



ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2024. Т. 32, № 4

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. № 4

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. Naske (проф., Германия)

M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2024. Том 32. № 4)

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 27.03.25
Выход в свет 08.04.25

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 21,66 п.л.
Уч.-изд. л. 21,15 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 198/24
Заказ № 74

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 4

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>Мищенко И.И., Мисник А.Е., Александров А.В.</i> Применение технологий компьютерного зрения и предварительной обработки изображений в системах поддержки принятия решений	6
<i>Назаров М.А., Галицков К.С.</i> Структурное моделирование технологического процесса охлаждения керамзита в барабанном холодильнике как объекта управления	27
<i>Чунихина Е.А., Фадеев А.С.</i> Система диагностики оборудования линии по производству керамзита при проведении технического обслуживания и ремонта	42
<i>AL-Rawi Muhanned.</i> Devised Technology for Wireless Power Transmission.....	53

Электроника, фотоника, приборостроение и связь

<i>Сайфулин М.Ж.</i> Корреляционная обработка данных для определения усредненной дифференциальной хроматограммы при многократном вводе проб.....	69
<i>Сухачёв К.И., Григорьев Д.П., Дорофеев А.С., Артюшин А.А., Кирюшкина А.С.</i> Создание и отработка гибкой системы захвата изображения на базе отечественных радиационно стойких электронных компонентов.....	82

Энергетика и электротехника

<i>Гулина С.А., Шабанов К.Ю., Шелудько Л.П.</i> Модернизация газораспределительных станций магистральных газопроводов.....	96
<i>Макарничев Ю.А., Носиков Н.А.</i> Математическая модель потребления электроэнергии на нефтеперекачивающих станциях	108

Информационные технологии и коммуникации

УДК 004.89

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

И.И. Мищенко, А.Е. Мисник, А.В. Александров¹

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

E-mail: sombra74@yandex.by, anton@misnik.by, an.vit.aleksandrov@yandex.by

Аннотация. Статья посвящена разработке системы поддержки принятия решений на основе технологий компьютерного зрения и методов предварительной обработки изображений. В работе проведен сравнительный анализ алгоритмов, используемых для улучшения качества визуальных данных и автоматической идентификации ключевых объектов на изображениях. Основное внимание уделяется различным методам фильтрации, эквализации и сегментации изображений, которые позволяют повысить точность алгоритмов компьютерного зрения при обнаружении важных структур. В процессе исследования были рассмотрены и протестированы различные алгоритмы предварительной обработки изображений, такие как адаптивная и стандартная эквализация гистограммы, медианная фильтрация и гамма-коррекция. Результаты показали, что применение предварительной обработки значительно улучшает качество анализа данных. Наибольшую эффективность в распознавании объектов продемонстрировал алгоритм Shi-Tomasi, особенно в сочетании с методами эквализации, что позволило достичь высокой точности идентификации структурных ориентиров. Статья подчеркивает важность этапа предварительной обработки для повышения производительности систем компьютерного зрения в различных областях, таких как промышленность, контроль качества на производстве, безопасность и автономные системы. Системы компьютерного зрения позволяют автоматизировать анализ изображений и минимизировать влияние человеческого фактора на процесс принятия решений. Примером практического применения представленных технологий является разработанная система для диагностики травм и патологий опорно-двигательного аппарата на основе рентгеновских снимков. Внедрение таких систем в медицинской практике позволяет ускорить процесс диагностики и повысить точность постановки диа-



© Автор(ы), 2024

¹ *Илья Игоревич Мищенко, магистрант.*

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

Анатолий Витальевич Александров, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой «Маркетинг и менеджмент».

гноза, что снижает нагрузку на специалистов и улучшает качество медицинской помощи.

Ключевые слова: *компьютерное зрение, предварительная обработка изображений, система поддержки принятия решений, сравнительный анализ, рентгеновские снимки, ключевые анатомические ориентиры, медицинская визуализация, автоматизация диагностики, анализ данных.*

Введение

Системы поддержки принятия решений находят все большее применение в самых разных технических и научных сферах, включая промышленность, финансы, логистику, управление производственными процессами и медицину. Эти системы предоставляют специалистам необходимые инструменты для принятия взвешенных решений на основе детального анализа данных. Их внедрение способствует значительному улучшению качества и обоснованности принимаемых решений благодаря возможности структурировать, анализировать и визуализировать важную информацию, необходимую для решения конкретных задач. Такие системы помогают снизить влияние рутинных аспектов на работу специалистов, автоматизируя повторяющиеся процессы и освобождая время для более сложных и творческих задач, что позволяет специалистам сосредоточиться на стратегически важных вопросах и в конечном итоге приводит к более продуктивной работе.

Компьютерное зрение – это базовая технология, позволяющая системам поддержки принятия решений эффективно воспринимать и анализировать визуальную информацию. Оно находит применение в таких областях, как распознавание объектов, лиц, текста, а также в автономном вождении, управлении качеством продукции на производственных линиях, мониторинге безопасности и во многих других приложениях. С постоянным прогрессом в области машинного обучения и обработки изображений возможности компьютерного зрения стремительно расширяются, открывая новые горизонты для его применения.

В промышленности компьютерное зрение используется для контроля качества продукции, где оно позволяет автоматически обнаруживать дефекты, такие как трещины, царапины или отклонения от стандартов. Такие системы минимизируют человеческий фактор, повышая точность и надежность контроля. В сфере безопасности компьютерное зрение используется для анализа видеопотоков с камер наблюдения, что позволяет в режиме реального времени обнаруживать подозрительное поведение, идентифицировать лица или номера автомобилей. В аграрной отрасли компьютерное зрение помогает анализировать состояние посевов, определять степень зрелости плодов и даже выявлять заболевания растений на ранних стадиях.

В медицинских системах поддержки принятия решений компьютерное зрение автоматизирует анализ визуальных данных, таких как результаты МРТ, КТ, рентгеновских снимков и других диагностических изображений. Это позволяет сократить время на обработку данных и уменьшить влияние рутинных аспектов работы, что, в свою очередь, снижает утомляемость врача и ускоряет процесс принятия врачебных решений. Например, алгоритмы могут автоматически выявлять аномалии, такие как опухоли или повреждения тканей, что значительно повышает скорость и точность диагностики.

Для обеспечения высокой точности и надежности алгоритмов компьютерного зрения важным этапом является предварительная обработка визуальных данных. Этот этап, который можно рассматривать как неотъемлемую часть общего

процесса анализа изображений, включает в себя ряд сложных и взаимосвязанных процедур, направленных на улучшение качества входных данных.

Прежде всего необходимо устранить присутствующие в изображениях шумы, которые могут существенно исказить информацию и привести к ошибкам в анализе, особенно в условиях низкого контраста или плохой освещенности. Устранение шумов, как правило, осуществляется с помощью методов фильтрации, таких как гауссово размытие, медианная фильтрация или более современные методы, основанные на глубоких нейронных сетях. Эти методы позволяют выделить ключевые особенности изображения, исключив случайные искажения.

Следующим важным аспектом является регулировка яркости и контрастности изображения. Данная процедура необходима для оптимизации восприятия визуальной информации алгоритмами, особенно в тех случаях, когда исходные изображения были получены в условиях неравномерного освещения. Регулировка контрастности позволяет выделить детали, которые могут быть важны для успешной идентификации объектов, а регулировка яркости помогает нормализовать изображение, обеспечивая равномерное распределение световых уровней.

Фильтрация изображений играет значимую роль в их предварительной обработке. В зависимости от конкретных задач фильтрация может включать сглаживание, усиление границ или удаление определенных частотных компонент. Эти операции направлены на выделение важных структур и контуров, что способствует более точной сегментации и классификации объектов на изображении.

Еще одной важной процедурой является корректное масштабирование изображений. Масштабирование необходимо для приведения изображения к стандартным размерам, что позволяет алгоритмам работать с однородными данными и избегать потерь информации при обработке объектов различных размеров. Это особенно важно для алгоритмов, основанных на нейронных сетях, где консистентность размеров входных данных напрямую влияет на качество обучения и последующего предсказания.

В совокупности все эти манипуляции направлены на повышение информативности и качества исходных данных, что, в свою очередь, существенно улучшает результаты последующего анализа. Применение подобных методов предварительной обработки позволяет не только улучшить общую производительность систем компьютерного зрения, но и значительно повысить их надежность и точность [1, 2].

В данной статье рассматривается подход к построению системы поддержки принятия врачебных решений при диагностике травм и патологий опорно-двигательного аппарата, основанной на анализе рентгеновских снимков. Основное внимание уделено проведению комплексного сравнительного анализа алгоритмов предварительной обработки изображений и алгоритмов компьютерного зрения, предназначенных для обнаружения ключевых анатомических ориентиров. Эти ориентиры включают в себя характерные формы, размеры и взаимное расположение различных костных элементов, таких как контуры костей, особенности строения суставов, наличие переломов или других деформаций на рентгеновских изображениях. Они играют критически важную роль в идентификации и оценке травм опорно-двигательного аппарата, таких как переломы, вывихи, артрозные изменения, при анализе рентгеновских изображений врачом для постановки диагноза и назначения лечения.

Процесс разработки системы поддержки принятия решений основывался на необходимости повышения точности и надежности диагностических выводов,

сделанных с помощью компьютерного зрения. В ходе исследования выяснилось, что без применения этапа предварительной обработки изображений точность работы алгоритмов компьютерного зрения существенно снижается. Алгоритмы, направленные на выявление анатомических ориентиров, не способны в полной мере идентифицировать ключевые элементы, если изображения предварительно не обработаны для устранения шумов, регулировки яркости и контрастности, а также фильтрации и масштабирования. Это обусловлено тем, что некачественные или искаженные изображения затрудняют выделение важных структур и контуров, что, в свою очередь, ведет к увеличению вероятности диагностических ошибок.

Таким образом, целью проведенной работы стало повышение точности системы поддержки принятия решений за счет выбора и оптимизации наиболее эффективных алгоритмов предварительной обработки и распознавания анатомических ориентиров на рентгеновских изображениях. Для этого были осуществлены детализированный анализ и оценка различных методов предварительной обработки, таких как фильтрация, коррекция яркости и контрастности, а также масштабирование изображений. Эти методы были проанализированы в контексте их влияния на последующую работу алгоритмов компьютерного зрения, ответственных за распознавание анатомических ориентиров.

Результаты проведенного исследования показали, что правильная комбинация методов предварительной обработки позволяет существенно улучшить качество входных данных, что напрямую отражается на точности и надежности работы алгоритмов компьютерного зрения.

На основе рассматриваемых подходов разработана система поддержки принятия решений для врача-травматолога.

Компьютерное зрение в задачах поддержки принятия решений

Алгоритмы компьютерного зрения находят применение в различных технических областях, где они используются для автоматизации процессов, повышения точности операций и обеспечения надежности систем.

В промышленности алгоритмы компьютерного зрения широко используются для контроля качества продукции на производственных линиях. Системы компьютерного зрения могут автоматически обнаруживать дефекты, такие как трещины, царапины, неправильные формы или отклонения от заданных размеров, что позволяет минимизировать человеческий фактор и значительно повысить точность контроля. Например, в автомобильной промышленности такие системы используются для проверки качества сборки автомобилей, включая проверку сварных швов, окраски и сборки деталей. В производстве полупроводников компьютерное зрение применяется для обнаружения микроскопических дефектов на кремниевых пластинах, что крайне важно для обеспечения высокого качества конечного продукта.

В области автономного вождения алгоритмы компьютерного зрения играют центральную роль. Они используются для анализа дорожной обстановки, включая распознавание дорожных знаков, разметки, других транспортных средств, пешеходов и препятствий. Компьютерное зрение позволяет системе автомобиля в реальном времени принимать решения, такие как торможение, ускорение или маневрирование, на основе визуальной информации. Благодаря использованию глубоких нейронных сетей современные системы компьютерного зрения способны не только распознавать объекты, но и предсказывать их траекторию движе-

ния, что существенно повышает безопасность автономных транспортных средств.

В логистике и управлении складами компьютерное зрение применяется для автоматизации процессов складирования, сортировки и инвентаризации товаров. Системы компьютерного зрения могут сканировать штрих-коды, идентифицировать тип и состояние товаров, а также отслеживать их перемещение по складу. Это позволяет значительно ускорить процессы обработки заказов и повысить точность учета товарно-материальных ценностей. Например, роботизированные системы с компьютерным зрением используются для автоматизированной укладки товаров на паллеты, что снижает вероятность ошибок и повреждений.

В области безопасности и видеонаблюдения алгоритмы компьютерного зрения применяются для анализа видеопотоков в режиме реального времени. Эти системы способны автоматически обнаруживать подозрительное поведение, распознавать лица, идентифицировать номерные знаки автомобилей и отслеживать перемещения людей в охраняемой зоне. Компьютерное зрение позволяет значительно повысить эффективность систем безопасности, снижая зависимость от человеческого наблюдения и увеличивая скорость реагирования на потенциальные угрозы.

В сельском хозяйстве алгоритмы компьютерного зрения используются для мониторинга состояния посевов, анализа степени зрелости плодов и выявления заболеваний растений на ранних стадиях. Системы компьютерного зрения, установленные на дронах или специализированных агротехнических машинах, могут в реальном времени собирать и анализировать данные о состоянии полей, что позволяет фермерам оптимизировать использование ресурсов, таких как вода и удобрения, и своевременно реагировать на появление вредителей или болезней. В животноводстве компьютерное зрение применяется для мониторинга состояния здоровья животных, включая автоматическое распознавание признаков стресса или заболеваний, что помогает фермерам поддерживать высокие стандарты ухода за скотом.

В геодезии и картографии алгоритмы компьютерного зрения применяются для анализа данных, полученных с дронов и спутников, с целью создания точных топографических карт и моделей местности. Эти алгоритмы позволяют автоматизировать процесс распознавания и классификации различных объектов на поверхности земли, таких как дороги, здания, водоемы и леса. Компьютерное зрение также используется для анализа изменений в ландшафте, таких как эрозия почвы или вырубка лесов, что важно для экологического мониторинга и планирования городского развития.

В медицинской области алгоритмы компьютерного зрения широко используются для автоматизации диагностики на основе других типов медицинских изображений, таких как МРТ, КТ и УЗИ. Эти системы могут автоматически выделять области, требующие внимания врача, такие как опухоли, аномальные образования или другие патологические изменения, что позволяет ускорить процесс диагностики и снизить вероятность ошибок. Более того, в офтальмологии компьютерное зрение используется для анализа снимков сетчатки глаза с целью раннего выявления заболеваний, таких как диабетическая ретинопатия или глаукома [3].

В медицинской диагностике, в частности в травматологии, основным диагностическим средством являются рентгеновские снимки, которые играют важную роль в выявлении и мониторинге различных патологий опорно-

двигательного аппарата. Рентгеновские изображения содержат богатую анатомическую информацию – с их помощью можно проанализировать состояние костей, суставов, мягких тканей и других структур организма. Ключевыми анатомическими ориентирами на таких снимках являются характерные формы, размеры и взаимное расположение различных костных элементов – например, контуры плечевой, бедренной или большеберцовой кости, особенности строения суставов, наличие переломов или других деформаций. Эти анатомические ориентиры помогают врачу идентифицировать и оценить патологические изменения [4].

Автоматизированное распознавание таких ключевых анатомических ориентиров на рентгеновских изображениях представляет собой важную задачу, решение которой может повысить точность и скорость медицинской диагностики, обеспечив врачей объективной информацией для принятия решений. Компьютерное зрение способно автоматически локализовывать и идентифицировать анатомические структуры, измерять их размеры и взаимное расположение, а также выявлять отклонения от нормы, указывающие на наличие патологий. Однако недостаточное качество рентгеновских снимков, наличие помех, артефактов и неравномерностей может затруднять их восприятие системами компьютерного зрения. На рис. 1, *а* продемонстрирован рентгеновский снимок без предварительной обработки.

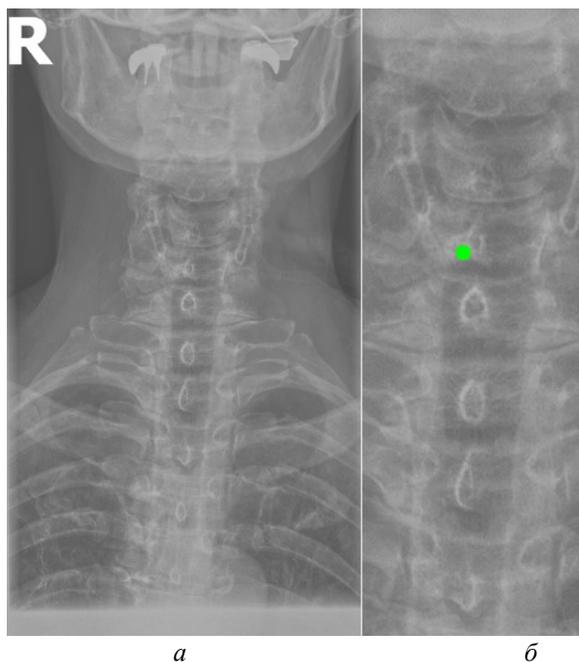


Рис. 1. Рентгеновский снимок без предварительной обработки (*а*); результаты работы детектора Harris на изображении без предварительной обработки (*б*)

Как видно на рис. 1, *б*, применение алгоритмов компьютерного зрения на необработанном изображении приводит к нечетким и неустойчивым результатам обнаружения ключевых анатомических ориентиров. Тем самым важной задачей, обеспечивающей эффективное применение алгоритмов компьютерного зрения, является разработка эффективных алгоритмов предварительной обработки изоб-

ражений. Данные предварительной обработки, такие как улучшение контраста и устранение артефактов, служат основой для более точного и надежного анализа с использованием алгоритмов компьютерного зрения. Это позволяет повысить качество обнаружения ключевых анатомических ориентиров, играющих критическую роль в идентификации и оценке патологических изменений.

Предварительная обработка рентгеновских изображений

Существует ряд разнообразных подходов и методов, используемых для предварительной обработки изображений в компьютерном зрении. Эти методы применяются с целью подготовки изображений для последующего анализа, обеспечивая повышение точности и надежности работы алгоритмов распознавания и диагностики [5].

Фильтрация изображений – это один из фундаментальных методов предварительной обработки, который используется для подавления шумов и артефактов, возникающих при получении изображений. Шумы могут существенно снижать качество изображения и затруднять дальнейший анализ. Существуют различные виды фильтров, каждый из которых решает специфические задачи:

- медианный фильтр применяется для устранения импульсных шумов, которые появляются в виде точек или полос на изображении, заменяет значение пикселя на медианное значение в окрестности пикселей, что позволяет эффективно сглаживать изображение без значительных потерь деталей [6];

- гауссов фильтр основан на применении гауссова размытия, которое помогает уменьшить шум за счет сглаживания изображения, что особенно эффективно для устранения мелких шумов не влияя на крупные структуры, такие как контуры анатомических объектов;

- адаптивная фильтрация включает использование методов, которые учитывают местные особенности изображения, такие как яркость и контраст. Адаптивные фильтры, например фильтр Винера, могут динамически изменять свои параметры в зависимости от локальных характеристик изображения, что делает их эффективными при обработке изображений с неравномерным уровнем шума [7].

Методы нормализации контраста и яркости предназначены для выравнивания неравномерного распределения световых и цветовых характеристик по изображению. В медицинских изображениях часто встречаются области с различной яркостью, что может затруднять анализ. Для решения этой проблемы применяются следующие подходы:

- гистограммная равнизация – нормализует распределение интенсивностей пикселей на изображении, расширяя области с низким контрастом, позволяет сделать детали в затемненных или пересвеченных участках изображения более заметными, что улучшает их восприятие и анализ[8];

- адаптивная гистограммная равнизация (CLAHE), в отличие от традиционной гистограммной равнизации, – применяется к локальным участкам изображения, что позволяет улучшить контраст в конкретных зонах без перерасширения контрастности в других, что особенно полезно для медицинских изображений, где важно сохранить локальные контрастные особенности, такие как контуры органов или опухолей [9];

- логарифмическое и экспоненциальное преобразование – использует нелинейные функции для регулирования яркости изображения: логарифмическое преобразование усиливает темные области изображения, а экспоненциальное – светлые, что помогает выделить важные детали в зависимости от задачи [10].

Сегментация – это метод, который используется для выделения и изоляции ключевых анатомических структур на изображении. Сегментация является важным этапом при анализе медицинских изображений, так как позволяет фокусироваться на конкретных областях интереса, игнорируя менее значимые элементы. Основными подходами к сегментации являются:

- глобальная и локальная сегментация. Глобальная сегментация предполагает разделение всего изображения на сегменты на основе общих критериев, таких как цвет или текстура. Локальная сегментация, напротив, фокусируется на конкретных участках изображения, где требуются более точные критерии для выделения структур, например при сегментации мелких сосудов или микроскопических опухолей [1];

- алгоритмы выделения границ, например, детектор Канни или алгоритм активных контуров (snakes), которые используются для выделения четких контуров анатомических структур. Эти методы полезны для определения границ органов или опухолей, что позволяет более точно измерять их размеры и форму [12];

- региональное разрастание и кластеризация. Применяются для выделения сегментов изображения на основе сходства пикселей. Региональное разрастание объединяет соседние пиксели с аналогичными характеристиками, тогда как кластеризация группирует пиксели на основе их статистических свойств. Эти подходы полезны для выделения однородных областей, таких как ткани или органы [13].

Улучшение резкости изображения направлено на повышение четкости и детализации, что важно для точного распознавания и анализа мелких структур на медицинских изображениях. Основные методы включают:

- контрастное усиление, которое увеличивает контраст между соседними пикселями, что позволяет выделить тонкие детали и улучшить общую четкость изображения; это важно при анализе рентгеновских снимков, где необходимо различать мелкие костные структуры или сосудистые образования;

- нерезкое маскирование, основанное на вычитании размытого изображения из оригинала, что приводит к усилению границ и выделению мелких деталей. Часто используется для улучшения резкости контуров и краев анатомических структур, таких как границы органов или опухолей;

- деконволюция – используется для восстановления деталей изображения, размытых в результате систематических искажений, таких как движение пациента или дефокусировка; помогает восстановить утраченные детали и улучшить общее качество изображения, что особенно важно в условиях низкой освещенности или высокой динамики процесса съемки [14].

Кроме основных методов существуют и другие техники, которые могут быть использованы для улучшения качества изображений:

- морфологическая обработка. Она включает операции, такие как эрозия, дилатация, открытие и закрытие, которые используются для удаления мелких артефактов, заполнения пробелов и выделения структур определенной формы. Эти методы полезны для улучшения сегментации и анализа изображений;

- преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Используются для анализа изображения в частотной области, что позволяет выделять определенные структуры или шумы на различных масштабах. Вейвлет-преобразование применяется для мультиуровневой обработки изображений, где важно учитывать детали на различных уровнях разрешения [15];

– интерполяция и ресемплинг. Применяются для изменения разрешения изображения, чтобы привести его к нужному формату для последующего анализа. Эти методы могут включать билинейную интерполяцию, кубическую интерполяцию и другие подходы, обеспечивающие сохранение важной информации при изменении размеров изображения [16].

