта 2024 г.

INTEGRATED EVALUATION OF THE FUNCTIONING QUALITY OF ROBOTIC AGRICULTURAL VEHICLE SYSTEM

*A.E. Yakovleva*¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: nastya-yakovleva-97@mail.ru

Abstract. *The article proposes to use a method for evaluating the effectiveness (Data Envelope Analysis) of a system of robotic agricultural vehicles, which is based on solving the problem of fractional linear programming when analyzing a set of homogeneous production facilities. This method is used for an integrated assessment of the quality of service of robotic vehicles according to the specified key parameters of functioning. The main parameters of the effectiveness of the system of robotic agricultural vehicles are selected: the coefficient of technical readiness, operational speed, downtime in maintenance and repair, the average daily duration of the car, the average monthly mileage of the vehicle, the remaining life of the car, the unit cost of maintenance and specific cargo displacement. Solving systems of linear equations makes it possible to determine the position of each analyzed object relative to the efficiency boundary in a multidimensional parameter space. The solution of the Bunker-Charnes-Cooper problem has been completed. Sets of target changes in the parameters of robotic cars have been obtained, which transfer objects to the efficiency boundary. The analysis of the parameters is carried out by constructing diagrams of production capabilities in a multidimensional space. For two periods of operation of the robotic vehicle system for an agro-industrial enterprise, the Malmquist index was calculated to assess the dynamics of operational efficiency.*

Keywords: *robotic vehicles, digital twin, efficiency evaluation method, virtual commissioning, Malmquist index.*

REFERENCES

1. *Novak P., Kadera P., Wimmer M. Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study // In: Proc. 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. IEEE Xplore, 2017. Pp. 1–4.*
2. *Shcherbakov M.V., Sai Van. K. Arhitektura sistemy predskazatel'nogo tekhnicheskogo obsluzhivaniya slozhnykh mnogoobektnykh sistem v koncepcii Industrii 4.0 [Architecture of a predictive maintenance system for complex multi-object systems in the concept of Industry 4.0] // Programmnye produkty i sistemy. 2020. № 2. Pp. 186–194. (In Russian).*
3. *Susarev S.V., Sidorenko K.V., Morev A.S., Gashenko Yu.V. Principy postroeniya sistem upravleniya robotizirovannykh transportnykh sredstv s avtonomnym i distancionnym rezhimom upravleniya [Principles of building control systems for robotic vehicles with autonomous and remote control modes] // Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemah. Trudy XXI Mezhdunarodnoj konferencii. V. 2. Samara: Ofort, 2019. Pp. 107–110. (In Russian).*
4. *Gubanov N.G., Odintsov V.P., Mikheev Yu.V., Akhyamov R.N., Morev A.S. Arhitektura sistemy diagnostiki i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya robotizirovannogo transportnogo sredstva [Architecture of the system of diagnostics and forecasting of the technical condition of a robotic vehicle] // Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemah. Trudy XXI Mezhdunarodnoj konferencii. V. 2. Samara: Ofort, 2019. Pp. 171–174. (In Russian).*
5. *Yakovleva A.E., Susarev S.V., Shcherbina V.G. Razrabotka diagnosticheskoy sistemy prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya avtonomnogo transportnogo sredstva [Development of a diagnostic system for predicting the technical condition of an autonomous vehicle] // Sbornik*



© The Author(s), 2024

¹ *Anastasiya E. Yakovleva, Assistant.*

- statej IX Mezhdunarodnoj nauchno prakticheskoj konferencii «Nauka i prosveshchenie: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovacii». Penza, 2022. Pp. 46–49. (In Russian).
6. *Berrada J.* Modeling Transportation Systems involving Autonomous Vehicle: A State of the Art // *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 27. Pp. 215–221.
 7. *Daigle M.* Model-based prognostics. Prognostics Center of Excellence, Intelligent Systems Division, NASA Ames Research Center. 2014. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/da58/cbbf188590845e9bf3caf0e3d2bd3f3f6723.pdf> (дата обращения 10.02.2024).
 8. *Schulte P.Z., Spenser D.A.* On-Board model-based fault diagnosis for autonomous proximity operations // *Proceedings of the 69th International Astronautically Congress (IAC)*, Bremen, Germany, 1-5 October 2018, IAC-18-C1.5.11x45016. 2018. Pp. 1–15.
 9. *Orlov S.P., Susarev S.V., Pugachev A.I.* Intellekturnaya sistema diagnostiki agregatov robotizirovannogo avtomobilya KAMAZ [Intelligent diagnostic system for units of a robotic KAMAZ vehicle] // *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyh sistemah. Trudy XXI Mezhdunarodnoj konferencii. V. 2.* Samara: Ofort, 2019. Pp. 92–95. (In Russian).
 10. *Cooper W.W., Seiford L.M., Zhu J.* Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations. *Handbook on Data Envelopment Analysis*. Boston, MA: Springer, 2011. Pp. 1–39.
 11. *Sowlati T., Paradi J.C.* Establishing the "practical frontier" in data envelopment analysis // *Omega*. 2004. Vol. 32 (4). Pp. 261–272.
 12. *Yakovleva A.E., Susarev S.V., Orlov S.P.* Analiz effektivnosti robotizirovannoj sistemy sel'sko-hozyajstvennyh avtomobilej [Efficiency analysis of the robotic system of agricultural vehicles] // *Sistemy upravleniya i informacionnye tekhnologii*. 2021. № 3 (85). Pp. 94–100. (In Russian).
 13. *Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K.* 2007 Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software. Springer-Verlag, 2007. 492 p.
 14. PIM-DEA. Home page. URL: <http://www.deasoftware.co.uk/> (accessed February 10, 2024).
 15. *Uchaykin R.A., Orlov S.P.* Sravnitel'naya ocenka effektivnosti komp'yuternoj tekhniki v podrazdeleniyah promyshlennogo predpriyatiya [Comparative evaluation of the effectiveness of computer technology in the divisions of an industrial enterprise] // *Vestn. Samarsk. gosud. tekhnich. un-ta. Seriya: Tekhnich. nauki*. 2020. V. 28. № 1. Pp. 74–86. (In Russian).
 16. *Susarev S.V.* Modeli ocenki effektivnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya robotizirovannyh transportnyh sredstv [Models for evaluating the effectiveness of maintenance of robotic vehicles] // *Vestn. Samarsk. gosud. tekhnich. un-ta. Seriya: Tekhnich. nauki*. 2020. V. 28. № 4. Pp. 62–76. (In Russian).
 17. *Lissitsa A., Babicheva T.* Theoretical foundations of the analysis of the productivity and efficiency of agricultural enterprises // *Discussion paper. Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe. Halle (Saale), Deutschland*. 2003. No. 49. 39 p.
 18. *Izadikhah M., Tavana M., Di Caprio D., Santos-Arteaga F.J.* A novel two-stage DEA production model with freely distributed initial inputs and shared intermediate outputs // *Expert Systems With Applications*. 2018. Vol. 99. Pp. 213–230.
 19. *Shaposhnikov A.M., Rainer S.V.* Evolyuciya metodologii analiza sredy funkcionirovaniya: literaturnyj obzor [Evolution of data envelopment analysis methodology: literature review] // *Ekonomicheskij vestnik IPU RAN*. 2023. № 1. Pp. 67–90. (In Russian).

Original article submitted 19.03.2024

Энергетика и электротехника

УДК 621.365.511

СИСТЕМА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА МАССИВНЫХ КОЛЕЦ ПЕРЕД РАСКАТКОЙ

А.А. Базаров, Д.В. Колпаков, Н.Р. Штукатуров¹

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, sward63rus@mail.ru, vip.ue98@mail.ru

Аннотация. Рассматривается система индукционного нагрева крупногабаритного кольца в катушке прямоугольной формы. Торцевая поверхность заготовки расположена горизонтально. Для формирования равномерного распределения температуры в заготовке, задвигаемой в индуктор, применяется механизм вращения. Проведенные исследования распределения мощности тепловыделения и температуры в заготовке показали необходимость снижения напряженности поля в области отверстия. Решение проблемы найдено с помощью применения магнитопроводов в конструкции индуктора, вытесняющих токи в заготовке за пределы подверженных перегреву участков. Полученные результаты моделирования электромагнитных и тепловых полей в заготовке подтверждают правильность конструктивного решения.

Ключевые слова: геометрическая модель, прямоугольный индуктор, объемная мощность.

Введение

При изготовлении колес для железнодорожных вагонов используются различные технологии [1–3]. Различия обусловлены условиями эксплуатации, в первую очередь – температурой, и свойствами применяемого металла. Использование многоэтапного процесса формования колеса железнодорожного вагона приводит к тому, что после нескольких операций температура заготовки снижается и для завершения процесса требуется дополнительный подогрев [4]. Учитывая, что повторный нагрев в газовой печи нежелателен, предлагается использовать индукционную систему для подогрева. Система нагрева должна обеспечить подогрев заготовки с начальной температуры 950 градусов до конечного значе-



© Автор(ы), 2024

¹ Александр Александрович Базаров, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Дмитрий Викторович Колпаков, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Николай Романович Штукатуров, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

ния 1100 градусов, чтобы процесс пластической деформации был выполнен без осложнений. В указанном диапазоне температур магнитные и тепловые свойства стали практически не изменяются.

Проектирование индукционного нагревателя для массивных колец требует учета различных особенностей технологического процесса [3–8]. При большом значении отношения радиуса заготовки к ее высоте возникает проблема нагрева торцевых поверхностей. Кроме того, при значительной массе процесс загрузки заготовки в индуктор является довольно сложным. При небольшой длине цилиндрической заготовки использование привычной конструкции индуктора невозможно, так как ее сложно удержать от падения при перемещении. В работе [6] индуктор для нагрева кольцевых заготовок имеет обычную цилиндрическую форму. Осевая линия индуктора ориентирована вертикально. Система загрузки содержит толкатели, обеспечивающие горизонтальное перемещение заготовки. После установки заготовки в нужное положение происходит опускание индуктора. Несмотря на простоту операций имеется существенный недостаток: требуются гибкие электрические токоподводы. Так как частота и величина тока довольно значительны, это приводит к увеличению потерь и снижению надежности. Для решения этих проблем в качестве конструкции предлагается прямоугольная катушка индуктора, в которую заготовка помещается путем заталкивания по направляющим (рис. 1) [9]. Для формирования равномерного распределения температурного поля предусматривается вращение кольцевой заготовки и введение пластин магнитопровода. Для вращения опорной теплоизолирующей плиты в индукторе предлагается использовать систему конических роликов, на которые опирается кольцо, расположенное по внешнему радиусу плиты. Соединение кольца и радиальных ребер жесткости предусматривается с помощью диэлектрических прокладок.

Процесс изготовления железнодорожных колес сопровождается не только изменением температуры, но и механическим воздействием со стороны прессового оборудования. Допустимая скорость деформации связана с возможностью устранения возникающих напряжений. Поэтому уровень температуры в загрузке очень важен. При анализе процессов нужно учитывать величину коэффициента упругости во всем объеме заготовки. Задача контроля напряжений в деформируемом объекте требует отдельного исследования [10, 11]. Более прагматичным является подход, связанный с соблюдением общих требований к распределению температуры в заготовке перед пластической деформацией [12, 13].

Проектирование систем индукционного нагрева вращающихся тел является специфической задачей, требующей учета динамических процессов. В зависимости от скорости вращения требуется рассмотрение влияния скорости вращения только на тепловые процессы или же и на электромагнитные [14–16]. В работах [15, 16] рассмотрено воздействие электромагнитного поля постоянных магнитов на вращающуюся заготовку. При взаимодействии магнитных полей индукционной системы и загрузки возникают усилия, которые необходимо учитывать при расчете узлов крепления индуктора и расчете электропривода, приводящего диск во вращение. Кроме рассмотренных вопросов при расчете основной задачей остается расчет параметров индуктора и получение распределения температуры в заготовке с допустимыми отклонениями [17].

Целью работы является поиск параметров системы индукционного нагрева массивного кольца в индукторе прямоугольной формы, обеспечивающей равномерное распределение температуры перед пластической деформацией.

Для расчета параметров индуктора необходимо использование численного метода. Кроме того, важно учитывать различные краевые эффекты, возникающие в отдельных областях загрузки. В качестве инструмента выбран программный комплекс Comsol, который построен на основе метода конечных элементов.

В связи с наличием в системе тел разной формы используется трехмерная модель электромагнитной задачи, содержащая цилиндрическую заготовку, индуктор с прямоугольными витками и пластины магнитопровода. Необходимость применения магнитопровода в рассматриваемом индукционном нагревателе обусловлена стремлением к снижению полей рассеяния и повышению коэффициента мощности. Это отражается на снижении потерь в катушке индуктора и повышении электрического коэффициента полезного действия. Кроме того, магнитопровод обеспечивает вытеснение тока в проводниках индуктора к поверхности. В условиях значительных зазоров между индуктором и загрузкой и отсутствием кольцевого эффекта, присущего индукторам цилиндрической формы, это обуславливает формирование более ярко выраженных границ области тепловыделения в загрузке. Обычно это свойство не очень важно, но в данном случае способствует повышению управляемости распределением плотности тока.

Геометрическая модель для решения электромагнитной задачи с прямоугольным индуктором представлена на рис. 1. Центр цилиндрической пустотелой заготовки имеет координаты $x = 0$; $y = 0$; $z = 0$. Для расчета принята заготовка с геометрическими размерами: внешний диаметр $D_2 = 0,422$ м; внутренний диаметр $D_1 = 0,125$ м; высота $h = 0,145$ м.

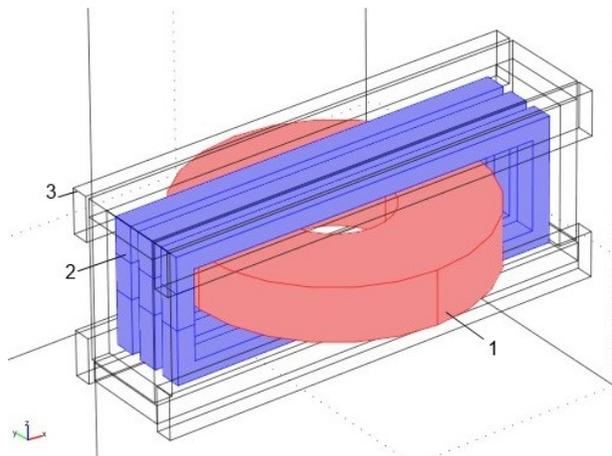


Рис. 1. Геометрическая модель индуктора с загрузкой: 1 – заготовка; 2 – проводники индуктора; 3 – пластины магнитопровода

Формулировка электромагнитной задачи

В терминах векторного магнитного потенциала задача индукционного нагрева формулируется следующим образом:

$$\nabla^2 \{\bar{A}\} - j\omega\sigma \{\bar{A}\} - \{\bar{J}\} = 0. \quad (1)$$

К основному уравнению Пуассона (1) добавляются граничные условия на различных участках границы:

$$\{\bar{A}\} = 0 \text{ на } S_1; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \{\bar{A}\}}{\partial n} = 0 \text{ на } S_2. \quad (3)$$

Выражение (2) задает значение магнитного потенциала на удаленной границе области. Выражение (3) описывает поведение функции на линии или поверхности, отражающей условия симметрии.

При моделировании в трехмерной области основное уравнение (1) принимает более сложный вид и записывается в виде системы уравнений:

$$\nabla \cdot (j\omega\sigma - \sigma\mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma\nabla V - \mathbf{J}^e) = 0; \quad (4)$$

$$(j\omega\sigma\mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\nabla \times \mathbf{A}) - \sigma\mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma\nabla V) = \mathbf{J}^e. \quad (5)$$

Здесь: σ – электропроводность; \mathbf{v} – вектор скорости движения; \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал; V – скалярный электрический потенциал; \mathbf{J}^e – вектор источников (плотность тока); μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_r – относительная магнитная проницаемость среды.

При моделировании электропроводность материала заготовки принята постоянной, так как в области высоких температур ее изменение незначительно. Магнитные свойства магнитопровода приняты также постоянными. Относительная магнитная проницаемость задана во всех элементах магнитопровода равной 1000.

Формулировка тепловой задачи

Определение температурных полей нагреваемого кольца сводится к решению уравнения теплопроводности с функцией распределения внутренних источников тепла, найденной в результате решения электромагнитной задачи.

Для решения тепловой задачи с учетом реальных режимов теплообмена с окружающей средой в качестве общей исходной модели температурного поля принято трехмерное нестационарное уравнение теплопроводности для полого цилиндра, формулируемое в декартовой системе координат:

$$\gamma C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \gamma C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T + Q \quad (6)$$

с начальными $T(x, y, z, 0) = \text{const}$ и граничными условиями

$$\mathbf{v} \cdot (\lambda \nabla T) = \alpha [T - T_c] + \varepsilon \sigma [T^4 - T_c^4]. \quad (7)$$

Здесь: $T(r, x, z, \tau)$, T_0 – температурное распределение в металле заготовки и температура окружающей среды; $C_p(x, y, z, t)$, $\gamma(x, y, z, \tau)$, $\lambda(x, y, z, \tau)$ – соответственно удельные теплоемкость, теплопроводность и плотность металла; α , ε , σ – коэффициенты конвективного теплообмена, степень черноты и коэффициент излучения поверхности материала; Q – удельная мощность источников внутреннего тепловыделения; \mathbf{v} – вектор скорости движения кольцевой заготовки.

Теплообмен в системе, состоящей из заготовки, индуктора и футеровки, включает несколько видов: свободная конвекция между твердыми поверхностями и окружающей средой (внутреннее пространство открыто); теплообмен излучением между поверхностями элементов системы; теплообмен излучением между поверхностями и внешней средой.

Вращательное движение заготовки при численном моделировании в трехмерной области задается с помощью выражений для составляющих скорости по осям в плоскости $xу$:

$$v_x = \frac{vy}{\sqrt{x^2 + y^2}}; v_y = \frac{vx}{\sqrt{x^2 + y^2}}.$$

Здесь v – линейная скорость кругового движения боковой поверхности заготовки.

Совместное решение электромагнитной и тепловой задач в данных условиях является сложным, поэтому используется подход с отдельным решением. На стадии решения электромагнитной задачи определяются области внутри заготовки, где происходит выделение тепла. Для тепловой задачи на основании полученной информации выполняется построение подобластей с внутренними источниками тепла.

В качестве материала в расчетах принят сплав ШХ15. Теплотехнические свойства в модели задаются с помощью аппроксимирующих выражений линейного вида:

$$\lambda = \lambda_0(1 + \alpha_\lambda T); C = C_0(1 + \alpha_C T).$$

Температурные коэффициенты определены с учетом перехода к шкале температуры в Кельвинах.

Моделирование электромагнитных и тепловых процессов

Для принятых размеров трубки индуктора (ширина 15 мм, толщина 10 мм) задан ток 7500 А, что соответствует плотности тока 50 А/мм². Расчеты выполнены для частоты 50 Гц.

Конструкция индуктора содержит магнитопровод из пластин для уменьшения полей рассеяния, повышения коэффициента мощности и снижения электрических потерь в индукторе. Из результатов расчета варианта конструкции индуктора с прямоугольными витками и пластинами магнитопровода следует, что распределение мощности удовлетворяет требованиям задачи нагрева: обеспечивается эффективный нагрев плоской части поверхности заготовки и тем самым компенсируются тепловые потери.

При решении электромагнитной задачи для системы, состоящей из индуктора, загрузки и магнитопроводов, необходим учет металлических элементов опорной конструкции, на которой размещается нагреваемое изделие. Для снижения мощности тепловыделения в каркасе предусматривается его изготовление из немагнитной стали. Наличие кольцевых и радиальных элементов способствует замыканию токов и дополнительному подогреву. Вместе с тем потери мощности нельзя считать полностью бесполезными, так как происходит компенсация отвода тепла с нижней поверхности заготовки через теплоизоляцию. В расчетной модели данными компонентами пришлось пренебречь из-за стремления упростить задачу и ускорить вычислительный процесс.

Приведение во вращение опорной плиты предусмотрено с помощью роликов конической формы, которые расположены в четырех точках за пределами габаритов индуктора. Прямое воздействие сильного электромагнитного поля на вращающиеся ролики ослаблено. Однако нагрев роликов неизбежен. Более мощным источником тепла является контакт с металлическим кольцом плиты. Простым решением проблемы является водяное струйное охлаждение роликов. Такой способ предотвращает перегрев подшипников. Более сложное в реализации охла-

ждение с помощью спрейеров нежелательно из-за воздействия паров воды на керамическую теплоизоляцию индуктора.

На рис. 2, 3 приведены распределения объемной мощности в разных плоскостях заготовки и индуктора. На рис. 2 видно, что максимальное значение мощности на плоской торцевой поверхности наблюдается на небольшом удалении от внешней и внутренней боковых (цилиндрических) поверхностей. Плотность тока уменьшается при переходе с торцевой плоской поверхности на боковые цилиндрические. Мощность тепловыделения на угловых участках снижается. Происходит более плавное изменение направления тока, что приводит к уменьшению плотности мощности тепловыделения в области пересечения торцевой и боковой поверхностей. Одновременно с этим проявляется эффект замыкания тока на плоскости путем обтекания центрального отверстия. Ток протекает одновременно вдоль боковой поверхности отверстия и на торцевой поверхности.

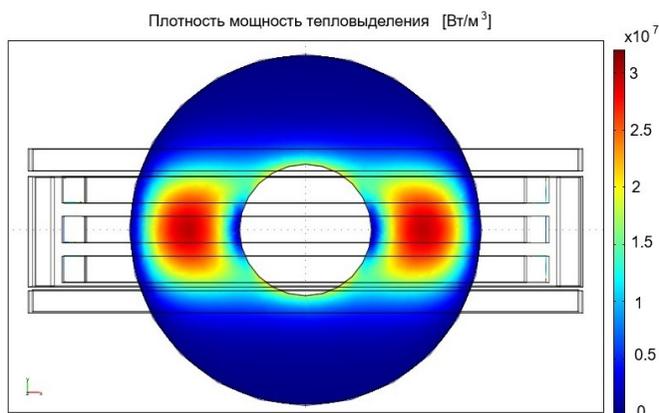


Рис. 2. Распределение плотности мощности тепловыделения на торцевой поверхности кольца

В плоскостях среза, параллельных торцевой поверхности заготовки, распределение плотности тока и мощности тепловыделения занимает более протяженный участок, вплоть до боковых поверхностей. Из-за того, что ток в области центрального отверстия разделяется на горизонтальную и вертикальную составляющие, плотность мощности меньше, чем на внешней поверхности.

На рис. 3 приведено распределение плотности мощности на продольном срезе кольца. Наблюдаются значительные участки с равномерным распределением плотности мощности. Это приводит к формированию неравномерного распределения температуры вдоль радиальной координаты. При моделировании тепловых процессов получен значительный перегрев области возле отверстия. Объясняется это тем, что одинаковое значение мощности в единичных прямоугольных областях кольца соответствует областям с разным радиусом и, соответственно, с разным объемом.

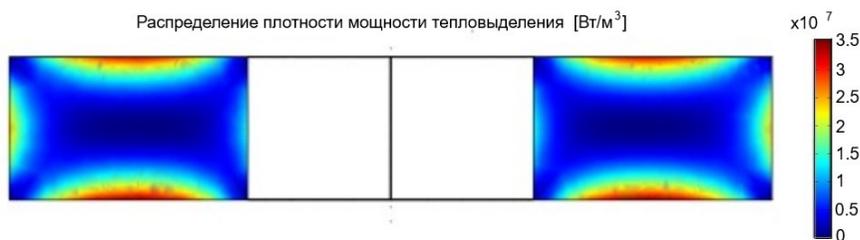


Рис. 3. Распределение плотности мощности тепловыделения в разрезе кольца ($y = 0$)

Проведенные исследования по использованию системы автоматического регулирования и программного управления с целью выравнивания распределения температуры в условиях частичной теплоизоляции показали невозможность получения допустимого отклонения температуры от заданного значения в объеме заготовки.

Для решения проблемы рассмотрена система управления пространственным распределением плотности тока и мощности в заготовке с помощью применения экранирующего магнитопровода между катушкой индуктора и заготовкой (рис. 4). Это позволит добиться более плавного распределения мощности по поверхности заготовки и предотвратит перегрев области возле отверстия в заготовке. В качестве материала для изготовления магнитопровода возможно применение электротехнической стали или феррита. Более удобным является вариант с ферритовыми пластинами, так как обеспечить поперечное расположение пластин в шихтованном магнитопроводе сложно в условиях изменения направления тока на угловых участках или из-за влияния геометрической формы загрузки; например, в области отверстия токи изменяют направление на 45 градусов, что приводит к наведению вихревых токов в пластинах магнитопровода.

Конструкция экранирующего магнитопровода имеет недостатки, связанные с увеличением толщины индуктора, что приводит к увеличению зазора между индуктором и загрузкой, а также с условиями работы магнитопровода в области высоких температур. В данной работе не рассмотрен комплекс вопросов, связанных с охлаждением магнитопровода. Проблемы одинаковы сложны как для феррита, так и для магнитопровода из шихтованного железа. Известны способы решения проблемы, заключающиеся в размещении слоя теплоизоляции между магнитопроводом и горячей поверхностью заготовки, а также усложнении конструкции магнитопровода за счет пропускания через него трубок с охлаждающей жидкостью. Такие технические решения, конечно, приводят к ухудшению энергетических характеристик индуктора. В данной работе остановились на принятой конструкции, так как требуются дополнительные исследования не только электромагнитных процессов, но и тепловых. В итоге предполагается размещение магнитопровода в одной плоскости с обмоткой, которая будет иметь более сложную форму. Проблему охлаждения магнитопровода перспективный вариант не устраняет.

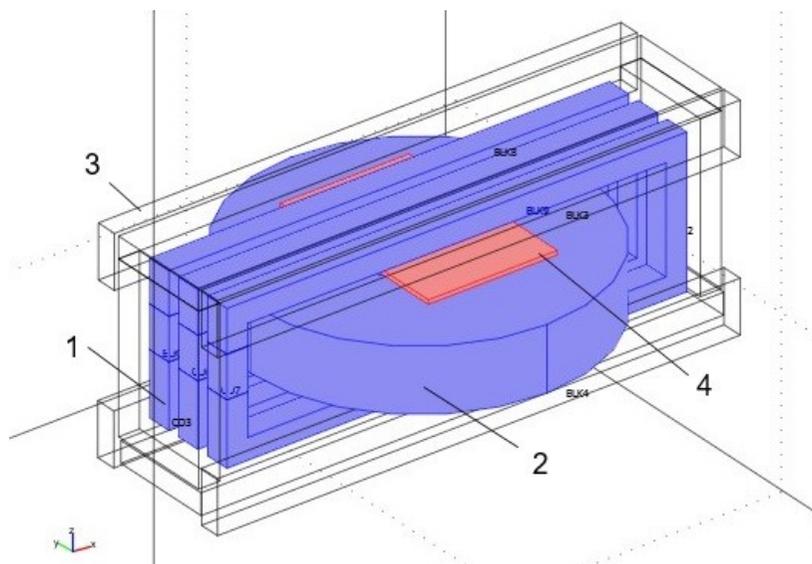


Рис. 4. Геометрическая модель индуктора с загрузкой: 1 – проводники индуктора; 2 – заготовка; 3 – пластины магнитопровода; 4 – пластина экранирующего магнитопровода

В результате проведенных расчетов получено приведенное на рис. 5 распределение плотности мощности на торцевой поверхности заготовки. Как видно из рисунка, область с мощностью тепловыделения смещена от отверстия в кольце. Аналогичные по виду распределения мощности наблюдаются по всей толщине кольца, подтверждая отсутствие тепловыделения во внутренних областях кольца, что свидетельствует о замыкании тока только по поверхности. Таким образом, выполнено одно из условий выравнивания распределения температуры во всем объеме заготовки – устранение зон с повышенным значением мощности тепловыделения.

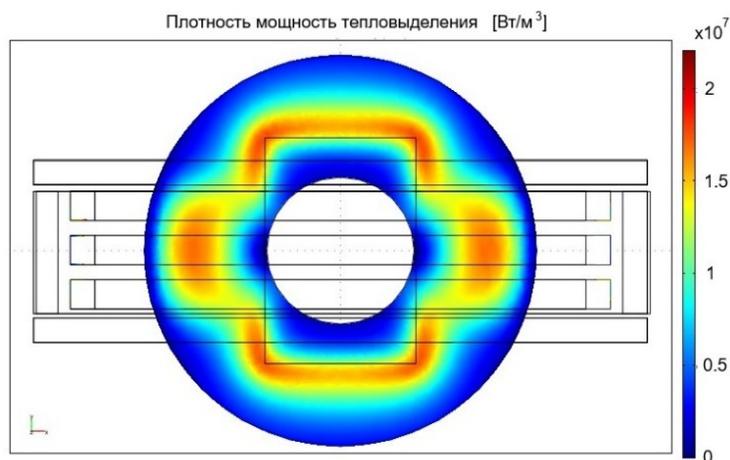


Рис. 5. Распределение плотности мощности тепловыделения на поверхности кольца

При заданном значении тока индуктора интегральное значение мощности тепловыделения в заготовке составляет 30 кВт. Распределение мощности тепловыделения, полученное в результате моделирования электромагнитных процессов, перенесено в модель тепловых процессов. Как отмечалось, при наличии сложных законов теплообмена (между поверхностями) и значительные нелинейности делают затруднительным применение связанных моделей. В рассматриваемой задаче одним из подобных факторов является движение нагреваемой заготовки. Поэтому использование сепаратной тепловой модели является более продуктивным и позволяет существенно снизить требования к вычислительным ресурсам. Для этого в геометрической модели сформированы дополнительные элементы, позволяющие на траектории протекания тока задать распределение плотности мощности тепловыделения в полном соответствии электромагнитной задаче.

В результате расчетов получены распределения температуры, показанные на рис. 6, 7.

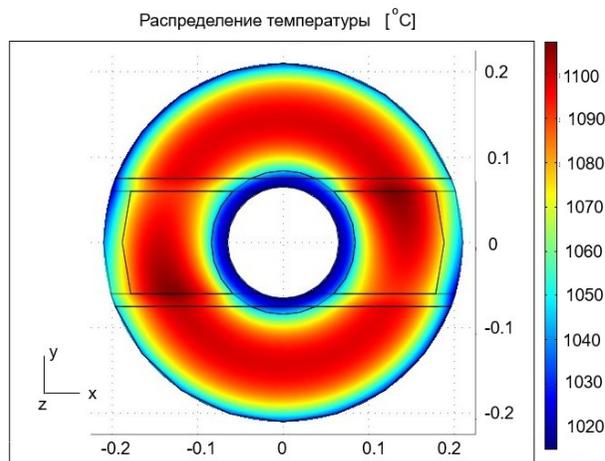


Рис. 6. Распределение температуры на поверхности заготовки, время нагрева 1300 с

Распределения температуры на торцевой поверхности и на плоскости, находящейся на расстоянии 65 мм от торцевой поверхности, имеют перепады температуры менее 100 градусов.

На рис. 8 показаны распределения температуры для продольных сечений кольцевой заготовки в плоскостях yz и xz , проходящих через ось вращения кольца. Распределения температуры для разных плоскостей отличаются незначительно. Это связано с тем, что на боковой поверхности заготовки область тепловыделения имеет форму вертикальной полосы, расположенной вблизи индуктора. Участки заготовки при ее вращении попадают в зону воздействия магнитного поля индуктора через отрезок времени, достаточный для поворота на определенный угол (около 90 градусов).

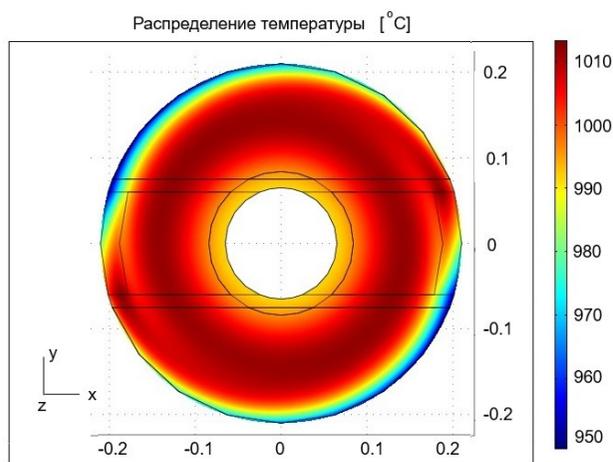


Рис. 7. Распределение температуры на расстоянии 0,065 м от торцевой поверхности кольца, время нагрева 1300 с

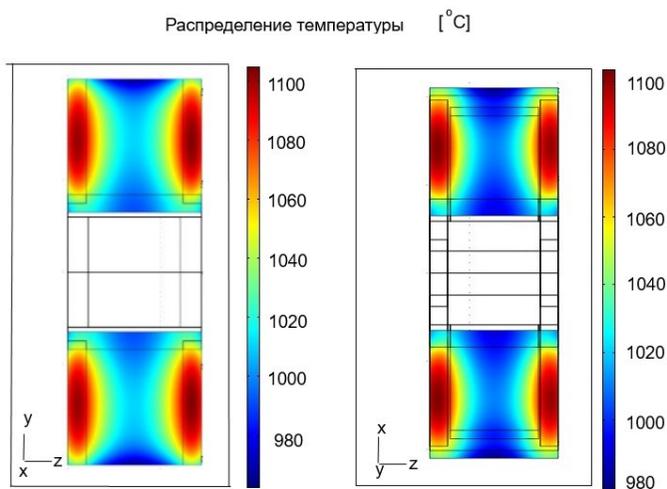


Рис. 8. Распределение температуры на плоскостях среза $(y,z,0)$ и $(x,z,0)$ при времени нагрева 1300 с

Приведенные на рис. 8 распределения температуры получены при неизменной во времени мощности тепловыделения. Использование системы регулирования температуры при контроле точки на боковой поверхности позволяет выровнять распределение до соответствия заданным требованиям. Полученное отклонение температуры в пределах всего объема кольца не превышает 5 %. Нужно учитывать, что достигнутый диапазон температур, равный 100 °С, в системе управления преобразуется в отклонение от среднего значения. При заданном значении температуры, равном 1050 °С, отклонение для распределения, представленного на рис. 8, составляет ± 50 °С.

Моделирование тепловых процессов показало возможность подогрева кольцевой заготовки до конечного значения температуры в течение 1500–1800 с при задании начального значения температуры от 0 до 900 градусов. При этом мощ-

ность в заготовке может быть увеличена до 60 кВт. Такой диапазон начальных значений температуры позволяет учесть снижение температуры заготовки на промежуточных операциях деформации и транспортировки, а также при сбоях в технологическом процессе.

Вместе с тем исходная задача при проектировании индуктора является более простой и предполагает подогрев заготовки от температуры 900 °С до 1100–1150 °С для завершения процесса прессования в более подходящих условиях. В результате коррекции времени, необходимого для подогрева кольца, остывшего до 900 °С, общее время сокращается более чем в три раза при мощности тепловыделения в заготовке 30 кВт и составляет 500 секунд.

Выполненные исследования показали возможность качественного нагрева холодной или остывшей кольцевой заготовки до заданного состояния. Такая ситуация может возникнуть при длительном перерыве в технологическом процессе. Повторный нагрев в газовой печи недопустим, так как потери металла из-за образования окалины и ее последующего удаления уменьшают вес заготовки ниже допустимого значения. Решение электромагнитной задачи при индукционном нагреве ферромагнитной заготовки становится более сложным из-за необходимости учета перехода через точку Кюри, но в целом алгоритм не изменяется.

Применение прямоугольного индуктора для нагрева кольцевой заготовки показало возможность управления распределением температуры в индукторе, не имеющем хорошей теплоизоляции. При нагреве стальных заготовок большого диаметра с соосным расположением заготовки и цилиндрического индуктора проблема выравнивания распределения температуры часто требует специальных мер, как, например, опускающихся теплоизоляционных затворов. В работе данная проблема решена более простым способом, не требующим дополнительных механизмов для перемещения массивных теплоизолирующих элементов.

Заключение

Разработана конструкция индукционной установки для подогрева вращающейся кольцевой заготовки. Использование прямоугольной катушки индуктора с внешним и внутренним магнитопроводами позволяет управлять пространственным распределением тока и мощности тепловыделения в заготовке. Показано, что предложенный вариант конструкции обеспечивает равномерное распределение температуры в кольцевой заготовке. Для уменьшения отклонения от заданного значения температуры целесообразно использование замкнутой системы регулирования температуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Яковченко А.В., Пугач А.А., Снитко С.А., Ивлева Н.И.* Совершенствование технологии штамповки колесных заготовок // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2012. № 24. С. 69–75.
2. *Кушнарев А.В., Богатов А.А., Киричков А.А., Пузырев С.С.* Развитие технологии производства железнодорожных колес // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14, № 1. С. 59–68.
3. *Будников А.С., Деметрашвили И.С., Руденко Д.О.* Разработка рациональной схемы нагрева заготовки перед операцией прошивки // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2019. № 1 (28). С. 42–47.
4. *Безручко И.И.* Индукционный нагрев для объемной штамповки. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 127 с.

5. Данилушкин А.И., Князев С.В., Семенов С.И. Математическая модель индукционного нагрева цилиндрических заготовок перед раскаткой // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 10–1. С. 101–103.
6. Фрыгин И.В. Оптимальное управление процессом индукционного подогрева стальных колес перед раскаткой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Самара: СамГТУ, 2001. 22 с.
7. Антонюк В.Е., Никифорович С.О., Рудый В.В. Обоснование целесообразности повторного нагрева в автоматизированной линии для изготовления кольцевых заготовок // Механика машин, механизмов и материалов. 2021. № 3 (56). С. 61–69.
8. Антонюк В.Е., Никифорович С.О., Рудый В.В. Особенности нагрева в условиях автоматизированной линии для изготовления кольцевых заготовок // Актуальные вопросы машиноведения. 2021. Т. 10. С. 321–325.
9. Базаров А.А., Колпаков Д.В., Штукатуров Н.Р., Будко С.И. Индуктор прямоугольной формы с магнитопроводом для нагрева массивных колец перед раскаткой // Общество. 2023. № 4–2 (31). С. 44–50.
10. Процев Ю.В. Расчет суммарных степеней деформации при многопереходной раскатке кольцевых заготовок // Производство проката. 2012. № 3. С. 25–27.
11. Сёмин П.В., Сёмин В.А., Лисунец Н.Л. Влияние частоты вращения заготовки и инструмента на процесс раскатки дисков в изотермических условиях // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 9. С. 42–44.
12. Пешкин К.С. Параметрическая оптимизация конструкции индукционной установки для зонного нагрева деталей перед операцией пластической деформации // Взаимодействие науки и практики в условиях инновационного развития общества: Сборник научных трудов. Смоленск: МНИЦ «Наукосфера», 2022. С. 46–53.
13. Валитов В.А., Мулюков Р.Р., Назаров А.А., Сухоруков Р.Ю., Утяшев Ф.З. Использование эффекта сверхпластичности для раскатки газотурбинных дисков из жаропрочных никелевых сплавов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2013. № 3. С. 51–56.
14. Маннанов Э.Р., Галунин С.А., Никаноров А.Н., Наке Б., Козулина Т.П. Разработка индукционных систем для нагрева дисков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 2. С. 23–31.
15. Лепешкин А.Р., Ильинская О.И., Кувалдин А.Б., Лепешкин С.А. Исследование нагрева вращающихся дисков турбин в электромагнитном поле, созданном с использованием специальных индукторов и сильных постоянных магнитов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2020. № 2. С. 112–122.
16. Алиферов А.И., Жуловян В.В., Морев А.Э., Промзелев В.А. Нагрев немагнитных изделий цилиндрического и прямоугольного поперечного сечения в магнитном поле вращающихся постоянных магнитов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2018. № 4 (41). С. 30–43.
17. Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Саратулов Ф.Н. Компьютерное моделирование индукционного нагрева движущихся цилиндрических ферромагнитных заготовок // Индукционный нагрев. 2011. № 4 (18). С. 5–8.

Статья поступила в редакцию 25 мая 2024 г.

INDUCTION HEATING SYSTEM OF MASSIVE RINGS BEFORE ROLLING

*A.A. Bazarov, D.V. Kolpakov, N.R. Shtukaturov*¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, sward63rus@mail.ru, vip.ue98@mail.ru

Abstract. *The work examines an induction heating system for a large ring in a rectangular coil. The end surface of the workpiece is located horizontally. To form a uniform temperature distribution in the workpiece pushed into the inductor, a rotation mechanism is used. Conducted studies of the distribution of heat generation power and temperature in the workpiece showed the need to reduce the field strength in the hole area. A solution to the problem was found through the use of magnetic cores in the inductor design, displacing currents in the workpiece beyond areas prone to overheating. The obtained results of modeling electromagnetic and thermal fields in the workpiece confirm the correctness of the design solution.*

Keywords: *geometric model, rectangular inductor, volumetric power.*

REFERENCES

1. *Yakovchenko A.V., Pugach A.A., Snitko S.A., Ivleva N.I.* Sovershenstvovanie tekhnologii shtampovki kolesnyh zagotovok [Improving the technology of stamping wheel blanks] // Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2012. № 24. Pp. 69–75. (In Russian).
2. *Kushnarev A.V., Bogatov A.A., Kirichkov A.A., Puzyrev S.S.* Razvitie tekhnologii proizvodstva zheleznodorozhnyh koles [Development of technology for the production of railway wheels] // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. 2016. V. 14, № 1. Pp. 59–68. (In Russian).
3. *Budnikov A.S., Demetrashvili I.S., Rudenko D.O.* Razrabotka racional'noj skhemy nagreva zagotovki pered operaciej proshivki [Development of a rational scheme for heating the workpiece before the firmware operation] // Modelirovanie i razvitie processov OMD. 2019. № 1 (28). Pp. 42–47. (In Russian).
4. *Bezruchko I.I.* Indukcionnyj nagrev dlya obemnoj shtampovki [Induction heating for volumetric stamping]. L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1987. 127 p. (In Russian).
5. *Danilushkin A.I., Knyazev S.V., Semenov S.I.* Matematicheskaya model indukcionnogo nagreva cilindricheskikh zagotovok pered raskatkoj [Mathematical model of induction heating of cylindrical billets before rolling] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2012. Vol. 8. № 10–1. Pp. 101–103. (In Russian).
6. *Frygin I.V.* Optimalnoe upravlenie processom indukcionnogo podogreva stalnyh koles pered raskatkoj [Optimal control of the process of induction heating of steel wheels before rolling]: avtoreferat dis. kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.13.06. Samara: SamGTU, 2001. 22 p. (In Russian).
7. *Antonyuk V.E., Nikiforovich S.O., Rudyj V.V.* Obosnovanie celesoobraznosti povtornogo nagreva v avtomatizirovannoj linii dlya izgotovleniya kolcevnyh zagotovok [Justification of the feasibility of reheating in an automated line for the production of ring blanks] // Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov. 2021. № 3 (56). Pp. 61–69. (In Russian).
8. *Antonyuk V.E., Nikiforovich S.O., Rudyj V.V.* Osobennosti nagreva v usloviyah avtomatizirovannoj linii dlya izgotovleniya kolcevnyh zagotovok [Features of heating in an automated line



© The Author(s), 2024

¹ *Aleksandr A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Dmitry V. Kolpakov, Postgraduate Student.
Nikolay R. Shtukaturov, Postgraduate Student.*

- for the production of ring blanks] // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya. 2021. Vol. 10. Pp. 321–325. (In Russian).
9. *Bazarov A.A., Kolpakov D.V., Shtukaturov N.R., Budko S.I.* Induktor pryamougol'noj formy s magnitprovodom dlya nagreva massivnyh kolec pered raskatkoj [Rectangular inductor with a magnetic core for heating massive rings before rolling] // *Obshchestvo*. 2023. № 4–2 (31). Pp. 44–50. (In Russian).
 10. *Procviv Yu.V.* Raschet summarnykh stepeney deformacii pri mnogoperekhodnoj raskatke kol'cevyyh zagotovok [Calculation of the total degrees of deformation during multi-transition rolling of ring blanks] // *Proizvodstvo prokata*. 2012. № 3. Pp. 25–27. (In Russian).
 11. *Syomin P.V., Syomin V.A., Lisunec N.L.* Vliyanie chastoty vrashcheniya zagotovki i instrumenta na process raskatki diskov v izotermicheskikh usloviyah [The influence of the rotation speed of the workpiece and the tool on the process of rolling disks under isothermal conditions] // *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2007. № 9. Pp. 42–44. (In Russian).
 12. *Peshkin K.S.* Parametricheskaya optimizaciya konstrukcii indukcionnoj ustanovki dlya zonnogo nagreva detalej pered operacij plasticheskoj deformacii [Parametric optimization of the design of an induction installation for zone heating of parts before plastic deformation] // *Vzaimodejstvie nauki i praktiki v usloviyah innovacionnogo razvitiya obshchestva. Sbornik nauchnykh trudov*. Smolensk: MNIC «Naukosfera», 2022. Pp. 46–53. (In Russian).
 13. *Valitov V.A., Mulyukov R.R., Nazarov A.A., Suhorukov R.Yu., Utyashev F.Z.* Ispolzovanie effekta sverhplastichnosti dlya raskatki gazoturbinykh diskov iz zharoprochnykh nikelevykh splavov [Using the superplasticity effect for rolling out gas turbine disks from heat-resistant nickel alloys] // *Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii*. 2013. № 3. Pp. 51–56. (In Russian).
 14. *Mannanov E.R., Galunin S.A., Nikanorov A.N., Nake B., Kozulina T.P.* Razrabotka indukcionnykh sistem dlya nagreva diskov [Development of induction systems for heating disks] // *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*. 2019. V Vol. 12. № 2. Pp. 23–31. (In Russian).
 15. *Lepeshkin A.R., Il'inskaya O.I., Kuvaldin A.B., Lepeshkin S.A.* Issledovanie nagreva vrashchayushchih diskov turbin v elektromagnitnom pole, sozdannom s ispolzovaniem specialnykh induktorov i silnykh postoyannykh magnitov [Study of heating of rotating turbine disks in an electromagnetic field created using special inductors and strong permanent magnets] // *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika*. 2020. № 2. Pp. 112–122. (In Russian).
 16. *Aliferov A.I., Zhulovyan V.V., Morev A.E., Promzelev V.A.* Nagrev nemagnitnykh izdelij cilindricheskogo i pryamougol'nogo poperechnogo secheniya v magnitnom pole vrashchayushchih diskov postoyannykh magnitov [Heating of non-magnetic products of cylindrical and rectangular cross-section in the magnetic field of rotating permanent magnets] // *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossijskoj Federacii*. 2018. № 4 (41). Pp. 30–43. (In Russian).
 17. *Praht V.A., Dmitrievskij V.A., Sarapulov F.N.* Kompyuternoe modelirovanie indukcionnogo nagreva dvizhushchih cilindricheskikh ferromagnitnykh zagotovok [Computer modeling of induction heating of moving cylindrical ferromagnetic workpieces] // *Indukcionnyj nagrev*. 2011. № 4 (18). Pp. 5–8. (In Russian).

Original article submitted 25.05.2024

УДК 621.3

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ КОМБИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ УСТАНОВОК ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Ю.В. Зубков, А.М. Абакумов, О.А. Абакумов¹

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: zub577@mail.ru, abakumov-am@yandex.ru, abakumovoleg1@gmail.com

Аннотация. Обоснована актуальность проблемы снижения энергопотребления электроприводов установок охлаждения природного газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Рассмотрена возможность решения этой проблемы с помощью системы комбинированного управления, содержащей две группы аппаратов воздушного охлаждения газа: с непрерывно и дискретно регулируемой скоростью электроприводов вентиляторов. Получен алгоритм оптимального по критерию максимальной экономии мощности управления, учитывающий особенности распределения температуры по длине теплообменника аппарата охлаждения. Показано, что в условиях ограничений на управляющие воздействия алгоритм оптимального управления состоит из нескольких интервалов. Получены соотношения для расчета оптимальной скорости электроприводов вентиляторов первой группы, количества включенных электроприводов вентиляторов аппаратов второй группы и экономии мощности на отдельных интервалах управления. Оценено влияние количества аппаратов с непрерывным регулированием скорости вентиляторов на величину экономии мощности. Обсуждена возможность использования упрощенной методики оценки экономии электроэнергии по усредненным показателям режима работы установки охлаждения.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, установки охлаждения природного газа, частотно-регулируемый привод, оптимизация алгоритмов управления.

Введение

Для обеспечения требуемых режимов транспортировки природного газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов осуществляют компримирование газа с последующим охлаждением перед подачей в линейную часть газопровода.

Охлаждение и стабилизация температуры газа обеспечивают повышение надежности и эффективности функционирования магистральных газопроводов.



© Автор(ы), 2024

¹ Юрий Валентинович Зубков, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий».

Александр Михайлович Абакумов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Олег Александрович Абакумов, аспирант кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Установки охлаждения газа (УОГ) на компрессорных станциях с газотурбинным приводом газоперекачивающих агрегатов потребляют более половины электроэнергии, расходуемой на производственные нужды, что определяет актуальность задачи повышения их энергоэффективности. Для решения этой задачи ведутся исследования, направленные как на совершенствование конструкции аппаратов воздушного охлаждения (АВО) [1–4], так и на оптимизацию алгоритмов управления электроприводами вентиляторов АВО [5–13].

Для управления температурой газа на выходе установки охлаждения используют различные способы. Типовые установки охлаждения газа, как правило, содержат значительное количество параллельно включенных аппаратов воздушного охлаждения с общим коллектором на входе и выходе установки. Большинство АВО, как например широко используемый на отечественных УОГ аппарат типа АВГ-75, выполняются с двумя вентиляторами, приводимыми в движение асинхронными короткозамкнутыми двигателями номинальной мощностью 37 кВт.

В стационарном режиме установка охлаждения создает температурный перепад (глубину охлаждения), определяемый разностью температур на ее входе θ_{inp} и выходе θ_{out} :

$$\Delta\Theta = \theta_{inp} - \theta_{out}.$$

Величина температурного перепада $\Delta\Theta$ установки зависит от суточного и сезонного хода температуры наружного воздуха, расхода газа, его температуры на входе УОГ. Для стабилизации температуры на выходе установки в условиях действия указанных возмущений необходимо управлять величиной температурного перепада $\Delta\Theta$, то есть обеспечивать требуемый температурный перепад:

$$\Delta\Theta = \Delta\theta_r. \quad (1)$$

Дискретное и рациональное дискретное управление

Основным способом управления температурой на выходе, используемым на большинстве установок охлаждения, является изменение количества включенных электродвигателей вентиляторов (дискретное управление).

Для разделения потоков охлаждающего воздуха отдельных вентиляторов в конструкции современных АВО используются диффузоры. Благодаря этому каждый вентилятор направляет поток охлаждающего воздуха на половину теплообменника.