Для выявления наиболее эффективных методов предварительной обработки рентгеновских изображений, которые могут быть использованы для повышения производительности и точности систем автоматического анализа, проведен комплексный сравнительный анализ влияния различных подходов на точность работы алгоритмов распознавания ключевых анатомических ориентиров [17]. Для оценки методов предварительной обработки были использованы такие метрики, как точность (precision – доля правильно распознанных ориентиров среди всех распознанных), полнота (recall – доля правильно распознанных ориентиров среди всех реально присутствующих) и F-мера (комплексный показатель, учитывающий и точность, и полноту) [18]. Этот анализ позволил выявить наиболее эффективные методы предварительной обработки, которые были использованы для повышения производительности и точности систем автоматического анализа рентгеновских снимков [19].

Для анализа использован набор рентгеновских снимков DICOM, содержащий около 1000 рентгеновских изображений различных анатомических областей, таких как плечо, локоть, позвоночник, запястье, колено и лодыжка. Все изображения были размечены врачами-травматологами, что позволило обеспечить наибольшую достоверность оценки точности работы алгоритмов.

Для создания эталонного набора изображений рентгеновские снимки в формате DICOM были загружены в специализированное программное обеспечение для медицинской визуализации. DICOM является стандартным форматом для медицинских изображений, который позволяет сохранять изображение с высоким качеством и дополнительной информацией об исследовании. Однако для дальнейшей обработки и анализа эти DICOM-файлы конвертируются в более распространенные графические форматы. Специализированное программное обеспечение сохраняет их в формате PNG. На рис. 2, а представлено изображение, полученное в результате работы в специализированном программном обеспечении.

Несмотря на то, что PNG является одним из четких графических форматов, он все же может приводить к некоторой потере качества по сравнению с исходными DICOM-файлами. Поэтому для извлечения более качественных изображений и проведения более детального анализа применяются алгоритмы и методы компьютерного зрения, которые способны работать непосредственно с DICOM-данными, избегая потерь при конвертации.

Для сравнительного анализа использовались различные методы и алгоритмы компьютерного зрения. Помимо изображений в формате PNG, конвертированных из исходных DICOM-файлов, применялись и другие подходы, направленные на извлечение более качественных изображений непосредственно из DICOM-данных, среди которых:

– базовое отображение Python. Изображения загружены в Python и отображены при помощи библиотеки Pillow без применения каких-либо дополнительных преобразований. Данный метод представлен на рис. 2, б;

– медианный фильтр. Для сглаживания шумов и артефактов на изображениях к базовому отображению Python применен медианный фильтр из библиотеки

OpenCV. Размер окна фильтра был подобран эмпирически. Данный метод обработки представлен на рис. 2, в;

– адаптивная эквализация гистограммы. Для улучшения локального контраста изображений помимо базового отображения Python использована адаптивная эквализация гистограммы из библиотеки OpenCV. Метод адаптивной эквализации представлен на рис. 3, а;

– стандартная эквализация гистограммы. Для сравнения с адаптивной эквализацией помимо базового отображения Python применена стандартная эквализация гистограммы из OpenCV. Данный метод представлен на рис. 3, б;

– гамма-коррекция. Для регулирования яркости и контрастности изображений, а также для сравнения с двумя предыдущими эквализациями использована гамма-коррекция. Значение гамма-параметра подбиралось эмпирически. Гамма-коррекция представлена на рис. 3, в.

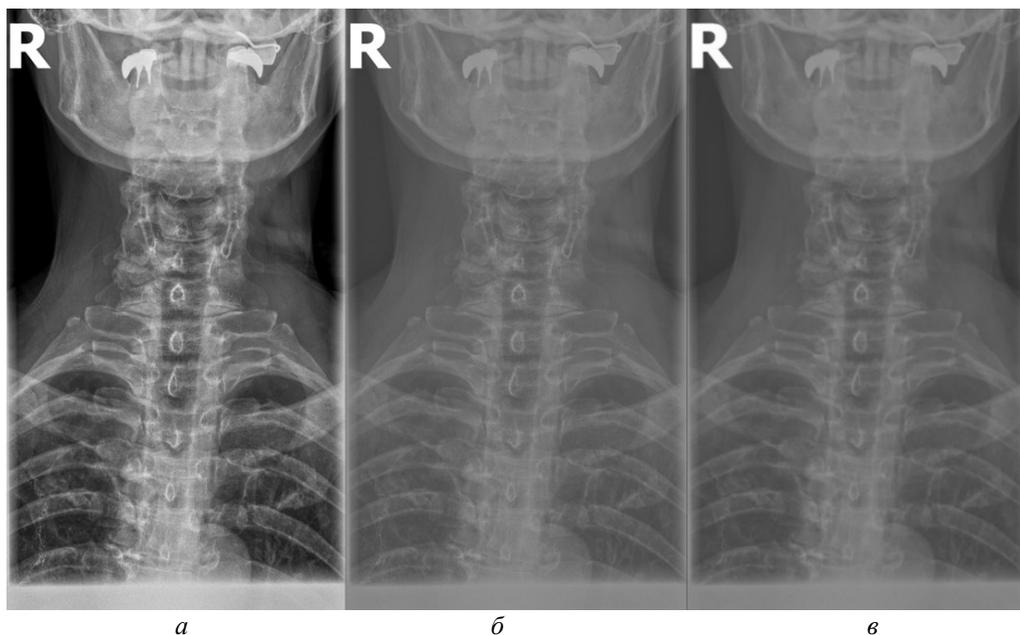


Рис. 2. Изображение, полученное при помощи специализированного программного обеспечения (а), метод базового отображения в Python (б), метод базового отображения Python с применением медианного фильтра (в)

Все перечисленные методы предварительной обработки последовательно применены к изображениям набора рентгеновских снимков DICOM.

Исходя из полученных изображений при использовании различных методов можно сделать следующие выводы:

– базовое отображение DICOM-данных с помощью библиотеки Pillow показало наличие значительного количества шумов и размытых объектов на полученных изображениях, что затрудняет четкое обнаружение анатомических ориентиров;

– применение медианного фильтра для сглаживания артефактов привело к чрезмерному размытию деталей на изображениях, сделав их еще менее пригодными для дальнейшего анализа;

– использование методов эквализации гистограммы продемонстрировало значительное улучшение контрастности и четкости визуализации анатомических структур по сравнению с базовым отображением и медианной фильтрацией;

– гамма-коррекция изображений, в отличие от эквализации, больше повлияла на яркость, нежели на контрастность, поэтому показала себя хуже в контексте задачи выделения ключевых анатомических ориентиров;

– отображение изображений в формате PNG, полученных из исходных DICOM-данных после применения ряда предварительных обработок с помощью специализированного программного обеспечения, продемонстрировало качество визуализации несколько меньшее, чем у методов эквализации, но при этом превосходящее качество других рассматриваемых методов обработки. В итоге комплекс предварительных обработок, необходимых для конвертации DICOM-данных в формат PNG, позволяет достичь качества визуализации, которое хотя и уступает эквализации, но превосходит другие методы.

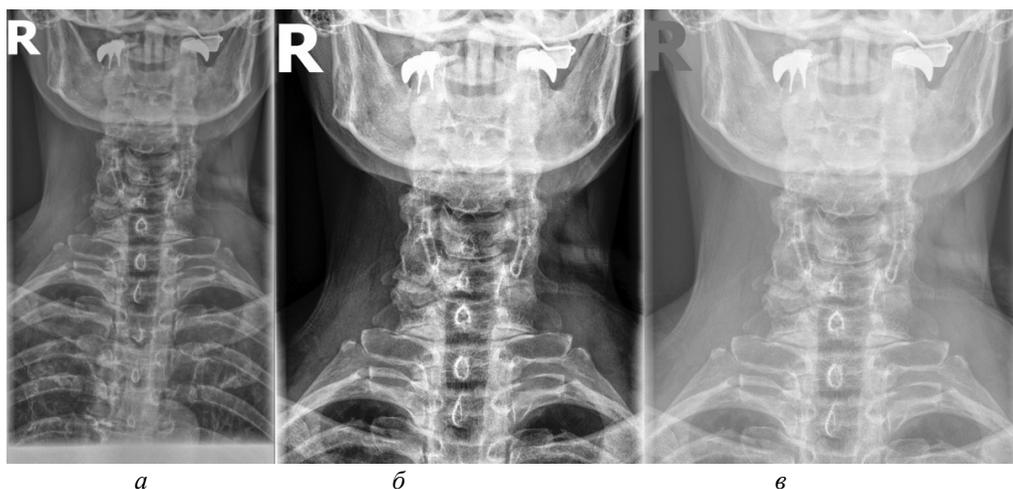


Рис. 3. Метод адаптивной эквализации гистограммы, метод стандартной эквализации гистограммы, метод гамма-коррекции

Однако для точного сравнительного анализа к каждому изображению последовательно применены три алгоритма нахождения анатомических ориентиров:

– детектор Харриса (Harris Corner Detector). Данный алгоритм основан на анализе матрицы Гессе изображения для выявления углов и угловых точек. Он позволяет находить устойчивые к масштабированию и повороту ключевые точки на изображениях;

– алгоритм Shi-Tomasi. Этот алгоритм является модификацией детектора Харриса и обеспечивает более устойчивое обнаружение углов и ключевых точек на изображениях. Он использует собственные значения матрицы Гессе для идентификации наиболее значимых точек;

– алгоритм SIFT (Scale-Invariant Feature Transform). SIFT является одним из наиболее распространенных методов обнаружения и описания ключевых точек на изображениях. Он позволяет выявлять устойчивые к масштабированию, повороту и изменению освещения характерные особенности объектов на изображении.

В итоге для каждого обработанного рентгеновского снимка получены три различные карты анатомических ориентиров, соответствующие детектору Харриса, алгоритму Shi-Tomasi и SIFT. Данный набор использован на этапе сравнительного анализа.

На рис. 4, 5 и 6 представлены результаты работы детектора Харриса, алгоритма Shi-Tomasi и SIFT при различных методах предварительной обработки изображений.

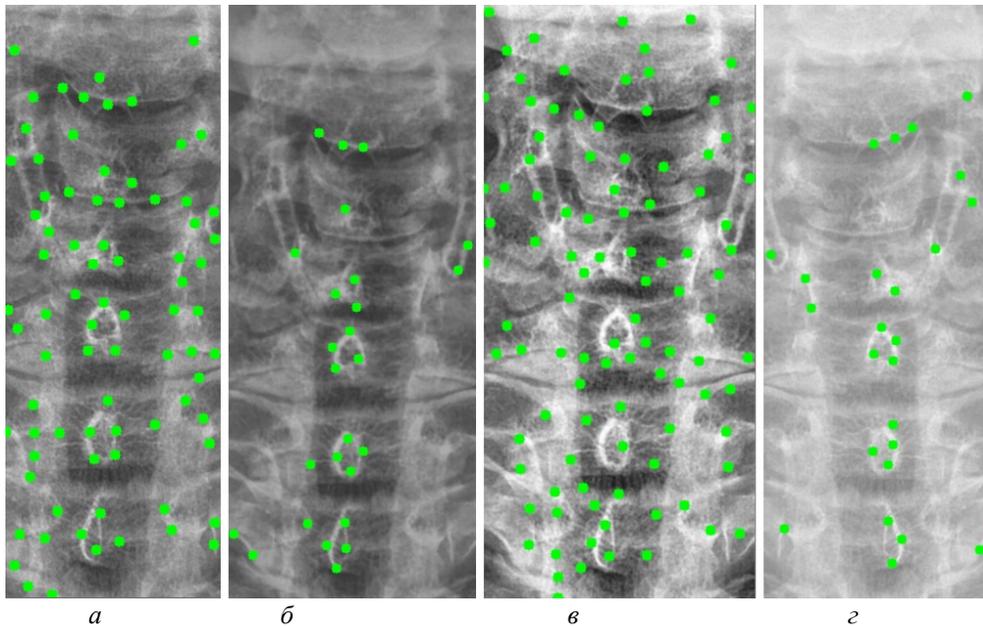


Рис. 4. Результаты работы детектора Harris на изображении, полученном при помощи специализированного программного обеспечения (а); результаты работы детектора Harris при методе адаптивной эквализации гистограммы (б); результаты работы детектора Harris при методе стандартной эквализации гистограммы (в); результаты работы детектора Harris при методе гамма-коррекции (г)

После получения всех карт анатомических ориентиров составлена таблица и проведен сравнительный анализ. В таблице представлены данные сравнительного анализа методов предварительной обработки и алгоритмов распознавания анатомических ориентиров. В ней представлены следующие данные:

- в колонке «Метод» указаны различные методы предварительной обработки изображений и алгоритмы распознавания анатомических ориентиров;
- в колонке «Принцип» описан принцип действия каждого метода;
- в колонке «Количество анатомических ориентиров (кластеров) и распределение по ним» указано, сколько анатомических ориентиров (кластеров) было правильно распознано каждым из методов и алгоритмом автоматического распознавания, а также как они распределились по различным позвонкам. Эта информация отражает полноту распознавания анатомических ориентиров, то есть долю реально присутствующих ориентиров, которые были корректно идентифицированы;

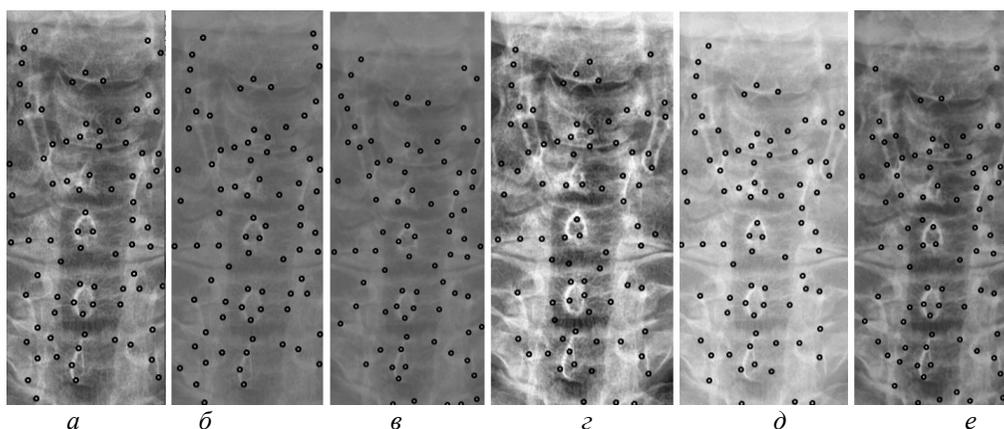


Рис. 5. Результаты работы алгоритма Shi-Tomasi на изображении, полученном при помощи специализированного программного обеспечения (*a*); результаты работы алгоритма Shi-Tomasi при методе базового отображения в Python (*б*); результаты работы алгоритма Shi-Tomasi при методе базового отображения Python с применением медианного фильтра (*в*); результаты работы алгоритма Shi-Tomasi при методе адаптивной эквализации гистограммы (*г*); результаты работы алгоритма Shi-Tomasi при методе стандартной эквализации гистограммы (*д*); результаты работы алгоритма Shi-Tomasi при методе гамма-коррекции (*е*)

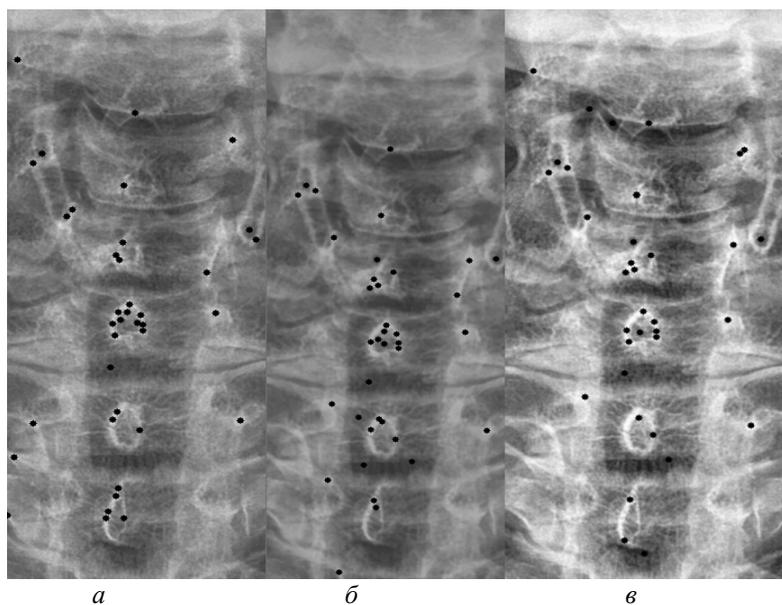


Рис. 6. Результаты работы алгоритма SIFT на изображении, полученном при помощи специализированного программного обеспечения (*a*); результаты работы алгоритма SIFT при методе адаптивной эквализации гистограммы (*б*); результаты работы алгоритма SIFT при методе стандартной эквализации гистограммы (*в*)

– в колонке «Точность» приводятся значения точности распознавания анатомических ориентиров для каждого метода;

– в колонке «Точность до обработки» приводятся значения точности распознавания анатомических ориентиров для каждого метода до предварительной обработки изображения.

Сравнительный анализ методов предварительной обработки и алгоритмов распознавания

Метод	Принцип	Количество анатомических ориентиров (кластеров) и распределение по ним			Точность	Точность до обработки
		Harris	Shi-Tomasi	SIFT		
Программа Dicom Image Viewer (эталон)	PNG-картинка полученная, специализированным программным обеспечением	78 кластеров 6: 8, 15, 13, 14, 15, 13	80 кластеров 6: 8, 15, 15, 13, 14, 16	40 кластеров 4: 9, 15, 11, 6	Harris – 87 %, Shi-Tomasi – 90 %, SIFT – 78 %	Harris – 65 %, Shi-Tomasi – 68 %, SIFT – 54 %
Базовое отображение Python (Pillow)	Отображение при помощи библиотеки Pillow в Python	Не нашел	80 Кластеров 6: 10, 10, 17, 15, 13, 15	Не нашел	Shi-Tomasi – 45 %	Shi-Tomasi – 25 %
Медианный фильтр	Отображение при помощи библиотеки Pillow в Python с применением фильтра Гаусса и медианного фильтра	Не нашел	80 Кластеров 6: 8, 15, 11, 17, 14, 15	Не нашел	Shi-Tomasi – 35 %	Shi-Tomasi – 22 %
Адаптивная эквализация	Разбитие снимка на небольшие области и контрастирование каждой из них с применением фильтра Гаусса и медианного фильтра	26 кластеров 6: 3, 1, 6, 4, 5, 7	80 кластеров 6: 4, 12, 17, 14, 12, 21	38 кластеров 6: 1, 4, 9, 10, 11, 3	Harris – 77 %, Shi-Tomasi – 82 %, SIFT – 74 %	Harris – 65 %, Shi-Tomasi – 71 %, SIFT – 62 %
Стандартная эквализация	Перераспределение значения пикселей для их равномерного распределения по диапазону. Данный метод выявляет более мелкие детали на изображении	50 кластеров 6: 6, 8, 10, 8, 5, 10	80 кластеров 6: 8, 16, 16, 14, 10, 16	37 кластеров 6: 4, 8, 8, 9, 5, 3	Harris – 91 %, Shi-Tomasi – 95 %, SIFT – 87 %	Harris – 74 %, Shi-Tomasi – 78 %, SIFT – 71 %
Гамма-корректировка	Отображение при помощи библиотеки Pillow в Python с применением фильтра гамма-коррекции	26 кластеров 6: 4, 2, 6, 4, 4, 6	80 Кластеров 6: 8, 15, 17, 12, 12, 16	Не нашел	Harris – 55 %, Shi-Tomasi – 65 %	Harris – 38 %, Shi-Tomasi – 47 %

Максимальное количество кластеров, которое может быть выделено, равно 6, так как на рентгеновских снимках выделялась часть спины, включающая 6 позвонков. Некоторые методы выделяют меньше кластеров, в то время как другие – больше; кроме того, часть методов не смогла распознать ключевые анатомические ориентиры вовсе. Это связано с особенностями алгоритмов и качеством предварительной обработки изображений.

На рис. 7 представлена гистограмма, на которой представлено количество ключевых анатомических ориентиров, распознанных при помощи трех алгоритмов на различных предварительно обработанных изображениях.

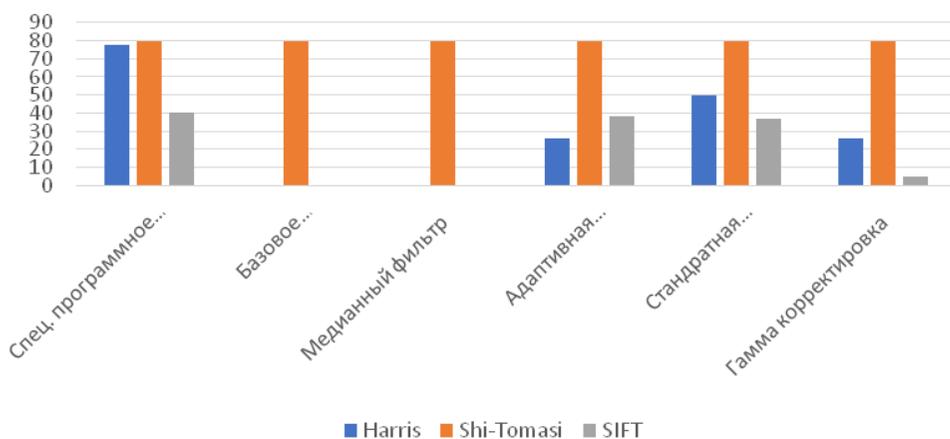


Рис. 7. Гистограмма сравнительного анализа методов предварительной обработки и алгоритмов распознавания ключевых анатомических ориентиров

Из данных таблицы видно, что наилучшим алгоритмом распознавания анатомических ориентиров является алгоритм Shi-Tomasi. Он распознал максимальное количество анатомических ориентиров вне зависимости от качества изображения, с которым работал, в то время как детектор Harris и алгоритм SIFT не смогли их распознать на изображениях, полученных при помощи базового отображения библиотекой Pillow, а также при применении медианного фильтра. Также алгоритм SIFT не смог найти ориентиры на изображении, полученном при гамма-коррекции.

Проанализировав все методы предварительной обработки и то, как алгоритмы смогли распознать ключевые анатомические ориентиры на них, можно сделать несколько выводов. Наилучшим методом оказалась стандартная эквализация изображений, при которой алгоритм Shi-Tomasi распознавал анатомические ориентиры с точностью около 95 %. Использование специализированного программного обеспечения также показало неплохие результаты, но немного уступало стандартной эквализации по точности распознавания – около 90 %. Остальные методы, такие как применение фильтров или гамма-коррекция, показали более низкую точность, в диапазоне от 35 до 75 %. В свою очередь, применение любого метода предварительной обработки повышало точность распознавания ключевых анатомических ориентиров на 15–25 %. В итоге наиболее предпочтительными методами оказались стандартная эквализация и специализированное программное обеспечение.

Построение системы поддержки принятия решений врача

На основе результатов комплексного сравнительного анализа существующих методов обработки и анализа медицинских изображений была построена система поддержки принятия врачебных диагностических решений для врачей-травматологов. Система основана на автоматизированной обработке и анализе рентгеновских снимков пациентов с целью выявления признаков травм и повреждений опорно-двигательного аппарата. Блок-схема, иллюстрирующая работу данной системы, представлена на рис. 8.