В стационарных режимах температурный перепад вдоль теплообменника АВО при работе двух вентиляторов изменяется по нелинейному закону [5–7]. В результате температурный перепад $\Delta\theta_1$, создаваемый при работе двигателя одного вентилятора, больше дополнительного температурного перепада $\Delta\theta_2$ от двигателя второго вентилятора. Обозначим отношение указанных температурных перепадов:

$$\gamma = \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_a}. \quad (2)$$

Для определенных конструктивных параметров АВО при постоянном расходе газа значение γ остается неизменным и может быть определено по паспортным тепловым характеристикам аппарата или на основе экспериментальных данных. Так, для АВО типа 2АВГ-75 значение $\gamma \approx 0,6$ [6, 7]. Представим температурный перепад на АВО в виде суммы температурного перепада $\Delta\theta_1$ при

включении одного двигателя вентилятора и дополнительного температурного перепада $\Delta\theta_2$ при включении второго двигателя вентилятора:

$$\Delta\theta_a = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2. \quad (3)$$

Согласно (2) и (3)

$$\Delta\theta_1 = \gamma\Delta\theta_a, \quad \Delta\theta_2 = (1-\gamma)\Delta\theta_a. \quad (4)$$

Очевидно, что для снижения расхода электроэнергии на нужды охлаждения в первую очередь необходимо включать по одному электродвигателю на каждом АВО, а затем при необходимости подключать вторые двигатели. Назовем такой алгоритм управления рациональным дискретным.

Используя допущение об идентичности характеристик аппаратов и равномерном распределении охлаждаемого газа по параллельно включенным аппаратам, на основании уравнения теплового и материального баланса температурный перепад на УОГ при рациональном дискретном управлении можно представить с учетом (4) в виде

$$\Delta\theta_d(N_1, N_2) = \begin{cases} \frac{\gamma\Delta\theta_a N_1}{N}, & 0 \leq N_1 \leq N, \\ \gamma\Delta\theta_a + (1-\gamma)\frac{\Delta\theta_a N_2}{N}, & 0 \leq N_2 \leq N, \end{cases} \quad (5)$$

где N_1 , N_2 – количество АВО с одним и двумя включенными двигателями вентиляторов соответственно; N – количество АВО.

Температурный перепад на УОГ при работе всех электродвигателей с номинальной скоростью

$$\Delta\Theta_{nom} = \frac{\Delta\theta_a N}{N} = \Delta\theta_a.$$

Принимая за базовую величину температурного перепада значение $\Delta\Theta_{nom} = \Delta\theta_a$, представляем соотношения (5) в относительных единицах (о.е.):

$$\Delta\theta_d^*(\beta_{1d}, \beta_{2d}) = \begin{cases} \gamma\beta_{1d}, & 0 \leq \beta_{1d} \leq 1, \\ \gamma + (1-\gamma)\beta_{2d}, & 0 \leq \beta_{2d} \leq 1, \end{cases} \quad (6)$$

где $\beta_{1d} = \frac{N_1}{N}$, $\beta_{2d} = \frac{N_2}{N}$ – относительное число АВО с одним и двумя включенными двигателями вентиляторов соответственно.

Учитывая, что температурный перепад на УОГ должен быть равен требуемому:

$$\Delta\theta_r^* = \frac{\Delta\Theta_d}{\Delta\theta_a}, \quad 0 \leq \Delta\theta_r^* \leq 1,$$

из выражений (6) находим зависимости требуемого относительного числа включенных двигателей вентиляторов от относительного температурного перепада:

$$\beta_{1d}(\Delta\theta_r^*) = \frac{\Delta\theta_r^*}{\gamma}, \quad 0 \leq \Delta\theta_r^* \leq \gamma, \quad (7)$$

$$\beta_{2d}(\Delta\theta_r^*) = \frac{\Delta\theta_r^* - \gamma}{1-\gamma}, \quad \gamma \leq \Delta\theta_r^* \leq 1. \quad (8)$$

Учитывая значительное количество АВО в составе типовых УОГ, можно без существенной для оценочных расчетов погрешности пренебречь дискретностью β_{1d} , β_{2d} , β_{0d} и рассматривать их как непрерывные величины.

Суммарную мощность двигателей вентиляторов УОГ принимаем за базовое значение мощности:

$$P_{\Sigma} = P_1 2N,$$

где P_1 – мощность одного двигателя АВО.

Принимая во внимание (7), (8), представляем мощность на валу двигателей вентиляторов в относительных единицах как функцию требуемого температурного перепада:

$$P_d^*(\Delta\theta_r^*) = \begin{cases} 0,5 \frac{\Delta\theta_r^*}{\gamma}, & 0 \leq \Delta\theta_r^* \leq \gamma, \\ 0,5 \frac{\Delta\theta_r^* - \gamma}{1 - \gamma}, & \gamma \leq \Delta\theta_r^* \leq 1. \end{cases}$$

В случае, когда управление осуществляют без учета отличия температурных перепадов $\Delta\theta_1$ и $\Delta\theta_2$ (дискретное управление, $\gamma = 0,5$), температурный перепад на УОГ и мощность определяются числом N_{0d} включенных двигателей вентиляторов:

$$\Delta\Theta_{0d}(N_{0d}) = 0,5 N_{0d} \Delta\theta_a, \quad P_{0d}(N_{0d}) = N_{0d} P_1, \quad 0 \leq N_{0d} \leq 2N.$$

Или в относительных единицах

$$\Delta\Theta_{0d}^*(\beta_{0d}) = \Delta\theta_r^* = 0,5 \beta_{0d}, \quad P_{0d}^*(\beta_{0d}) = 0,5 \beta_{0d}, \quad 0 \leq \beta_{0d} \leq 2,$$

где $\beta_{0d} = \frac{N_{0d}}{N}$ – относительное количество включенных двигателей вентиляторов.

Для дискретного управления зависимость требуемой относительной мощности двигателей вентиляторов от требуемого температурного перепада принимает вид:

$$P_{0d}^*(\Delta\theta_r^*) = \Delta\theta_r^*. \quad (9)$$

Экономия мощности при использовании рационального дискретного управления вместо дискретного

$$\Delta P_1^*(\Delta\theta_r^*) = P_{0d}^*(\Delta\theta_r^*) - P_d^*(\Delta\theta_r^*), \quad (10)$$

или в процентном отношении к мощности при дискретном управлении

$$\Delta p_1(\Delta\theta_r^*) = 100 \frac{P_{0d}^*(\Delta\theta_r^*) - P_d^*(\Delta\theta_r^*)}{P_{0d}^*(\Delta\theta_r^*)} \%.$$

Комбинированное управление

В последнее время все большее применение получают системы непрерывно-регулируемого регулирования температуры газа на выходе УОГ, в которых для привода вентиляторов используются частотно-регулируемые приводы (ЧРП). Такие системы обеспечивают значительную экономию электроэнергии, потребляемой на нужды охлаждения. В то же время оснащение электродвигателей всех АВО преобразователями частоты связано с существенными финансовыми вложениями и приво-

дит к проблемам электромагнитной совместимости электрооборудования, для решения которых требуются затраты на дополнительное оборудование, в частности на фильтрокомпенсирующие устройства [14, 15].

Одним из возможных способов решения указанных проблем является использование систем комбинированного управления. В таких системах АВО делятся на две группы: одна группа оснащается ЧРП вентиляторов, а для второй используется приводы с дискретно регулируемой скоростью [8, 10].

Вопросы оптимизации режимов работы комбинированных систем без учета особенностей температурного распределения в двухвентиляторных АВО рассмотрены в [10]. Исследуем возможность дополнительного снижения потребления электроэнергии приводами УОГ за счет оптимизации алгоритмов управления с учетом указанных выше отличий температурных перепадов на АВО при работе одного и двух двигателей вентиляторов.

Введем обозначения:

– относительное количество АВО с ЧРП вентиляторов

$$\alpha = \frac{N_f}{N}, \quad 0 < \alpha < 1,$$

где N_f – количество АВО с ЧРП вентиляторов;

– относительное количество АВО с дискретно управляемыми приводами

$$\frac{N - N_f}{N} = 1 - \alpha;$$

– относительное число АВО с дискретно управляемыми приводами с одним и двумя включенными двигателями вентиляторов

$$\beta_{1c} = \frac{N - N_f}{N}; \quad \beta_{2c} = \frac{N - N_f}{N}.$$

Необходимый порядок включения двигателей и ограничения на их число представляем в виде:

$$\begin{aligned} &\text{при } 0 \leq \beta_{1c} \leq 1 - \alpha, \quad \beta_{2c} = 0; \\ &\text{при } \beta_{1c} = 1 - \alpha, \quad 0 \leq \beta_{2c} \leq 1 - \alpha. \end{aligned} \quad (11)$$

Принимая во внимание, что относительный температурный перепад на аппарате с ЧРП пропорционален относительной скорости v вентиляторов [6, 10, 11], общий относительный температурный перепад, создаваемый на УОГ аппаратами первой группы, представим в виде

$$\Delta\theta_f^*(v) = \alpha v, \quad 0 \leq v \leq 1, \quad (12)$$

где $v = \frac{n}{n_{nom}}$ – отношение текущей скорости вентилятора к номинальной.

Температурный перепад, обусловленный АВО с дискретно управляемой скоростью вентиляторов, определяем аналогично (6) с учетом (11):

$$\Delta\theta_{dc}^*(v, \beta_{1c}, \beta_{2c}) = \begin{cases} \gamma\beta_{1c}, & 0 \leq \beta_{1c} \leq 1 - \alpha, \\ \gamma(1 - \alpha) + (1 - \gamma)\beta_{2c}, & 0 \leq \beta_{2c} \leq 1 - \alpha. \end{cases}$$

Относительный температурный перепад на УОГ при комбинированном управлении находим как сумму температурных перепадов, создаваемых первой и второй группами АВО:

$$\Delta\theta_c^*(\beta_{1c}, \beta_{2c}) = \begin{cases} \alpha v + \gamma\beta_{1c}, & 0 \leq \beta_{1c} \leq 1 - \alpha, \\ \alpha v + \gamma(1 - \alpha) + (1 - \gamma)\beta_{2c}, & 0 \leq \beta_{2c} \leq 1 - \alpha. \end{cases} \quad (13)$$

Мощность на валу вентиляторов АВО с ЧРП пропорциональна их относительной скорости в третьей степени [6, 8–12]. Принимая, как и выше, за базовую величину суммарную мощность электродвигателей УОГ, относительную мощность на валу вентиляторов АВО с ЧРП представляем в виде

$$P_f^*(v) = \alpha v^3.$$

Суммарная относительная мощность на валу двигателей при комбинированном управлении и условиях (11)

$$P_c^*(v, \beta_{1c}, \beta_{2c}) = \begin{cases} \alpha v^3 + 0,5\beta_{1c}, & 0 \leq \beta_{1c} \leq 1 - \alpha, \\ \alpha v^3 + 0,5(1 - \alpha) + 0,5\beta_{2c}, & 0 \leq \beta_{2c} \leq 1 - \alpha. \end{cases} \quad (14)$$

Принимаем за критерий оптимизации экономии мощности при переходе от дискретного управления к комбинированному:

$$\Delta P_2^*(v, \beta_{1c}, \beta_{2c}) = P_{0d}^* - P_c^*(v, \beta_{1c}, \beta_{2c}).$$

Согласно (9) представляем выражение для экономии мощности в виде

$$\Delta P_2^*(v, \beta_{1c}, \beta_{2c}) = \Delta\theta_r^* - P_c^*(v, \beta_{1c}, \beta_{2c}). \quad (15)$$

Задача оптимизации заключается в нахождении управляющих воздействий v , β_{1c} , β_{2c} , доставляющих максимум критерию (15) при ограничениях на управляющие воздействия (11), (12), и выполнении технологических требований (1). Для ее решения используем метод неопределенных множителей Лагранжа. В условиях изменения требуемого температурного перепада $0 \leq \Delta\theta_r^* \leq 1$ ограничения на управляющие воздействия приводят к появлению в алгоритме оптимального управления отдельных интервалов.

Приравнявая первое уравнение в (13) требуемому температурному перепаду на УОГ, получаем уравнение связи:

$$g_1(v, \beta_{1c}) = \alpha v + \gamma\beta_{1c} - \Delta\theta_r^* = 0. \quad (16)$$

Функция Лагранжа

$$L_1(v, \beta_{1c}, \lambda_1) = \Delta P_2^* + \lambda_1 g_1(v, \beta_{1c}) = \Delta\theta_r^* - (\alpha v^3 + 0,5\beta_{1c}) + \lambda_1 [\alpha v + \gamma\beta_{1c} - \Delta\theta_r^*], \quad (17)$$

где λ_1 – неопределенный множитель Лагранжа.

Находим частные производные от функции Лагранжа по управляющим переменным и λ и приравниваем их нулю:

$$\frac{\partial L_1(v, \beta_{1c}, \lambda_1)}{\partial \beta_{1c}} = -0,5 + \lambda_1 \gamma = 0; \quad (18)$$

$$\frac{\partial L_1(v, \beta_{1c}, \lambda_1)}{\partial v} = -3v^2 + \lambda_1 \alpha = 0; \quad (19)$$

$$\frac{\partial L_1(v, \beta_{1c}, \lambda_1)}{\partial \lambda_1} = \alpha v + \gamma\beta_{1c} - \Delta\theta_r^* = 0. \quad (20)$$

Из (18) находим значение неопределенного множителя Лагранжа

$$\lambda_1 = \frac{1}{2\gamma},$$

и, подставляя его в (19), получаем выражение для оптимальной скорости

$$v_{1opt} = \frac{1}{\sqrt{6\gamma}}. \quad (21)$$

Температурный перепад, соответствующий v_{1opt} ,

$$\Delta\theta_{r1}^* = \alpha v_{1opt}. \quad (22)$$

Из (20) находим

$$\beta_{1c}(\Delta\theta_r^*) = \frac{\Delta\theta_r^* - \Delta\theta_{r1}^*}{\gamma}. \quad (23)$$

Из (23) следует, что для неотрицательности β_{1c} должно выполняться условие $\Delta\theta_r^* \geq \Delta\theta_{r1}^*$. Таким образом, на первом интервале особого управления $(0, \Delta\theta_{r1}^*)$ необходимо принять $\beta_{1c} = 0$, то есть регулирование температурного режима на этом интервале должно осуществляться только аппаратами с ЧРП. Их скорость определяется из условия (16) обеспечения требуемого температурного перепада:

$$v_1(\Delta\theta_r^*) = \frac{\Delta\theta_r^*}{\alpha}. \quad (24)$$

Значение $\Delta\theta_{r1}^*$ по (22) определяет правую границу первого интервала управления.

Мощность на валу двигателей вентиляторов на первом интервале и на его правой границе с учетом (24)

$$P_{1c}^*(\Delta\theta_r^*) = \alpha \left(v_1(\Delta\theta_r^*) \right)^3, \quad P_{1c}^*(\Delta\theta_{r1}^*) = \alpha \left(v_1(\Delta\theta_{r1}^*) \right)^3.$$

Экономия мощности на первом и последующих интервалах управления определяется выражением (15).

На втором интервале управления $(\Delta\theta_{r1}^*, \Delta\theta_{r2}^*)$ оптимальная скорость остается неизменной, $v_2(\Delta\theta_r^*) = v_{1opt}$, а требуемый температурный режим обеспечивается за счет использования АВО с одним включенным двигателем вентиляторов. Их необходимое количество определяется соотношением (23).

На рис. 1 показан пример зависимостей скорости v и количества АВО с одним β_{1c} и двумя β_{2c} включенными двигателями вентиляторов (в примере принято $\alpha = 0,5$; $\gamma = 0,6$).

Правая граница второго интервала управления соответствует ограничению $\beta_{1c} = 1 - \alpha$ и определяется выражением

$$\Delta\theta_{r2}^* = \Delta\theta_{r1}^* + \gamma(1 - \alpha). \quad (25)$$

Мощность на втором интервале управления и на его правой границе

$$\begin{aligned} P_{2c}^*(\Delta\theta_r^*) &= P_{1c}^*(\Delta\theta_{r1}^*) + 0,5\beta_{1c}(\Delta\theta_r^*), \\ P_{2c}^*(\Delta\theta_{r2}^*) &= P_{1c}^*(\Delta\theta_{r1}^*) + 0,5(1 - \alpha). \end{aligned} \quad (26)$$

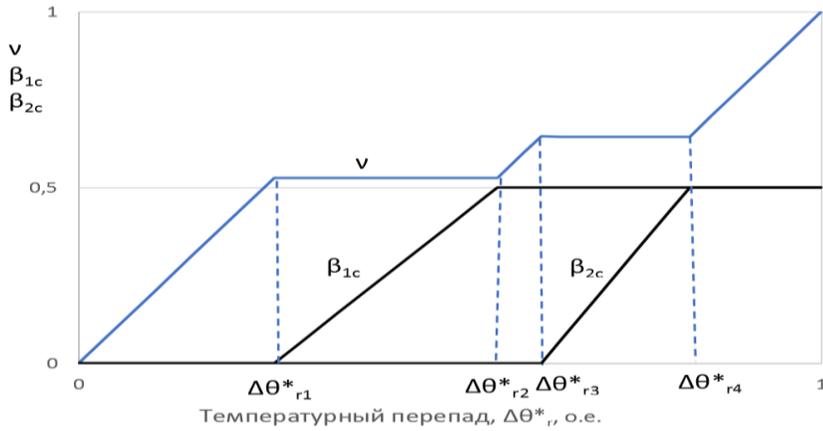


Рис. 1. Зависимости относительной скорости v и относительного количества АВО с одним β_{1c} и двумя β_{2c} включенными двигателями вентиляторов от требуемого температурного перепада $\Delta\theta_r^*$, о.е.

Чтобы найти алгоритм управления для $\Delta\theta_r^* > \Delta\theta_{r2}^*$, рассматриваем вторые уравнения в (13), (14). Уравнение связи (16) и функция Лагранжа (17) трансформируются к виду

$$g_2(v, \beta_{2c}) = \alpha v + \gamma(1 - \alpha) + (1 - \gamma)\beta_{2c} - \Delta\theta_r^*,$$

$$L_2(v, \beta_{2c}, \lambda_2) = \Delta P_2^* + \lambda_2 g_2(v, \beta_{2c}) = \Delta\theta_r^* - (\alpha v^3 + 0,5(1 - \alpha) + 0,5\beta_{2c}) + \lambda_2 [\alpha v + \gamma(1 - \alpha) + (1 - \gamma)\beta_{2c} - \Delta\theta_r^*].$$

Аналогично предыдущему находим

$$\frac{\partial L_2(v, \beta_{2c}, \lambda_2)}{\partial \beta_{2c}} = -0,5 + \lambda_2(1 - \gamma) = 0;$$

$$\frac{\partial L_2(v, \beta_{1c}, \lambda_1)}{\partial v} = -3v^2 + \lambda_2\alpha = 0;$$

$$\frac{\partial L_2(v, \beta_{1c}, \lambda_1)}{\partial \lambda_1} = \alpha v + \gamma(1 - \alpha) + (1 - \gamma)\beta_{2c} - \Delta\theta_r^* = 0; \quad (27)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2(1 - \gamma)}; \quad v_{2opt} = \frac{1}{\sqrt{6(1 - \gamma)}}. \quad (28)$$

Учитывая выражения (22), (25), температурный перепад, соответствующий v_{2opt} , можно представить в виде

$$\Delta\theta_{r3}^* = \Delta\theta_{r2}^* + \alpha(v_{2opt} - v_{1opt}).$$

Из (27) находим

$$\beta_{2c}(\Delta\theta_r^*) = \frac{\Delta\theta_r^* - \Delta\theta_{r2}^*}{1 - \gamma}. \quad (29)$$

Согласно (29) для неотрицательности β_{2c} должно выполняться условие $\Delta\theta_r^* \geq \Delta\theta_{r2}^*$. Следовательно, на третьем интервале особого управления

$(\Delta\theta_{r2}^*, \Delta\theta_{r3}^*)$ количество АВО с двумя включенными двигателями вентиляторов $\beta_{2c} = 0$, а требуемый температурный режим обеспечивается за счет управления скоростью вентиляторов первой группы АВО. Требуемая скорость определяется из уравнения связи (16) и после преобразований может быть представлена в виде

$$v_3(\Delta\theta_r^*) = v_{1opt} + \frac{1}{\alpha}(\Delta\theta_r^* - \Delta\theta_{r2}^*).$$

Мощность на валу вентиляторов на третьем интервале особого управления и на его правой границе

$$P_{3c}^*(\Delta\theta_r^*) = P_{2c}^*(\Delta\theta_{r2}^*) + \alpha(v_3(\Delta\theta_r^*))^3;$$

$$P_{3c}^*(\Delta\theta_{r3}^*) = P_{2c}^*(\Delta\theta_{r2}^*) + \alpha(v_3(\Delta\theta_{r3}^*))^3.$$

На четвертом интервале оптимального управления $(\Delta\theta_{r3}^*, \Delta\theta_{r4}^*)$ скорость вентиляторов АВО с ЧРП остается неизменной, $v_4(\Delta\theta_r^*) = v_{2opt}$, а требуемый температурный перепад обеспечивается изменением количества АВО с двумя включенными двигателями вентиляторов.

Ограничение $\beta_{2c} \leq (1 - \alpha)$ определяет правую границу четвертого интервала управления:

$$\Delta\theta_{r4}^* = \Delta\theta_{r3}^* + (1 - \alpha)(1 - \gamma).$$

Мощность на валу вентиляторов на четвертом интервале управления и его правой границе

$$P_{4c}^*(\Delta\theta_r^*) = P_{3c}^*(\Delta\theta_{r3}^*) + 0,5\beta_{2c}(\Delta\theta_r^*);$$

$$P_{4c}^*(\Delta\theta_{r4}^*) = P_{3c}^*(\Delta\theta_{r3}^*) + 0,5(1 - \alpha).$$

На пятом интервале особого управления требуемый температурный режим обеспечивается регулированием скорости вентиляторов АВО первой группы. Требуемая скорость определяется согласно уравнению связи (16):

$$v_5(\Delta\theta_r^*) = v_{2opt} + \frac{1}{\alpha}(\Delta\theta_r^* - \Delta\theta_{r4}^*).$$

Мощность на пятом интервале

$$P_{5c}^*(\Delta\theta_r^*) = P_{4c}^*(\Delta\theta_{r4}^*) + \alpha(v_5(\Delta\theta_r^*))^3.$$

На рис. 2 приведены графики экономии мощности при рациональном дискретном управлении

$$\Delta P_1^*(\Delta\theta_r^*) = P_{od}^*(\Delta\theta_r^*) - P_d^*(\Delta\theta_r^*)$$

и оптимальном комбинированном управлении для значения $\alpha = 0,5$

$$\Delta P_2^*(\Delta\theta_r^*) = P_{od}^*(\Delta\theta_r^*) - P_{ic}^*(\Delta\theta_r^*), \quad i = \overline{1,5}. \quad (30)$$

На этом же рисунке показан график экономии мощности для алгоритма комбинированного управления, не учитывающего нелинейность изменения температуры по длине теплообменника (для $\gamma = 0,5$).

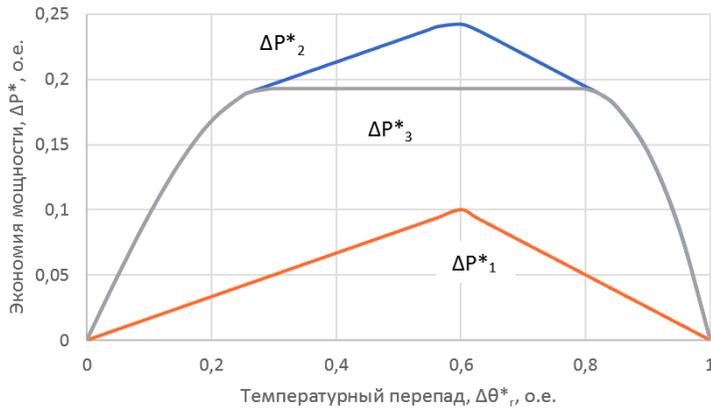


Рис. 2. Зависимости экономии мощности от требуемого температурного перепада: ΔP_1^* – рациональное дискретное управление; ΔP_2^* – оптимальное комбинированное управление; ΔP_3^* – комбинированное управление для $\gamma = 0,5$

Оценим влияние доли АВО с ЧРП на экономию мощности при оптимальном комбинированном управлении и комбинированном управлении для $\gamma = 0,5$.

Наибольшее значение экономии мощности ΔP_m^* в варианте оптимального комбинированного управления достигается на правой границе второго интервала управления при $\Delta \theta_r^* = \Delta \theta_{r2}^*$. Значение ΔP_m^* определяется подстановкой в (30) выражений (22), (25), (26) и может рассматриваться как функция относительного количества α аппаратов с ЧРП. За относительный показатель экономии принимаем отношение экономии мощности $\Delta P_m^*(\alpha)$ к мощности при дискретном управлении в процентах:

$$\Delta p_2(\alpha) = 100 \frac{\Delta P_m^*(\alpha)}{P_{od}^*(\Delta \theta_{r2}^*)} \%.$$

График $\Delta p_2(\alpha)$ приведен на рис. 3.

Аналогично найдена зависимость относительной экономии мощности $\Delta p_3(\alpha)$ при условии $\Delta \theta_r^* = \Delta \theta_{r2}^*$ для алгоритма комбинированного управления, не учитывающего нелинейность распределения температуры по длине теплообменника АВО ($\gamma = 0,5$) [10]. На рис. 3 представлен график $\Delta p_3(\alpha)$, а также график разности

$$\Delta p_{2-3}(\alpha) = \Delta p_2(\alpha) - \Delta p_3(\alpha).$$

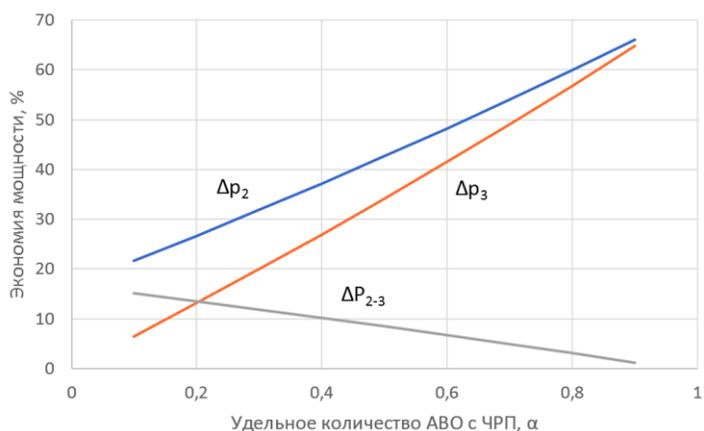


Рис. 3. Зависимости относительной экономии мощности от удельного количества АВО с ЧРП: Δp_2 – оптимальное комбинированное управление; Δp_3 – комбинированное управление для $\gamma = 0,5$; ΔP_{2-3} – дополнительная экономия мощности

Алгоритм оптимального комбинированного управления, учитывающий особенности температурного распределения по длине теплообменника АВО, например для $\alpha = 0,5$, обеспечивает уменьшение потребляемой мощности на 8,5 % по сравнению с алгоритмом комбинированного управления для $\gamma = 0,5$. Значение ΔP_{2-3} возрастает при уменьшении значения α .

Оценка энергетической эффективности оптимизации

Чтобы оценить энергетическую эффективность применения ЧРП вентиляторов АВО, необходимо сопоставить дополнительные затраты на реализацию проекта со стоимостью сэкономленной электроэнергии [16]. Методика расчета экономии электроэнергии при полностью частотном управлении электроприводами АВО с учетом нелинейной зависимости экономии от требуемого температурного перепада приведена в [17].

Для приближенной оценки энергоэффективности оптимального комбинированного управления целесообразно рассматривать экономию мощности $\Delta P_2^*(\Delta \theta_r^*)$ по выражению (30), отнесенную к мощности при дискретном управлении:

$$\Delta P_2^*(\Delta \theta_r^*) = \frac{\Delta P_c^*(\Delta \theta_r^*)}{\Delta P_{od}^*(\Delta \theta_r^*)}.$$

Следует отметить, что в реальных условиях эксплуатации режимы работы со значениями $\Delta \theta_r^*$, близкими к 0 и 1, как правило, не используются. Первый из них (значение $\Delta \theta_r^* \approx 0$) соответствует низкой температуре наружного воздуха, когда требуемый температурный перепад может быть обеспечен за счет конвективного теплообмена при отключенных двигателях вентиляторов. Второй режим (значение $\Delta \theta_r^* \approx 1$) возникает при температуре наружного воздуха, близкой к темпера-

туре газа на входе в УОГ. В этом случае двигатели вентиляторов отключают из-за неэффективности их работы.

Расчетный график зависимости $\Delta p_2(\Delta\theta_r^*)$ для $\alpha=0,5$ и рабочих значений $\Delta\theta_r^*$ приведен на рис. 4.

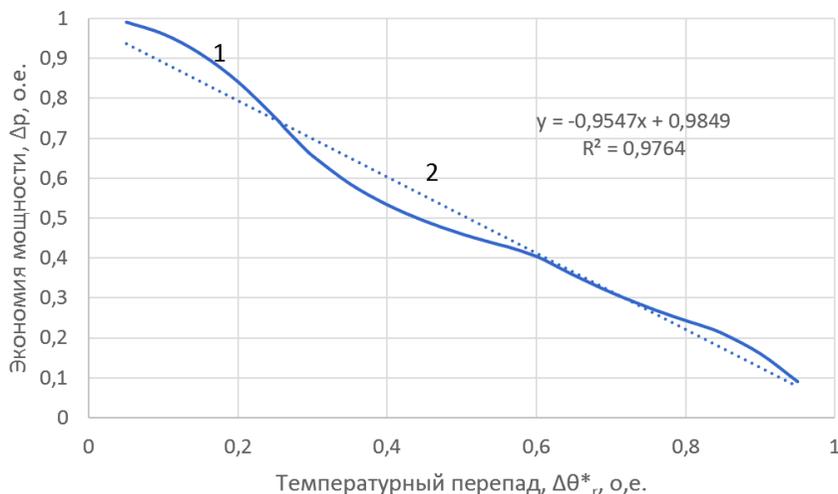


Рис. 4. Графики зависимости экономии мощности от требуемого температурного перепада: 1 – оптимальное комбинированное управление $\Delta p_2(\Delta\theta_r^*)$; 2 – линейная аппроксимация $\Delta p_2(\Delta\theta_r^*)$

В рассматриваемом варианте комбинированного управления нелинейная зависимость $\Delta p_2(\Delta\theta_r^*)$ с высоким значением величины достоверности ($R^2 = 0,976$) может быть аппроксимирована линейной функцией:

$$\Delta p_2(\Delta\theta_r^*) = 0,9547 - 0,9849\Delta\theta_r^*. \quad (31)$$

Благодаря этому оценочные расчеты экономии электроэнергии можно проводить по среднему значению $\Delta\theta_{rm}^*$. Учитывая (9), можно показать, что

$$\Delta\theta_{rm}^* = P_{0d}^* = \frac{W_{0d}}{P_{\Sigma} T_r \eta_r},$$

где W_{0d} – электроэнергия, потребленная за определенное время T_r работы, например за год, конкретной УОГ с дискретным управлением приводами вентиляторов (определяется по приборам учета электроэнергии); η_d – КПД дискретно регулируемых приводов.

Расчитывая по выражению (31) значение $\Delta p_2(\Delta\theta_{rm}^*)$ и пренебрегая отличием КПД дискретно и частотно-регулируемых приводов, определяем экономию электроэнергии в именованных единицах:

$$\Delta W_2 = W_{0d} \Delta p_2(\Delta\theta_{rm}^*).$$

Простой срок окупаемости проекта использования оптимального комбинированного управления взамен дискретного определяется соотношением [16]

$$T_c = \frac{k\alpha NC_f}{C_e \Delta W_2},$$

где k – повышающий коэффициент, учитывающий затраты на разработку проекта, дополнительное оборудование, включая преобразователи частоты, монтаж и наладку системы управления; C_f – стоимость преобразователя частоты; C_e – тариф на потребленную электроэнергию.

Из последнего выражения следует, что при прочих равных условиях срок окупаемости проекта модернизации зависит от соотношения цен на электроэнергию и единичную мощность ЧРП и должен определяться с учетом динамики их изменения.

Выводы

1. На широко применяемых двухвентиляторных аппаратах воздушного охлаждения газа вследствие нелинейного распределения температуры газа по длине теплообменника температурный перепад при включении одного вентилятора отличается от дополнительного температурного перепада, обусловленного включением второго вентилятора.

2. Алгоритм оптимального комбинированного управления электродвигателями вентиляторов УОГ, построенный с учетом этого эффекта, позволяет дополнительно сократить потребление электроэнергии на нужды охлаждения.

3. Действие ограничений на управляющие воздействия приводит к появлению нескольких интервалов в алгоритме оптимального управления. На отдельных интервалах управления требуемый температурный перепад на УОГ обеспечивается включением необходимого количества дискретно регулируемых приводов вентиляторов при неизменной оптимальной скорости частотно-регулируемых приводов, на интервалах особого управления требуемый температурный перепад создается изменением скорости ЧРП вентиляторов.

4. Дополнительная экономия мощности от учета неравномерного распределения температуры по длине теплообменника возрастает при уменьшении удельного числа АВО с ЧРП вентиляторов. Оценочные расчеты экономии мощности и электроэнергии при использовании оптимального алгоритма комбинированного управления целесообразно проводить по средним значениям требуемого температурного перепада на УОГ, которые могут быть выявлены на основании анализа потребления электроэнергии на УОГ с дискретным регулированием скорости вентиляторов.

5. Разработанная методика позволяет провести сравнительный анализ энергетической эффективности различных вариантов построения систем управления электроприводами установок охлаждения газа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алимов С.В., Прокопец А.О., Кубаров С.В. и др.* Модернизация вентиляторов АВО газа при реконструкции КС МГ // Газовая промышленность. 2009. № 4. С. 54–56.
2. *Маланичев В.А., Миатов О.Л., Типайлов А.М.* Разработка и модернизация вентиляторных блоков аппаратов воздушного охлаждения // Химическая техника. 2004. № 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://techno-cons.ru/files/23_08_2013_114.pdf

3. *Шайхутдинов А.З., Лифанов В.А., Маланичев В.А.* Современные АВО газа – ресурс энергосбережения в газовой отрасли // Газовая промышленность. 2010. № 9. С. 40–41.
4. *Linde R.* Advantage of pipelining gas at low temperatures // Pipe Line Industry. 1984. Vol. 55. No. 3. Pp. 49–56.
5. *Ванчин А.Г.* Расчет работы узла воздушного охлаждения газа в условиях компрессорной станции магистрального газопровода [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2013. Вып. 3. С. 164–179. – Режим доступа: <http://www.ogbus.ru> (дата обращения 29.03.2024).
6. *Artyukhov I., Abakumov A., Zemitsov A., Yerbayev Y.* Energy Efficiency Analysis of Control Algorithms for Fan Electric Drives in Gas Air-Cooling Plants // International Conference on Efficient Production and Processing ICEPP 2021: Proceedings of ICEPP 2021. Lecture Notes in Civil Engineering. Pp. 46–55.
7. *Данилушкин А.И., Крайнов В.Г., Мигачева Л.А.* Оптимизация стационарного распределения нагрузки аппаратов воздушного охлаждения газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2011. № 3 (31). С. 159–164.
8. *Пашкин В.В., Ивашкин О.Н., Шабанов В.А.* Способ управления частотно-регулируемым приводом аппарата воздушного охлаждения газа при двухступенчатом охлаждении // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2019. № 3. С. 177–193 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ogbus.ru> (дата обращения 29.03.2024).
9. *Артюхов И.И., Аршакаян И.И., Тарисов Р.Ш., Тримбач А.А., Устинов Е.В.* Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 1 (54). Вып. 3. С. 25–32.
10. *Абакумов А.М., Кузнецов П.К.* Комбинированное управление электроприводами вентиляторов установок охлаждения газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. Т. 29, № 3. С. 67–82.
11. *Абакумов А.М., Алимов С.В., Мигачева Л.А., Мосин В.Н.* Оптимизация стационарных режимов работы установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 3. С. 110–113.
12. *Абакумов А.М., Зубков Ю.В., Абакумов О.А.* Оптимизация стационарных режимов работы установок охлаждения газа с частотно-регулируемым приводом вентиляторов // Известия вузов. Электромеханика. 2024. Т. 67, № 1. С. 36–45.
13. *Артюхов И.И., Аршакаян И.И., Жабский М.В., Коротков А.В., Погодин Н.В., Тримбач А.А.* Некоторые аспекты применения частотно-регулируемого электропривода в системах воздушного охлаждения компримированного газа // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 1 (100). Вып. 1. С. 20–29.
14. *Артюхов И.И., Бочкарева И.И., Тримбач А.А.* Качество электроэнергии в системе электроснабжения газотурбинной компрессорной станции в условиях оснащения установок охлаждения газа частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 4 (60). Вып. 2. С. 165–170.
15. *Бочкарева И.И.* Обеспечение электромагнитной совместимости частотно-регулируемых установок охлаждения газа с источниками электроснабжения: Автореф. дис. ... канд. технических наук: 05.09.03. Саратов: СГТУ, 2012. 19 с.
16. *Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В.* Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. М.: Академия, 2008. 208 с.
17. *Абакумов А.М., Антропов В.Е., Ведерников А.С., Абакумов О.А.* Энергетическая эффективность установок охлаждения природного газа с частотно-регулируемым приводом вентиляторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2019. № 3 (63). С. 95–104.

Статья поступила в редакцию 08 мая 2024 г.

OPTIMIZATION OF COMBINED ALGORITHMS CONTROL ELECTRIC DRIVES OF INSTALLATIONS NATURAL GAS COOLING

Yu.V. Zubkov, A.M. Abakumov, O.A. Abakumov¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: zub577@mail.ru, abakumov-am@yandex.ru, abakumovoleg1@gmail.com

Abstract. *The relevance of the problem of reducing energy consumption by electric drives of natural gas cooling units at compressor stations of main gas pipelines is substantiated. The possibility of solving this problem with the help of a combined control system containing two groups of gas air cooling devices is considered: with continuously and discretely controlled speed of electric fan drives. An algorithm for control that is optimal according to the criterion of maximum power savings is obtained, taking into account the peculiarities of temperature distribution along the length of the heat exchanger of the cooling apparatus. It is shown that under conditions of restrictions on control actions, the optimal control algorithm consists of several intervals. Relationships were obtained for calculating the optimal speed of electric fan drives of the first group, the number of switched on electric fan drives of devices of the second group, and power savings at individual control intervals. The influence of the number of devices with continuous fan speed control on the amount of power savings was assessed. The possibility of using a simplified methodology for assessing energy savings based on average indicators of the operating mode of a cooling installation is discussed.*

Keywords: *energy efficiency, natural gas cooling units, variable frequency drive, optimization of control algorithms.*

REFERENCES

1. *Alimov S.V., Prokopec A.O., Kubarov S.V.* Modernizaciya ventilyatorov AVO gaza pri rekonstrukcii KS MG [Modernization of gas air coolers during reconstruction of MG compressor stations] // *Gazovaya promyshlennost.* 2009. № 4. P. 54-56. (In Russian).
2. *Malanichev V.A., Miatov O.L., Tipajlov A.M.* Razrabotka i modernizaciya ventilyatornyh blokov apparatov vozdušnogo ohlazhdeniya [Development and modernization of fan units for air cooling devices] // *Himicheskaya tekhnika,* 2004, № 2. (http://techno-cons.ru/files/23_08_2013_114.pdf) (In Russian).
3. *Shajhudinov A.Z., Lifanov V.A., Malanichev V.A.* Sovremennye AVO gaza – resurs energosberezheniya v gazovoj otrasli [Modern gas air coolers are a resource for energy saving in the gas industry] // *Gazovaya promyshlennost.* 2010. № 9. P. 40-41. (In Russian).
4. *Linde R.* Advantage of pipelining gas at low temperatures // *Pipe Line Industry.* 1984. Vol. 55. No 3. P. 49-56.
5. *Vanchin A.G.* Raschet raboty uzla vozdušnogo ohlazhdeniya gaza v usloviyah kompressornoj stancii magistral'nogo gazoprovoda [Calculation of the operation of a gas air cooling unit in the conditions of a compressor station of a main gas pipeline] [Elektronnyj resurs // Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Neftegazovoe delo». 2013. Vyp. № 3. P. 164-179. Rezhim dostupa: <http://www.ogbus.ru>. Data obrashcheniya 29.03.2024.] (In Russian).
6. *Artyukhov I., Abakumov A., Zemtsov A., Yerbayev Y.* Energy Efficiency Analysis of Control Algorithms for Fan Electric Drives in Gas Air-Cooling Plants // *International Conference on*



© The Author(s), 2024

¹ *Yuri V. Zubkov (Dr. Tech. Sci.), Professor.
Alexander M. Abakumov (Dr. Tech. Sci.), Professor.
Oleg A. Abakumov, Postgraduate Student.*

- Efficient Production and Processing ICEPP 2021: Proceedings of ICEPP 2021. Lecture Notes in Civil Engineering. P. 46-55.
7. *Danilushkin A.I., Krajnov V.G., Migacheva L.A.* Optimizaciya stacionarnogo ras-predeleniya nagruzki apparatov vozdušnogo ohlazhdeniya gaza [Optimization of stationary load distribution of gas air coolers] // Vestnik Samarsk. gosud. tekhnich. un-ta. Seriya: Tekhnich. nauki. 2011. № 3 (31). P. 159-164. (In Russian).
 8. *Pashkin V.V., Ivashkin O.N., Shabanov V.A.* Sposob upravleniya chastotno-reguliruemyim privodom apparata vozdušnogo ohlazhdeniya gaza pri dvuhstupenchatom ohlazhdenii [Method for controlling a variable-frequency drive of a gas air-cooling apparatus with two-stage cooling] // Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo». 2019. №3. P. 177-193. Rezhim dostupa: <http://ogbus.ru>. Data obrashcheniya 29.03.2024. (In Russian).
 9. *Artyuhov I.I., Arshakyan I.I., Tarisov R.Sh., Trimbach A.A., Ustinov E.V.* Resursosberegayushchaya tekhnologiya ohlazhdeniya gaza na kompressornyh stanciyah [Resource-saving technology for gas cooling at compressor stations] // Vestnik Saratov. gosud. tekhnich. un-ta. 2011. №1(54). Vyp. 3. P. 25-32. (In Russian).
 10. *Abakumov A.M., Kuznecov P.K.* Kombinirovannoe upravlenie elektroprivodami ventilyatorov ustanovok ohlazhdeniya gaza [Combined control of electric drives for fans of gas cooling units] // Vestnik Samarsk. gosud. tekhnich. un-ta. Seriya: Tekhnich. nauki. 2021. T. 29. №3. P. 67-82. (In Russian).
 11. *Abakumov A.M., Alimov S.V., Migacheva L.A., Mosin V.N.* Optimizaciya stacionarnykh rezhimov raboty ustanovok ohlazhdeniya gaza kompressornykh stancij magistral'nykh gazoprovodov [Optimization of stationary operating modes of gas cooling units at compressor stations of main gas pipelines] // Izvestiya vuzov. Elektromekhanika. 2011. №3. P. 110-113. (In Russian).
 12. *Abakumov A.M., Zubkov Yu.V., Abakumov O.A.* Optimizaciya stacionarnykh rezhimov raboty ustanovok ohlazhdeniya gaza s chastotno-reguliruemyim privodom ventilyatorov [Optimization of stationary operating modes of gas cooling units with frequency-controlled fan drives] // Izvestiya vuzov. Elektromekhanika. V. 67, №1, 2024. P.36-45. (In Russian).
 13. *Artyuhov I.I., Arshakyan I.I., Zhabskij M.V., Korotkov A.V., Pogodin N.V., Trimbach A.A.* Nekotorye aspekty primeneniya chastotno-reguliruемого elektroprivoda v sistemah vozdušnogo ohlazhdeniya komprimirovannogo gaza [Some aspects of the use of variable frequency electric drives in compressed gas air cooling systems] // Vestnik Saratov. gosud. tekhnich. un-ta. 2006. № 1(100). Vyp. 1. P. 20-29. (In Russian).
 14. *Artyuhov I.I., Bochkareva I.I., Trimbach A.A.* Kachestvo elektroenergii v sisteme elektroснабzheniya gazoturbinnoy kompressornoj stancii v usloviyah osnashcheniya ustanovok ohlazhdeniya gaza chastotno-reguliruemyim elektroprivodom ventilyatorov [Quality of electricity in the power supply system of a gas turbine compressor station when gas cooling units are equipped with frequency-controlled electric fan drives] // Vestnik Saratov. gosud. tekhnich. un-ta. 2011. № 4(60). Vyp. 2. P. 165-170. (In Russian).
 15. *Bochkareva I.I.* Obespechenie elektromagnitnoy sovmestimosti chastotno-reguliruemykh ustanovok ohlazhdeniya gaza s istochnikami elektroснабzheniya [Ensuring electromagnetic compatibility of frequency-controlled gas cooling units with power supplies]: Avtoref. dis. ... kand. tekhnicheskikh nauk: 05.09.03. Saratov: SGTU, 2012. 19 p. (In Russian).
 16. *Ilinskij N.F., Moskalenko V.V.* Elektroprivod: energo- i resursosberezhenie [Electric drive: energy and resource saving]. M.: Akademiya, 2008. 208 p. (In Russian).
 17. *Abakumov A.M., Antropov V.E., Vedernikov A.S., Abakumov O.A.* Energeticheskaya effektivnost ustanovok ohlazhdeniya prirodnogo gaza s chastotno-reguliruemyim privodom ventilyatorov [Energy efficiency of natural gas cooling units with variable frequency drive fans] // Vestnik Samarsk. gosud. tekhnich. un-ta. Seriya: Tekhnich. nauki. 2019, №3(63). P. 95-104. (In Russian).

Original article submitted 08.05.2024

УДК 621.317.31.014.33, 621.3.084.2

ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ КАТУШКИ РОГОВСКОГО С НЕИНВЕРТИРУЮЩИМ ИНТЕГРАТОРОМ

В.В. Кочетков, А.И. Мельников, Н.М. Кочетков¹

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: volodya163@mail.ru, artommelnikov@icloud.com, nikitakochetkov163@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена разработке и моделированию системы измерения импульсного тока при проведении высоковольтных испытаний и экспериментов. Предложенная система измерения основана на применении катушки Роговского с неинвертирующим интегратором. Результаты численного моделирования разработанной системы измерения тока сравнены с результатами применения малоиндуктивного шунтирующего резистора, катушки Роговского с пассивным RC-интегратором и катушки Роговского с инвертирующим активным интегратором в аналогичных системах измерения. Для сравнительного теста смоделированы различные стандартные импульсные токи, в т.ч. импульс с крутым фронтом (1/20 мкс), импульс тока большой амплитуды (4/10 мкс), импульсный ток молнии (8/20 мкс), коммутационный импульсный ток (30/80 мкс) и импульсные токи с длительностью 1–3 мс. Из результатов моделирования следует, что разработанная катушка Роговского с предложенным неинвертирующим интегратором имеет достаточно высокую точность в широкой полосе частот, перекрывающей полосу частот стандартных импульсных токов при высоковольтных испытаниях.

Ключевые слова: система измерения, импульсный ток, катушка Роговского, интегратор, высоковольтные испытания.

Испытания импульсным током охватывают большой спектр задач, таких как исследование работы устройств подавления перенапряжений и моделирование тока молнии для исследования характеристик системы молниезащиты. В соответствии со стандартами ГОСТ, IEC и IEEE [1–4] используют три формы импульса – импульс с крутым фронтом 1/20 мкс, импульс 8/20 мкс, имитирующий грозовые перенапряжения, и импульс переключения 30/80 мкс для испытания ОПН на остаточное напряжение, и две формы волны для проверки тепловой способности ОПН: импульс тока 4/10 мкс и импульс тока большой длительности [4].

Обычно при высоковольтных испытаниях для измерения импульсного тока в цепь генератора тока подключается малоиндуктивный резистор. Недостатком



© Автор(ы), 2024

¹ Владимир Валерьевич Кочетков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Артем Игоревич Мельников, магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Никита Максимович Кочетков, магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

использования резистивного шунта является то, что может произойти повреждение низковольтного регистрирующего устройства при пробое. Катушка Роговского с интегратором является одним из лучших вариантов для измерения импульсного тока.

Катушка Роговского не имеет гальванической связи с цепью генерации импульсного тока. Таким образом, эта измерительная система обеспечивает гальваническую развязку относительно цепи генерации тока, а низковольтное регистрирующее устройство также защищено от аварии из-за пробоя и наведенного напряжения при испытаниях. Существует множество применений катушки Роговского не только для измерения тока при высоковольтных испытаниях, но и для других целей, таких как измерение реального тока молнии [5], измерение гармонического тока и так далее [6].

Цель данной работы – разработать систему измерения импульсного тока на основе катушки Роговского с неинвертирующим активным интегратором, которая позволит точно измерять импульсные токи с быстрым нарастанием фронта в диапазоне нескольких микросекунд и до нескольких миллисекунд. Кроме того, интегрирующая цепь не должна нуждаться в синхронизации, когда она используется для измерения импульсного тока с быстрым нарастанием фронта.

Стандартные импульсные формы тока классифицируются на два типа в соответствии со стандартами ИЕС и IEEE [1, 2]. Первый тип используется для имитации форм тока, возникающих при грозовых перенапряжениях или переключениях. Это формы двойной экспоненциальной или затухающей осциллирующей функции. Второй тип имеет приблизительно прямоугольную форму (или форму волн большой длительности в стандарте ИЕС 60099-4 [3]), что является имитацией тока, возникающего из-за разряда длинных линий передачи.

Чтобы обеспечить точные измерения, приходится учитывать частотный спектр измеряемого тока. Полоса пропускания измерительной системы должна охватывать все спектры этих компонентов.

Для удобства измерения импульса тока при высоковольтных испытаниях катушка Роговского выполняется в виде зажимного устройства. Катушка наматывается на изолированный сердечник из немагнитного материала, чтобы избежать магнитного насыщения. Устройство должно быть пригодным для работы в широком диапазоне частот. Ограниченная частотная характеристика катушки, реагирующей на индуцированное напряжение, зависит от ее самоиндукции L_0 и общей емкости шунта. Расчетная схема катушки Роговского с измерительным кабелем и шунтирующим резистором показана на рис. 1.

Если пренебречь внутренним сопротивлением, то частота среза может быть рассчитана по уравнению

$$f_H = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}, \quad (1)$$

где C_0 – емкость катушки и измерительного кабеля.

Демпфирующее сопротивление R_0 подключается на приемном конце кабеля, чтобы избежать искажения формы сигнала вследствие отражения в нагрузке на частоте f_H . Из кривых частотных спектров стандартных импульсных токов следует, что соответствующая высшая частота среза f_H должна быть выше 1 МГц.