Рис. 8. Блок-схема работы системы поддержки принятия врачебных решений, основанной на обработке и анализе медицинских изображений

Работа системы происходит в следующей последовательности:

- ввод рентгеновских снимков. Пользователь (врач) загружает в систему необходимые рентгеновские снимки пациента;
- предварительная обработка изображений. Система выполняет предварительную обработку загруженных рентгеновских снимков, включающую в себя операции по улучшению качества, фильтрации шумов, сегментации и выделению интересующих областей;
- применение методов обработки снимков. На предварительно обработанных изображениях применяются наиболее эффективные методы обработки, выявленные в ходе сравнительного анализа;
- распознавание анатомических ориентиров. Используя полученные данные, система распознает и идентифицирует ключевые анатомические ориентиры на рентгеновских снимках;
- коррекция с использованием полученных данных. На основе распознанных анатомических ориентиров система проводит коррекцию и уточнение диагностических параметров;
- вынесение рекомендаций системой. Система формирует рекомендации для врача по дальнейшей диагностике и лечению пациента;
- визуализация результатов. Полученные результаты анализа, включая выявленные патологии и сформированные рекомендации, отображаются в понятном для врача виде с использованием различных визуальных средств;
- принятие решения врачом. Врач рассматривает представленную информацию, оценивает рекомендации системы и принимает окончательное решение по дальнейшей тактике ведения пациента.

На рис. 9 представлены результаты работы системы поддержки принятия врачебных решений.

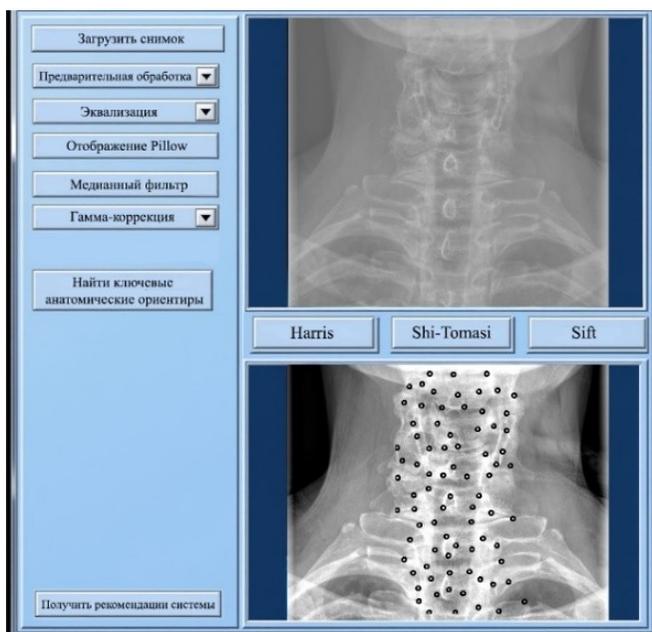


Рис. 9. Результаты работы системы поддержки принятия врачебных решений

Система включает в себя следующие ключевые возможности:

- автоматическая предварительная обработка медицинских изображений. Система использует метод стандартной эквализации, который показал наилучшие результаты по точности распознавания анатомических ориентиров;

- кластеризация и распознавание анатомических ориентиров. Алгоритм Shi-Tomasi применяется для выделения ключевых элементов позвоночника на изображениях, сгруппированных в 5–6 кластеров. Точность распознавания достигает 95 %;

- интеллектуальная система поддержки диагностики. На основе выделенных анатомических ориентиров система может предложить врачу предварительные диагнозы, а также рекомендации по дальнейшему обследованию пациента.

Таким образом, данная система упрощает процессы диагностики заболеваний позвоночника, а также облегчает работу медицинского персонала.

Выводы

Разработанная система поддержки принятия врачебных решений, основанная на обработке рентгеновских снимков, представляет собой комплексное решение, учитывающее результаты сравнительного анализа существующих методов компьютерного зрения, а также методов предварительной обработки и анализа медицинских изображений. Применение передовых алгоритмов предварительной обработки изображений, распознавания анатомических ориентиров, анализа диагностических параметров, а также визуализации результатов позволяет существенно повысить эффективность и точность диагностики заболеваний позвоночника. Использование данной системы снижает нагрузку на врачей при работе с большими объемами медицинских изображений, предоставляя им достоверные рекомендации для принятия окончательных клинических решений.

Разработка и внедрение подобных интеллектуальных систем поддержки принятия врачебных решений открывает новые перспективы для совершенствования медицинской диагностики и повышения качества оказания медицинской помощи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2015. 1072 с.
2. *Прэнтл У.* Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 2012. 998 с.
3. *Mehmood A., Khan I.R., Dawood H.* Enhancement of CT images for visualization // International Conference on Artificial Intelligence and Computing Systems, 2019. P. 32–40. DOI: 10.1145/3306214.3338602.
4. *Agomma R. Olory, Vázquez C., Cresson T., De Guise J.* Automatic detection of anatomical regions in frontal x-ray images: comparing convolutional neural networks to random forest // Medical Imaging 2018: Computer-Aided Diagnosis, 2018. V. 10575. P. 759–767. DOI:10.1117/12.2295214.
5. *Panse V., Gupta R.* Medical Image Enhancement with Brightness Preserving Based on Local Contrast Stretching and Global Dynamic Histogram Equalization // International Conference on Communication, Signal Processing, and Networking, 2021. P. 45–52. DOI: 10.1109/CSNT51715.2021.9509670.
6. *Ласьков В.В., Симонов Е.Н.* Методы фильтрации изображений в рентгеновской компьютерной томографии // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2024. С. 15–23.
7. *Kumari L.S., Kanhirodan R.* Contrast Enhancement of Medical Radiography Images Using Edge Preserving Filters // International Conference on Bioinformatics and Systems Biology, 2018. P. 88–96. DOI: 10.1109/ICBSII.2018.8524691.
8. *Шашикала Х.К.* Техники предварительной обработки изображений для рентгеновских медицинских изображений: обзор // Международный журнал творческих исследований. 2023. С. 432–439. URL: www.licrt.org (дата обращения: 25.07.2024).
9. *Saadi R.A., Liaw J., Baker A., Isildak H.* Improving Microscopic Imaging in Otology and Neurotology // Otolaryngology-Head and Neck Surgery, 2020. P. 300–312. DOI: 10.1097/MAO.0000000000002567. EDN: TDROP.
10. *Vasuki P., Kanimozhi J., Devi M.* A survey on image preprocessing techniques for diverse fields of medical imagery // Proceedings of the International Conference on Electronics, Information, and Communication, 2017. P. 230–235. DOI: 10.1109/ICEICE.2017.8192443.
11. *Goyal S.* Region-Based Contrast Limited Adaptive HE with Additive Gradient for Contrast Enhancement of Medical Images (MRI) // International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), 2011. P. 154–157.
12. *Клевцова Е.А.* Сравнительная оценка методов выделения контуров объектов интереса на высокотехнологичных медицинских изображениях // XIII Конгресс молодых ученых ИТМО. 2024. С. 103–110.
13. *Khudhair K.T., Najjar F.H., Waheed S.R., Al-Jawahry H.M., Alwan H.H., Al-khaykan A.* A novel medical image enhancement technique based on a hybrid method // Journal of Physics: Conference Series, 2023. P. 120–130. DOI: 10.1088/1742-6596/2432/1/012021.
14. *Довганич А.А.* Адаптивные методы обработки медицинских изображений: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18. М.: МГУ, 2022. 156 с. EDN: JRGRPX.
15. *Gueorguiev V., Ivanov I., Georgieva D.* Medical Images Enhancement with Pseudo-HDR Method // IEEE Transactions on Medical Imaging, 2014. P. 245–252.
16. *Jangra A., Jaiswal A.* A Comparative Study of Machine Learning and Deep Learning Techniques on X-ray Images for Pneumonia // Applications of Artificial Intelligence and Machine Learning. Lecture Notes in Electrical Engineering. Unhelker B., Pandey H.M., Raj G. (eds). 2022. Vol. 925. Springer, Singapore. P. 415–426. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-4831-2>.
17. *Abdallah Y.M.Y., Alqahtani T.* Research in Medical Imaging Using Image Processing Techniques // Intech Open, 2019. DOI: 10.5772/INTECHOPEN.84360.
18. *Islam S.M., Mondal H.S.* Image Enhancement Based Medical Image Analysis // International Conference on Communication and Network Technologies, 2019. P. 540–548. DOI: 10.1109/icccnt45670.2019.8944910.
19. *Арсеньев Д.Г., Мисник А.Е., Шалухова М.А.* Применение технологий компьютерного зрения для выстраивания индивидуальных траекторий реабилитации // Материалы, обо-

рудование и ресурсосберегающие технологии: Материалы международной науч.-техн. конф. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2024. С. 346–347. EDN: AYVEFM

Статья поступила в редакцию 22.10.2024

APPLICATION OF COMPUTER VISION AND IMAGE PREPROCESSING TECHNOLOGIES IN DECISION SUPPORT SYSTEMS

*I.I. Mishchenko, A.E. Misnik, A.V. Alexandrov*¹

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

E-mail: sombra74@yandex.by, anton@misnik.by, an.vit.aleksandrov@yandex.by

Abstract. *The article focuses on the development of a decision support system based on computer vision technologies and image preprocessing methods. It presents a comparative analysis of algorithms used to enhance the quality of visual data and to automatically identify key objects in images. The study emphasizes various methods such as filtering, equalization, and image segmentation, which are designed to improve the accuracy of computer vision algorithms in detecting important structures. The research tested and evaluated several image preprocessing techniques, including adaptive and standard histogram equalization, median filtering, and gamma correction. The results demonstrate that applying image preprocessing significantly improves the quality of data analysis. The Shi-Tomasi algorithm showed the highest efficiency in object recognition, especially when used with equalization techniques, allowing for precise identification of structural landmarks. The paper highlights the critical role of preprocessing in boosting the performance of computer vision systems across various domains, such as industrial applications, quality control, safety, and autonomous systems. These systems enable the automation of image analysis while reducing the impact of human error in decision-making processes. A practical example of these technologies is the development of a system for diagnosing musculoskeletal injuries and pathologies based on X-ray images. The implementation of such systems in medical practice accelerates diagnostic processes and improves the accuracy of diagnoses, ultimately reducing the workload of specialists and enhancing the quality of healthcare services.*

Keywords: *computer vision, image preprocessing, decision support system, comparative analysis, X-ray images, key anatomical landmarks, medical imaging, diagnostic automation, data analysis.*

REFERENCES

1. Gonzalez R., Woods R. Digital Image Processing. N.-Y: Pearson, 2018. 1022 p.
2. Pratt W. Digital Image Processing. N.-Y.: John Wiley and Sons, 2001. 738 p.
3. Mehmood A., Khan I.R., Dawood H. Enhancement of CT images for visualization // International Conference on Artificial Intelligence and Computing Systems, 2019. P. 32–40. DOI: 10.1145/3306214.3338602.
4. Agomma R. Olory, Vázquez C., Cresson T., De Guise J. Automatic detection of anatomical regions in frontal x-ray images: comparing convolutional neural networks to random forest // Medical Imaging 2018: Computer-Aided Diagnosis, 2018. V. 10575. P. 759–767. DOI:10.1117/12.2295214.



© The Author(s), 2024

¹ Ilya I. Mishchenko, Master's Student.

Anton E. Misnik (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Software for Information Technologies, Head Lab. of Cyber-Physical Systems.

Anatoly V. Alexandrov (Ph.D. (Economic)), Associate Professor, Head Dept. of Marketing and Management.

5. *Panse, V., Gupta R.* Medical Image Enhancement with Brightness Preserving Based on Local Contrast Stretching and Global Dynamic Histogram Equalization // International Conference on Communication, Signal Processing, and Networking, 2021. P. 45–52. DOI: 10.1109/CSNT51715.2021.9509670.
6. *Laskov V.V., Simonov E.N.* Metody filtracii izobrazhenij v rentgenovskoj kom-pyuternoj tomografii [Methods of Image Filtering in X-ray Computed Tomography] // Vestnik YuUrGU. Seriya: Kompyuternye tehnologii, upravlenie, radioelektronika. 2024. P. 15–23. (In Russian)
7. *Kumari L.S., Kanhirodan R.* Contrast Enhancement of Medical Radiography Images Using Edge Preserving Filters // International Conference on Bioinformatics and Systems Biology, 2018. P. 88–96. DOI: 10.1109/ICBSII.2018.8524691.
8. *Shashikala H.K.* Tehniki predvaritelnoj obrabotki izobrazhenij dlya rentgenovskih medicinskih izobrazhenij: obzor [Image Preprocessing Techniques for X-ray Medical Images] // Mezhdunarodnyj zhurnal tvorcheskikh issledova-nij. 2023. P. 432–439. URL: www.licrt.org (data obrasheniya: 25.07.2024). (In Russian)
9. *Saadi R.A., Liaw J., Baker A., Isildak H.* Improving Microscopic Imaging in Otolaryngology and Neurotology // Otolaryngology-Head and Neck Surgery, 2020. P. 300–312. DOI: 10.1097/MAO.0000000000002567.
10. *Vasuki P., Kanimozhi J., Devi M.* A survey on image preprocessing techniques for diverse fields of medical imagery // Proceedings of the International Conference on Electronics, Information, and Communication, 2017. P. 230–235. DOI: 10.1109/ICEICE.2017.8192443.
11. *Goyal S.* Region-Based Contrast Limited Adaptive HE with Additive Gradient for Contrast Enhancement of Medical Images (MRI) // International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), 2011. P. 154–157. D0111081411.
12. *Klevcova E.A.* Sravnitel'naya ocenka metodov vydeleniya konturov obektov interesa na vysokotekhnologichnyh medicinskih izobrazheniyah [Comparative Evaluation of Methods for Extracting Contours of Objects of Interest in High-Tech Medical Images] // XIII Kongress molodyh uchenyh ITMO. 2024. P. 103–110. (In Russian)
13. *Khudhair K.T., Najjar F.H., Waheed S.R., Al-Jawahry H.M., Alwan H.H., Al-khaykan A.* A novel medical image enhancement technique based on a hybrid method // Journal of Physics: Conference Series, 2023. P. 120–130. DOI: 10.1088/1742-6596/2432/1/012021.
14. *Dovganich A.A.* Adaptivnye metody obrabotki medicinskih izobrazhenij [Adaptive Methods for Medical Image Processing]: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 05.13.18. M.: MGU, 2022. 156 p. EDN: JRGRPX. (In Russian)
15. *Gueorguiev V., Ivanov I., Georgieva D.* Medical Images Enhancement with Pseudo-HDR Method // IEEE Transactionson Medical Imaging, 2014. P. 245–252.
16. *Jangra A., Jaiswal A.* A Comparative Study of Machine Learning and Deep Learning Techniques on X-ray Images for Pneumonia // Applications of Artificial Intelligence and Machine Learning. Lecture Notes in Electrical Engineering. Unhelker B., Pandey H.M., Raj G. (eds). 2022. Vol. 925. Springer, Singapore. P. 415–426. DOI: 10.1007/978-981-19-4831-2.
17. *Abdallah Y.M.Y., Alqahtani T.* Research in Medical Imaging Using Image Processing Techniques // Intech Open, 2019. DOI: 10.5772/INTECHOPEN.84360.
18. *Islam S.M., Mondal H.S.* Image Enhancement Based Medical Image Analysis // International Conferenceon Communicationand Network Technologies, 2019. P. 540–548. DOI: 10.1109/iccent45670.2019.8944910.
19. *Arsenev D.G., Misnik A.E., Shaluhova M.A.* Primenenie tehnologij kompyuternogo zreniya dlya vystraivaniya individualnyh traektorij reabilitacii [Application of computer vision technologies for building personalized rehabilitation pathways] // Materialy, oborudovanie i resursoberegayushie tehnologii. Materialy mezhdunarodnoj nauch. tehn. konf. Mogilev: Belorus.-Ros. un-t, 2024. P. 346–347. EDN: AYVEFM.

Original article submitted 22.10.2024

УДК 001.891.573

СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ КЕРАМЗИТА В БАРАБАННОМ ХОЛОДИЛЬНИКЕ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ**М.А. Назаров, К.С. Галицков¹**Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: nazarovm86@yandex.ru, ksgal@yandex.ru

Рассмотрен технологический процесс охлаждения керамзита в барабанном холодильнике как объект управления с распределенными параметрами. С учетом обоснованных допущений и упрощений динамика рассматриваемого процесса описана системой неоднородных дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка, решение которой позволило получить операторы, согласовывающие управляющее воздействие и основные возмущения с температурой керамзита в барабанном холодильнике. Полученные операторы математической модели, представляющие собой трансцендентные передаточные функции, для возможности их дальнейшего практического применения при синтезе систем автоматизации аппроксимированы типовыми формами передаточных функций. Синтезирована структурная схема математической модели процесса охлаждения керамзита в барабанном холодильнике как объекта управления. Проведены вычислительные эксперименты по исследованию динамических и статических режимов работы объекта управления.

Ключевые слова: охлаждение керамзита, барабанный холодильник, объект с распределенными параметрами, математическая модель, передаточная функция, структурная схема.

Введение

Широкое применение в строительстве керамзита в качестве теплоизоляционного, конструкционно-теплоизоляционного и конструктивного материала обусловлено рядом преимуществ – сравнительно небольшой массой конструкций, низкими тепловыми потерями, высокими огнестойкостью и морозостойкостью стеновых ограждений, длительным периодом эксплуатации дорожных покрытий [1–5].

Керамзит изготавливается из определенного глинистого сырья, последовательно проходящего многоступенчатую цепочку требуемых технологических переделов, каждый из которых в определенной степени влияет на качество ко-



© Автор(ы), 2024

¹ Максим Александрович Назаров, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механизация, автоматизация и энергоснабжение строительства».

Константин Станиславович Галицков, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Механизация, автоматизация и энергоснабжение строительства».

нечной продукции. Основными операциями керамзитового производства являются: предварительная подготовка глинистого сырья; формование гранул сырца, например с помощью шнекового пресса; окатывание и сушка гранул в сушильном барабане; обжиг во вращающейся печи и последующее охлаждение обожженного керамзита в барабанном холодильнике.

Охлаждение гранул керамзита – финальный технологический этап, на котором формируются требуемые физико-химические характеристики конечного продукта. Известно, что в процессе обжига на гранулы оказывается тепловое воздействие, что, в свою очередь, приводит к их расширению и образованию пор. Соблюдение технологических требований, исключающих резкое снижение температуры на этапе охлаждения керамзита, позволяет предотвратить деформации гранул и их трещинообразование. При остывании формируется прочная кристаллическая решетка гранул керамзита, что делает их более устойчивыми к механическим повреждениям. В противном случае гранулы остывают неравномерно, возникают термические напряжения и, как следствие, образование трещин и потеря целостности материала. Чрезмерно интенсивное охлаждение может явиться одной из причин снижения прочности керамзита и невозможности применения его в качестве заполнителя при изготовлении теплоизоляционно-конструкционного и конструктивного легких бетонов. Кроме того, формируемые теплоизоляционные свойства керамзита зависят от образующихся внутри материала пор во время обжига. Высокий темп остывания влечет их закрытие, что негативно сказывается на теплоизоляционных и звукоизоляционных характеристиках конечной продукции. Поэтому обеспечение требуемого режима на этапе охлаждения оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства готового керамзита. Очевидно, что для получения керамзита заданного качества необходимо использовать современные подходы к автоматизации, основанные на глубоком изучении свойств и анализе технологического процесса охлаждения как объекта управления. Создание подобных систем автоматического управления, очевидно, должно включать стадию математического моделирования, проведения вычислительных экспериментов и анализа полученных результатов. Однако исследования в этой области практически не проводились. Это подчеркивает актуальность задачи создания математической модели технологического процесса охлаждения керамзита в барабанном холодильнике в виде уравнений и структуры, а также их глубокого исследования.

Постановка задачи

В настоящее время существует несколько типов оборудования, используемых для охлаждения керамзита после обжига, каждый из которых имеет свои особенности и преимущества. Барабанные холодильники являются одним из наиболее широко применяемых видов. Основным их элементом является вращающийся барабан, обеспечивающий равномерное распределение керамзита по длине и охлаждение. Непрерывная циркуляция воздуха вокруг гранул способствует интенсивному и равномерному их охлаждению, так как увеличивается площадь теплообменной поверхности между керамзитом и охлаждающим воздухом. Дополнительным достоинством оборудования данного типа является меньшая, по сравнению с другими установками аналогичного назначения, подверженность керамзита повреждениям, что снижает потери материала и обеспечивает больший объем готовой продукции на выходе. Барабанные холодильники также обладают гибкостью в эксплуатации, так как могут быть адаптированы для

работы с различными объемами керамзита, что делает их универсальным решением для производств разного масштаба.

Рассмотрим конструкцию барабанного холодильника (рис. 1), который представляет собой теплообменный аппарат непрерывного действия, работающий по принципу противотока. Он выполнен в виде открытого с торцов стального цилиндра (барабана) 1, установленного с уклоном φ к горизонту и вращающегося со скоростью ω_6 , что обеспечивает передвижение материала [6]. Загрузка обожженного керамзита 2 после вращающейся печи осуществляется с горячего конца; двигаясь к противоположному (холодному) концу, он охлаждается встречным потоком воздуха. Для защиты корпуса холодильника от высоких температур примерно треть длины барабана со стороны горячего конца футеруется огнеупорным кирпичом 3. Ввиду того, что характерные свойства рассматриваемого объекта зависят как от времени, так и от пространственных координат, процесс охлаждения классифицируем как объект управления с распределенными параметрами.

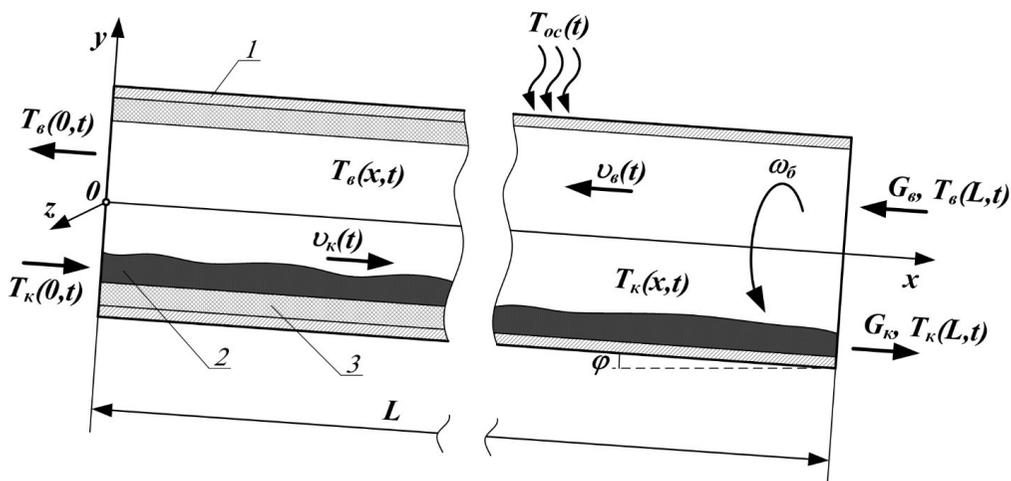


Рис. 1. Расчетная схема процесса охлаждения керамзита в барабанном холодильнике как объекта управления с распределенными параметрами

При рассмотрении процесса охлаждения керамзита как объекта управления с распределенными параметрами и учете того, что пространственное изменение параметров наблюдается только по продольной координате x барабана холодильника, его динамика характеризуется температурой $T_k(x,t)$ керамзита, перемещающегося со скоростью v_k вдоль оси $x \in 0..L$ (L – длина барабана, t – время). Исходя из ограничений, обусловленных необходимостью согласованной работы холодильника с другими установками технологической линии и удобства последующей технической реализации, за управляющее воздействие принимаем скорость движения охлаждающего воздуха $v_e(t)$ вдоль оси x . На основании проведенного анализа из множества возмущающих факторов выбираем наиболее существенные – температуры керамзита $T_k(0,t)$ и воздуха $T_e(L,t)$, поступающих в барабан, а также температуру $T_{oc}(t)$ окружающей среды.

Требуется найти операторы исследуемого объекта управления в виде передаточных функций, связывающих выходные координаты с управляющими и возмущающими воздействиями, с последующей их аппроксимацией типовыми динамическими звеньями и структурным представлением математического описания.

Решение поставленной задачи

При создании математического описания, ориентированного на рассмотрение ключевых аспектов процесса, и для исключения вероятности получения модели излишней сложности, очевидно, требуется ввести ряд допущений. Основываясь на анализе влияния тех или иных факторов на рассматриваемые процессы, сформулируем следующие упрощения [7].

1. Считаем, что теплофизические характеристики участвующих в теплопередаче сред и материалов не изменяются по пространственным координатам и остаются постоянными во времени.

2. Принимаем, что используемые в математической модели коэффициенты теплопередачи постоянны и усредняем их по длине корпуса ввиду наличия футеровки на начальном участке.

3. Пренебрегаем динамикой изменения температуры корпуса холодильника.

4. Допускаем, что пространственное изменение температур керамзита и воздуха наблюдается только по оси x , а по радиусу барабана рассматриваем некоторые средние их значения.

5. Считаем, что скорости движения керамзита и воздуха одинаковы по всей длине барабанного холодильника, но могут изменяться во времени.

6. Учитываем, что скорости v_k и v_g могут принимать различные значения, но в первом приближении не рассматриваем влияние их изменения на динамику процесса.

В рамках поставленной задачи с учетом принятых допущений, когда рассматривается динамический процесс теплообмена двух движущихся в противоположных направлениях вдоль продольной оси сред, непосредственно контактирующих между собой, математическое описание может быть представлено следующей системой линейных неоднородных дифференциальных уравнений в частных производных [7]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_k(x,t)}{\partial t} &= -v_k \cdot \frac{\partial T_k(x,t)}{\partial x} - \frac{\alpha \cdot F}{V_k \cdot \rho_k \cdot c_k} \times \\ &\times [T_k(x,t) - T_g(x,t)] - \frac{k_k \cdot F_k}{V_k \cdot \rho_k \cdot c_k} \cdot [T_k(x,t) - T_{oc}(t)]; \\ \frac{\partial T_g(x,t)}{\partial t} &= v_g \cdot \frac{\partial T_g(x,t)}{\partial x} + \frac{\alpha \cdot F}{V_g \cdot \rho_g \cdot c_g} \cdot [T_k(x,t) - T_g(x,t)] - \\ &- \frac{k_g \cdot F_g}{V_g \cdot \rho_g \cdot c_g} \cdot [T_g(x,t) - T_{oc}(x,t)], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где F – площадь поверхности теплообмена между керамзитом и воздухом; V_k , ρ_k , c_k – объем, плотность и удельная теплоемкость керамзита, находящегося в холодильнике; α – коэффициент теплоотдачи на контактной поверхности керамзита и охлаждающего воздуха; k_k , k_g – коэффициенты теплопередачи между

керамзитом и окружающей средой, воздухом и окружающей средой через корпус холодильника; F_k, F_e – площади поверхностей теплообмена между керамзитом и окружающей средой, воздухом и окружающей средой через ограждающие конструкции холодильника; V_e, ρ_e, c_e – объем, плотность и удельная теплоемкость воздуха, находящегося в холодильнике.

Считая начальные условия нулевыми и применяя к (1) преобразование Лапласа, получим систему обыкновенных неоднородных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\left. \begin{aligned} p \cdot T_k(x, p) &= -v_k \cdot \frac{dT_k(x, p)}{dx} - \frac{\alpha \cdot F}{V_k \cdot \rho_k \cdot c_k} \cdot [T_k(x, p) - T_e(x, p)] - \\ &- \frac{k_k \cdot F_k}{V_k \cdot \rho_k \cdot c_k} \cdot [T_k(x, p) - T_{oc}(p)]; \\ p \cdot T_e(x, p) &= v_e \cdot \frac{dT_e(x, p)}{dx} + \frac{\alpha \cdot F}{V_e \cdot \rho_e \cdot c_e} \cdot [T_k(x, p) - T_e(x, p)] - \\ &- \frac{k_e \cdot F_e}{V_e \cdot \rho_e \cdot c_e} \cdot [T_e(x, p) - T_{oc}(p)], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где p – оператор Лапласа.

Исходя из применяемой технологии охлаждения и конструкции установки, которая находится под влиянием сосредоточенных воздействий на ее концах, граничные условия для рассматриваемого случая будем определять температурами поступающих в холодильник керамзита $T_k(0, t)$ и воздуха $T_e(L, t)$, которые в операторной форме имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} T_k(x, p) \Big|_{x=0} &= T_k(0, p); \\ T_e(x, p) \Big|_{x=L} &= T_e(L, p). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Производя ряд очевидных преобразований и решая систему (2) относительно $T_k(x, t)$, получим линейное неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2 T_k(x, p)}{dx^2} + E_1(p) \cdot \frac{dT_k(x, p)}{dx} - E_2(p) \cdot T_k(x, p) = -E_3(p) \cdot T_{oc}(p), \quad (4)$$

где коэффициенты представляют собой сложные функции характерных параметров и оператора p :

$$E_1(p) = D_1(p) - D_2(p); E_2(p) = D_1(p) \cdot D_2(p) - B_1 \cdot B_2;$$

$$E_3(p) = B_1 \cdot C_2 + C_1 \cdot D_2(p);$$

$$D_1(p) = A_1(p) + B_1 + C_1; D_2(p) = A_2(p) + B_2 + C_2;$$

$$A_1(p) = \frac{p}{v_k}; B_1 = \frac{1}{v_k} \cdot \frac{\alpha \cdot F}{V_k \cdot \rho_k \cdot c_k}; C_1 = \frac{1}{v_k} \cdot \frac{k_k \cdot F_k}{V_k \cdot \rho_k \cdot c_k};$$

$$A_2(p) = \frac{p}{v_e}; B_2 = \frac{1}{v_e} \cdot \frac{\alpha \cdot F}{V_e \cdot \rho_e \cdot c_e}; C_2 = \frac{1}{v_e} \cdot \frac{k_e \cdot F_e}{V_e \cdot \rho_e \cdot c_e};$$

$$\sigma_1(p) = \frac{-E_1(p) + \sqrt{E_1(p)^2 + 4 \cdot E_2(p)}}{2};$$

$$\sigma_2(p) = \frac{-E_1(p) - \sqrt{E_1(p)^2 + 4 \cdot E_2(p)}}{2}.$$

Используя граничные условия (3), найдем решение (4) в виде

$$T_\kappa(x, p) = \Psi_1(x, p) \cdot T_\kappa(0, p) + \Psi_2(x, p) \cdot T_\epsilon(L, p) + \Psi_3(x, p) \cdot T_{oc}(p), \quad (5)$$

где операторы

$$\Psi_1(x, p) = \frac{T_\kappa(x, p)}{T_\kappa(0, p)} = \frac{[D_1(p) + \sigma_1(p)] \cdot e^{L \cdot \sigma_1(p) + x \cdot \sigma_2(p)} - [D_1(p) + \sigma_2(p)] \cdot e^{L \cdot \sigma_2(p) + x \cdot \sigma_1(p)}}{[D_1(p) + \sigma_1(p)] \cdot e^{L \cdot \sigma_1(p)} - [D_1(p) + \sigma_2(p)] \cdot e^{L \cdot \sigma_2(p)}}; \quad (6)$$

$$\Psi_2(x, p) = \frac{T_\kappa(x, p)}{T_\epsilon(L, p)} = \frac{B_1 \cdot [e^{x \cdot \sigma_1(p)} - e^{x \cdot \sigma_2(p)}]}{[D_1(p) + \sigma_1(p)] \cdot e^{L \cdot \sigma_1(p)} - [D_1(p) + \sigma_2(p)] \cdot e^{L \cdot \sigma_2(p)}}; \quad (7)$$

$$\Psi_3(x, p) = \frac{T_\kappa(x, p)}{T_{oc}(p)} = \frac{E_3(p)}{E_2(p)} \cdot \left[1 - \frac{e^{x \cdot \sigma_2(p)} \cdot \left\{ \frac{C_1 \cdot E_2(p)}{E_3(p)} - D_1(p) + [D_1(p) + \sigma_1(p)] \cdot e^{L \cdot \sigma_1(p)} \right\}}{[D_1(p) + \sigma_1(p)] \cdot e^{L \cdot \sigma_1(p)} - [D_1(p) + \sigma_2(p)] \cdot e^{L \cdot \sigma_2(p)}} \right] - \frac{e^{x \cdot \sigma_1(p)} \cdot \left\{ \frac{C_1 \cdot E_2(p)}{E_3(p)} - D_1(p) + [D_1(p) + \sigma_2(p)] \cdot e^{L \cdot \sigma_2(p)} \right\}}{[D_1(p) + \sigma_1(p)] \cdot e^{L \cdot \sigma_1(p)} - [D_1(p) + \sigma_2(p)] \cdot e^{L \cdot \sigma_2(p)}}. \quad (8)$$

Операторы $\Psi_1(x, p)$, $\Psi_2(x, p)$, $\Psi_3(x, p)$ в (5) являются трансцендентными функциями. Использование математического описания такого типа при синтезе систем управления затруднительно. В связи с этим, учитывая наиболее очевидную конфигурацию системы управления, которую возможно внедрить в данном случае, осуществим аппроксимацию в точке выхода керамзита из холодильника (т. е. при $x = L$) при некоторых фиксированных значениях скорости v_ϵ . Используя аппарат логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик, выполним переход к типовым передаточным функциям [8]. Рассмотрим случай, характеризующийся параметрами процесса (см. таблицу).

Параметры технологического процесса охлаждения керамзита в барабанном холодильнике

Параметр	Единица измерения	Численное значение	Параметр	Единица измерения	Численное значение
L	м	20	c_κ	Дж/(кг·°С)	840
V_κ	м ³	10	c_ϵ	Дж/(кг·°С)	1005
V_ϵ	м ³	60	α	Вт/(м ² ·°С)	36.5
F	м ²	190	k_κ	Вт/(м ² ·°С)	10
F_κ	м ²	50.2	k_ϵ	Вт/(м ² ·°С)	7.4
F_ϵ	м ²	81.7	v_κ	м/с	0.008
ρ_κ	кг/м ³	600			
ρ_ϵ	кг/м ³	1.2			

В результате аппроксимации найдены типовые формы передаточных функций $W_{11}(p)$, $W_{22}(p)$, $W_{33}(p)$, наиболее приближенные к исходным трансцендентным $\Psi_1(L, p)$, $\Psi_2(L, p)$, $\Psi_3(L, p)$ в сечении, соответствующем точке выгрузки керамзита из холодильника:

$$\Psi_1(L, p) \cong W_{11}(p) = \frac{\Delta T_{\kappa}(L, p)}{\Delta T_{\kappa}(0, p)} = k_1(p) \cdot W_1(p);$$

$$\Psi_2(L, p) \cong W_{22}(p) = \frac{\Delta T_{\kappa}(L, p)}{\Delta T_{\theta}(L, p)} = k_2(p) \cdot W_2(p);$$

$$\Psi_3(L, p) \cong W_{33}(p) = \frac{\Delta T_{\kappa}(L, p)}{\Delta T_{oc}(L, p)} = k_3(p) \cdot W_3(p),$$

где передаточные функции без учета коэффициентов передачи

$$W_1(p) = \frac{T_{12} \cdot p + 1}{T_{11} \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_1 \cdot p}; \quad (9)$$

$$W_2(p) = \frac{1}{T_2 \cdot p + 1}; \quad (10)$$

$$W_3(p) = \frac{T_{33} \cdot p + 1}{(T_{31} \cdot p + 1) \cdot (T_{32} \cdot p + 1)}. \quad (11)$$

Следует отметить, что значения постоянных времени остаются неизменными в рассматриваемом диапазоне вариации параметров, а коэффициенты передачи k_1 , k_2 , k_3 функционально зависят от скорости движения воздуха v_{θ} :

$$k_1(p) = \Phi_1(v_{\theta}); \quad k_2(p) = \Phi_2(v_{\theta}); \quad k_3(p) = \Phi_3(v_{\theta}). \quad (12)$$

Коэффициенты передачи определены для относительного отклонения скорости воздуха $\Delta v_{\theta} = n \cdot v_{\theta 0}$ ($n \in -0.05, -0.025, 0.025, 0.05$) от номинальной величины общеизвестным методом по значениям логарифмических амплитудных частотных характеристик, соответствующих передаточным функциям $\Psi_1(L, p)$, $\Psi_2(L, p)$, $\Psi_3(L, p)$ при нулевой частоте. В качестве рабочей принята скорость воздуха $v_{\theta 0} = 7.72$ м/с. Зависимость численных значений рассматриваемых коэффициентов от величины приращения скорости воздуха приведена на рис. 2. Анализ полученных характеристик показывает, что коэффициент k_1 при уменьшении скорости на 5 % от номинальной возрастает на 15 %, а при увеличении скорости на ту же величину снижается на 12.9 %. Коэффициент k_2 имеет аналогичную тенденцию, но при этом уменьшение скорости приводит к его росту лишь на 1.6 %, а увеличение скорости – к снижению на 4.3 %. Для коэффициента k_3 имеет место рост при увеличении скорости движения воздуха, однако в рассматриваемом диапазоне его приращение составляет менее 1 %, поэтому он может считаться постоянным. Параметрическая неопределенность, выраженная в виде существенной вариации коэффициента k_1 , очевидно, усложняет управление рассматриваемым объектом и должна быть учтена при разработке системы автоматизации процесса охлаждения керамзита для достижения робастной устойчивости [9, 10].

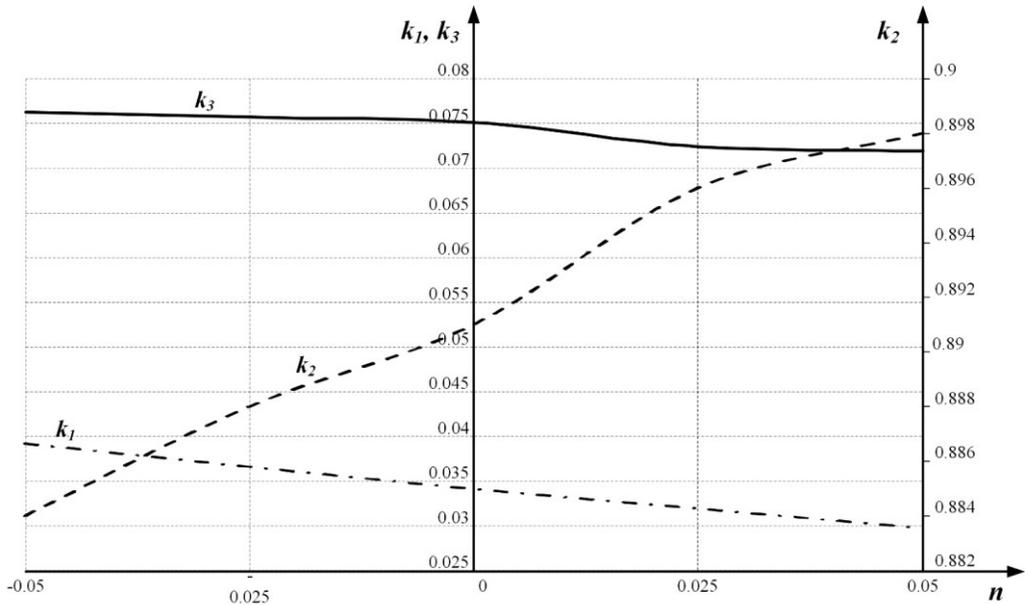


Рис. 2. Зависимость численных значений коэффициентов передачи k_1 , k_2 , k_3 от величины приращения скорости движения воздуха $v_в$

Постоянные времени и время запаздывания в передаточных функциях $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$ составляют: $T_{11} = 520$ с, $T_{12} = 441$ с, $\tau_1 = 2400$ с, $T_2 = 650$ с, $T_{31} = 9.5$ с, $T_{32} = 710$ с, $T_{33} = 4.5$ с.

Основной методикой теоретического исследования объектов управления и последующего синтеза систем автоматизации, которая позволяет в удобной форме представить взаимосвязи операторов математической модели и дает возможность упростить решение задачи настройки регуляторов с заранее установленными показателями качества работы, является структурная теория. Воспользуемся выражениями (9)–(12) и построим структурную схему (рис. 3) математической модели процесса охлаждения керамзита в барабанном холодильнике, которая позволит оценить динамику выходной координаты в сечении $x = L$.

Вычислительные эксперименты по исследованию объекта управления

На основании структурной схемы (см. рис. 3) в программной среде Matlab Simulink создана вычислительная модель (рис. 4), которая позволит определить численные решения и представить результаты в удобной для анализа форме. Потребуем, чтобы модель обеспечивала возможность проведения экспериментов по исследованию временных характеристик объекта управления по отношению к управляющему и возмущающим воздействиям.

Блоки М1, М2, М3 и М4 обеспечивают возможность скачкообразного изменения скорости $v_в$ и температур $T_k(0, t)$, $T_e(L, t)$, $T_{oc}(t)$ соответственно. С их помощью производится вывод объекта в рабочую точку и задание приращений управляющего и возмущающих параметров для исследования динамики в малой окрестности рабочей точки. Блоки М5, М6, М7 соответствуют нелинейным

функциям Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 , связывающим коэффициенты k_1 , k_2 , k_3 со скоростью воздуха v_0 . Множительные блоки M8, M9, M10 аналогичны операторам умножения структурной схемы. С помощью блоков M11, M12, M13, M14 и M15 задаются передаточные функции $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$. Причем блок M12 позволяет учесть величину времени запаздывания τ_1 в передаточной функции $W_1(p)$. Формирование выходной величины как суммы выходных сигналов обозначенных передаточных функций осуществляется с помощью блока M16. Для наблюдения переходных процессов в объекте управления введен осциллограф M17.

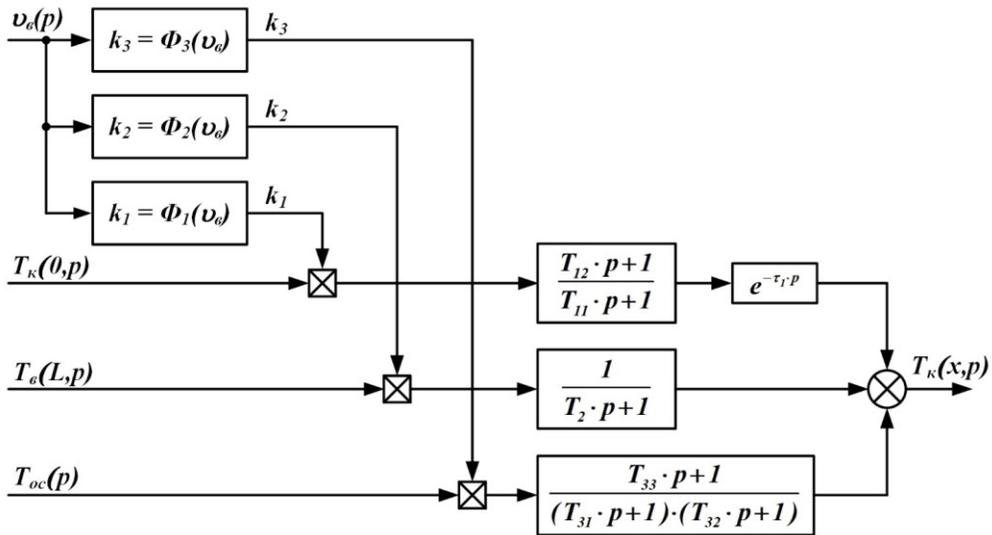


Рис. 3. Структурная схема математической модели процесса охлаждения керамзита в барабанном холодильнике как объекта управления

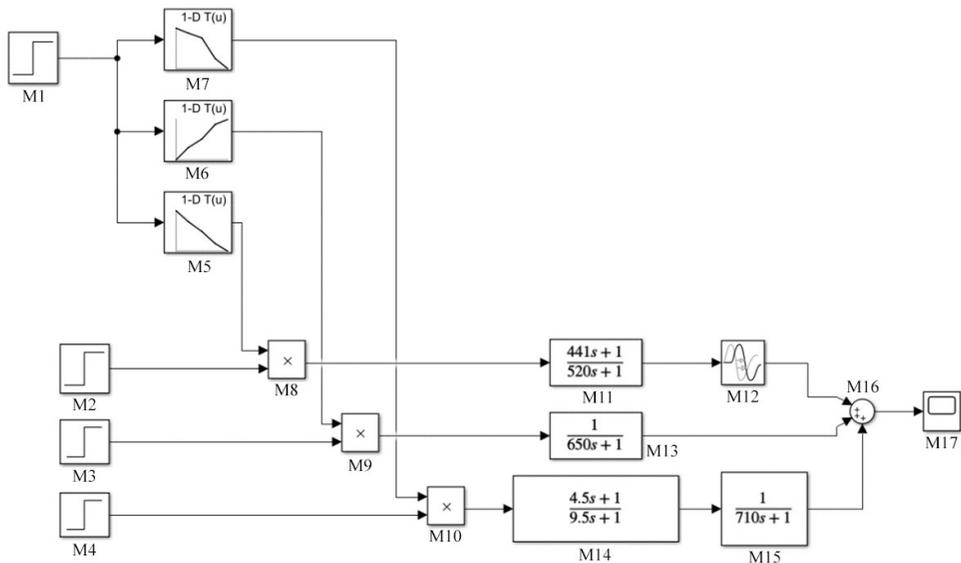


Рис. 4. Вычислительная модель процесса охлаждения керамзита в барабанном холодильнике при рассмотрении выходной координаты в сечении $x = L$

Выполнено исследование реакции объекта на управляющее и основное возмущающее воздействия – скорости движения охлаждающего воздуха $v_{\epsilon}(p)$ вдоль оси x и температуры $T_k(0, p)$ керамзита, поступающего в барабан. При проведении экспериментов наблюдалась динамика выходной координаты – температуры $T_k(L, p)$ керамзита на выходе из холодильника.