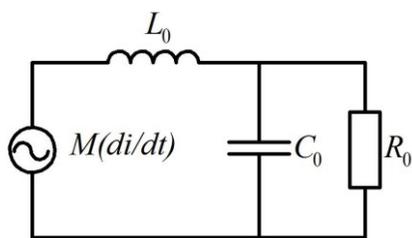


Рис. 1. Схема катушки Роговского с измерительным кабелем и шунтирующим резистором

Расчетные параметры катушки Роговского: взаимная индуктивность $M = 0,16$ мкГн; индуктивность $L_0 = 6,4$ мкГн, сопротивление $R_0 = 50$ Ом и емкость $C_0 = 1$ нФ. Частотная характеристика катушки Роговского с измерительным кабелем и шунтирующим резистором рассчитана по формуле (1) и представлена на рис. 2.

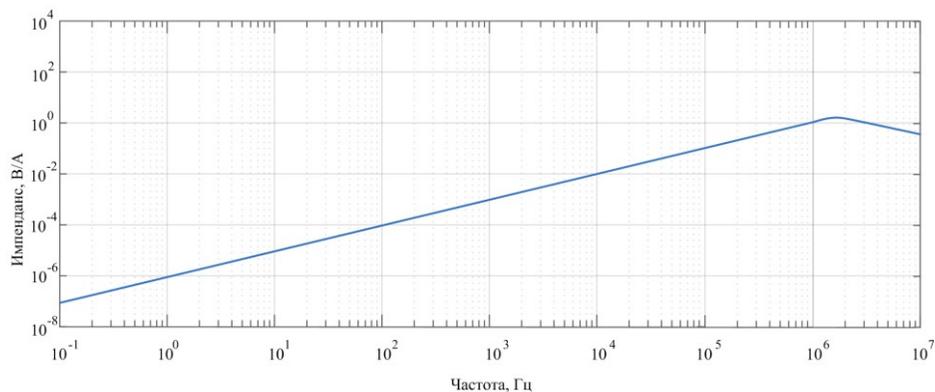


Рис. 2. Частотная характеристика передаточной функции катушки Роговского с измерительным кабелем и шунтирующим резистором

Измерительная система с катушкой Роговского и пассивным RC -интегратором представлена на рис. 3. Она достаточно легко конструируется для измерения импульсного тока в высоковольтной лаборатории. Для получения величины коэффициента передачи в 10 кА/В расчетные значения R_1 и C_1 составили 15 кОм и 110 нФ.

Частотная характеристика измерительной системы с катушкой Роговского и пассивным RC -интегратором представлена рис. 4. На рисунке обозначены: 1 – величина передаточного импеданса катушки Роговского; 2 – величина коэффициента передачи интегратора; 3 – коэффициент передачи всей измерительной системы. Из графика следует, что f_L составляет около 100 Гц, а f_H – около 2 МГц.

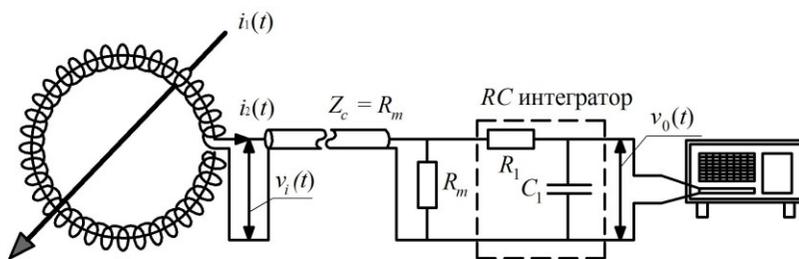


Рис. 3. Схема измерительной системы с катушкой Роговского и пассивным RC -интегратором

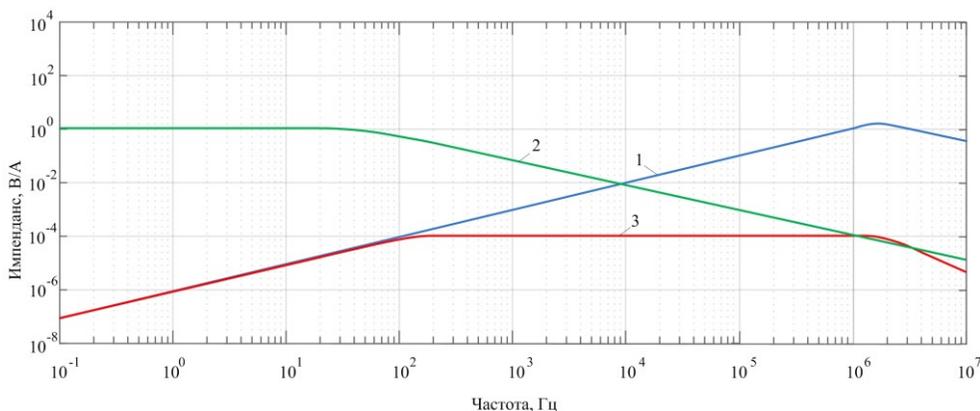


Рис. 4. Частотная характеристика передаточной функции измерительной системы с катушкой Роговского и пассивным RC -интегратором

Из рис. 4 следует, что эта измерительная система имеет хорошие возможности для измерения импульсов $1/20$, $4/10$ и $8/20$ мкс, но не справляется с измерением импульса тока с большим временем длительности, например импульсных токов коммутации [14]. Амплитуда волны заднего фронта импульса будет ослаблена по сравнению с реальной, так как интегратор не может реагировать на сигнал с низкочастотным спектром. Погрешность измерения вызвана высоким значением нижней частоты среза f_L , которая обратно пропорциональна произведению сопротивления и емкости цепи интегратора. Довольно трудно спроектировать пассивный RC -интегратор для преодоления этой проблемы, поскольку коэффициент передачи также пропорционален f_L . Если f_L рассчитана на низкое значение частоты, это влияет на измерительную систему, имеющую низкий выходной измеряемый сигнал, и на него может накладываться шум в окружающей среде лаборатории высокого напряжения. Для корректного измерения амплитуды волны заднего фронта импульса был предложен компенсированный пассивный RC -интегратор [7]. Однако этот интегратор обеспечивает хорошую точность только для некоторых форм сигнала. В [8] был предложен инвертирующий активный интегратор. Преимущество предложенного активного интегратора состоит в том, что нижняя частота среза может быть рассчитана на значение менее 1 Гц, и было обнаружено, что катушка Роговского с активным интегратором обеспечивает очень хороший результат для сигналов с длительностью в несколько миллисекунд. Однако активный интегратор всегда обеспечивает искажение

переднего фронта исследуемого сигнала в диапазоне нескольких микросекунд из-за характеристик интегрирующей цепи. Для преодоления этой проблемы можно использовать фильтр низких частот для уменьшения сигнала синхронизации, но измеряемая форма сигнала также ослабляется фильтром. Поэтому необходимо разработать катушку Роговского с соответствующим интегратором для измерения импульсных токов с широкой полосой частот и без сигнала запуска.

Инвертирующий активный интегратор [8, 9, 12, 15] состоит из инвертирующего интегратора и инвертирующего усилителя, схема которого представлена на рис. 5.

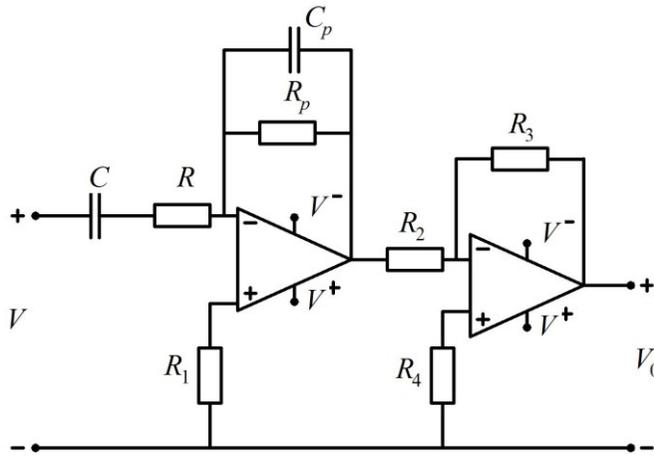


Рис. 5. Схема инвертирующего активного интегратора

Передаточная функция интегратора и коэффициент передачи всей измерительной системы могут быть рассчитаны по уравнениям:

$$W_r = \frac{V_1}{I_1} = \left(\frac{\frac{M}{L_0 C_0} s}{s^2 + \frac{1}{R_0 C_0} s + \frac{1}{L_0 C_0}} \right), \quad (2)$$

$$W_1 = \frac{V_0}{V_1} = \left(\frac{s C R_p}{(s C_1 R_p + 1)(s C R + 1)} \right) \cdot \left(\frac{R_3}{R_2} \right), \quad (3)$$

$$W_R W_1 = \frac{V_0}{I_1} = \left(\frac{\frac{M}{L_0 C_0} s}{s^2 + \frac{1}{R_s C_0} s + \frac{1}{L_0 C_0}} \right) \cdot \left(\frac{s C R_p}{(s C_1 R_p + 1)(s C R + 1)} \right) \cdot \left(\frac{R_3}{R_2} \right). \quad (4)$$

Частотная характеристика измерительной системы с катушкой Роговского и активным интегратором представлена рис. 6. На рисунке обозначены: 1 – величина коэффициента передачи катушки Роговского; 2 – величина коэффициента передачи активного интегратора; 3 – коэффициент передачи всей измерительной системы.

Из графика следует, что f_L составляет около 1 Гц, а f_H – около 2 МГц. Рассчитанный импеданс передачи охватывает частотный спектр стандартных импульсных токов. Однако этот интегратор приводит к отклонению формы сигнала в начальный момент измерения из-за неидеальных характеристик операционных усилителей. Медленно нарастающий сигнал индуцированного напряжения в начальный момент времени передается непосредственно на выход операционного усилителя через C_p , что, в свою очередь, вызывает инвертированный сигнал помехи на выходной форме сигнала.

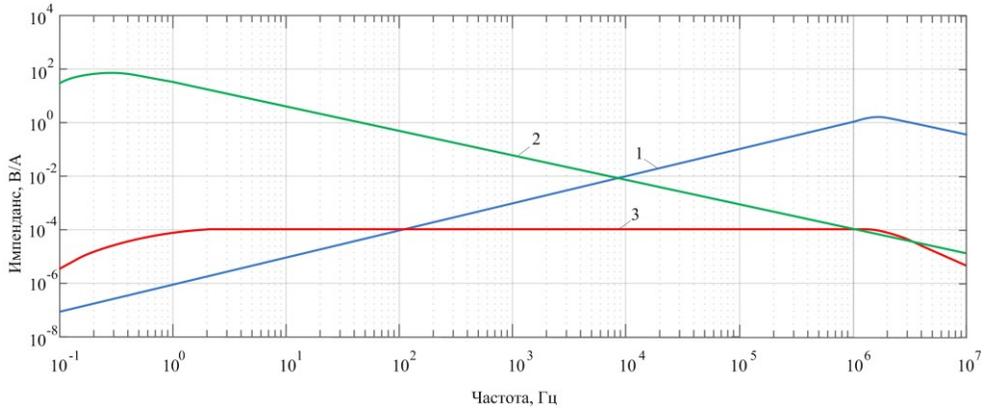


Рис. 6. Частотная характеристика передаточной функции измерительной системы с катушкой Роговского и инвертирующим активным интегратором

Схема неинвертирующего активного интегратора [9] состоит из цепи пассивного RC -интегратора и неинвертирующего интегратора на операционном усилителе (рис. 7).

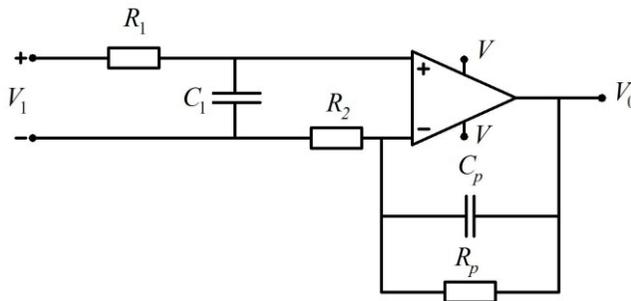


Рис. 7. Схема неинвертирующего активного интегратора

Передаточная функция интегратора и коэффициент передачи всей измерительной системы могут быть рассчитаны по уравнениям:

$$W_1 = \frac{V_1}{V_0} = \left(\frac{1}{1 + R_1 C_1 s} \right) \cdot \left(\frac{s + \frac{R_2 + R_p}{R_2 R_p C_p}}{s + \frac{1}{R_p C_p}} \right), \quad (5)$$

$$W_R W_1 = \frac{V_0}{I_1} = \left(\frac{\frac{M}{L_0 C_0} s}{s^2 + \frac{1}{R_s C_0} s + \frac{1}{L_0 C_0}} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + R_1 C_1 s} \right) \cdot \left(\frac{s + \frac{R_2 + R_p}{R_2 R_p C_p}}{s + \frac{1}{R_p C_p}} \right). \quad (6)$$

Частотная характеристика измерительной системы с катушкой Роговского и неинвертирующим активным интегратором представлена на рис. 8. На рисунке обозначены: 1 – величина коэффициента передачи катушки Роговского; 2 – величина коэффициента передачи неинвертирующего активного интегратора; 3 – коэффициент передачи всей измерительной системы.

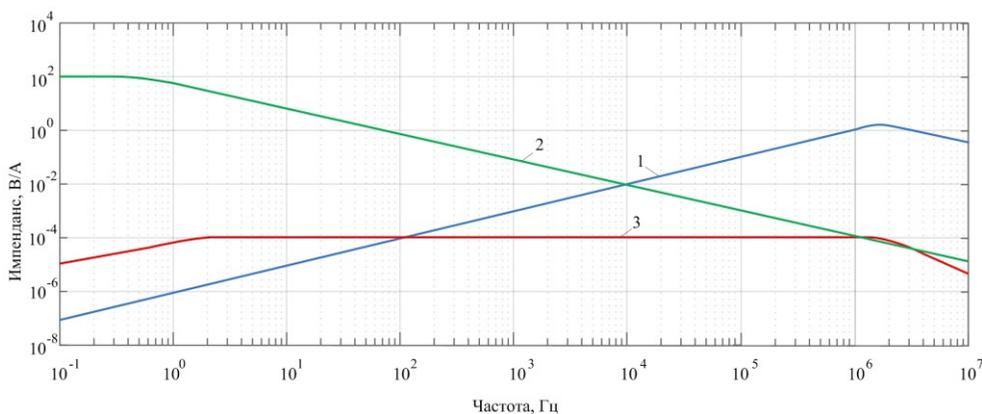


Рис. 8. Частотная характеристика передаточной функции измерительной системы с катушкой Роговского и неинвертирующим активным интегратором

Из графика следует, что f_L составляет около 1 Гц, а f_H – около 2 МГц. Рассчитанная полоса частот измерительной системы с неинвертирующим активным интегратором охватывает весь частотный спектр стандартных импульсных токов. Предложенная схема интегратора имеет преимущество перед инвертирующим активным интегратором, поскольку отсутствует разделительный конденсатор на входе усилителя, который вызывает искажения частотной характеристики в области низких частот. В совокупности с отсутствием второго операционного усилителя это приводит к существенному упрощению схемотехники и наличию полосы частот, в два раза перекрывающей потребности при измерениях стандартных импульсов тока, что делает возможным активное применение данной конструкции в измерительных и научных лабораториях [16].

Вывод. В работе обоснована перспективность применения измерительных систем с катушкой Роговского для измерения импульсного тока при высоковольтных испытаниях. Предложенная схема измерительной системы с катушкой Роговского и неинвертирующим активным интегратором имеет достаточно высокую линейность в широкой полосе частот, перекрывающей диапазон частот стандартных импульсных токов при высоковольтных испытаниях. Можно сделать вывод, что разработанная система измерения тока имеет перспективу разви-

тия и может быть применена для измерения импульсных токов при проведении высоковольтных испытаний и экспериментов. Удовлетворительные результаты математического моделирования позволяют использовать материалы, полученные в ходе исследования, для технической реализации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ ИЕС 61000-4-20-2014. Электромагнитная совместимость. Часть 4-20. Методы испытаний и измерений. Испытания на помехоэмиссию и помехоустойчивость в тем-волноводах.
2. ГОСТ Р 55630-2013/ИЕС/TR 62066:2002. Перенапряжения импульсные и защита от перенапряжений в низковольтных системах переменного тока.
3. ИЕС 60099-4(2004). Разрядники для защиты от перенапряжений. Часть 4. Оксидно-металлические разрядники без искровых промежутков для защиты от перенапряжений в системах переменного тока.
4. ГОСТ Р 55193-2012 (МЭК 60060-2:2010). Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением.
5. *Важов В.Ф., Лавринович В.А.* Техника высоких напряжений: Учебник для бакалавров. М.: Инфра-М, 2015. 263 с.
6. *Шваб А.* Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. М: Энергоатомиздат, 1983. 264 с.
7. *Liu Y., Lin F., Zhang Q., Zhong H.* Design and construction of a Rogowski coil formeasuring wide pulse current // IEEE Sens. J. 11 (January (1)). 2011. Pp. 123–130.
8. *Moonmirat P., Kunakorn A., Yuthagowith P.* A wide bandwidth Rogowskicoil with an active integrator for measurement of impulse currents // In Proceedings Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL 2013), Korea, 2013. Pp. 593–597.
9. *Limcharoen W., Yuthagowith P.* Rogowski coil with an active integrator formeasurement of switching impulse current // In Proc. 10th Int. Conf. on Electrical Engineering, Electronic, Computer, Telecommunication and Information Technology. Krabi, Thailand, 2013. Pp. 1–4.
10. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
11. *Дашук П.Н., Заенц С.Л., Комельков В.С., Кучинский Г.С., Николаевская Н.Н., Шкуронат П.И., Шнеерсон Г.А.* Техника больших импульсных токов и магнитных полей. М: Атомиздат, 1970. 472 с.
12. *Peerawut Yuthagowith, Banyat Leelachariyakul.* A rogowski coil with an active integrator for measurement of long duration impulse currents // In International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China, 2014.
13. *Mingott A., Peretto L., Tinarelli R.* A Smart Frequency Domain-Based Modeling Procedure of Rogowski Coil for Power Systems Applications, in: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020. Vol. 69. Issue 9. Pp. 6748–6755.
14. *Paophan B., Kunakorn A., Yuthagowith P.* Implementation of a Rogowski's coil for partial discharge detection // 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiba, Japan, 2016.
15. *Priti Bawankule, Kandasamy Chandrasekaran.* Rogowski Coil with an Active Integrator for Impulse Current Measurement // IEEE 3rd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT), Bangalore, India, 2022.
16. *Yueyue Zhu, Mengying Li, Yan Zhao, Liang Xue.* Fast and quantitative measurement of pulse current using interferometry // IET Power Electron, 2019. Vol. 12. Issue 13. Pp. 3556–3561.

Статья поступила в редакцию 15 мая 2024 г.

MEASUREMENT OF PULSE CURRENT DURING HIGH VOLTAGE TESTS USING ROGOWSKI COIL WITH NON-INVERTING INTEGRATOR

*V.V. Kochetkov, A.I. Melnikov, N.M. Kochetkov*¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: volodya163@mail.ru, artommelnikov@icloud.com, nikitakochetkov163@gmail.com

Abstract. *The work is devoted to the development and modelling of the system of pulse current measurement during high-voltage tests and experiments. The proposed measurement system is based on the application of Rogowski coil with non-inverting integrator. The results of numerical modelling of the developed current measurement system are compared with the results of application of a low-inductance shunt resistor, Rogowski coil with passive RC-integrator and Rogowski coil with inverting active integrator in similar measurement systems. Various standard pulse currents including steep edge pulse (1/20 μ s), large amplitude current pulse (4/10 μ s), lightning pulse current (8/20 μ s), switching pulse current (30/80 μ s), and 1-3 ms pulse currents are modelled for the comparative test. From the simulation results, it follows that the developed Rogowski coil with the proposed non-inverting integrator has sufficiently high accuracy in a wide frequency band overlapping the frequency band of standard pulse currents in high-voltage tests.*

Keywords: *measurement system, pulse current, Rogowski coil, integrator, high-voltage tests.*

REFERENCES

1. GOST IEC 61000-4-20-2014. Elektromagnitnaya sovместimost. Chast 4-20. Metody ispytaniy i izmereniy. Ispytaniya na pomekhoemissiyu i pomekhoustoichivost v temvolnovodah [Electromagnetic compatibility. Part 4-20. Test and measurement methods. Tests for interference emission and noise immunity in waveguides]. (In Russian).
2. GOST R 55630-2013/IEC/TR 62066:2002. Perenapryazheniya impul'snye i zashchita ot perenapryazheniy v nizkovol'tnykh sistemah peremennogo toka [Pulse overvoltages and surge protection in low-voltage AC systems]. (In Russian).
3. IEC 60099-4(2004). Razryadniki dlya zashchity ot perenapryazheniy. Chast 4. Oksidno-metallicheskie razryadniki bez iskrovyyh promezhutkov dlya zashchity ot perenapryazheniy v sistemah peremennogo toka [Surge arresters. Part 4. Metal oxide spark gaps without spark gaps for overvoltage protection in alternating current systems]. (In Russian).
4. GOST R 55193-2012 (MEK 60060-2:2010). Elektrooborudovanie i elektroustanovki peremennogo toka na napryazhenie 3 kV i vyshe. Metody izmereniya pri ispytaniyakh vysokim napryazheniem. ГОСТ Р 55193-2012 (МЭК 60060-2:2010) [Electrical equipment and electrical installations of alternating current for voltage 3 kV and higher. Measurement methods for high voltage testing]. (In Russian).
5. *Vazhov V.F., Lavrinovich V.A.* Tekhnika vysokih napryazheniy: Uchebnik dlya bakalavrov [High Voltage Engineering: Textbook for Bachelors]. M.: Infra-M, 2015. 263 p. (In Russian).
6. *Shvab A.* Izmereniya na vysokom napryazhenii: Izmeritelnye pribory i sposoby izmereniya [High Voltage Measurements: Measuring Instruments and Methods]. M: Energoatomizdat, 1983. 264 p. (In Russian).
7. *Liu Y., Lin F., Zhang Q., Zhong H.* Design and construction of a Rogowski coil formeasuring wide pulse current // IEEE Sens. J. 11 (January (1)). 2011. Pp. 123–130.



© The Author(s), 2024

¹ *Vladimir V. Kochetkov (PhD. Sci. (Techn.)), Associate Professor.*

Artem I. Melnikov, Master's Student.

Nikita M. Kochetkov, Master's Student.

8. *Moonmirat P., Kunakorn A., Yutthagowith P.* A wide bandwidth Rogowskicoil with an active integrator for measurement of impulse currents // In Proceedings Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL 2013), Korea, 2013. Pp. 593–597.
9. *Limcharoen W., Yutthagowith P.* Rogowski coil with an active integrator formeasurement of switching impulse current // In Proc. 10th Int. Conf. on Electrical Engineering, Electronic, Computer, Telecommunication and Information Technology. Krabi, Thailand, 2013. Pp. 1–4.
10. *Mesyac G.A.* Impulsnaya energetika i elektronika [Pulse energy and electronics]. M.: Nauka, 2004. 704 p. (In Russian).
11. *Dashuk P.N., Zaenc S.L., Komel'kov V.S., Kuchinskij G.S., Nikolaevskaya N.N., Shkuropat P.I., Shneerson G.A.* Tekhnika bolshih impulsnyh tokov i magnitnyh polej [Technology of high pulse currents and magnetic fields]. M.: Atom-izdat, 1970. 472 p.
12. *Peerawut Yutthagowith, Banyat Leelachariyakul.* A rogowski coil with an active integrator for measurement of long duration impulse currents // In International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China, 2014.
13. *Mingott A., Peretto L., Tinarelli R.* A Smart Frequency Domain-Based Modeling Procedure of Rogowski Coil for Power Systems Applications, in: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020. Vol. 69. Issue 9. Pp. 6748–6755.
14. *Paophan B., Kunakorn A., Yutthagowith P.* Implementation of a Rogowski's coil for partial discharge detection // 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiba, Japan, 2016.
15. *Priti Bawankule, Kandasamy Chandrasekaran.* Rogowski Coil with an Active Integrator for Impulse Current Measurement // IEEE 3rd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT), Bangalore, India, 2022.
16. *Yueyue Zhu, Mengying Li, Yan Zhao, Liang Xue.* Fast and quantitative measurement of pulse current using interferometry // IET Power Electron, 2019. Vol. 12. Issue 13. Pp. 3556–3561.

Original article submitted 15.05.2024

УДК 621.3; 533.9

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ТОПЛИВА

В.В. Романова^{1,2}, К.В. Суслов³, А.Г. Батухтин¹, С.В. Хромов¹

¹ Забайкальский государственный университет
Россия, 672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30

² Филиал Национального исследовательского университета
«Московский энергетический институт» в г. Волжском
Россия, 404110, г. Волжский, пр-т им. Ленина, 69

³ Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»
Россия, 111250, г. Москва, Красноказарменная, 17

E-mail: romanova181@mail.ru, batuhkina_ir@mail.ru, sergeixrom@inbox.ru, souslov@istu.edu

Аннотация. Работа посвящена исследованию влияния качества электрической энергии на срок службы электродов плазменных систем термохимической подготовки топлива, применяемых на тепловых электрических станциях, которые работают на угольном топливе. Детально освещены вопросы перемещения приэлектродного участка плазмы при использовании магнитно-волнового сканирования. В качестве основного инструмента исследования использовано программное обеспечение ANSYS Maxwell. Компьютерное моделирование выполнено при следующих основных параметрах эксперимента: коэффициент несимметрии по нулевой последовательности (K_{0U}) равен 2 % и 4 %; коэффициент несимметрии по обратной последовательности (K_{2U}) равен 2 % и 4 %; отклонение напряжения $\delta U_{(+)}$ равно 5 % и 10; применяемые материалы изготовления электродов: медь (Cu), псевдосплав вольфрама, никеля и меди – ВНДС ($W + Ni + Cu$), псевдосплав молибдена, вольфрама и меди – МВД ($Mo + W + Cu$). На основании полученных результатов моделирования построены графические отображения изменения траекторий движения приэлектродного участка плазмы при различных искажающих факторах, зависимости изменения величин удельной эрозии различных материалов электродов, графические зависимости изменения срока службы электродов плазменных систем. Исследова-



© Автор(ы), 2024

¹ Виктория Викторовна Романова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика».