Проведение вычислительных экспериментов осуществлялось в определенной последовательности согласно следующей методике. На первом этапе процесс охлаждения керамзита был выведен в рабочую точку с координатами: скорость движения воздуха $v_{\epsilon} = v_{\epsilon 0} = 7.72$ м/с, температура керамзита на входе $T_{к.вх} = T_{к.вх0} = 900$ °С, температура воздуха на входе $T_{\epsilon.вх} = T_{\epsilon.вх0} = 20$ °С, температура окружающей среды $T_{oc} = 20$ °С.

После того как все переходные процессы завершились, к моменту времени $t_0 = 6000$ с величина температуры керамзита на выходе барабана составляла $T_{к.вых} = 50$ °С. При исследовании реакции объекта на изменение управляющего воздействия в момент времени $t_0 = 6000$ скорость $v_{\epsilon 0}$ была ступенчато увеличена на Δv_{ϵ} и составила $v_{\epsilon} = v_{\epsilon 0} + \Delta v_{\epsilon}$. Проведено четыре эксперимента с различными величинами приращений скорости Δv_{ϵ} : $0.1v_{\epsilon 0}$, $0.05v_{\epsilon 0}$, $-0.05v_{\epsilon 0}$, $-0.1v_{\epsilon 0}$. На рис. 5 представлены графики переходных процессов по отношению к приращению Δv_{ϵ} .

По аналогичной методике выполнены эксперименты при вариации возмущающего воздействия путем ступенчатого изменения в момент температуры керамзита на входе в барабан $T_{к.вх} = T_{к.вх0} + \Delta T_{к.вх}$. Приращения температуры $\Delta T_{к.вх}$ составили $0.1T_{к.вх0}$, $0.05T_{к.вх0}$, $-0.05T_{к.вх0}$, $-0.1T_{к.вх0}$. Переходные процессы, отражающие реакцию объекта на изменения возмущений, приведены на рис. 6.

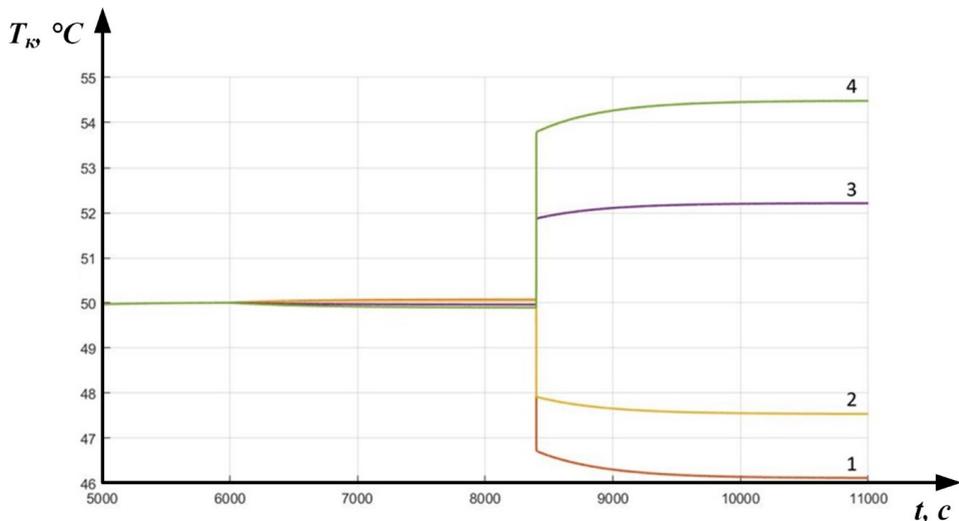


Рис. 5. Переходные процессы в объекте управления по отношению к управляющему воздействию: 1 – $\Delta v_{\epsilon} = 0.1v_{\epsilon 0}$; 2 – $\Delta v_{\epsilon} = 0.05v_{\epsilon 0}$; 3 – $\Delta v_{\epsilon} = -0.05v_{\epsilon 0}$; 4 – $\Delta v_{\epsilon} = -0.1v_{\epsilon 0}$

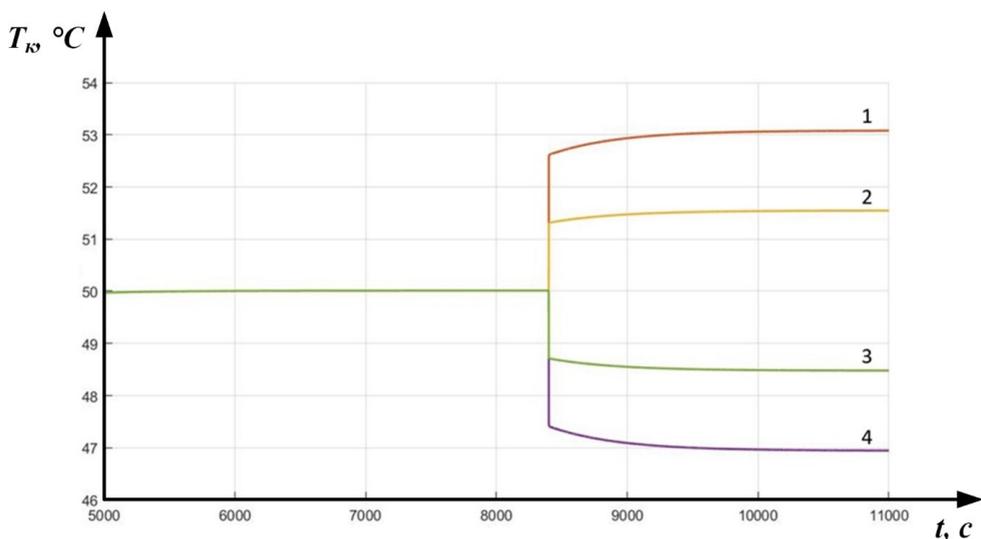


Рис. 6. Переходные процессы в объекте управления по отношению к возмущающему воздействию: 1 – $\Delta T_{к.вх} = 0.1T_{к.вх0}$; 2 – $\Delta T_{к.вх} = 0.05T_{к.вх0}$; 3 – $\Delta T_{к.вх} = -0.05T_{к.вх0}$; 4 – $\Delta T_{к.вх} = -0.1T_{к.вх0}$

Преимущественно для тепловых установок рассматриваемого типа существенное значение имеет вид кривой изменения температуры обрабатываемых материалов по продольной координате, который при проектировании систем управления может влиять на выбор количества датчиков и мест их установки. Для адекватного решения этой задачи применительно к последующей автоматизации процесса охлаждения керамзита целесообразно построить график распределения температуры T_k по координате x при различных скоростях v_e движения охлаждающего воздуха (рис. 7).

Построим статическую характеристику объекта управления $T_k(L,0) = \Phi_4(v_e, T_k(0,0))$ путем соотнесения установившихся значений выходной координаты с величинами управляющих и возмущающих воздействий из технологически обоснованного диапазона (рис. 8). Такая трехмерная поверхность представляет собой нелинейную функцию и в практике эксплуатации барабанного холодильника может использоваться как регулировочная характеристика, которая позволит определить требуемую скорость v_e движения охлаждающего воздуха для получения заданной температуры $T_{к.вых} = T_k(L,0)$ керамзита на выходе холодильника при определенном значении температуры $T_{к.вх} = T_k(0,0)$ материала на входе установки.

Полученные результаты исследований динамических и статического режимов работы рассматриваемого объекта управления позволяют судить об адекватности разработанного математического описания, а также могут быть использованы при проектировании систем автоматизации керамзитового производства и использованы в практике эксплуатации установок рассматриваемого типа.

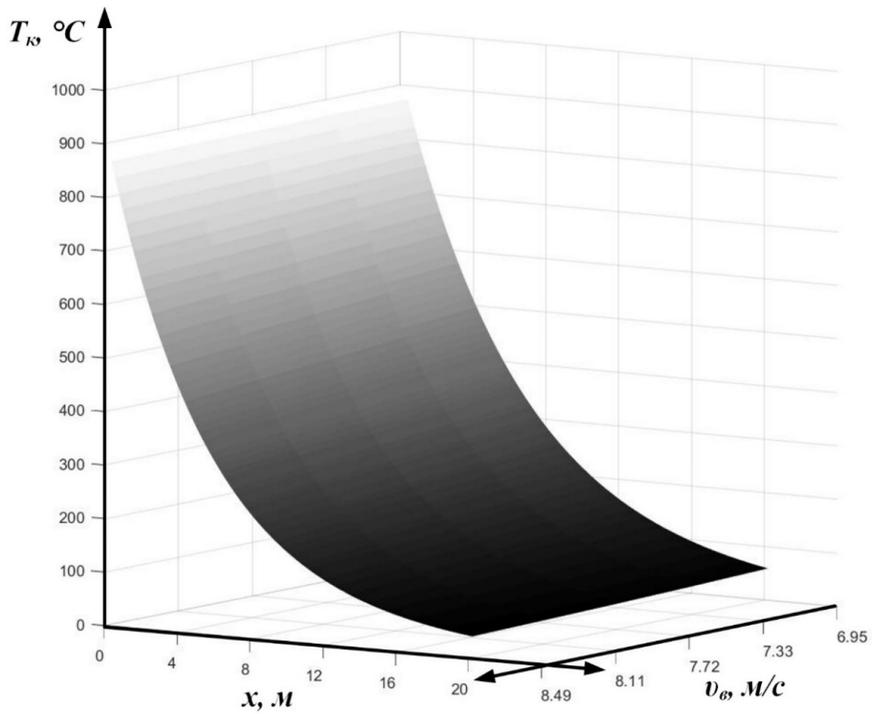


Рис. 7. Распределение температуры керамзита T_k по координате x при различных скоростях v_0

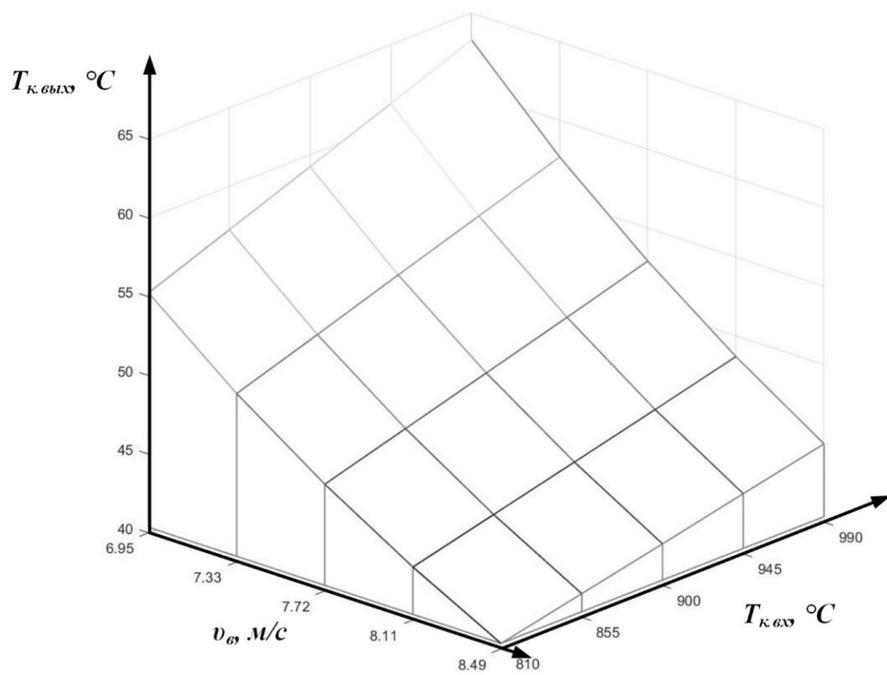


Рис. 8. Регулировочная характеристика барабанного холодильника

Выводы

1. Проведен анализ процесса охлаждения обожженного керамзита в барабанном холодильнике, который показал, что рассматриваемый технологический передел может быть классифицирован как объект управления с распределенными по продольной координате параметрами.

2. Разработано математическое описание процесса охлаждения керамзита как объекта управления в виде системы неоднородных дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка и их краевых условий.

3. Найдено частное решение системы уравнений для случая, соответствующего реальным технологическим условиям на керамзитовом производстве, и получены математические операторы, отражающие динамику процесса.

4. Для удобства использования полученных результатов при автоматизации произведена аппроксимация трансцендентных функций типовыми динамическими звеньями, на основании чего создана структурная схема, проблемно ориентированная на создание систем управления производством керамзита.

5. Проведен ряд вычислительных экспериментов по исследованию динамических и статических режимов работы объекта управления. Полученные результаты позволяют судить об адекватности разработанной математической модели и могут упростить синтез систем управления, повысить качество настройки их регуляторов, сократить временные затраты на их проектирование.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горин В.М., Токарева С.А., Вытчиков Ю.С., Беляков И.Г., Шиянов Л.П. Применение стеновых камней из беспесчаного керамзитобетона в жилищном строительстве // Строительные материалы. 2010. № 2. С. 15–18. EDN: MBCHTN.
2. Горин В.М., Токарева С.А., Кабанова М.К. Стеновые керамзитобетонные конструкции – перспективный материал для индустриального домостроения // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 55–58.
3. Ледяйкин А.С., Лияскин О.В. Перспективы применения керамзита в России // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: Сборник трудов Семнадцатой международной научно-технической конференции. Саранск, 2018. С. 196–199. EDN: YVCPFB.
4. Galitskov K. Intelligent management of high-technology equipment for the manufacture of concrete and ceramic materials and products // Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education: Proceedings VI International Scientific Conference. MATEC Web of Conferences. 2018. P. 03043. DOI: 10.1051/mateconf/201825103043. EDN: ZUEQLA.
5. Galitskov S., Galitskov K., Samokhvalov O. Computer modeling of the dynamics of energy consumption during expanded clay burning // Complex Systems: Control and Modeling Problems: Proceedings 21st International Conference. Samara, 2019. P. 401–406. DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976656. EDN: PBZCXE.
6. Онацкий С.П. Производство керамзита. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1987. 333 с.
7. Назаров М.А. Математическое описание барабанного холодильника как объекта автоматизации производства керамзита // Механизация и автоматизация строительства: сборник статей. Самара, 2021. С. 75–80. EDN: DQVOAP.
8. Назаров М.А. Аппроксимация математической модели барабанного холодильника для производства керамзита как объекта управления с распределенными параметрами // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: сборник статей. Самара, 2023. С. 892–898. EDN: LPYRTG.
9. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002. 303 с.
10. Зотов М.Г. Робастные и адаптивные системы // Автоматика и телемеханика. 2015. № 2. С. 61–72. EDN: TOBFEB.

STRUCTURAL MODELING OF EXPANDED CLAY COOLING TECHNOLOGICAL PROCESS IN A DRUM COOLER AS A CONTROL OBJECT

M.A. Nazarov, K.S. Galitskov¹

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

E-mail: nazarovm86@yandex.ru, ksgal@yandex.ru

Abstract. *The technological process of expanded clay cooling in a drum cooler is considered as a control object with distributed parameters. Taking into account reasonable assumptions and simplifications, the dynamics of the process under consideration is described by a system of non-homogeneous differential equations in partial derivatives of the first order, the solution of which made it possible to obtain operators linking the control action and the main disturbances with the temperature of expanded clay in the drum cooler. The obtained operators of the mathematical model, which are transcendental transfer functions, are approximated by typical forms of transfer functions for the possibility of their further practical application in the synthesis of automation systems. A structural diagram of the mathematical model of the process of expanded clay cooling in a drum cooler as a control object is synthesized. Computational experiments are carried out to study the dynamic and static operating modes of the control object.*

Keywords: *expanded clay cooling, drum cooler, object with distributed parameters, mathematical model, transfer function, structural diagram.*

REFERENCES

1. Gorin V.M., Tokareva S.A., Vytchikov Yu.S., Belyakov I.G., Shiyonov L.P. Primenenie stenovykh kamnej iz bespeschannogo keramzitobetona v zhilishnom stroitelstve [The use of wall blocks made of sand-free expanded clay concrete in residential construction] // Stroitelnye materialy. 2010. № 2. P. 15–18. (In Russian)
2. Gorin V.M., Tokareva S.A., Kabanova M.K. Stenovye keramzitobetonnye konstrukcii – perspektivnyj material dlya industrialnogo domostroeniya [Wall structures made of expanded clay concrete are a promising material for industrialized housing construction] // Stroitelnye materialy. 2011. № 3. P. 55–58. (In Russian)
3. Ledyajkin A.S., Liyaskin O.V. Perspektivy primeneniya keramzita v Rossii [The prospects for the use of expanded clay in Russia] // Aktualnye voprosy arhitektury i stroitelstva: Sbornik trudov semnadcatoj Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Saransk, 2018. P. 196–199. (In Russian)
4. Galitskov K. Intelligent management of high-technology equipment for the manufacture of concrete and ceramic materials and products // Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education: Proceedings VI International Scientific Conference. MATEC Web of Conferences. 2018. P. 03043. DOI: 10.1051/mateconf/201825103043.
5. Galitskov S., Galitskov K., Samokhvalov O. Computer modeling of the dynamics of energy consumption during expanded clay burning // Complex Systems: Control and Modeling Problems: Proceedings 21st International Conference. Samara, 2019. P. 401–406. DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976656.



© The Author(s), 2024

¹ Maxim A. Nazarov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Mechanization, Automation, and Energy Supply in Construction.
Konstantin S. Galitskov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Head of Dept. Mechanization, Automation, and Energy Supply in Construction.

6. *Onackij S.P.* Proizvodstvo keramzita [The production of expanded clay]. 3-e izd., pererab. i dop. M.: Strojizdat, 1987. 333 p. (In Russian)
7. *Nazarov M.A.* Matematicheskoe opisanie barabannogo holodilnika kak obekta avtomatizacii proizvodstva keramzita [Mathematical Description of a Drum Cooler as an Object of Automation in the Production of Expanded Clay] // *Mehanizaciya i avtomatizaciya stroitelstva: sbornik statej.* Samara, 2021. P. 75–80. (In Russian)
8. *Nazarov M.A.* *Approximaciya matematicheskoy modeli barabannogo holodilnika dlya proizvodstva keramzita kak obekta upravleniya s raspredelennymi parametrami* [Approximation of the Mathematical Model of a Drum Cooler for the Production of Expanded Clay as a Distributed Parameter Control Object] // *Tradicii i innovacii v stroitelstve i arhitekture: sbornik statej.* Samara, 2023. P. 892–898. (In Russian)
9. *Polyak B.T., Sherbakov P.S.* *Robastnaya ustojchivost i upravlenie* [Robust Stability and Control]. M.: Nauka, 2002. 303 p. (In Russian)
10. *Zotov M.G.* *Robastnye i adaptivnye sistemy* [Robust and Adaptive Systems] // *Avtomatika i telemehanika.* 2015. № 2. P. 61–72. (In Russian)

Original article submitted 11.10.2024

УДК 666.3-1:001.891.592

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ ЛИНИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ КЕРАМЗИТА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА

*Е.А. Чунихина, А.С. Фадеев*¹

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

E-mail: karno1753@yandex.ru, fas2204@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрен метод контроля за состоянием оборудования электропривода, который позволит отслеживать его режим работы в реальном времени. В процессе работы предлагается учитывать эксплуатационные характеристики электропривода. В рамках работы была проанализирована конструкция ленточного конвейера с точки зрения его надежности. На основе известных зависимостей были разработаны математические модели, описывающие наработку до отказа элементов, что способствует повышению адекватности оценки сроков службы оборудования при оценке факторов его работы. Для проведения исследований была синтезирована структурная схема системы автоматического управления диагностикой и восстановлением исправности электропривода. Этот подход демонстрирует прогрессивные и современные способы обеспечения надежности технологического оборудования, что, в свою очередь, оптимизирует работу системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) на основе фактического состояния оборудования. Предлагаемая система диагностики играет важную роль в снижении простоев и уменьшении эксплуатационных затрат при использовании электроприводов на предприятиях. С её помощью предприятия смогут более эффективно планировать техническое обслуживание и наиболее эффективно обеспечивать ресурсы электроприводов, что приведёт к увеличению общей производительности и снижению рисков, связанных с внезапными отказами.

Ключевые слова: электропривод, показатели надежности, режим работы, технологическое оборудование, остаточный ресурс.

Современная автоматизация снижает степень участия человека в производственном процессе, ввиду чего снижается контроль за техническим состоянием оборудования [1]. В связи с этим остро встает вопрос контроля и мониторинга технологического оборудования, что вызвано требованиями к его безотказной работе. Исключения останковки оборудования по причине его отказа можно достичь, например, с помощью прогнозирования момента отказа технологических машин на основании непрерывного мониторинга режимов их работы и состояния



© Автор(ы), 2024

¹ *Елизавета Александровна Чунихина, аспирант кафедры «Механизация, автоматизация и энергоснабжение строительства».*

Александр Сергеевич Фадеев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механизация, автоматизация и энергоснабжение строительства».

с целью выбора наиболее благоприятного времени для выведения оборудования в ремонт [2].

Известно, что техническое обслуживание оборудования может осуществляться [3] по отказам, регламенту или фактическому состоянию. Проведение технического обслуживания и ремонта (ТОиР) оборудования по отказу не подразумевает какого-либо контроля технологического оборудования, но при этом отказы возникают непредсказуемо по времени и объему. Это влечет экономические затраты на ремонт и остановку производства с последующим смещением сроков выполнения заказов. При регламентном проведении ТОиР зачастую происходит замена еще исправных деталей и узлов оборудования, что приводит к увеличению эксплуатационных затрат. Для выполнения технической диагностики перед ТОиР необходимо провести диагностирование состояния оборудования, что влечет дополнительные затраты, но позволяет спланировать время проведения ТОиР и с большой долей вероятности спрогнозировать время на выполнение заказов предприятия.

Авторами статьи для контроля за состоянием оборудования электропривода предлагается интегрировать в технологический процесс автоматизацию мониторинга за его работой. Это позволит отслеживать в реальном времени режимы работы электропривода и, аккумулируя полученные данные, прогнозировать его работу.

В процессе работы необходимо учитывать эксплуатационные характеристики, такие как значения рабочих токов и токов утечки, напряжений, момента вращения, температуры корпуса и элементов электропривода. Их изменение позволит идентифицировать режим работы электропривода и определить среднее время работы до отказа [4].

Для определения показателей надежности электропривода с целью снижения затрат на эксплуатацию предлагается оснастить его устройством, которое условно назовем прибором идентификации неисправностей (ПИН). Данное устройство позволит непрерывно осуществлять измерение и запись технических параметров (питающее напряжение и потребляемый ток, мощность, коэффициент мощности, частота вращения вала двигателя, температуры двигателя и редуктора, уровень шума и вибрации механической части привода, вращающий момент и некоторые другие) электропривода. Кроме того, обеспечивается возможность введения в ПИН сведений о необходимых регламентных работах, например замене масла, протяжке болтовых соединений, смазке открытых передач и др.

Для решения поставленных задач на первом этапе был рассмотрен ленточный конвейер (рис. 1), в котором с точки зрения надежности можно выделить несколько однотипных элементов, а именно подшипник, вал, муфту, зубчатую передачу и двигатель [5-9]. При проведении дальнейших исследований примем муфту и зубчатую передачу абсолютно надежными. Математическое описание процесса изменения показателей надежности подшипника и двигателя будем определять по методике, приведенной в [10], а вала – по методике из [11]. Особенностью модели является то, что все элементы (вал, подшипник, двигатель, обмотка) имеют одинаковые математические описания, независимо от места применения. Отличия состоят лишь в числовых характеристиках модели.

На основании зависимостей, представленных в [10] и [11], построим математические модели наработки до отказа асинхронного двигателя, приводного барабана и редуктора. Примем, что электродвигатель с точки зрения надежности со-

стоит из вала, двух подшипников и обмотки. Поэтому для моделирования двигателя используем модель надежности вала, две модели надежности подшипника и одну модель надежности изоляции (рис. 2). Так как определение показателей надежности сопряжено с изменениями температуры, то необходимо добавить блок моделирования температуры обмоток «Расчет температуры» исходя из их параметров: индуктивности фаз обмотки L_a , L_b , L_c ; потребляемых токов i_a , i_b , i_c ; температуры окружающей среды T_{oc} и других [12].

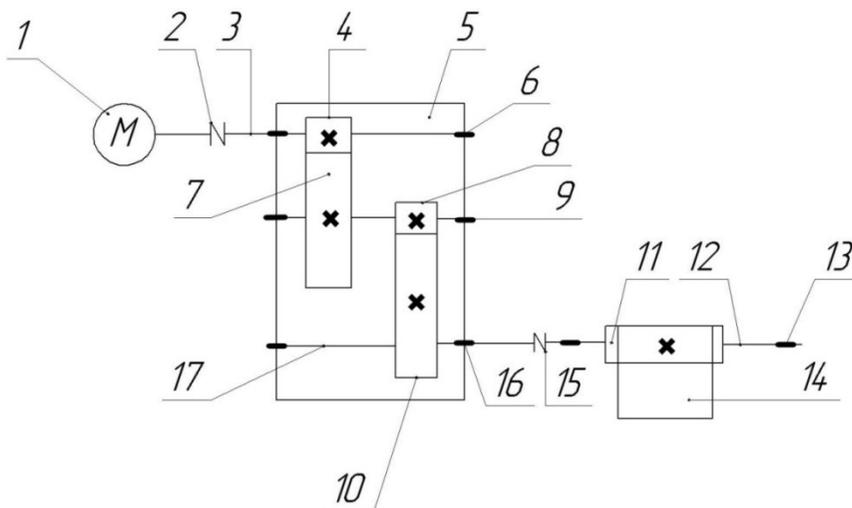


Рис. 1. Кинематическая схема конвейера: 1 – электродвигатель; 2 – муфта упругая; 3 – вал быстроходный; 4 – вал-шестерня быстроходной ступени; 5 – корпус редуктора; 6 – подшипниковый узел с глухой крышкой; 7 – зубчатое колесо быстроходной ступени; 8 – вал-шестерня тихоходной ступени; 9 – вал-шестерня промежуточный; 10 – зубчатое колесо тихоходной ступени; 11 – барабан приводной ленточного конвейера; 12 – вал приводного барабана; 13 – опора подшипниковая приводного барабана; 14 – лента питателя; 15 – муфта упругая; 16 – подшипниковый узел со сквозной крышкой с уплотнением; 17 – вал тихоходный

В структуре (см. рис. 2) присутствуют блоки Servise, введенные для восстановления надежности системы и моделирующие процесс ремонта или восстановления. Также в модели имеются блоки расчета механических параметров вращения вала. На основании полученных выходных данных остаточной наработки в блоке Min выбирается минимальное значение, которое считается конечным для данного узла.

Редуктор с точки зрения надежности состоит из трех валов, шести подшипников и двух зубчатых передач. Тогда для моделирования надежности редуктора выбираются три модели надежности вала и шесть моделей надежности подшипника (рис. 3). Блоки, обеспечивающие работу подсистем определения надежности отдельных узлов и выходные блоки, аналогичны блокам, рассмотренным выше и учтенными при моделировании асинхронного двигателя (см. рис. 2).

Барабан с точки зрения надежности состоит из одного вала и двух подшипников. Тогда для моделирования надежности редуктора применим одну модель надежности вала и две модели надежности подшипника (рис. 4). Блоки, обеспе-

чивающие работу подсистем определения надежности отдельных узлов и выходные блоки, аналогичны рассмотренным при моделировании асинхронного двигателя (см. рис. 2).

После моделирования наработки до отказа каждого из узлов производится выбор из выходных сигналов минимального – он и будет выходным сигналом остаточного времени наработки.

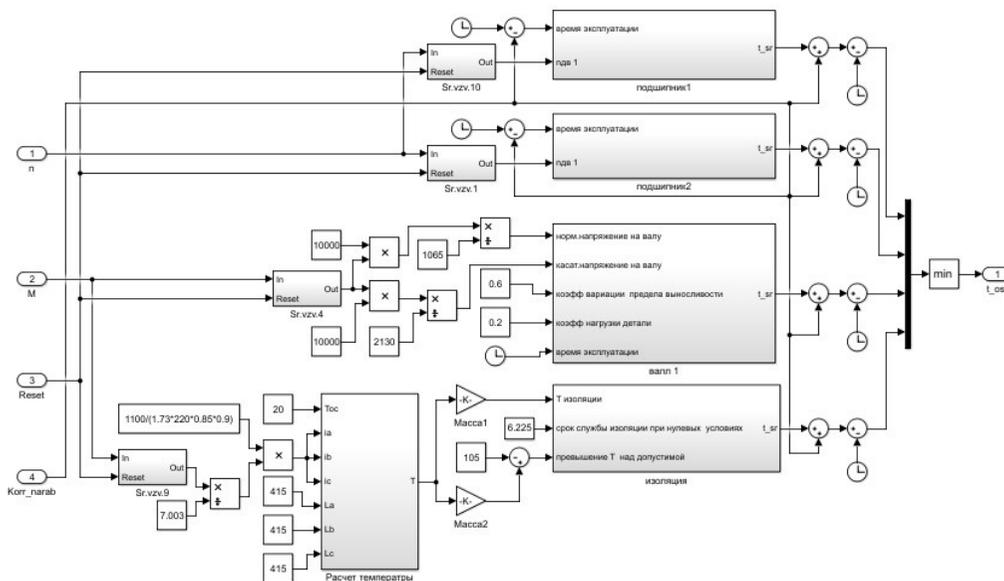


Рис. 2. Вычислительная модель асинхронного двигателя

Для проведения следующего этапа исследований разработана структурная схема системы автоматического управления (САУ) диагностики надежности электроприводов (рис. 5). Здесь блок моделирует технологический процесс (ТП) в рассматриваемом случае, процесс работы электропривода конвейера [3], входные координаты \bar{X}_1 которого контролируется датчиками D_1 , а выходные \bar{X} – датчиками D_2 . Кроме того, координата \bar{X}_1 формируется из координаты \bar{X}_{ex} , обеспечивая дискретное управление ей посредством сигнала \bar{Y}_2 . Параметры надежности устройств, участвующих в технологическом процессе, моделируются с помощью блока «Надежность узлов машин» (НУМ). В этом блоке реализованы все функции надежности узлов, объектов, устройств и машин технологического процесса. Выходной координатой НУМ \bar{V} являются параметры надежности узлов, учитываемыми в процессе работы возмущениями – сигналы \bar{h}_2 и \bar{h}_3 с датчиков D_1 и D_2 . Входным воздействием на НУМ является \bar{Y}_1 – это операции технического осмотра, обслуживания и ремонта, которые позволяют привести показатели надежности машин технологического процесса к заданным в технической документации значениям (пределам). Сигналы \bar{Y}_1 и \bar{Y}_2 формируются административной системой АС, в которую входят логические и вероятностные функции, обеспечивающие проведение своевременных процедур по восстановлению надежности устройств технологического процесса с учетом ряда произ-

водственных факторов h_1 . Работа АС основывается на сигнале отклонения $\overline{\delta V}$, который является разностью заданных в технической документации значений \overline{V}_3 и полученных с НУМ \overline{V} параметров надежности [13].

На основании структуры САУ (см. рис. 5) создана вычислительная модель автоматизированной системы управления показателями надежности электропривода конвейера (рис. 6). В состав конвейера входят асинхронный двигатель и механическая часть. В блок НУМ введены модели надежности асинхронного двигателя, редуктора и приводного барабана конвейера. В блоке АС предусмотрено по одному блоку административной системы на каждый механизм.

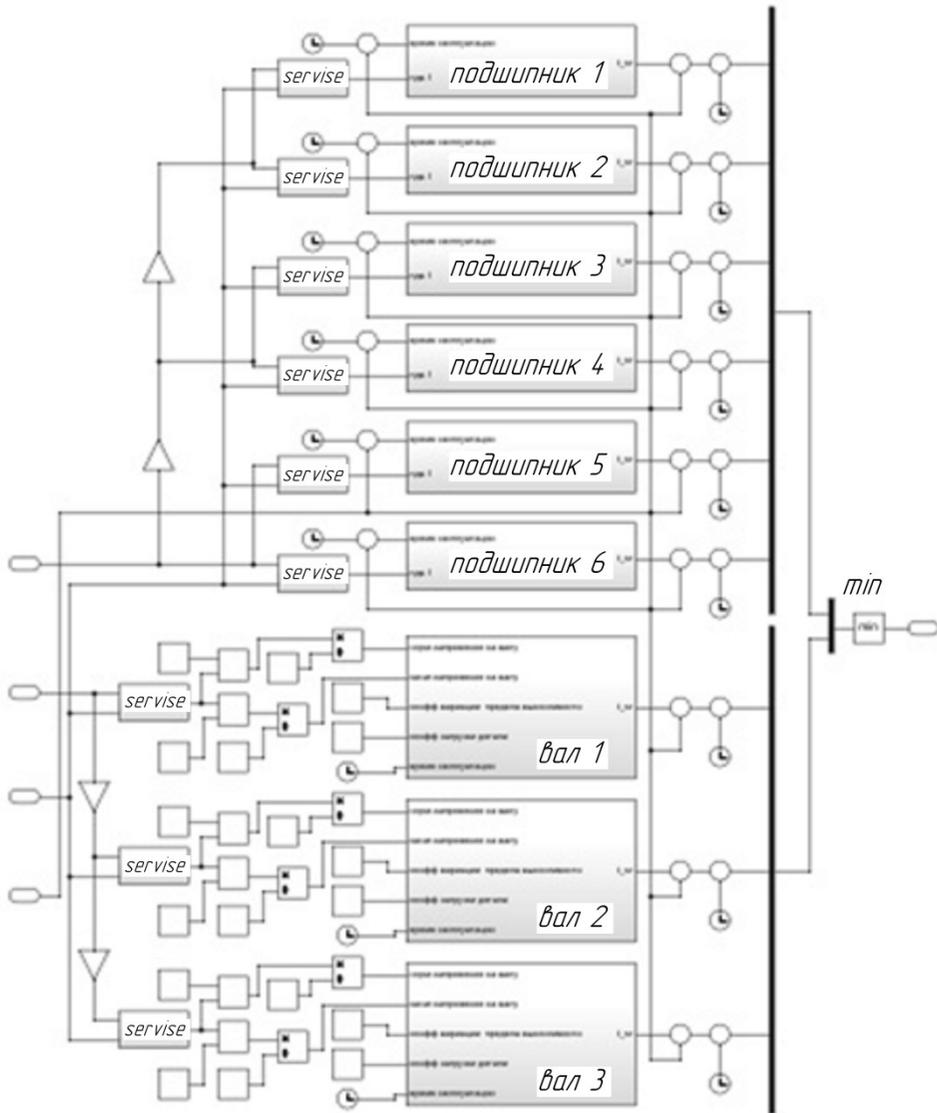


Рис. 3. Вычислительная модель редуктора

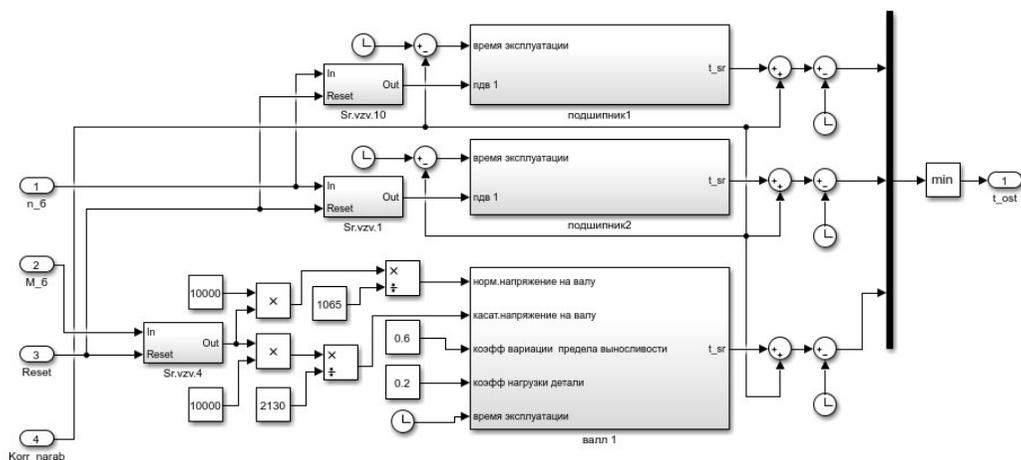


Рис. 4. Вычислительная модель барабана конвейера

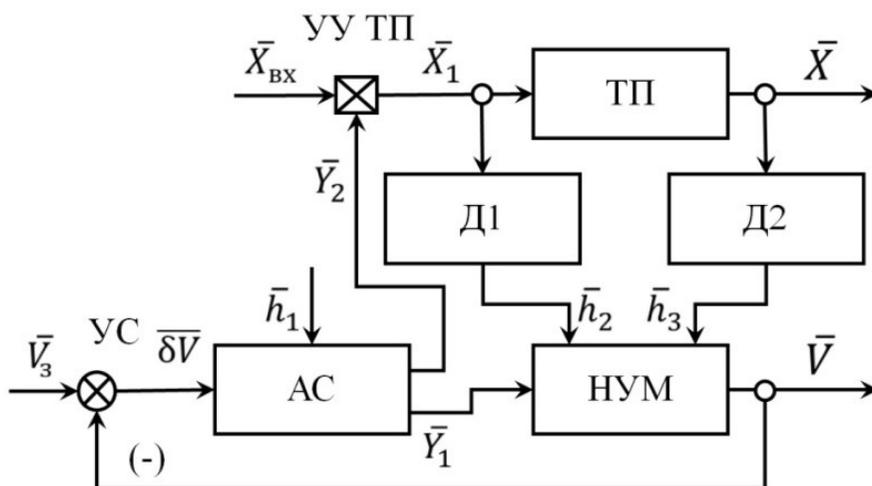


Рис. 5. Структура САУ диагностики надежности электроприводов

Административная структура (АС) имеет стохастический характер работы [14]. То есть при приближении времени ожидаемого отказа объекта автоматизации АС обеспечит начало выполнения процедуры с некоторой вероятностью и процедура будет завершена успешно за некоторый интервал времени с определенной вероятностью.

Начало выполнения работ зависит от ряда факторов: вида операции (осмотр, техническое обслуживание (ТО) без остановки объекта, ТО с остановкой объекта, ремонт); количества и квалификации персонала, задействованного в операции; загруженности оборудования и технического персонала в текущий момент

времени; годового план проведения на ТОиР; наличия накопителей и дублирования оборудования в технологической линии [15].

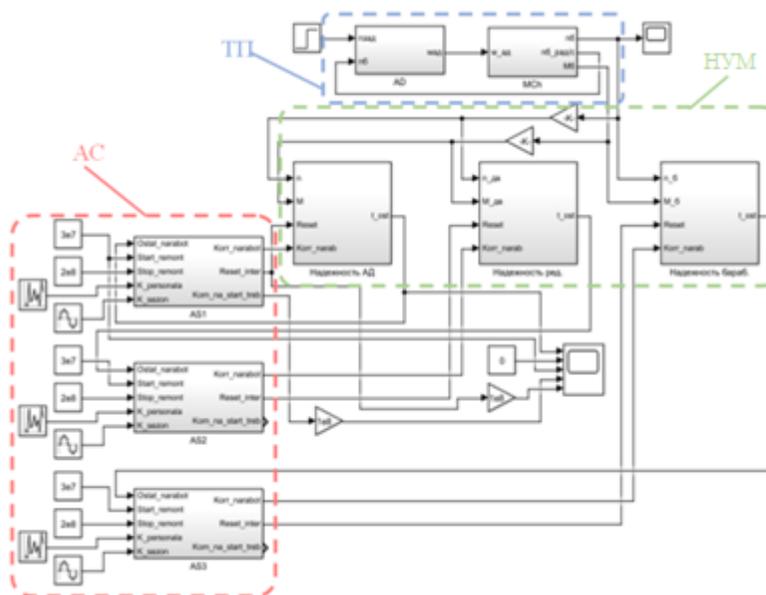


Рис. 6. Вычислительная модель автоматизированной системы управления показателями надежности электропривода конвейера

Настройка АС выполняется за счет задания коэффициентов, которые определяют вероятности начала выполнения работ, направленных на увеличение надежности оборудования в зависимости от ранее обозначенных факторов. Более подробно работа АС будет показана в отдельной статье.

Работу построенной вычислительной модели оценим по графику изменения времени наработки до отказа, приведенному на рис. 7. На графике видно, что наработка (линия 1 периода I) уменьшается с течением времени и при достижении минимального уровня надежности (линия 4) должен начаться процесс восстановления объекта. Но в этот момент времени производить восстановление объекта не представляется возможным по причинам, описанным ранее в общих принципах действия АС. В случае, когда ситуация позволяет, происходит восстановление объекта, которому соответствует растущая линия 2 на рис. 7. При этом восстановление объекта происходит до начального уровня наработки. Также на графике показан период восстановления асинхронного двигателя (линия 3 на рис. 7), в котором объект выведен из работы и происходит восстановление его показателя надежности. На периодах II и III процессы повторяются.

Особенности настройки автоматической системы, приведенной на рис. 6, заключаются в том, чтобы выбрать такой минимальный уровень надежности (линия 4 на рис. 7) и такие значения коэффициентов величин, отражающих стохастические процессы в АС, при которых начало ремонта возможно отложить на некоторое время, не доводя объект до отказа. Анализируя графики, приведенные на рис. 7, можем заключить, что для данного случая это выполняется.

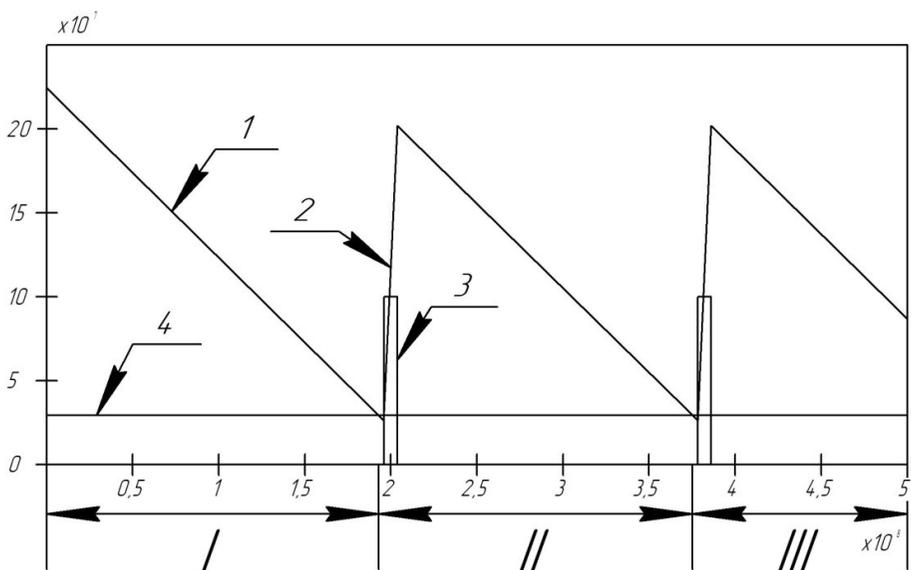


Рис. 7. Результат работы модели автоматизированной системы управления показателями надежности электропривода конвейера: 1 – наработка до отказа АД; 2 – время восстановления ресурса АД; 3 – момент обозначения периода проведения восстановления АД; 4 – заданный уровень надежности, при достижении которого требуется проводить восстановление ресурса АД

Выводы

На примере керамзитового производства показана возможность применения САУ и диагностики надежности электропривода для реализации прогрессивного способа обеспечения показателей надежности технологического оборудования, которое заключается в обеспечении работы системы ТОиР по фактическому состоянию. Также показана методика составления общей модели надежности оборудования из типовых элементов прогнозирования надежности элементов. Показана структура САУ диагностики надежности электроприводов и выполнено вычислительное моделирование работы такой системы на примере электродвигателя конвейера. Результатом явился график изменения времени наработки до отказа при длительности моделирования $450 \cdot 10^6$ с, при этом САУ обеспечила вывод в ремонт оборудования три раза, не снизив остаточное время наработки до отказа ниже $0,28 \cdot 10^7$ с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галицков К.С., Фадеев А.С. Структурный синтез технологического комплекса глиноподготовки в условиях нестационарности влажности сырья при производстве керамзита // Строительные материалы. 2022. № 5. С. 40-44. DOI:10.31659/0585-430X-2022-802-5-40-44. EDN: RQJKEW.
2. Барлоу Р.Э., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. Пер. с англ. И.А. Ушакова. М.: Наука, 1984. 327 с.
3. Фадеев А.С., Самохвалов О.В. Надежность систем автоматического управления технологическими процессами: учебно-методическое пособие. Самара: СамГТУ, 2022. 75 с.
4. Карaban В.И. Диагностика и надёжность автоматизированного технологического оборудования: учебное пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2009.
5. Самохвалов О.В. Автоматизация технологического процесса обжига при производстве керамзита заданной прочности: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Самара, 2018. 214 с.

EDN: TRARVI.

6. *Онацкий С.П.* Производство керамзита. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1987. 333 с.
7. *Персиянов А.Н.* Производство и применение керамзита. Куйбышев: Куйбышевское кн. изд-во, 1961. 46 с.
8. *Белов М.П., Новиков А.Д., Рассудов Л.Н.* Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для вузов. 3-е изд. М.: Академия, 2007. 576 с. EDN: QMJURZ.
9. *Галицков С.Я., Галицков К.С., Масляницын А.П.* Динамика асинхронного двигателя. Самара: СГАСУ, 2004. 97 с. EDN: SZIHFL.
10. *Галицков К.С., Фадеев А.С., Ильина Е.А.* Математическое моделирование изменения показателей надежности элементов электропривода конвейера // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии. Сборник статей 80-й Юбилейной всероссийской научно-технической конференции / Под ред. М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, А.К. Стрелкова. Самара: СамГТУ, 2023. С. 928–935. EDN: JURJTD.
11. *Сызранцева К.В., Черная Л.А.* Оценка надежности валов по критерию усталостной прочности при случайном режиме нагружения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 5. С. 34–38. EDN: QAKCDX.
12. *Галицков К.С., Шломов С.В.* Идентификация одного класса объектов управления с переменными параметрами // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: материалы 70-й Всерос. науч.-техн. конф. Самара: СГАСУ, 2013. С. 461-463. EDN: TLLICD.
13. *Ильина Е.А., Ленивец А.Г.* Разработка системы автоматического управления пассажирским лифтом // Механизация и автоматизация строительства: сб. ст. Самара: СамГТУ, 2020. С. 391-395. EDN: AEJBUV.
14. *Воронов А.А.* Теория автоматического управления. Ч. I, II. М.: Высшая школа, 1986.
15. *Шубин М.В.* Автоматическая система упреждения аварий (разрушения огнеупорной футеровки) мощных вращающихся печей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. М., 2010. 28 с. EDN: QGZMZP.