Константин Витальевич Суслов, доктор технических наук, доцент кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии».

Андрей Геннадьевич Батухтин, доктор технических наук, доцент, декан энергетического факультета.

Сергей Владимирович Хромов, старший преподаватель кафедры «Энергетика».

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012-2 «Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива», соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г.).

ния, выполненные с применением компьютерного моделирования на основе программного продукта ANSYS Maxwell, позволили выполнить количественную оценку влияния искажений напряжения на траекторию перемещения приэлектродного участка плазмы и, следовательно, срок службы электродов плазматрона. В частности, в процессе исследования выполнена детальная оценка и анализ степени влияния на эксплуатацию и техническое состояние электродов плазменных систем таких показателей качества электрической энергии, как коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательности, отклонение напряжения. Проведено обсуждение полученных результатов исследования, сформулированы рекомендации по применению плазменных систем термохимической подготовки топлива, используемых на тепловых электрических станциях для розжига топлива пылеугольных котлов.

Ключевые слова: компьютерное моделирование в программном обеспечении ANSYS Maxwell, качество электрической энергии, плазменные системы термохимической подготовки топлива, приэлектродный участок плазмы, магнитно-волновое сканирование, срок службы электродов плазменных систем.

Введение

Качество электрической энергии (КЭЭ) – одно из основополагающих аспектов эффективной работы элементов электроэнергетических систем. Как известно [1–5], КЭЭ в ряде регионов России и за рубежом не соответствует регламентируемым ГОСТ 32144–2013 [6] значениям, в наибольшей степени преобладает отклонение таких показателей качества электрической энергии (ПКЭ), как несимметрия и несинусоидальность напряжения, отклонение напряжения.

На сегодняшний день плазменные системы термохимической подготовки топлива находят широкое применение в топливно-энергетических комплексах электроэнергетических систем [7, 8]. Согласно спецификации производителей плазменных систем, для их стабильной работы необходимо наличие определенных энергоресурсов (электроснабжение, водоснабжение и т. д.), которые должны соответствовать определенным требованиям [7–10].

Сложность работы плазменных систем термохимической подготовки топлива заключается в чувствительности данных систем к внешним помехам, таким как искажение напряжения питающей сети. Как и любое технически сложное оборудование, плазменные системы сконструированы и изготовлены для работы в строго определенных (номинальных) условиях эксплуатации [11–15].

Стоит отметить, что одними из основных элементов электродуговых плазменных систем термохимической подготовки топлива являются электроды, способствующие образованию плазмы при эксплуатации плазменных установок [15–16]. Для данных элементов характерны неисправности и преждевременный выход из строя, обусловленные износом поверхности электродов, который вызывается такими факторами, как термическое воздействие со стороны электрической дуги, а кроме того, электроэрозионное и коррозионно-окислительное воздействие. В зоне непосредственного воздействия привязки электрической дуги на поверхность электрода возможен его локальный нагрев до температуры в несколько тысяч градусов. Соответственно, при перемещении пятна привязки на поверхности электродов возможны появления каверн, трещин, отколов вследствие термохимических воздействий [19–21].

Одним из наиболее эффективных способов увеличения ресурса электродов является применение магнитно-волнового сканирования для перемещения приэлектродного участка плазмы. Разновидностью магнитно-волнового сканирова-

ния является питание электромагнитных катушек плазматрона переменным напряжением [22]. Стоит подчеркнуть, что при использовании любого переменного напряжения в качестве питания плазменной установки необходимо учитывать его качество.

Известно, что движение приэлектродного участка плазмы зависит от сочетания подемоторной силы и электромагнитных сил катушек [12–24]. Вследствие этого изменения электромагнитного поля катушек из-за искажения напряжения приведут к изменению движения приэлектродного участка плазмы. Отсюда следует, что подобные искажения траекторий, возникающие при отклонении уровня напряжений от регламентируемых [6] значений, могут значительно снизить ресурс электродов, так как при подобной форме траектории увеличивается время нахождения приэлектродного участка плазмы в одной области электрода. Снижение ресурса электрода, в свою очередь, уменьшает ресурс установки плазматрона в целом.

Именно поэтому в рамках настоящей статьи предлагается выполнить исследования и оценку влияния искажения напряжений на траекторию движения приэлектродного участка плазмы с магнитно-волновым сканированием и последующего изменения ресурса плазматрона при определенных условиях эксплуатации.

Материалы и методы исследования

В качестве основного инструмента исследования использовано программное обеспечение ANSYS Maxwell [25]. Указанный программный продукт предоставляет возможность выполнения процедуры оценки влияния искажений напряжения на траекторию перемещения приэлектродного участка плазмы и, следовательно, ресурс электродов плазматрона.

Как известно, траектория движения приэлектродного участка плазмы зависит от изменения электромагнитных сил катушек плазматрона, то есть изменение электромагнитного поля катушек приводит к изменению траектории движения приэлектродного участка плазмы. Следовательно, для оценки влияния искажений напряжения необходимо выполнить построение картины электромагнитных полей катушек плазматрона.

В проводимых исследованиях выбраны следующие параметры эксперимента:

- коэффициент несимметрии по нулевой последовательности (K_{0U}), равный 2 % и 4 %;
- коэффициент несимметрии по обратной последовательности (K_{2U}), равный 2 % и 4 %;
- отклонение напряжения $\delta U_{(+)}$, равное 5 % и 10 %.

Искажение напряжения задавалось однократно и оставалось неизменным на протяжении каждой итерации эксперимента.

В процессе исследования выполнены следующие эксперименты:

- *эксперимент № 1* – построение эталонной траектории движения приэлектродного участка плазмы без искажения напряжения;
- *эксперимент № 2* – построение траектории движения приэлектродного участка плазмы при величине $K_{2U} = 2\%$;
- *эксперимент № 3* – построение траектории движения приэлектродного участка плазмы при величине $K_{2U} = 4\%$;

- эксперимент № 4 – построение траектории движения приэлектродного участка плазмы при величине $K_{0U} = 2\%$;
- эксперимент № 5 – построение траектории движения приэлектродного участка плазмы при величине $K_{0U} = 4\%$;
- эксперимент № 6 – построение траектории движения приэлектродного участка плазмы при величине $\delta U_{(+)} = 5\%$;
- эксперимент № 7 – построение траектории движения приэлектродного участка плазмы при величине $\delta U_{(+)} = 10\%$.

Результаты исследования и их обсуждение

Примеры статичных форм электромагнитных полей без искажения напряжения приведены на рис. 1, при искажении напряжения (параметры $K_{2U} = 4\%$, $\delta U_{(+)} = 10\%$) – на рис. 2, 3.

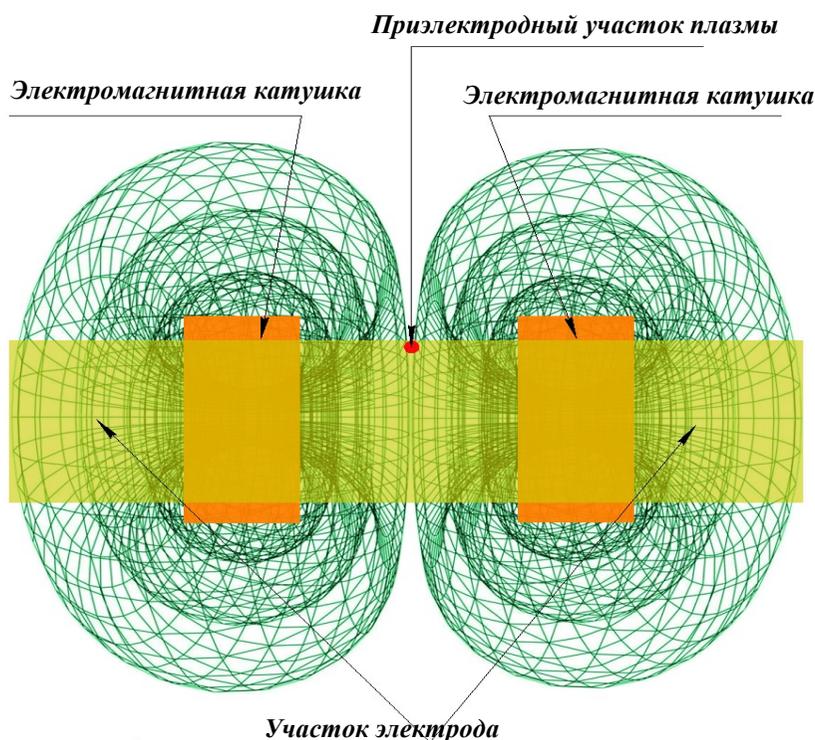


Рис. 1. Электромагнитное поле модели магнитно-волнового сканирования без искажения напряжения

Сравнение статичных форм электромагнитных полей, изображенных на рис. 1–3, показывает их видоизменения при воздействии искажающих факторов. Так, размер статичной формы электромагнитного поля катушки при несимметрии напряжений отличается от размера статичной формы как при отклонении напряжения, так и без искажения напряжений.

В рамках исследования траекторий движения приэлектродного участка плазмы необходимо реализовать картины разверток трехмерного движения на

плоскость при различных параметрах эксперимента, далее представленных на рис. 4–10.

В результате выполненных экспериментов получены траектории движения приэлектродного участка плазмы, изображенные на рис. 4–10, из которых становится очевидным, что при перемещении приэлектродного участка плазмы с магнитно-волновом сканированием переменным током его траектория изменяется со временем.

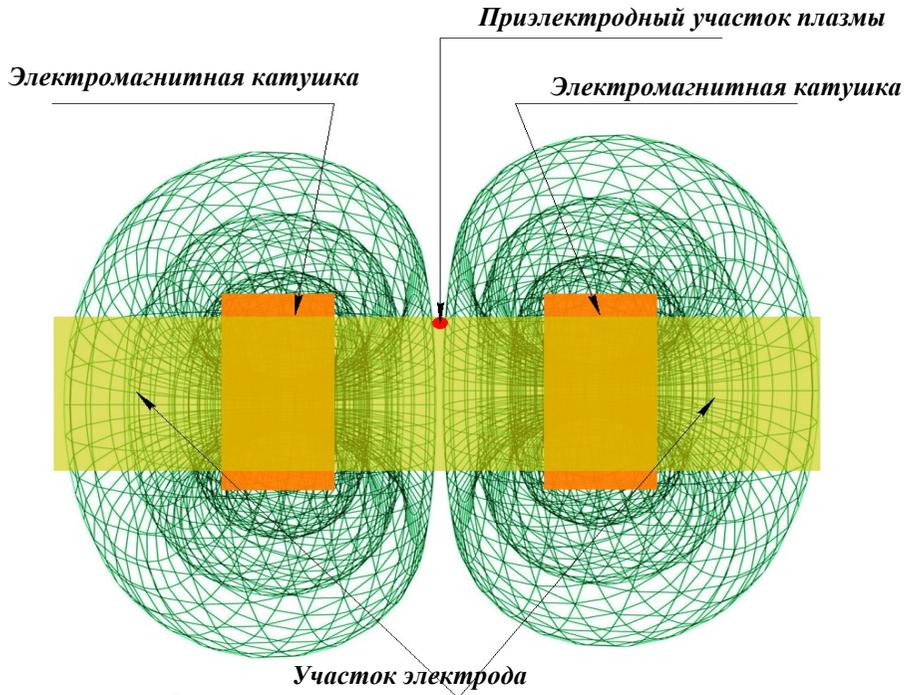


Рис. 2. Электромагнитное поле модели магнитно-волнового сканирования при $K_{2U} = 4\%$

На полученных траекториях движения приэлектродного участка плазмы (см. рис. 4–10) отображены моменты появления резких изменений кривой, что позволяет судить о потенциальном перегреве электрода вследствие искажений напряжения.

Анализ траекторий движения приэлектродного участка в выполненных исследованиях показывает следующее:

- в экспериментах № 2 и № 3 – от величины несимметрии напряжений по обратной последовательности зависит степень отклонения формы траектории от формы траектории без искажения напряжений, однако характер воздействия остается схожим;

- в экспериментах № 2 и № 4 – схожесть влияния составляющих несимметрии напряжений на траекторию движения, однако степень данного влияния различна. Несимметрия напряжений по обратной последовательности оказывает большее влияние, чем несимметрия напряжений по нулевой последовательности, на форму траектории движения;

– в экспериментах № 4 и № 5 – зависимость изменения формы траектории от величины несимметрии напряжения нулевой последовательности. Чем больше величина несимметрии напряжений по нулевой последовательности, тем больше отклонение траектории, следовательно, тем больше вероятность возникновения каверн на участке электрода.

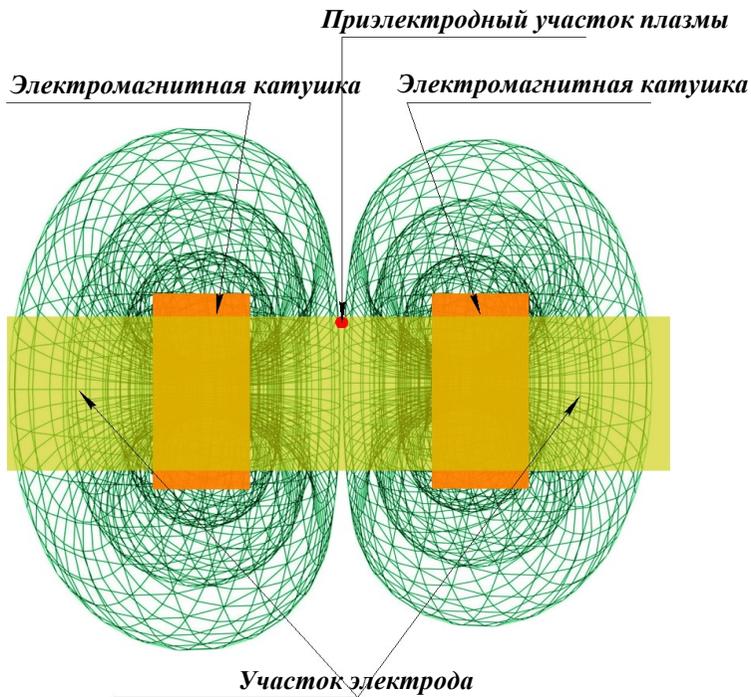


Рис. 3. Электромагнитное поле модели магнитно-волнового сканирования при $\delta U_{(+)} = 10\%$

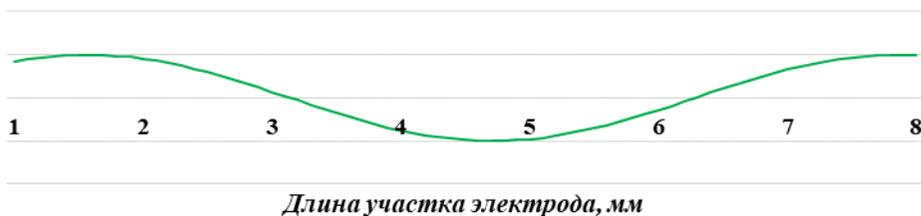


Рис. 4. Траектория движения приэлектродного участка плазмы без искажения величины напряжения

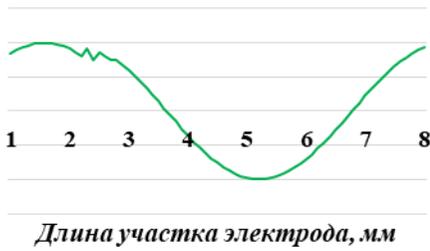


Рис. 5. Траектория движения приэлектродного участка плазмы при $K_{2U} = 2\%$

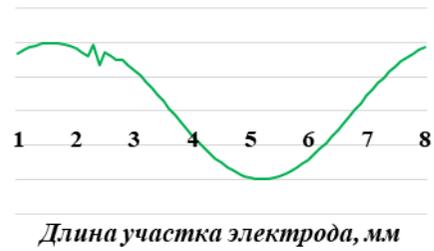


Рис. 6. Траектория движения приэлектродного участка плазмы при $K_{2U} = 4\%$



Рис. 7. Траектория движения приэлектродного участка плазмы при $K_{0U} = 2\%$

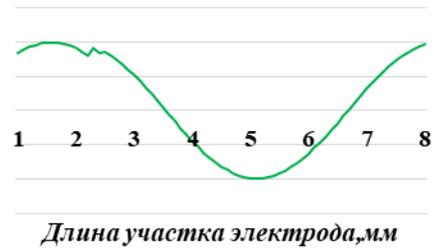


Рис. 8. Траектория движения приэлектродного участка плазмы при $K_{0U} = 4\%$



Рис. 9. Траектория движения приэлектродного участка плазмы при $\delta U_{(+)} = 5\%$

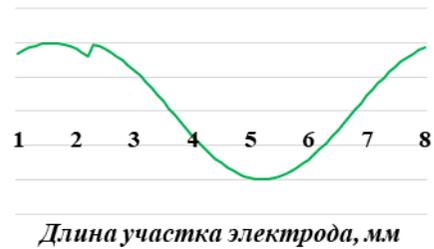


Рис. 10. Траектория движения приэлектродного участка плазмы при $\delta U_{(+)} = 10\%$

Таким образом, анализ результатов моделирования траекторий показал, что форма изменения кривой при отклонении напряжения отличается от формы траекторий при наличии несимметрии напряжений. Кроме того, очевидно, что величина отклонения напряжения прямо пропорциональна величине искажения траектории движения приэлектродного участка плазмы относительно формы траектории без искажения напряжений, полученной в результате эксперимента № 1.

В итоге в выполненных экспериментах № 2–7 построен участок с искривлением формы траектории относительно формы траектории без искажения напряжений. Соответственно, изменение движения траектории приэлектродного участка плазмы показывает качественную характеристику влияния искажения

напряжения на ресурс электродов плазматрона. Именно поэтому для количественной оценки степени воздействия искажения напряжений необходимо определить динамику варьирования величин эрозии электродов вследствие изменения показателей качества электрической энергии.

Следовательно, отразим взаимосвязь искажений траекторий приэлектродного участка плазмы с величиной эрозии электрода через изменения температуры электрода. Срок службы электрода плазматрона определим согласно формуле

$$Z = \frac{\rho \pi D L_{\text{эф}} H}{GI}, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала электрода, г/см³; G – удельная эрозия электрода, мкг/К; I – фазный ток плазматрона, А; $L_{\text{эф}}$ – цилиндрическая область эрозии электрода, мм; H – толщина стенки электрода, мм; D – толщина эрозии электрода, мм.

В формуле (1) приняты допущения: область эрозии электрода, ограниченная криволинейной поверхностью длиной L , заменена цилиндрической с эффективной длиной $L_{\text{эф}}$. Это допущение оправдано в силу того, что зона эрозии на порядок превышает как толщину эрозии, так и толщину стенки электрода [26]. Значения параметров формулы (1), кроме удельной величины эрозии, принимаем постоянными. Величина удельной эрозии будет зависеть от температуры перегрева электрода, зависящей, в свою очередь, от траектории движения приэлектродного участка. Исходя из этого для нахождения данной зависимости необходимо выполнить исследования изменения температуры электрода плазматрона при различных искажениях напряжения, используя программный продукт ANSYS Maxwell.

С целью определения количественных значений изменения ресурса электродов плазматрона необходимо получить данные величин удельной эрозии электрода при различных искажениях напряжения, используя формулу (1). Следовательно, выполним следующий эксперимент с соответствующими параметрами:

- применяемые материалы изготовления электродов: медь (Cu), псевдосплав молибдена, вольфрама и меди – МВД (Mo + W + Cu) и псевдосплав вольфрама, никеля и меди – ВНДС (W + Ni + Cu);

- начальная рабочая температура электродов принята равной 1000 К;

- начальные форма и размеры электродов одинаковы на каждой итерации моделирования;

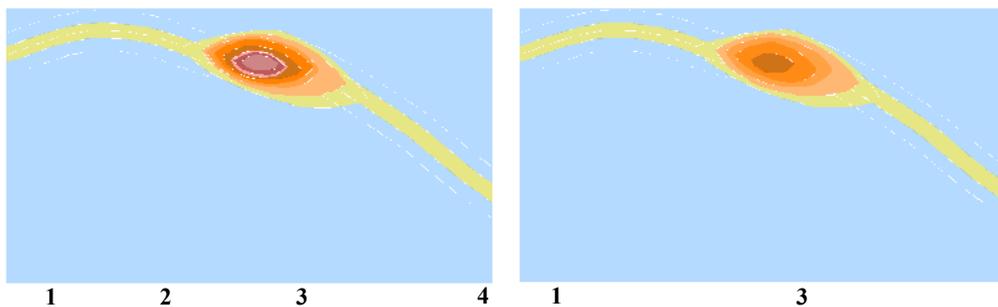
- величина фазного тока постоянна на каждой итерации моделирования;

- коэффициент несимметрии по нулевой последовательности (K_{0U}) равен 2 % и 4 %;

- коэффициент несимметрии по обратной последовательности (K_{2U}) равен 2 % и 4 %;

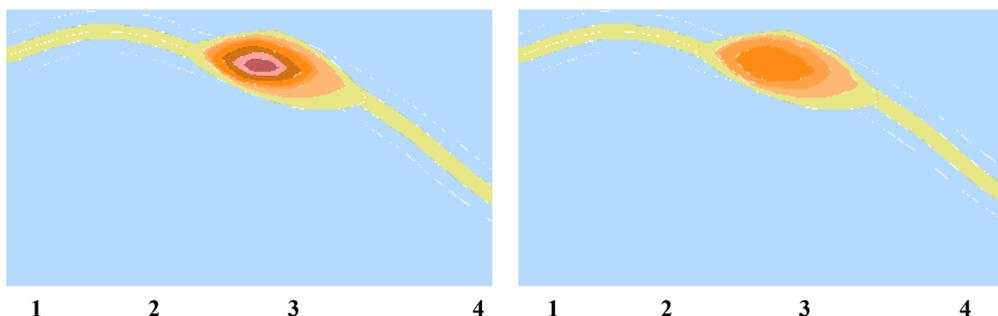
- отклонение напряжения $\delta U_{(+)}$ равно 5 % и 10 %.

В результате комплекса экспериментов получены данные изменения температуры электрода плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при различных искажениях напряжения, проиллюстрированные на рис. 11–19. Очевидно, что отображение изменения температуры электрода плазматрона показывает области повышенной температуры электрода при различных искажениях напряжения.