Статья поступила в редакцию 11.10.2024

DIAGNOSTIC SYSTEM FOR THE EXPANDED CLAY PRODUCTION LINE EQUIPMENT DURING MAINTENANCE AND REPAIR OPERATIONS

E.A. Chunikhina, A.S. Fadeev¹

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

E-mail: karno1753@yandex.ru, fas2204@mail.ru

Abstract. *The article discusses a method for monitoring the condition of electric drive equipment, which will allow you to monitor its operating mode in real time. During operation, it is proposed to take into account the operational characteristics of the electric drive. As part of the work, the design of the conveyor belt was analyzed in terms of its reliability. Based on the known dependencies, mathematical models have been developed that describe the operating time to failure of the elements, which helps to increase the adequacy of the assessment of the service life of the equipment when evaluating the factors of its operation. To carry out the research, a block diagram of the automatic control system for diagnosis and restoration of the electric drive was synthesized. This approach demonstrates progressive and modern ways to ensure the reliability of technological equipment, which, in turn, optimizes the operation of the maintenance and repair system based on the actual condition of the equipment. The proposed diagnostic system plays an important role in reducing downtime and reducing operating costs when using electric drives in enterprises. With its help, enterprises will be able to plan maintenance more efficiently and provide electric drive resources in the most efficient way, which will lead to an increase in overall productivity and reduce the risks associated with sudden failures.*

Keywords: *electric drive, reliability indicators, operating mode, technological equipment, residual resource.*

REFERENCES

1. Galickov K.S., Fadeev A.S. Strukturnyj sintez tekhnologicheskogo kompleksa gli-nopodgotovki v usloviyah nestacionarnosti vlazhnosti syr'ya pri proizvodstve keramzita [Structural synthesis of the clay preparation technological complex under non-stationary raw material moisture conditions in the production of expanded clay] // Stroitelnye materialy. 2022. № 5. P. 40-44. DOI:10.31659/0585-430X-2022-802-5-40-44. (In Russian)
2. Barlou R.E., Proshan F. Statisticheskaya teoriya nadezhnosti i ispytaniya na bezotkaznost [Statistical Theory of Reliability and Life Testing]. Per. s angl. I.A. Ushakova. M.: Nauka, 1984. 327 p. (In Russian)
3. Fadeev A.S., Samokhvalov O.V. Nadezhnost sistem avtomaticheskogo upravleniya tekhnologicheskimi processami [Reliability of Automated Process Control Systems]: uchebno-metodicheskoe posobie. Samara: SamGTU. 2022. 75 p. (In Russian)
4. Karaban V.I. Diagnostika i nadyozhnost' avtomatizirovannogo tekhnologicheskogo oborudovaniya: uchebnoe posobie [Diagnostics and Reliability of Automated Process Equipment: Study Guide]. Staryj Oskol: TNT, 2009. (In Russian)
5. Samohvalov O.V. Avtomatizaciya tekhnologicheskogo processa obzhiga pri proizvodstve keramzita zadannoj prochnosti [Automation of the Firing Process in the Production of Expanded Clay with Specified Strength]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.06. Samara, 2018. 214 p. (In Russian)



© The Author(s), 2024

¹ Elizaveta A. Chunikhina, Postgraduate Student, Dept. of Mechanization, Automation, and Energy Supply in Construction.
Aleksandr S. Fadeev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Mechanization, Automation, and Energy Supply in Construction.

6. *Onackij S.P.* Proizvodstvo keramzita [Production of Expanded Clay]. 3-e izd., pererab. i dop. M.: Strojizdat, 1987. 333 p. (In Russian)
7. *Persiyarov A.N.* Proizvodstvo i primenenie keramzita [Production and Application of Expanded Clay]. Kujbyshev: Kujbyshevskoe kn. izd-vo, 1961. 46 p. (In Russian)
8. *Belov M.P., Novikov A.D., Rassudov L.N.* Avtomatizirovannyj elektroprivod tipovyh proizvodstvennyh mekhanizmov i tekhnologicheskikh kompleksov [Automated Electric Drive for Typical Production Mechanisms and Technological Complexes]. 3-e izd. M.: Akademiya, 2007. 576 p. (In Russian)
9. *Galickov S.Ya., Galickov K.S., Maslyanicyn A.P.* Dinamika asinhronnogo dvigatelya [Dynamics of an Induction Motor]. Samara: SGASU, 2004. 97 p. EDN: SZIHFL. (In Russian)
10. *Galickov K.S., Fadeev A.S., Ilina E.A.* Matematicheskoe modelirovanie izmeneniya pokazatelej nadezhnosti elementov elektroprivoda konvejera [Mathematical Modeling of Reliability Indicators Change for Conveyor Electric Drive Components] // Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arhitekture. Stroitel'stvo i stroitel'nye tekhnologii. Sbornik statej 80-j Yubilejnoj vsrossijskoj nauchno-tekhnicheskoi konferencii / Ed. by M.V. Shuvalova, A.A. Pishuleva, A.K. Strelkova. Samara: SamGTU, 2023. P. 928–935. (In Russian)
11. *Syzranceva K.V., Chernaya L.A.* Ocenka nadezhnosti valov po kriteriyu ustalostnoj prochnosti pri sluchajnom rezhime nagruzheniya [Evaluation of Shaft Reliability Based on Fatigue Strength Criterion Under Random Loading Conditions] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie. 2013. № 5. P. 34–38. (In Russian)
12. *Galickov K.S., Shlomov S.V.* Identifikaciya odnogo klassa obektov upravleniya s peremennymi parametrami [Identification of a Class of Control Objects with Variable Parameters] // Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arhitekture: materialy 70-j Vseros. nauch.-tekhn. konf. Samara: SGASU, 2013. P. 461-463. (In Russian)
13. *Ilina E.A., Lenivcev A.G.* Razrabotka sistemy avtomaticheskogo upravleniya passazhirskim liftom [Development of an Automatic Control System for a Passenger Elevator] // Mekhanizaciya i avtomatizaciya stroitel'stva: sb. st. Samara: SamGTU, 2020. P. 391-395. (In Russian)
14. *Voronov A.A.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Automatic Control Theory]. CH. I, II. M.: Vysshaya shkola, 1986. (In Russian)
15. *Shubin M.V.* Avtomaticheskaya sistema uprezhdeniya avarij (razrusheniya ognepornoj futerovki) moshchnyh vrashchayushchihsya pechej [Automatic System for Preventing Accidents (Destruction of Refractory Lining) in High-Power Rotary Kilns]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.11.13. M., 2010. 28 p. (In Russian)

Original article submitted 11.10.2024

UDK 621.315.59:621.396.9

DEvised TECHNOLOGY FOR WIRELESS POWER TRANSMISSION**Muhanned AL-Rawi¹**Institut Teknologi Bandung
10, Jalan Ganesa, Coblong, Kota Bandung, 40132, Jawa Barat Indonesia

E-mail: muhrawi@yahoo.com

Abstract. *Wireless charging of gadgets is one of the most emerging technologies in the world today. The most common method currently used is wireless power transfer through inductive coupling. Wireless power transfer is one of the simplest and cost-effective ways of charging, as it eliminates the need for conventional copper cables and current-carrying wires. In this paper, a methodology and principle of operation are devised for wireless power transfer through inductive coupling, and a feasible design is modeled accordingly. The inductive coupling technique is chosen because it is currently the easiest method of wireless power transfer, offering high efficiency and the ability to transfer a large amount of energy. This paper presents the results of experiments conducted to verify the wireless power transfer functionality. Additionally, to demonstrate its versatility and range of applications, the transferred power is used to charge a battery with the aid of additional circuitry. We also study the effect of placing obstacles between the transmitter and receiver to determine its potential as an alternative in the medical industry, such as for charging pacemakers. This research focuses on the study of wireless power transfer for the purpose of transferring energy at maximum efficiency within a small range or in the near-field region.*

Keywords: design, wireless power transmission, inductive coupling, efficiency, near-field region.

Introduction

If we are using an electronic device, perhaps a mobile phone, and we need to recharge the battery then we will probably have to get a charger and connect the phone to the wire. But what if we could charge it without having to connect it to wire? meaning power will be transferred wirelessly. This is possible through a concept called Wireless Power Transmission (WPT). Research and studies have been done ever since the 19th century but it is only recently that this concept has begun to be implemented [1–5].

Currently, engineers are trying to discover how to increase the efficiency of power transmitted wirelessly and also methods that are safe to human beings and the environment and notwithstanding, methods that are cheaper and hence can be commercially viable. Though still in the early stages, several electronic companies are beginning to roll out devices that can wirelessly transmit power [6–10].

WPT is based on the principle of electromagnetic induction. Electromagnetic induction works on the concept of a primary coil generating a predominantly magnetic



© The Author(s), 2024

¹ Muhanned Al-Rawi (Ph.D. (Techn.)), Assistant Professor, School of Electrical Engineering and Informatics.

field and a secondary coil being within that field so a current is induced within its coils. This causes the relatively short range due to the amount of power required to produce an electromagnetic field [11–15].

This paper seeks to eliminate the use of wires in the transmission of power from the source to the device to be powered. Although WPT is based on electromagnetic induction, there are various methods that are used. Some are less efficient than others and costly while others do not allow for a longer range of transmission. In this paper, it is required to design and construct an electronic device that shall transmit power within a small range. The device can then be used to charge batteries for devices like pace makers.

In the paper, a suitable method is used to ensure that enough power is transmitted wirelessly so that it can then charge batteries. The major challenge is in the coupling circuit which comprises of the coils where electromagnetic induction occurs.

1. Methods and materials

1.1. General principle of design

The general principle of operation is designed using inductive coupling and ensuring that the power transfer is as efficient as possible and the transfer within the near field. The design also ensures for purposes of versatility and optimization of the battery charging circuit is energy efficient and prevents losses. The circuit is divided into two sections; transmitter circuit, and receiver circuit

The transmitter circuit comprises of the power supply, boost converter, royer oscillator and the copper laminated coils. The receiver side has the receiver coil, rectifier, Liquid Crystal Display (LCD), Atmega 328 microcontroller and the switching circuit that uses the CD4066. Fig. 1 shows the block diagram of the design.

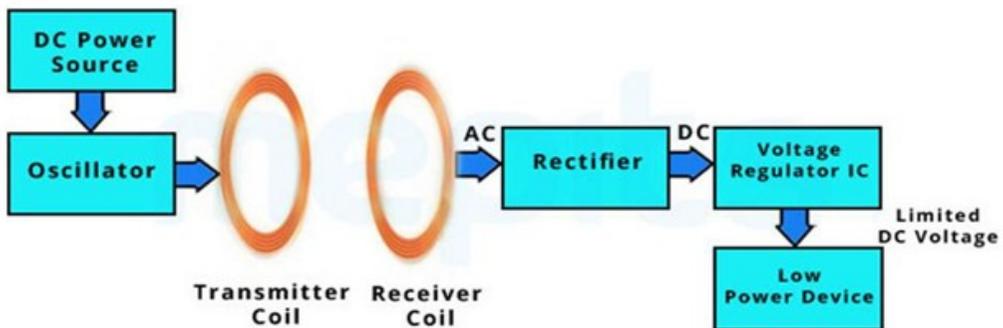


Fig. 1. Block diagram of the design

AC power is supplied from the mains and fed to the power supply. It is stepped down and then rectified to give DC power. The DC voltage is then passed through the voltage regulator (LM7805) so as to give a constant 5V DC. This DC signal is however not enough to cause a significant to create a large emf that causes the induction. The 5V is then fed to the DC boost converter to raise the voltage to 30V. The 30V now becomes the input to the royer oscillator circuit. The oscillator then converts the received DC voltage to AC power with a high frequency.

The transistor (MOSFET) causes a large current which is then supplied to the transmitting copper coil. The diagram in Fig. 2 shows the circuit of the transmitter section.

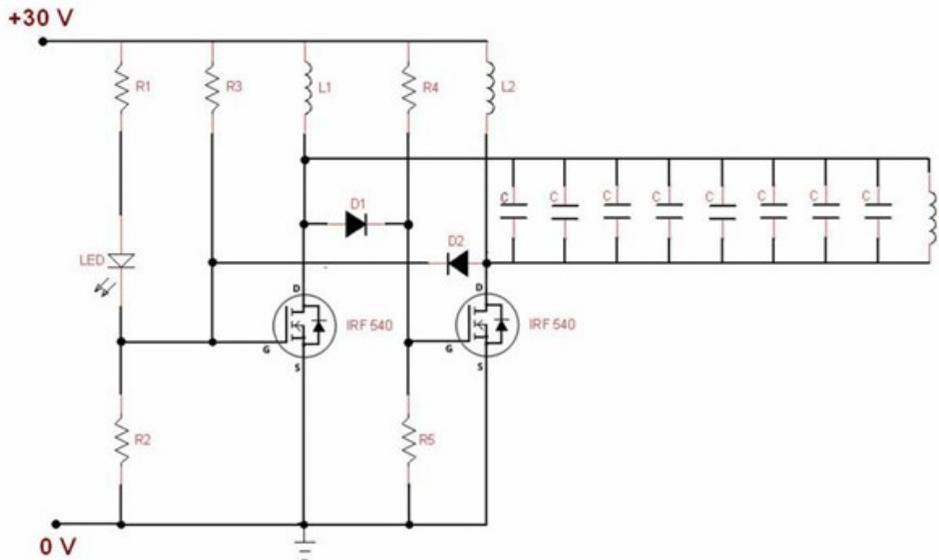


Fig. 2. Transmitter section circuit

The transmitter circuit section has two power MOSFETs (IRF540) which are biased using the resistors R1, R2, R3, R4. There is also a choke made up of inductors L1 & L2. The 8 capacitors C operate as resonating capacitors to ensure the coils are at resonant frequencies. Oscillators have feedback, in the case of the royer oscillator negative feedback. The two diodes D1 & D2 thus provide the cross coupled feedback required. The transmitter coil L which is basically an inductor is where the electromagnetic induction occurs. The coil used in this case is gauge 26. When power is given to the oscillator circuit, the DC current starts flowing through the two sides of the coil (L1&L2) and also to the drain terminals of the MOSFET. During the same instant, voltage appears on gate terminal of both the transistors and tries to turn ON the transistors. Any one of the transistor will be faster than the other and it will turn ON first.

When Q1 turns on first, its drain voltage will be clamped to near ground. Meanwhile Q2 will be in the off state. Once Q2 is in the conduction state, its drain voltage begins rising steadily to peak and then immediately begins to drop due to the tank circuit formed by the capacitor C and the primary coil of oscillator through one half cycle. The operating frequency of the oscillator is determined by the resonance formula given below

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

In the receiver side, the circuit is as shown in Fig. 3.

When the receiver coil is placed within the near field range from the transmitter coil, the magnetic field in the transmitter coil extends and it induces an AC voltage which generates a current flow in the receiver coil of the wireless charger. The transmitted AC voltage is then fed to the rectifier which converts it to DC. A capacitive fil-

ter is used to eliminate any ripples. The rectified voltage is fed to the voltage regulator LM7805 to ensure that the voltage is regulated and constant. The output is regulated 5V DC. This power then goes to power the microcontroller, LCD and the CD4066 switch.

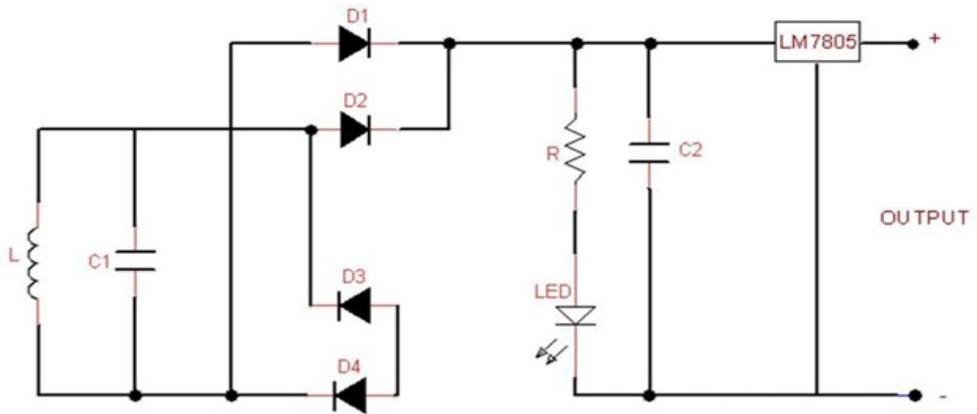


Fig. 3. Receiver circuit

1.2. Hardware and software components

1.2.1. Hardware

1.2.1.1. Power supply

The power supply circuit is shown in Fig.4.

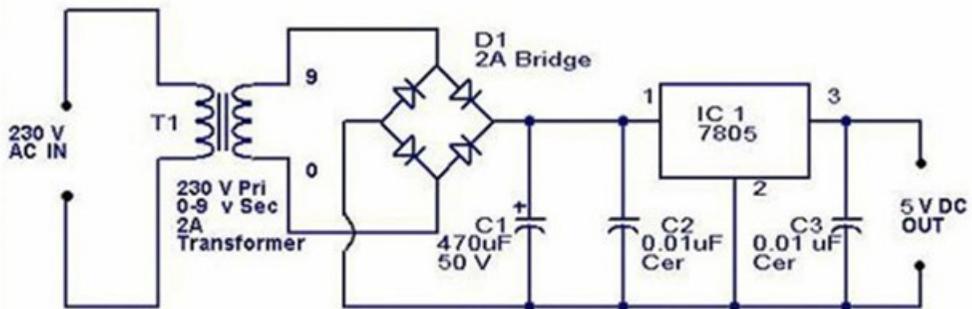


Fig. 4. Power supply

The oscillator needs 30V DC supplied. The power supply unit used however gives an output of 5V DC. The power supply contains a transformer that stepped down the 230V AC supplied from the mains to 9V AC. A full-wave bridge rectifier then rectified the 9V AC. Full wave bridge rectifier is preferred over the half wave bridge rectifier since, for the half wave rectifier, a large capacitor will be required to hold up the voltage during the gap whereby an AC cycle is skipped.

The bridge rectifier has an efficiency of 80% hence the rectified output is less than the input. The output received is 7.2V DC. This voltage however is still erratic and pulsating thus a smoothing capacitor is required. The smoothing capacitor supplies charge when the rectifier voltage falls thus evening out any fluctuations by the signal.

The smoothed DC voltage is then fed to the voltage stabilizer LM7805 which ensures a stable output voltage of 5V.

1.2.1.2. DC - DC boost converter

This is required since the voltage required to be fed into the oscillator is 30V yet from the power supply unit only 5V is being achieved. To step up to 30V, we use the switching regulator shown in Fig. 5.

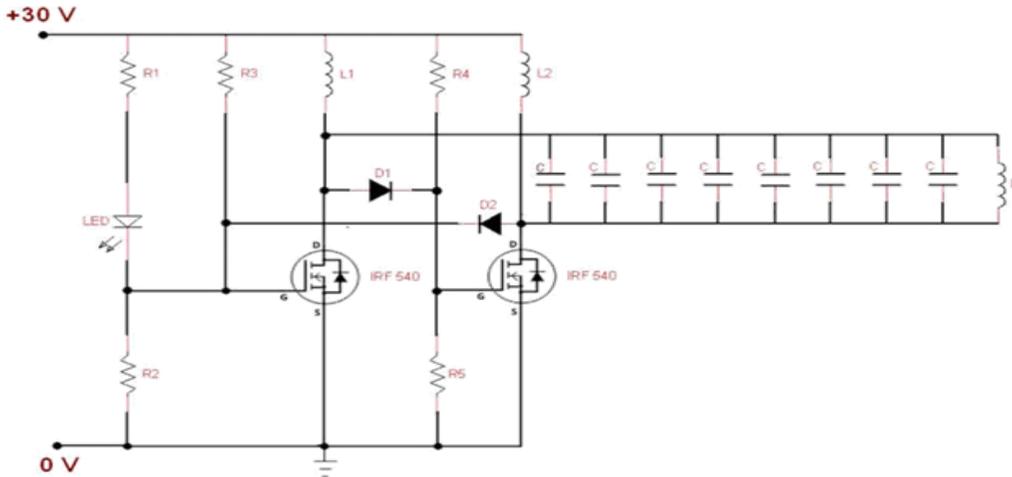


Fig. 5. Switching regulator

This switching regulator can operate in the continuous or the discontinuous mode so that the output voltage is higher. It consists of the following components: an inductor, capacitor, switching device, diode, and the input voltage source. The switch is usually controlled by a pulse width modulator. A potentiometer is also available that regulates the output voltage. In the continuous mode, the switch conducts and thus the current through the inductor is ramped up. When the switch is turned off, the voltage at point 4 in Fig.5 rises rapidly. This is because the inductor is attempting to maintain the current at a constant. The diode in turn goes on and thus the inductor dumps the current into capacitor C3 resulting in more energy being generated and thus a higher output voltage than the input voltage.

1.2.1.3. Royer oscillator

Oscillators are systems that consist of both passive and active components of a circuit which then generate sinusoidal waveforms or repetitive waveforms. Oscillator circuits generate waveforms without the aid of external inputs. They convert the DC supply power source to AC power which is supplied to a load. For this design, we use a royer oscillator as shown in Fig. 6. This oscillator belongs to the relaxation oscillators classification since its output is non-sinusoidal.

The capacitors turn the oscillator into a harmonic oscillator that outputs sine waves. This oscillator has two parts. The first part is a relaxation oscillator. It is connected as an astable multi vibrator which converts the DC power fed into it. It then converts the received DC power to a high frequency AC power. This part generates square waves which are the input of the second part which is the power amplifier. These waves are the input at the gate terminal of the power MOSFET.

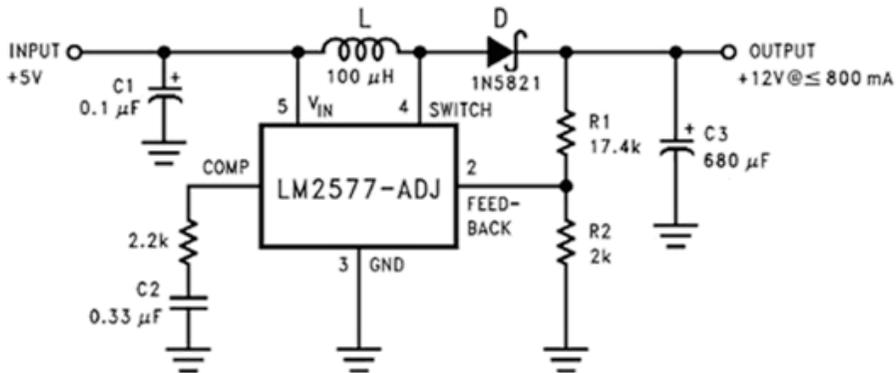


Fig. 6. Oscillator circuit

The second part is the power amplifier. The gate of the first MOSFET is driven by the signal generated at the oscillator part. This MOSFET provides the voltage and the current needed to drive the gate of the second MOSFET. When the second MOSFET turns on, it allows a large current from the DC signal to flow to the transmitting coil. The large current generates a large flux which then induces a high voltage to the receiving coil.