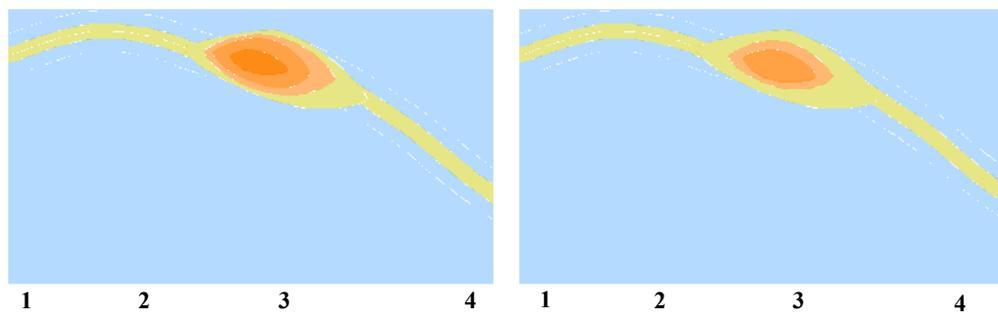
а) *Длина участка электрода, мм* б) *Длина участка электрода, мм*
 ■ $\Delta T < 50 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 150 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 250 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 290 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 330 \text{ K}$
 ■ $\Delta T < 100 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 200 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 270 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 310 \text{ K}$

Рис. 11. Отображение изменения температуры медного электрода плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $K_{2U} = 2\%$ (а), $K_{2U} = 4\%$ (б)



а) *Длина участка электрода, мм* б) *Длина участка электрода, мм*
 ■ $\Delta T < 50 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 150 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 250 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 290 \text{ K}$
 ■ $\Delta T < 100 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 200 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 270 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 310 \text{ K}$

Рис. 12. Отображение изменения температуры медного электрода плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $K_{0U} = 2\%$ (а), $K_{0U} = 4\%$ (б)



а) *Длина участка электрода, мм* б) *Длина участка электрода, мм*
 ■ $\Delta T < 50 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 150 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 250 \text{ K}$
 ■ $\Delta T < 100 \text{ K}$ ■ $\Delta T < 200 \text{ K}$

Рис. 13. Отображение изменения температуры медного электрода плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $\delta U_{(+)} = 5\%$ (а), $\delta U_{(+)} = 10\%$ (б)

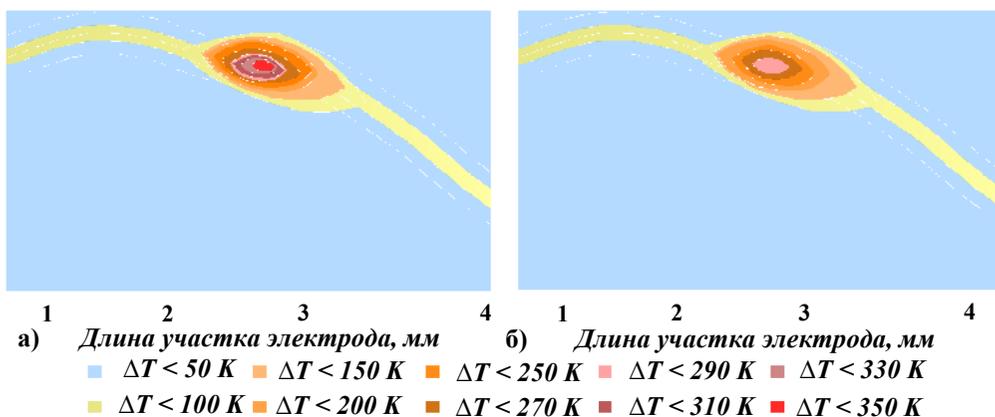


Рис. 14. Отображение изменения температуры электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди (МВД) плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $K_{2U} = 2\%$ (а), $K_{2U} = 4\%$ (б)

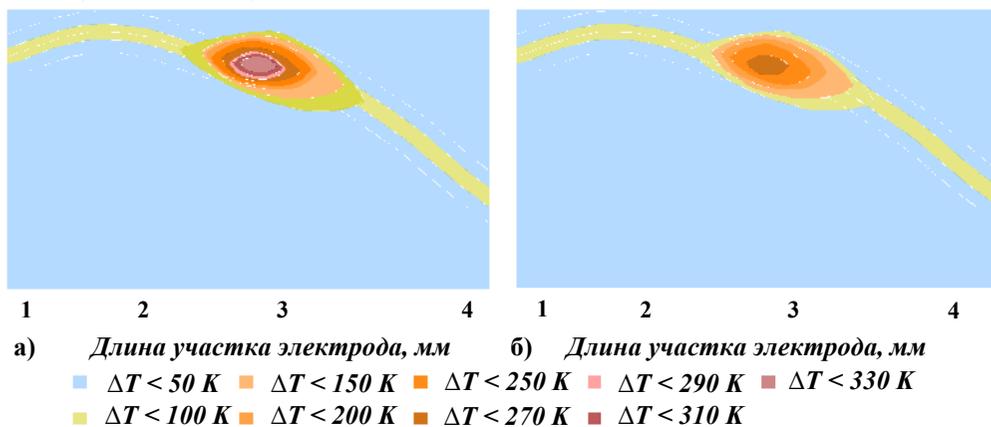


Рис. 15. Отображение изменения температуры электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди (МВД) плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $K_{0U} = 2\%$ (а), $K_{0U} = 4\%$ (б)

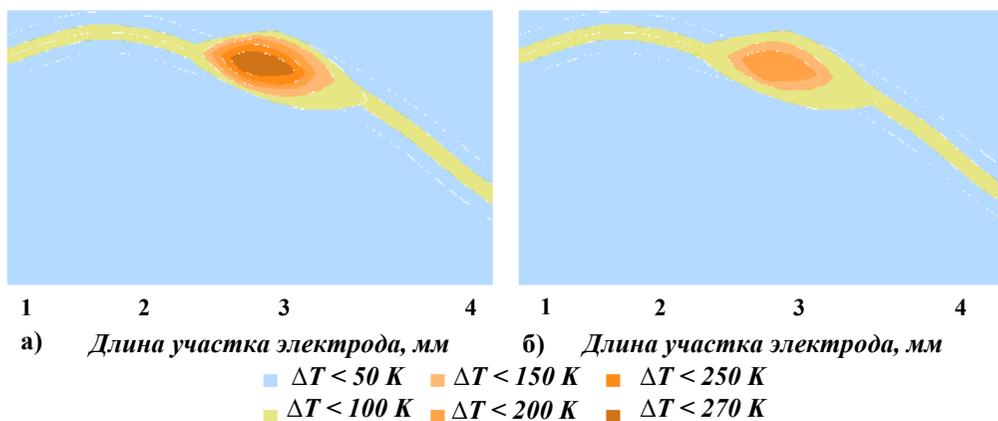


Рис. 16. Отображение изменения температуры электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди (МВД) плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $\delta U_{(+)} = 5\%$ (а), $\delta U_{(+)} = 10\%$ (б)

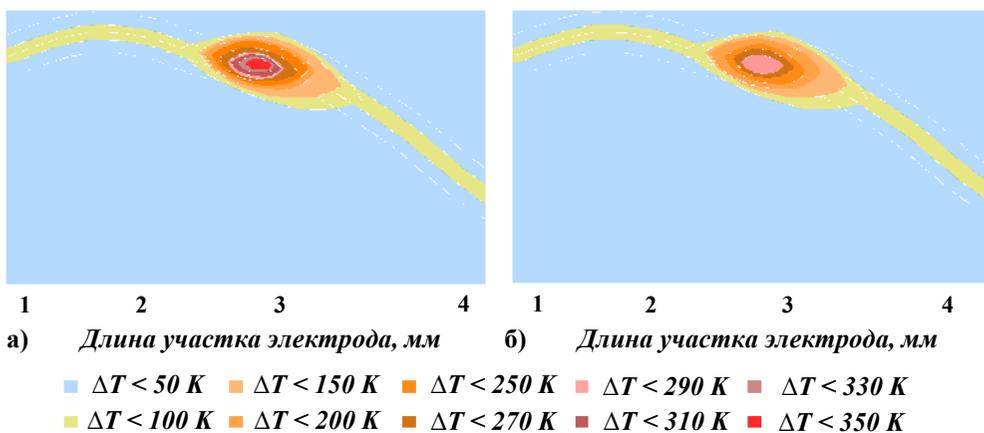


Рис. 17. Отображение изменения температуры электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди (ВНДС) плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $K_{2U} = 2\%$ (а), $K_{2U} = 4\%$ (б)

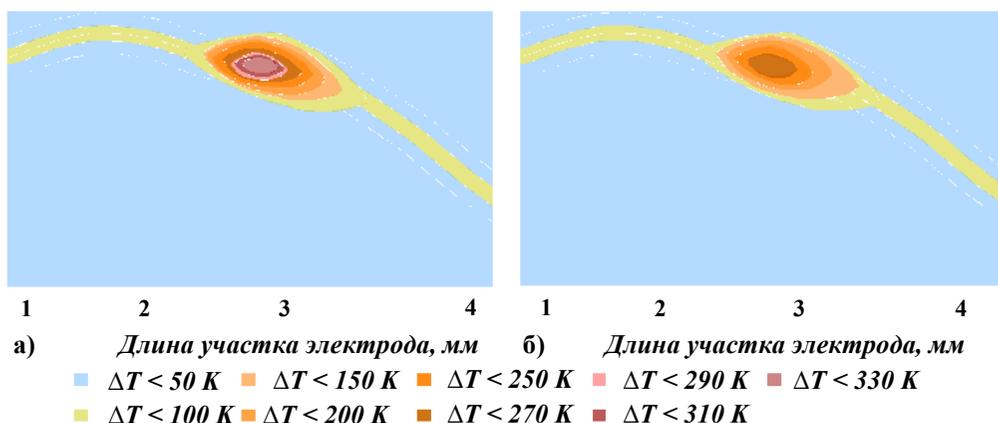


Рис. 18. Отображение изменения температуры электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди (ВНДС) плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $K_{0U} = 2\%$ (а), $K_{0U} = 4\%$ (б)

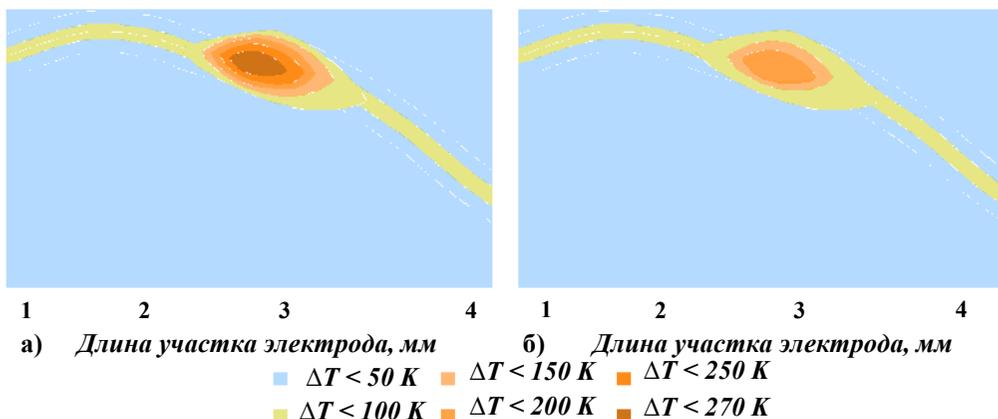


Рис. 19. Отображение изменения температуры электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди (ВНДС) плазматрона при движении приэлектродного участка плазмы при $\delta U_{(+)} = 5\%$ (а), $\delta U_{(+)} = 10\%$ (б)

Сравнение областей повышенной температуры электродов, изображенных на рис. 11–19, показывает, что повышение температуры участка электрода зависит прямо пропорционально от величины искажения напряжений.

Графические отображения рис. 11–13, иллюстрирующие изменение температуры электрода из меди (Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током ΔT :

– при K_{0U} , равном 2 % и 4 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $K_{0U} = 2\%$ меньше, чем для $K_{0U} = 4\%$, на 110 К. Максимальное ΔT составило для $K_{0U} = 2\%$ $\Delta T = 200$ К, для $K_{0U} = 4\%$ $\Delta T = 310$ К;

– при K_{2U} , равном 2 % и 4 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $K_{2U} = 2\%$ меньше, чем для $K_{2U} = 4\%$, на 80 К. Максимальное ΔT составило для $K_{2U} = 2\%$ $\Delta T = 250$ К, для $K_{2U} = 4\%$ $\Delta T = 330$ К;

– при $\delta U_{(+)}$, равном 5 % и 10 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $\delta U_{(+)} = 5\%$ меньше, чем для $\delta U_{(+)} = 10\%$, на 50 К. Максимальное ΔT составило для $\delta U_{(+)} = 5\%$ $\Delta T = 200$ К, для $\delta U_{(+)} = 10\%$ $\Delta T = 250$ К.

Проведенный анализ рис. 11–13 исследованных искажающих факторов свидетельствует о том, что наибольшее влияние K_{2U} оказывает на температурный режим работы электродов. Так, при $K_{2U} = 4\%$ изменение температуры электрода относительно рабочей температуры, равной $T = 1000$ К, составило $\Delta T' = 330$ К.

Графические отображения, представленные на рис. 13–16, иллюстрирующие изменение температуры электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди – МВД (Mo + W + Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током ΔT :

– при K_{0U} , равном 2 % и 4 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $K_{0U} = 2\%$ меньше, чем для $K_{0U} = 4\%$, на 60 К. Максимальное ΔT составило для $K_{0U} = 2\%$ $\Delta T = 245$ К, для $K_{0U} = 4\%$ $\Delta T = 305$ К;

– при K_{2U} , равном 2 % и 4 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $K_{2U} = 2\%$ меньше, чем для $K_{2U} = 4\%$, на 80 К. Максимальное ΔT составило для $K_{2U} = 2\%$ $\Delta T = 265$ К, для $K_{2U} = 4\%$ $\Delta T = 345$ К;

– при $\delta U_{(+)}$, равном 5 % и 10 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $\delta U_{(+)} = 5\%$ меньше, чем для $\delta U_{(+)} = 10\%$, на 70 К. Максимальное ΔT составило для $\delta U_{(+)} = 5\%$ $\Delta T = 195$ К, для $\delta U_{(+)} = 10\%$ $\Delta T = 265$ К.

Проведенный анализ рис. 13–16 исследованных искажающих факторов свидетельствует о том, что наибольшее влияние K_{2U} оказывает на температурный режим работы электродов. Так, при $K_{2U} = 4\%$ изменение температуры электрода относительно рабочей температуры, равной $T = 1000$ К, составило $\Delta T' = 345$ К.

Графические отображения рис. 16–19, иллюстрирующие изменение температуры электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди – ВНДС (W + Ni + Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током ΔT :

– при K_{0U} , равном 2 % и 4 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $K_{0U} = 2\%$ меньше, чем для $K_{0U} = 4\%$, на 60 К. Максимальное ΔT составило для $K_{0U} = 2\%$ $\Delta T = 250$ К, для $K_{0U} = 4\%$ $\Delta T = 310$ К;

– при K_{2U} , равном 2 % и 4 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $K_{2U} = 2\%$ меньше, чем для $K_{2U} = 4\%$, на 80 К. Максимальное ΔT составило для $K_{2U} = 2\%$ $\Delta T = 270$ К, для $K_{2U} = 4\%$ $\Delta T = 350$ К;

– при $\delta U_{(+)}$, равном 5 % и 10 % соответственно, показывают, что максимальное ΔT для $\delta U_{(+)} = 5\%$ меньше, чем для $\delta U_{(+)} = 10\%$, на 70 К. Максимальное ΔT составило для $\delta U_{(+)} = 5\%$ $\Delta T = 200$ К, для $\delta U_{(+)} = 10\%$ $\Delta T = 270$ К.

Проведенный анализ рис. 16–19 исследованных искажающих факторов свидетельствует о том, что наибольшее влияние K_{2U} оказывает на температурный режим работы электрода. Так, при $K_{2U} = 4\%$ изменение температуры электродов относительно рабочей температуры, равной $T = 1000$ К, составило $\Delta T' = 350$ К.

Искажения траекторий приэлектродного участка плазмы подтверждают влияние качества электроэнергии на ресурс электродов плазматрона. Однако для оценки степени влияния ПКЭ необходимо количественно оценить изменения срока службы электродов плазменных установок.

Соответственно, полученные значения изменения температур необходимо соотнести с удельной величиной эрозии электродов плазматрона. Ввиду этого на данном этапе исследования предпочтительно использование графоаналитического метода на основе исследований, полученных авторами в [27]. Результаты исследования графически отображены на рис. 20–22.

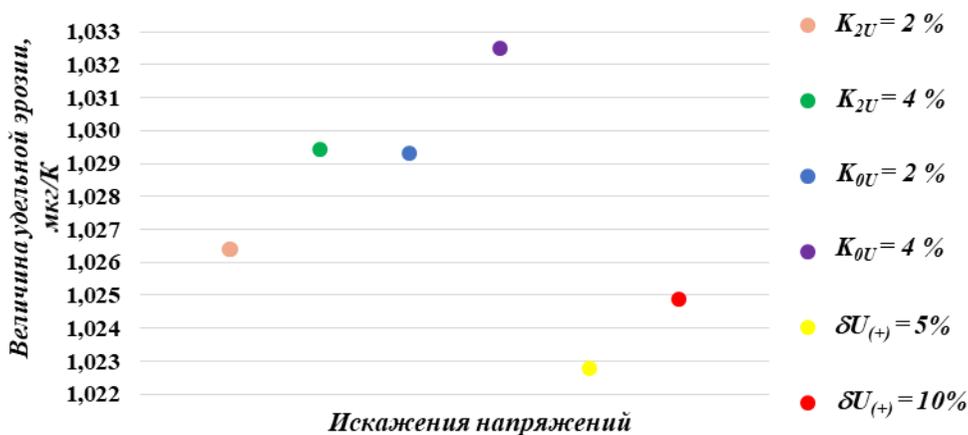


Рис. 20. Величины удельной эрозии электродов плазматрона при различных искажениях напряжения с материалом электрода медь

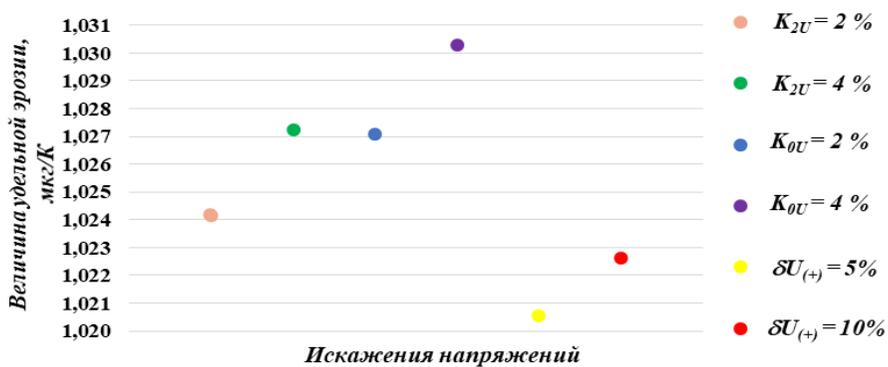


Рис. 21. Величины удельной эрозии электродов плазматрона при различных искажениях напряжения с материалом электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди (МВД)

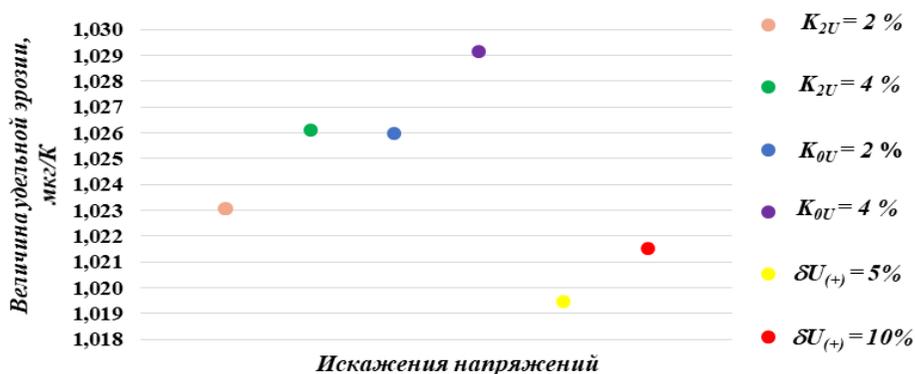


Рис. 22. Величины удельной эрозии электродов плазматрона при различных искажениях напряжения с материалом электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди (ВНДС)

Анализ изображенных на рис. 20 графических отображений свидетельствует о том, что величина удельной эрозии электрода из меди (Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током изменяется при искажении напряжения так:

– при $K_{0U} = 2\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0264$ мкг/К, при $K_{0U} = 4\%$ $G = 1,0294$ мкг/К;

– при $K_{2U} = 2\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0293$ мкг/К, при $K_{2U} = 4\%$ $G = 1,0325$ мкг/К;

– при $\delta U_{(+)} = 5\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0228$ мкг/К, при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $G = 1,0249$ мкг/К.

Изображенные на рис. 21 графические отображения показывают, что величина удельной эрозии электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди – МВД (Mo + W + Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током изменяется при искажении напряжения так:

– при $K_{0U} = 2\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0242$ мкг/К, при $K_{0U} = 4\%$ $G = 1,0272$ мкг/К;

– при $K_{2U} = 2\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0271$ мкг/К, при $K_{2U} = 4\%$ $G = 1,0303$ мкг/К;

– при $\delta U_{(+)} = 5\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0206$ мкг/К, при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $G = 1,0226$ мкг/К.

Анализ графических отображений, представленных на рис. 22, показывает, что величина удельной эрозии электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди – ВНДС (W + Ni + Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током изменяется при искажении напряжения так:

– при $K_{0U} = 2\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0231$ мкг/К, при $K_{0U} = 4\%$ $G = 1,0261$ мкг/К;

– при $K_{2U} = 2\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0260$ мкг/К, при $K_{2U} = 4\%$ $G = 1,0292$ мкг/К;

– при $\delta U_{(+)} = 5\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0194$ мкг/К, при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $G = 1,0215$ мкг/К.

Сравнение полученных результатов удельной эрозии электродов показало, что наибольшее значение данного параметра отмечено для медного электрода, что обусловлено меньшей термической стойкостью материала.

Как известно, для установок, применяемых для розжига топлива угольных тепловых станций, нормативный срок службы электрода по данным завода-изготовителя составляет 200 ч [26, 27].

На основании формулы (1) определим срок службы электрода при различных искажающих факторах. В качестве примера рассмотрим вариант эксперимента – электрод из меди (Cu) плазматрона при условии $K_{2U} = 4\%$:

$$Z = \frac{8.96 \cdot 3.14 \cdot 1.81 \cdot 7 \cdot 1}{1.0292 \cdot 500} = 193.5 \text{ ч.}$$

Алгоритм вычисления Z аналогичен для остальных вариантов эксперимента. Графические результаты расчета представлены на рис. 23–25.

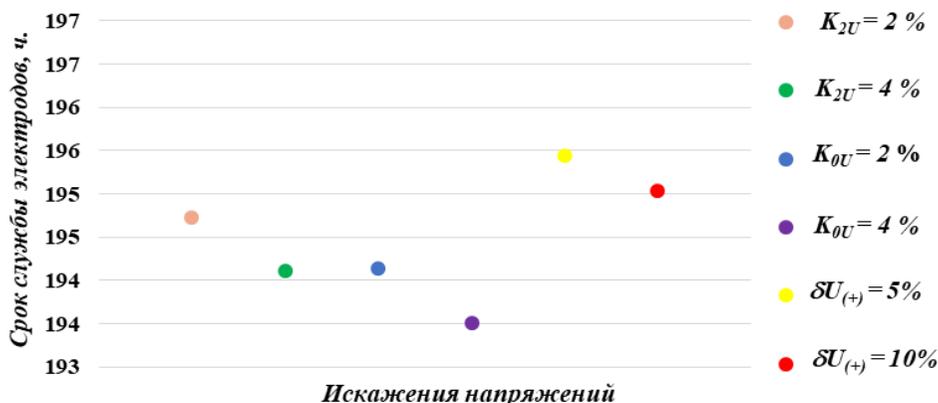


Рис. 23. Изменение срока службы электродов при различных искажениях напряжения плазматрона с материалом электрода медь

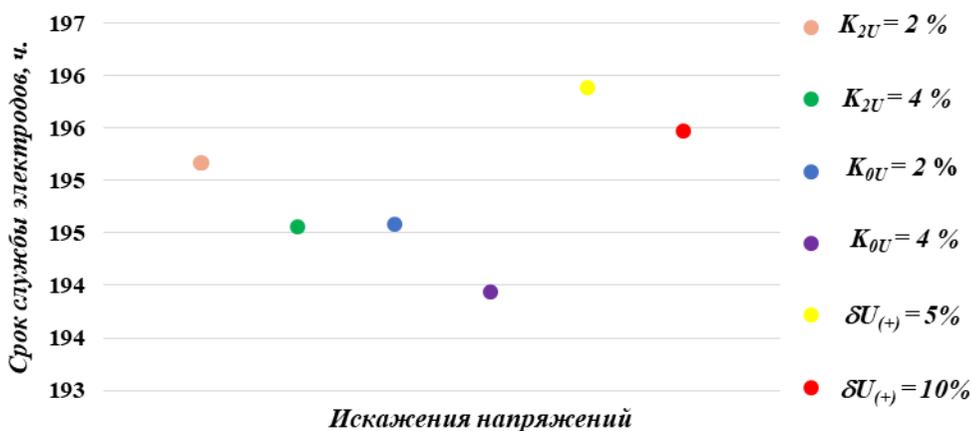


Рис. 24. Изменение срока службы электродов при различных искажениях напряжения плазматрона с материалом электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди (МВД)

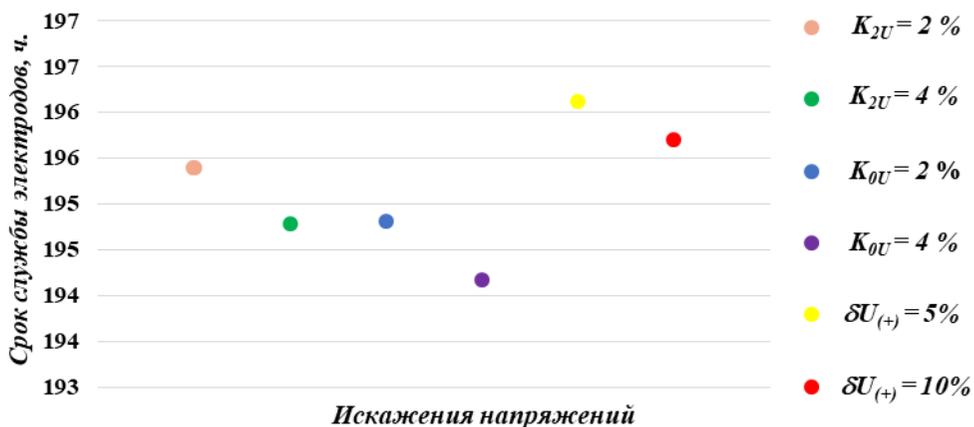


Рис. 25. Изменение срока службы электродов при различных искажениях напряжения плазматрона с материалом электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди (ВНДС)

Графические отображения, проиллюстрированные на рис. 23, показывают, что срок службы электрода из меди (Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током изменился так:

– при $K_{0U} = 2\%$ срок службы составил $Z = 194,6$ ч, при $K_{0U} = 4\%$ $Z = 194,1$ ч. В процентном соотношении изменение срока службы при $K_{0U} = 2\%$ составило $\Delta Z = 2,64\%$, при $K_{0U} = 4\%$ $\Delta Z = 2,94\%$;

– при $K_{2U} = 2\%$ срок службы составил $Z = 194,1$ ч, при $K_{2U} = 4\%$ $Z = 193,5$ ч. В процентном соотношении изменение срока службы при $K_{2U} = 2\%$ составило $\Delta Z = 2,93\%$, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,25\%$;

– при $\delta U_{(+)} = 5\%$ срок службы составил $Z = 195,4$ ч, при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $Z = 195$ ч. В процентном соотношении изменение срока службы при $\delta U_{(+)} = 5\%$ составило $\Delta Z = 2,28\%$, при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $\Delta Z = 2,49\%$.

Анализ графических отображений, представленных на рис. 24, показывает, что срок службы электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди – МВД (Mo + W + Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током изменился так:

– при $K_{0U} = 2\%$ срок службы составил $Z = 195,2$ ч, при $K_{0U} = 4\%$, $Z = 194,6$ ч. В процентном соотношении изменение ресурса для $K_{0U} = 2\%$ составило $\Delta Z = 2,42\%$, для $K_{0U} = 4\%$ $\Delta Z = 2,72\%$;

– при $K_{2U} = 2\%$ срок службы составил $Z = 194,6$ ч, при $K_{2U} = 4\%$ $Z = 193,9$ ч. В процентном соотношении изменение срока службы для $K_{2U} = 2\%$ составило $\Delta Z = 2,71\%$, для $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,03\%$;

– при $\delta U_{(+)} = 5\%$ срок службы составил $Z = 195,9$ ч при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $Z = 195,5$ ч. В процентном соотношении изменение ресурса для $\delta U_{(+)} = 5\%$ составило $\Delta Z = 2,06\%$, для $\delta U_{(+)} = 10\%$ $\Delta Z = 2,26\%$.

Анализируя изображенные на рис. 25 графические отображения, отметим, что срок службы электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди – ВНДС (W + Ni + Cu) плазматрона с магнитно-волновым сканированием переменным током изменился так:

– при $K_{0U} = 2\%$ срок службы составил $Z = 195,4$ ч, при $K_{0U} = 4\%$ $Z = 194,8$ ч. В процентном соотношении изменение срока службы при $K_{0U} = 2\%$ составило $\Delta Z = 2,31\%$, при $K_{0U} = 4\%$ $\Delta Z = 2,61\%$;

– при $K_{2U} = 2\%$ срок службы составил $Z = 194,8$ ч, при $K_{2U} = 4\%$ $Z = 194,2$ ч. В процентном соотношении изменение срока службы при $K_{2U} = 2\%$ составило $\Delta Z = 2,6\%$, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 2,92\%$;

– при $\delta U_{(+)} = 5\%$ срок службы составил $Z = 196,1$ ч, при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $Z = 195,7$ ч. В процентном соотношении изменение срока службы при $\delta U_{(+)} = 5\%$ составило $\Delta Z = 1,94\%$, при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $\Delta Z = 2,15\%$.

Проведенные исследования доказали влияние искажения напряжений на срок службы электродов плазменных установок при использовании магнитно-волнового сканирования. Установлено, что максимальная величина изменения срока службы наблюдается для электрода с материалом изготовления – медь при $K_{2U} = 4\%$ и составляет $\Delta Z = 3,25\%$.

Заключение

1. Выявлено влияние искажения напряжений на эксплуатацию электродов плазменных установок, использующих перемещение приэлектродного участка плазмы магнитно-волновым сканированием. Так, максимальные величины изменения сроков службы электродов при $K_{2U} = 4\%$ составляют: с материалом изготовления электродов из меди $\Delta Z = 3,25\%$; с материалом изготовления электро-

дов из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди $\Delta Z = 3,03\%$; с материалом изготовления электродов из псевдосплава вольфрама, никеля и меди $\Delta Z = 2,92\%$. Максимальные величины изменения сроков службы при $K_{0U} = 4\%$ составляют: с материалом изготовления электродов из меди $\Delta Z = 2,94\%$; с материалом изготовления электродов из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди $\Delta Z = 2,72\%$; с материалом изготовления электродов из псевдосплава вольфрама, никеля и меди $\Delta Z = 2,61\%$. Максимальные величины изменения сроков службы при $\delta U_{(+)} = 10\%$ составляют: с материалом изготовления электродов из меди $\Delta Z = 2,49\%$; с материалом изготовления электродов из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди $\Delta Z = 2,26\%$; с материалом изготовления электродов из псевдосплава вольфрама, никеля и меди $\Delta Z = 2,15\%$.

2. Показана количественная взаимосвязь величин удельной эрозии электродов плазматрона с его сроком службы для различных материалов электродов. Так, для медного электрода при $\delta U_{(+)} = 5\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0228$ мкг/К, срок службы $Z = 195,4$ ч; при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $G = 1,0249$ мкг/К, $Z = 195$ ч; при $K_{0U} = 2\%$ $G = 1,0264$ мкг/К, $Z = 194,6$ ч; при $K_{0U} = 4\%$ $G = 1,0294$ мкг/К, $Z = 194,1$ ч; при $K_{2U} = 2\%$ $G = 1,0293$ мкг/К, $Z = 194,1$ ч; при $K_{2U} = 4\%$ $G = 1,0325$ мкг/К, $Z = 193,5$ ч; для электрода из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди $\delta U_{(+)} = 5\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0206$ мкг/К, срок службы $Z = 195,9$ ч; при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $G = 1,0226$ мкг/К, $Z = 195,5$ ч; при $K_{0U} = 2\%$ $G = 1,0242$ мкг/К, $Z = 195,2$ ч; при $K_{0U} = 4\%$ $G = 1,0272$ мкг/К, $Z = 194,6$ ч; при $K_{2U} = 2\%$ $G = 1,0271$ мкг/К, $Z = 194,6$ ч; при $K_{2U} = 4\%$ $G = 1,0303$ мкг/К, $Z = 193,9$ ч; для электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди $\delta U_{(+)} = 5\%$ удельная эрозия составила $G = 1,0194$ мкг/К, срок службы $Z = 196,1$ ч; при $\delta U_{(+)} = 10\%$ $G = 1,0215$ мкг/К, $Z = 195,7$ ч; при $K_{0U} = 2\%$ $G = 1,0231$ мкг/К, $Z = 195,4$ ч, при $K_{0U} = 4\%$ $G = 1,0261$ мкг/К, $Z = 194,8$ ч, при $K_{2U} = 2\%$ $G = 1,0260$ мкг/К, $Z = 194,8$ ч; при $K_{2U} = 4\%$ $G = 1,0292$ мкг/К, $Z = 194,2$ ч.

Стоит отметить, что несмотря на более высокую величину эрозии отклонение температуры для медного электрода – наименьшее, что говорит о лучшей теплопроводности и соответственно лучшем охлаждении электродов из данного материала.

3. Оценено влияние различных искажающих факторов, при этом выявлен показатель качества электрической энергии – K_{2U} , имеющий наибольшее воздействие на изменение ресурса электрода и, соответственно, на срок службы плазматрона в целом. Минимальный срок службы электродов плазменных систем при $K_{2U} = 4\%$ для материала электродов из меди составил $Z = 193,5$ ч; для материала электродов из псевдосплава молибдена, вольфрама и меди $Z = 193,9$ ч; для материала электродов из псевдосплава вольфрама, никеля и меди $Z = 194,2$ ч.

4. Исследованы разные материалы, применяемые при изготовлении электродов плазменных систем, определен материал с наименьшей величиной измене-

ния ресурса электрода в результате воздействия искажающих факторов. Выявлено, что материал электрода из псевдосплава вольфрама, никеля и меди показал наибольшую стойкость к термическому воздействию и, соответственно, к искажению напряжения.

5. Согласно проведенным исследованиям, величина отклонения температуры электрода от рабочей не должна превышать 200 К, что, в свою очередь, позволит лимитировать изменение срока службы электродов и поддерживать техническое состояние плазменных систем термохимической подготовки топлива при одновременном воздействии нескольких искажающих факторов.

6. Установлено, что качество электрической энергии оказывает влияние на срок службы плазменных установок с магнитно-волновым сканированием плазмы. Величина отдельного воздействия невелика, однако при одновременном влиянии нескольких факторов снижение ресурса плазматрона может достичь ощутимых значений. Следовательно, при установке плазменных систем в местах с некачественной электрической энергией необходима разработка технических мероприятий по нормализации параметров напряжения.

7. Эффективная и стабильная работа плазменных систем термохимической подготовки топлива зависит от условий их эксплуатации; в связи с этим внедрение технических воздействий, направленных на поддержание технического состояния путем коррекции искажений напряжения, способствует их длительной работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Коверникова Л.И., Шамонов Р.Г., Суднова В.В.* Качество электрической энергии, современное состояние, проблемы, предложения по их решению / Отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2017. 219 с.
2. *Zapanov O.V., Kovernikova L.I.* On the power quality of electrical energy supplied to joint stock company «Aleksandrovsky mine» // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 209. 07012. 6 p.
3. *Вагин Г.Я., Куликов А.Л.* Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электрические станции. 2019. № 6 (1055). С. 54–59. doi: 10.34831/EP.2019.1055.44184.
4. *Romanova V.V., Suslov K.V., Khromov S.V.* Ensuring the reliability of power supply systems by improving the quality of electrical energy // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2552 (070017). 7 p. doi: 10.1063/5.0117210.
5. *Nagata E., Ferreira D., Bollen M., et al.* Real-Time Voltage Sag Detection and Classification for Power Quality Diagnostics. Measurement. 2020. Vol. 164 (4). 15 p. doi: 10.1016/j.measurement.2020.108097.
6. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
7. *Михайлов В.Е., Колпаков С.П., Хоменок Л.А., Шестаков Н.С.* О перспективе внедрения систем плазменного розжига на энергетических котлах // Надежность и безопасность энергетики. 2019. Т. 12. № 1. С. 22–28. doi: 10.24223/1999-5555-2019-12-1-22-28.
8. *Моссэ А., Савчин В.* Плазменные технологии использования топливно-энергетического сырья // Наука и инновации. 2018. № 5 (183). С. 67–71.
9. *Карпенко Е.И., Устименко А.Б.* Плазменные методы повышения эффективности использования твердых топлив // Вестник Казахского национального университета. Сер.: Физическая. 2020. № 4 (75). С. 72–85. doi: 10.26577/RCPH. 2020.v75. i4.08.
10. *Мухаева Д.В., Карпенко Е.И., Ринчинов А.П.* Плазматрон с высокоресурсным катодом // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2019. № 2–3. С. 20–26. doi: 10.18101/2306-2363-2019-2-3-20-26.

11. *Гришина И.А., Иванов В.А.* Состояние и перспективы развития исследований по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу // *Физика плазмы*. 2020. Т. 46. № 12. С. 1143–1152. doi: 10.31857/S0367292120120033.
12. *Никулин Р.Г., Цицын Ю.Д., Казанцев А.В., Никулина С.Г.* Эффективность использования двухкамерных плазматронов для плазменной поверхностной термической обработки // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2020. Т. 1. С. 439–443.
13. *Гайдаш Н.М., Иванов Н.С.* Использование низкотемпературной плазмы для производства электроэнергии // *Энергетическая безопасность*. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. С. 366–371.
14. *Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Чередниченко В.С., Кузьмин М.Г., Урбах А.Э.* Исследование генератора термической плазмы технологического назначения // *Теплофизика и аэромеханика*. 2015. Т. 22. № 6. С. 805–808.
15. *Сафронов А.А., Кузнецов В.Е., Васильева О.Б., Дудник Ю.Д., Ширяев В.Н.* Плазматроны переменного тока. Системы иницирования дуги. Особенности конструкции и применения // *Приборы и техника эксперимента*. 2019. № 2. С. 58–66.
16. *Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н., Михайлов Б.И., Десятков Г.А.* Генераторы электродуговой термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1999. 712 с.
17. *Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Dudnik Y.D., Shiryayev V.N., Vasilieva O.B., Kovshechnikov V.B.* Study of the electrode erosion in powerful, single-chamber, three-phase alternating-current plasma torches // *High Temperature*. 2021. Т. 59. № 2. Pp. 162–168. doi: 10.31857/S004036442103011.
18. *Сафронов А.А., Кузнецов В.Е., Дудник Ю.Д., Ширяев В.Н., Васильева О.Б., Ковшечников В.Б.* Исследование эрозии электродов в мощных однокамерных трехфазных плазматронах переменного тока // *Теплофизика высоких температур*. 2021. Т. 59. Вып. 3. С. 330–336.
19. *Цицын Ю.Д., Овчинников И.П.* Исследование скорости эрозии кольцевых катодов плазматрона // *Электрофизические методы обработки в современной промышленности*. Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. С. 317–320.
20. *Kuznetsov V.E., Safronov A.A., Shiryayev V.N., Vasilieva O.B., Pavlov A.V., Dudnik Y.D., Kuchina Y.A.* Application Field and Ways to Control ac Plasma Torch with Rail Electrodes // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. Vol. 946. № 1. P. 12166. doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012166.
21. *Dudnik Yu.D., Borovskoy A.M., Shiryayev V.N., Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Vasilieva O.B., Pavlov A.V., Ivanov D.V.* Plasma Injector for a Three-phase Plasma Torch with Rail Electrodes and Some Results of Its Investigation // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. Vol. 946. № 1. Pp. 012167. doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012167.
22. *Михайлов Б.И.* Сканирование дуговым пятном трубчатых электродов в газовихревых плазматронах // *Теплофизика и аэромеханика*. 2008. Т. 15. № 2. С. 336–338.
23. *Дутова О.С.* Термохимические процессы в материале электрода плазматрона: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.14. Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2012. 102 с.
24. *Овчинников И.П., Цицын Ю.Д.* Исследование переноса продуктов эрозии кольцевых катодов плазматрона // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2021. Т. 1. С. 314–318.
25. ANSYS Maxwell [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell> (дата обращения 16.05.2024).
26. *Кошкаков В.В., Ребров С.Г., Голиков А.Н., Федоров И.А.* Ресурсные характеристики плазматрона переменного тока «Звезда» // *Прикладная физика*. 2021. № 4. С. 32–39. doi: 10.51368/1996-0948-2021-4-32-39.
27. *Будин А.В., Коликов В.А., Рутберг Ф.Г.* Влияние величины тока и температуры рабочего газа на эрозию электродов разрядной камеры мощных импульсных плазматронов // *Журнал технической физики*. 2007. Т. 77. № 8. С. 49–53.

Статья поступила в редакцию 16 июня 2024 г

INFLUENCE OF THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY ON THE OPERATION OF THE MAIN ELEMENTS OF ELECTRIC ARC PLASMA SYSTEMS FOR THERMOCHEMICAL FUEL PREPARATION

V.V. Romanova^{1,2}, K.V. Suslov³, A.G. Batukhtin¹, S.V. Khromov¹

¹ Trans-Baikal State University
30, Alexandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russian Federation

² Branch of the National Research University
«Moscow Power Engineering Institute» in Volzhsky
69, im. Lenin pr., Volzhsky, 404110, Russian Federation

³ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
17, Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation

E-mail: romanova181@mail.ru, batuhina_ir@mail.ru, sergeixrom@inbox.ru, souslov@istu.edu

Abstract. The work is devoted to the study of the influence of the quality of electrical energy on the service life of electrodes of plasma thermochemical fuel treatment systems used in thermal power plants running on coal fuel. The issues of moving the near-electrode plasma section using magnetic wave scanning are discussed in detail. The ANSYS Maxwell software was used as the main research tool. The computer simulation was performed with the following main experimental parameters: the coefficient of asymmetry in the zero sequence (K_{0U}) is 2% and 4%; the coefficient of asymmetry in the negative sequence (K_{2U}) is 2% and 4%; the voltage deviation $\delta U_{(+)}$ is 5% and 10%; the materials used for manufacturing electrodes: copper (Cu), a pseudo-alloy of tungsten, nickel and copper – (W + Ni + Cu), a pseudo-alloy of molybdenum, tungsten and copper – (Mo + W + Cu). Based on the obtained simulation results, graphical representations of changes in the trajectories of the near-electrode plasma section under various distorting factors, dependences of changes in the values of specific erosion of various electrode materials, graphical dependences of changes in the service life of electrodes of plasma systems are constructed. The studies performed using computer modeling based on the ANSYS Maxwell software product made it possible to quantify the effect of voltage distortions on the trajectory of the near-electrode plasma section and, consequently, the service life of the plasmatron electrodes. In particular, in the course of the study, a detailed assessment and analysis of the degree of influence of the following indicators of electrical energy quality was performed: the coefficients of asymmetry in the negative and zero sequence, voltage deviations on the operation and technical condition of the electrodes of plasma systems. The results of the study were discussed, and recommendations were formulated for the use of plasma thermochemical fuel preparation systems used at thermal power plants to ignite the fuel of pulverized coal boilers.



© The Author(s), 2024

¹ Victoria V. Romanova (PhD (Techn.)), Associate Professor.
Konstantin V. Suslov (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor.
Andrey G. Batukhtin (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor.
Sergey V. Khromov Senior Lecturer.

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme № 123102000012-2 «Comprehensive study of aerodynamic characteristics of plasma systems of thermochemical fuel preparation», agreement № 075-03-2023-028/1 of 05.10.2023).

Keywords: computer modeling in ANSYS Maxwell software, quality of electrical energy, plasma systems for thermochemical preparation of fuel, near-electrode plasma section, magnetic wave scanning, service life of plasma system electrodes.

REFERENCES

1. *Kovernikova L.I., Shamonov R.G., Sudnova V.V.* Kachestvo elektricheskoy energii, sovremennoe sostoyanie, problemy, predlozheniya po ih resheniyu [The quality of electrical energy, the current state, problems, proposals for their solution]. Novosibirsk: Nauka, 2017. 219 p. (In Russian).
2. *Zapanov O.V., Kovernikova L.I.* On the power quality of electrical energy supplied to joint stock company «Aleksandrovsky mine» // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 209. 07012. 6 p.
3. *Vagin G.Ya., Kulikov A.L.* Kachestvo elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya. Analiz sostoyaniya metodov normirovaniya i kontrolya [The quality of electrical energy in power supply systems. Analysis of the state of rationing and control methods] // Elektricheskie stancii. 2019. № 6 (1055). Pp. 54–59. doi: 10.34831/EP.2019.1055.44184. (In Russian).
4. *Romanova V.V., Suslov K.V., Khromov S.V.* Ensuring the reliability of power supply systems by improving the quality of electrical energy // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2552 (070017). 7 p. doi: 10.1063/5.0117210.
5. *Nagata E., Ferreira D., Bollen M., et al.* Real-Time Voltage Sag Detection and Classification for Power Quality Diagnostics. Measurement. 2020. Vol. 164 (4). 15 p. doi: 10.1016/j.measurement.2020.108097.
6. GOST 32144–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electrical energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems]. M.: Standartinform, 2014. 19 p.
7. *Mihajlov V.E., Kolpakov S.P., Homenok L.A., Shestakov N.S.* O perspektive vnedreniya sistem plazmennogo rozzhiga na energeticheskikh kotlah [On the prospect of introducing plasma ignition systems on power boilers] // Nadyozhnost' i bezopasnost energetiki. 2019. T. 12. № 1. Pp. 22–28. doi: 10.24223/1999-5555-2019-12-1-22-28. (In Russian).
8. *Mosse A., Savchin V.* Plazmennyye tekhnologii ispolzovaniya toplivno-energeticheskogo syrya [Plasma technologies for the use of fuel and energy raw materials] // Nauka i innovacii. 2018. № 5 (183). Pp. 67–71. (In Russian).
9. *Karpenko E.I., Ustimenko A.B.* Plazmennyye metody povysheniya effektivnosti ispolzovaniya tverdykh topliv [Plasma methods for increasing the efficiency of solid fuels use] // Vestnik Kazhskogo nacionalnogo universiteta. Seriya fizicheskaya. 2020. № 4 (75). Pp. 72–85. doi: 10.26577/RCPH.2020.v75. i4.08. (In Russian).
10. *Muhaeva D.V., Karpenko E.I., Rinchinov A.P.* Plazmotron s vysokoresursnym katodom [Plasmatron with a high-resource cathode] // Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Himiya. Fizika. 2019. № 2–3. Pp. 20–26. doi: 10.18101/2306-2363-2019-2-3-20-26. (In Russian).
11. *Grishina I.A., Ivanov V.A.* Sostoyanie i perspektivy razvitiya issledovaniy po fizike plazmy i upravlyaemomu termoyadernomu sintezu [The state and prospects of development of research on plasma physics and controlled thermonuclear fusion] // Fizika plazmy. 2020. Vol. 46. № 12. Pp. 1143–1152. doi: 10.31857/S0367292120120033. (In Russian).
12. *Nikulin R.G., Shchicyn Yu.D., Kazancev A.V., Nikulina S.G.* Effektivnost ispolzovaniya dvukamernykh plazmotronov dlya plazmennoj poverhnostnoj termicheskoy obrabotki [Efficiency of using two-chamber plasma torches for plasma surface heat treatment] // Himiya. Ekologiya. Urbanistika. 2020. V. 1. Pp. 439–443. (In Russian).
13. *Gajdash N.M., Ivanov N.S.* Ispolzovanie nizkotemperaturnoy plazmy dlya proizvodstva elektroenergii [The use of low-temperature plasma for power generation] // Energeticheskaya bezopasnost. Kursk: Yugo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet, 2020. Pp. 366–371. (In Russian).
14. *Anshakov A.S., Urbah E.K., Cherednichenko V.S., Kuzmin M.G., Urbah A.E.* Issledovanie generatora termicheskoy plazmy tekhnologicheskogo naznacheniya [Investigation of a thermal plasma generator for technological purposes] // Teplofizika i aeromehanika. 2015. V. 22. № 6. Pp. 805–808. (In Russian).
15. *Safronov A.A., Kuznecov V.E., Vasileva O.B., Dudnik Yu.D., Shiryaev V.N.* Plazmotrony

- peremennogo toka. Sistemy iniciirovaniya dugi. Osobennosti konstrukcii i primeneniya [Plasma torches of alternating current. Arc initiation systems. Design and application features] // Pribory i tekhnika eksperimenta. 2019. № 2. Pp. 58–66. (In Russian).
16. Zhukov M.F., Zasyplin I.M., Timoshevsky A.N., Mikhailov B.I., Tens G.A. Generatory elektrodugovoy termicheskoj plazmy [Generators of electric arc thermal plasma]. Novosibirsk: Nauka, 1999. 712 p. (In Russian).
 17. Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Dudnik Y.D., Shiryayev V.N., Vasilieva O.B., Kovshechnikov V.B. Study of the electrode erosion in powerful, single-chamber, three-phase alternating-current plasma torches // High Temperature. 2021. T. 59. № 2. Pp. 162–168. doi: 10.31857/S004036442103011.
 18. Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Dudnik Yu.D., Shiryayev V.N., Vasil'eva O.B., Kovshechnikov V.B. Issledovanie erozii elektrodov v moshchnyh odnokamernyh tryohfaznyh plazmotronah peremennogo toka [Investigation of electrode erosion in high-power single-chamber three-phase alternating current plasma torches] // Teplofizika vysokih temperatur. 2021. Vol. 59. Vyp. 3. Pp. 330–336. (In Russian).
 19. Shchicyn Yu.D., Ovchinnikov I.P. Issledovanie skorosti erozii kol'cevyyh katodov plazmatrona [Investigation of the erosion rate of ring cathodes of a plasmatron] // Elektrofizicheskie metody obrabotki v sovremennoj promyshlennosti. Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyyh, aspirantov i studentov. Perm': Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politekhnicheskij universitet, 2021. Pp. 317–320. (In Russian).
 20. Kuznetsov V.E., Safronov A.A., Shiryayev V.N., Vasilieva O.B., Pavlov A.V., Dudnik Y.D., Kuchina Y.A. Application Field and Ways to Control ac Plasma Torch with Rail Electrodes // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 946. № 1. Pp. 12166. doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012166.
 21. Dudnik Yu.D., Borovskoy A.M., Shiryayev V.N., Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Vasilieva O.B., Pavlov A.V., Ivanov D.V. Plasma Injector for a Three-phase Plasma Torch with Rail Electrodes and Some Results of Its Investigation // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 946. № 1. Pp. 012167. doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012167.
 22. Mihajlov B.I. Skanirovanie dugovym pyatnom trubchatyyh elektrodov v gazovihrevyyh plazmotronah [Arc spot scanning of tubular electrodes in gas-vortex plasma torches] // Teplofizika i aeromekhanika. 2008. V. 15. № 2. Pp. 336–338. (In Russian).
 23. Dutova O.S. Termohimicheskie processy v materiale elektroda plazmotrona: dis. kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.14. Novosibirsk: Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze SO RAN, 2012. 102 p. (In Russian).
 24. Ovchinnikov I.P., Shchicyn Yu.D. Issledovanie perenosa produktov erozii kolcevyyh katodov plazmotrona [Investigation of the transfer of erosion products of annular cathodes of a plasma torch] // Himiya. Ekologiya. Urbanistika. 2021. Vol. 1. Pp. 314–318. (In Russian).
 25. ANSYS Maxwell [ANSYS Maxwell]. <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell> (accessed May 16, 2024).
 26. Koshlakov V.V., Rebrov S.G., Golikov A.N., Fedorov I.A. Resursnye karakteristiki plazmotrona peremennogo toka «Zvezda» [Resource characteristics of the alternating current plasma torch «Zvezda»] // Prikladnaya fizika. 2021. № 4. Pp. 32–39. doi: 10.51368/1996-0948-2021-4-32-39. (In Russian).
 27. Budin A.V., Kolikov V.A., Rutberg F.G. Vliyanie velichiny toka i temperatury rabocheho gaza na eroziyu elektrodov razryadnoj kamery moshchnyyh impulsnyh plazmotronov [Influence of the current and temperature of the working gas on the erosion of the electrodes of the discharge chamber of high-power pulsed plasma torches] // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. 2007. Vol. 77. № 8. Pp. 49–53. (In Russian).

Original article submitted 16.06.2024