1.2.1.4. Full-wave bridge rectifier

The transmitted current received on the receiver side is AC. However, for purposes of charging the battery, DC is needed hence the need for rectification. In the design, a full wave bridge rectifier instead of a half wave rectifier is used. It is basically a full wave rectifier but uses four diodes instead of two which then form arms that are the bridge rectifier.

1.2.1.5. Microcontroller unit

A simple definition of the microcontroller is a computer on a chip. The microcontroller enables the work to be a standalone system which is able to produce varied reactions to various situations according to preset controls. The microcontroller in this paper is the Atmega-328 microcontroller.

The system is required to alert the user if a load is in place, calculate and display the level of charge, start the charging if needed and finally cut the charging when the load is fully charged. To do these actions on its own, the microcontroller needs to be loaded with a program to enable it execute all these actions.

1.2.1.6. LCD screen

In this paper, a display screen is used to show various aspects of the work. Internally, the LCD is made up of a thin layer of liquid crystals sandwiched between two layers of transparent electrode glass sheets. The nature of the glass sheets determines the type of the LCD screen. If both glass sheets are transparent then the LCD is transmissive and if one sheet has a reflective coat then the cell will be reflective. The liquid crystal molecules are able to twist, therefore changing slightly the amount of light penetration resulting in different characters being displayed on the screen. The display unit for this paper is a 16X2 LCD as shown in Fig. 7.

This means that the screen can display a maximum of 16 characters on one line and there are two lines where the characters can be displayed. The LCD used is HITACHI 44780. It is connected to the Atmega-328 microcontroller as shown in Fig. 8.

A potentiometer is connected to control the brightness of the LCD. The LCD model used has additional pins 15 and 16 that are used to turn the backlight on.



Fig. 7. 16X2 LCD

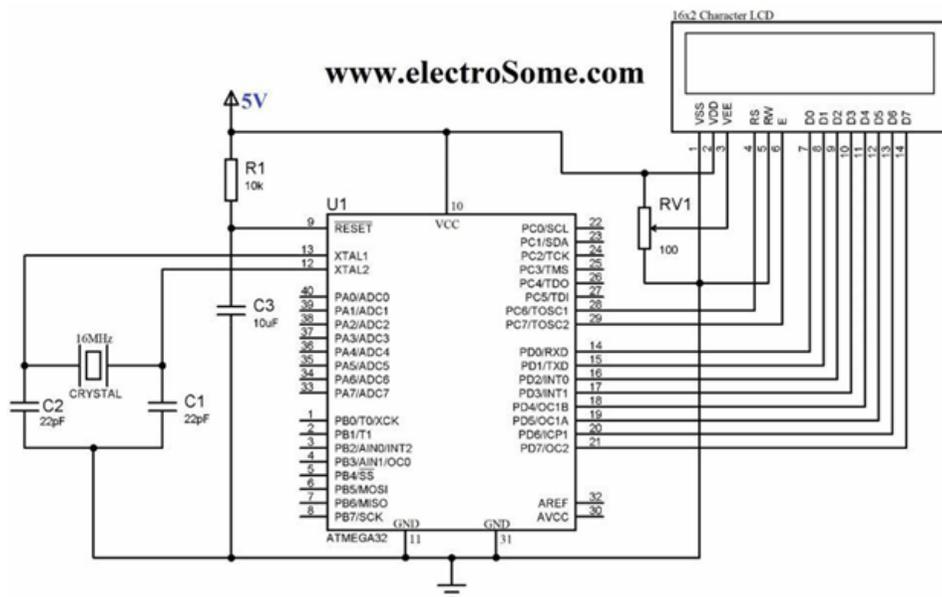


Fig. 8. LCD & Atmega-328 connection

1.2.1.7. Switching circuit

When the charging is complete, it is important to cut supply to the load so that power is conserved. The switching off of the circuit is achieved by the IC Cd 4066. Conventional switching circuit components such as the relay are not possible in this situation because of the lower power produced after transmission. Had a relay been used in the circuit, there would not have been enough power for the relay to work and therefore the switch will not work.

The CD 4066 is a low power multiplexing switch circuit which is an ideal replacement for mechanical switches. The IC has a bandwidth of around 8MHz, current consumption of 1 mA but it requires a high level power supply voltage since the input

impedance of the circuit drops with higher voltage levels. The circuit cuts supply to the load once the batteries are full so that power is not lost unnecessarily. The multiplexer switch diagram is shown in Fig. 9.

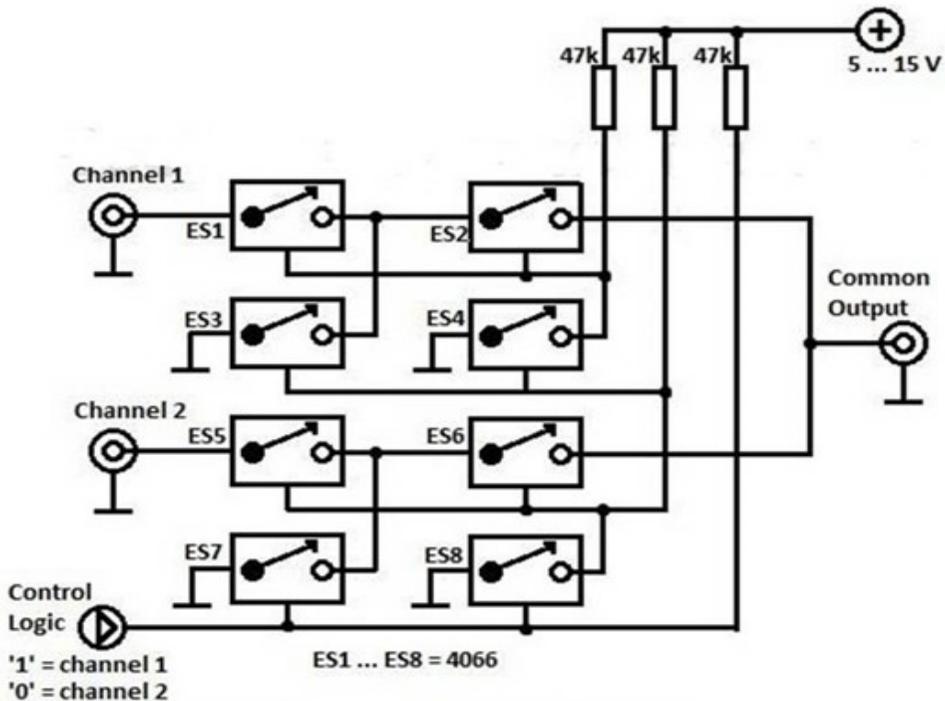


Fig. 9. Multiplexer switch

1.2.2. Software

1.2.2.1. USBasp

This is a Universal Serial Bus (USB) based programmer for the microcontroller used for burning hex files into AVR microcontroller. In order to program any microcontroller, we need the hex file or the sketch which is the machine code for the microcontroller. This file is generated by the corresponding assembler software, which converts programming code into machine code. Programming code can be produced by third party cross compiler software, such as arduino.

To transfer program using it, one end is connected to the computer that has assembler software and code. The other end is then connected to a 6-pin or a 10-pin cable. From this cable, female to female pins can be used which can then easily be hooked to a breadboard. Regardless of whether the 6-pin cable or 10-pin cable is used, only 6 pins will be in use, these are the Master in Slave Out(MISO), Serial Clock(SCK), Target AVR MCU Reset(RST), Power(VTG), Master Out Slave In(MOSI), and Common Ground(GND) connections.

1.2.2.2. Programming language

A programming language is a constructed language designed to communicate instructions to a machine. They are used to create programs that control how a machine functions in different circumstances. The work in this paper is done in assembler language. This is a low level programming language for a microcontroller or other programmable device. The assembler language has a very strong association with the ar-

chitecture of the microcontroller hence a good understanding of the microprocessor architecture is required when programming using assembler.

During the programming process the flowchart in Fig. 10 is used so that the code could be developed in segments and then combined to function as one.

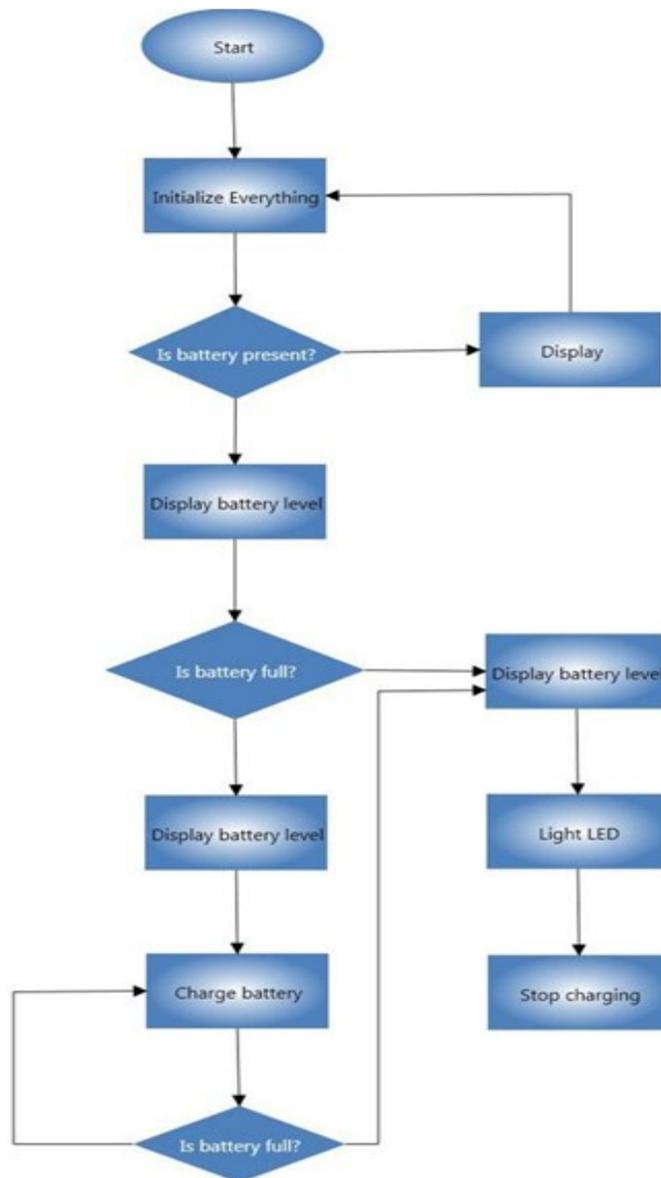


Fig. 10. Code flowchart

2. Results and discussions

2.1. Results

The main objective of the paper is to develop a device for wireless power transfer. The device has to be an electronic circuit. The achievement of this objective is further broken down into specific objectives which all together aided the development of the device. The other objectives are as follows:

1. Design and assemble a power supply unit. The power supply is to step down 230V AC supplied by the mains to 12V AC high frequency. The 12V AC is then to be rectified to give 5V DC.

2. Step up the DC supply. Using a boost converter, the DC voltage is raised to 30V DC.

3. Design and assemble an appropriate oscillator. For this paper, a royer oscillator is found to be most suitable.

After assembling and fabricating the components on the veroboard. The above three objectives formed the transmitter module. When assembled and fabricated, it is as depicted in Fig. 11.



Fig. 11. Components on the Veroboard

4. Develop transmitter and receiver coils. Electromagnetic induction occurs between these two coils and an emf generated on the TX coil that induces a current on the RX coil. The coils are embedded on the fabricated casing of the modules. However they are as in Fig. 12.



Fig. 12. Imbedded coils

5. Design the receiver module and rectify the AC voltage received on the receiver coil. The rectifier is needed to output DC power which is used to power other components.
6. Designing a battery charging circuit. The transmitted power is to be used to charge a battery so as to further demonstrate the application of wireless power transmission in the modern world. Fig. 13 illustrates the fabrication of the device.



Fig. 13. Fabrication

2.2. Analysis and discussion

2.2.1. Coils

To test if power is transmitted, we first solder an LED to the receiver coil. The test is successful with only 5V DC powering the oscillator. However, the power is too to energize the battery charging circuit that comprised of an LCD and microprocessor. The voltage is stepped up using a boost converter to 30V DC. Two receiving coils are used and each has an LED lamp. They both lit brightly. We then add a set of LEDs and the results are as in Fig. 14 and Fig. 15.

In the above figure, the receiving coils are not separated from the transmitter coil. However, as the distance of separation increases, the brightness reduces. This proves that indeed the distance of separation determines the current induced in the receiver coil. As distance increases, less current is induced from the change of flux. The test LED bulbs lit brightest up to a separation distance of 5cm between the two coils after which their brightness reduced significantly.

Also, different gauges of the coil are used to determine which is more effective. Currently, in the market the most common are gauge 26 and gauge 16. It is noted that for the coils of gauge 16, the distance of separation between the coils has to be shorter and also the brightness of the bulb is less than for the gauge 26.



Fig.14. LED 1



Fig. 15. LED 2

Various objects are placed between the receiver and the transmitter coil to test if the shielding would have an effect on the power being transmitted. It is observed that this did not have any significant effect on the power that is transmitted. However when a magnetic material is placed in between the coils it had an effect.

2.2.2. Oscillator

The royer oscillator is chosen because of its simplicity yet powerful design. It is capable of generating very high oscillating current which is necessary to increase the strength of the magnetic field. This is achieved by the semi-conductor used. In this case, the IR 540 power MOSFETS. However, due to the large current, heating occurred in the MOSFETs thus heat sinks are attached to them.

When the voltage is stepped up to 30V DC, upon doing the initial test, the transmitter circuit did not oscillate yet the first MOSFET is rapidly heating up. It is discovered that due to voltage being fed rising too slowly on power up, a short circuit occurs. To solve this issue, a reset switch is introduced between the power supply and the oscillator circuit. The switch also enabled the circuit to be reset once the MOSFETs heated up.

It is also observed that as much as the voltage to the oscillator had been stepped up, the power being received on the load coil is not enough to power the battery charging circuit. This is attributed to the receiver coil being slightly out of resonance thus it is not able to receive the power well. To solve this, we ensure that the coils have the same number of turns and the capacitors used are identical so that both the transmitter and receiver circuits have the same resonant frequency.

2.2.3. Battery charging circuit

The battery charging circuit consists of the rectifier which converts the AC power to DC, an Atmega-328 microcontroller, a 16X2 LCD and a CD4066 switch. This part is largely controlled by the microcontroller. Initially a relay is used as the switch once the battery is full. However, it is drawing more current and thus acts as load. The CD4066 become a better alternative as it consumes less current and also is less bulky as compared to the single channel relay.

One of the challenges with modern chargers is that once charging is complete; there is no notification to the user to stop the charging. To solve this, a buzzer is used

so that once the charging is complete it sounds. However, this means the input signal has to be driven at the same frequency as that of the buzzer and also it consumes more power. An Red-Green-Blue (RGB) LED is instead used. Its operation is coded and loaded to the microcontroller.

It is observed that, once the battery starts charging, it heavily loaded the rectifier voltage and caused it to drop significantly. The battery internal resistance is suspected to be the major cause of this.

Conclusion

The objectives of the paper were met. An electronic device that wirelessly transmits power and then charges batteries was developed. We were able to design discrete components such as the royer oscillator, coils and a full bridge voltage rectifier for the system design process. Conclusions that were drawn from the paper are as follows:

1. Based on the theory of wireless charging via inductive coupling, which was the method used in the paper, it was seen that various aspects i.e. distance, resonant frequency, quality factor; coil turns ratio determine the efficiency of WPT. In addition, there is an exponential decay for power versus the distance of separation.

2. From the analysis, it was seen that at 0cm separation distance, the power transfer was most efficient as seen by the brightness of the test lamps.

3. From the paper, WPT for short range or near field occurred up to a distance of 5cm after which the power transferred began to significantly drop.

4. It can also be concluded that WPT can be used in other applications. In the paper, we were able to charge a 9V battery from power that was transmitted wirelessly.

5. Lastly, we can conclude that WPT is not affected by non-magnetic materials shielding the two coils. This therefore means that it can be effectively used in the medical field to charge pacemakers and other devices.

REFERENCES

1. *Choudhary V., Singh S.* Wireless power transmission: An innovative idea // International Journal of Educational Planning & Administration. 2011. Vol. 1, No. 3. P. 203–210.
2. *Parmar Y., Patel A., Shah J.* Review paper on wireless power transmission // International Journal of Scientific Research Engineering & Technology. 2015. Vol. 4, Issue 11. P. 1171–1173.
3. *Das S.* Review paper on wireless power transmission for charging mobile devices // International Journal of Engineering and Computer Science. 2017. Vol. 6, Issue 3. P. 20751–20755. DOI: 10.18535/ijecs/v6i3.62.
4. *Muthu J., Jarugumalli S., Sabapathy S.* An efficient wireless power transmission for future transport system // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2018. Vol. 119, No. 14. P. 1145–1151.
5. *Zhang Z., Pang H., Georgiadis A., Cecati C.* Wireless power transfer – An overview // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2019. Vol. 66, Issue 2. P. 1044–1058. DOI: 10.1109/TIE.2018.2835378.
6. *Saji M.* Review Paper on Wireless Power Transfer // International Journal of Trend in Scientific Research and Development. 2023. Vol. 7, Issue 4. P. 144–147.
7. *Liu W., Chau K.T., Tian X., Wang H., Hua Z.* Smart wireless power transfer – opportunities and challenges // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023. Vol. 180, Issue C. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113298. EDN: KPKZJV.
8. *Wang Y., Qiao J., Du J., Wang F., Zhang W.* A view of research on wireless power transmission // The International Conference on Mechanical, Electric and Industrial Engineering (MEIE2018). 2018. 26–28 May, Hangzhou, China. DOI: 10.1088/1742-6596/1074/1/012140.
9. *Hui S.-Y.R., Yang Y., Zhang C.* Wireless Power Transfer: A Paradigm Shift for the Next Generation // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2023. Vol. 11, No. 3. P. 2412–2427. DOI: 10.1109/jestpe.2023.3237792. EDN: YKJKZA.

10. *Xu F., Wong S.-C., Tse C.K.* Inductive power transfer system with maximum efficiency tracking control and real-time mutual inductance estimation // *IEEE Trans. Power Electron.* 2022. Vol. 37, No. 5. P. 6156–6167. DOI: 10.1109/tpel.2021.3126884. EDN: ZXTYWZ.
11. *Tang X., Zeng J., Pun K.P., Mai S., Zhang C., Wang Z.* Low-cost maximum efficiency tracking method for wireless power transfer systems // *IEEE Trans. Power Electron.* 2018. Vol. 33, No. 6. P. 5317–5329. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2726085.
12. *Liu Y., Madawala U.K., Mai R., He Z.* An optimal multivariable control strategy for inductive power transfer systems to improve efficiency // *IEEE Trans. Power Electron.* 2020. Vol. 35, No. 9. P. 8998–9010. DOI: 10.1109/TPEL.2020.2970780. EDN: WMKNPP.
13. *Zhong W., Hui S.Y.R.* Charging time control of wireless power transfer systems without using mutual coupling information and wireless communication system // *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017. Vol. 64, No. 1. P. 228–235. DOI: 10.1109/TIE.2016.2598725.
14. *Rahman M., Shanto S., Sarker N.* A comprehensive review of wireless power transfer methods, applications, and challenges // *Engineering Reports.* 2024. Vol. 6, Issue 10. DOI: 10.1002/eng2.12951. EDN: SIQEBF.
15. *Singh S., Hasarmani T.S., Holmukhe R.M.* Wireless transmission of electrical power overview of recent research & development // *International Journal of Computer and Electrical Engineering.* 2012. Vol. 4, No. 2. P. 207–211. DOI: 10.7763/IJCEE.2012.V4.480.

Original article submitted 28.12.2024

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

*Муханнед Аль-Раби*¹

Институт Технологии Бандунга
10, Jalan Ganesa, Coblong, Kota Bandung, 40132, Jawa Barat, Indonesia

E-mail: muhrawi@yahoo.com

Аннотация. Беспроводная зарядка гаджетов является одной из самых перспективных технологий в современном мире. Наиболее распространенным методом, используемым в настоящее время, является передача энергии через индуктивную связь. Беспроводная передача энергии – это один из самых простых и экономически эффективных способов зарядки, поскольку устраняет необходимость в традиционных медных кабелях и токопроводящих проводах. В данной статье разработаны методология и принцип работы для беспроводной передачи энергии через индуктивную связь, а также предложена соответствующая реализуемая модель. Техника индуктивной связи выбрана потому, что в настоящее время это самый простой метод беспроводной передачи энергии, обеспечивающий высокую эффективность и возможность передачи большого количества энергии. В статье представлены результаты экспериментов, проведенных для проверки функциональности беспроводной передачи энергии. Кроме того, чтобы продемонстрировать универсальность и диапазон применения, переданная энергия используется для зарядки аккумулятора с помощью дополнительных схем. Мы также изучаем влияние размещения препятствий между передатчиком и приемником, чтобы определить потенциал этой технологии в медицинской отрасли, например для зарядки кардиостимуляторов. Данное исследование сосредоточено на изучении беспроводной передачи энергии с целью передачи энергии с максимальной эффективностью на небольшом расстоянии или в ближней зоне.

Ключевые слова: проектирование, беспроводная передача энергии, индуктивная связь, эффективность, ближняя зона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Choudhary V., Singh S. Wireless power transmission: An innovative idea // International Journal of Educational Planning & Administration. 2011. Vol. 1, No. 3. P. 203–210.
2. Parmar Y., Patel A., Shah J. Review paper on wireless power transmission // International Journal of Scientific Research Engineering & Technology. 2015. Vol. 4, Issue 11. P. 1171–1173.
3. Das S. Review paper on wireless power transmission for charging mobile devices // International Journal of Engineering and Computer Science. 2017. Vol. 6, Issue 3. P. 20751–20755. DOI: 10.18535/ijecs/v6i3.62.
4. Muthu J., Jarugumalli S., Sabapathy S. An efficient wireless power transmission for future transport system // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2018. Vol. 119, No. 14. P. 1145–1151.
5. Zhang Z., Pang H., Georgiadis A., Cecati C. Wireless power transfer – An overview // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2019. Vol. 66, Issue 2. P. 1044–1058. DOI: 10.1109/TIE.2018.2835378.
6. Saji M. Review Paper on Wireless Power Transfer // International Journal of Trend in Scientific Research and Development. 2023. Vol. 7, Issue 4. P. 144–147.



© Автор(ы), 2024

¹ Муханнед Аль-Раби, кандидат технических наук, доцент школы электротехники и информатики.

7. *Liu W., Chau K.T., Tian X., Wang H., Hua Z.* Smart wireless power transfer – opportunities and challenges // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 180, Issue C. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113298. EDN: KPKZJV.
8. *Wang Y., Qiao J., Du J., Wang F., Zhang W.* A view of research on wireless power transmission // *The International Conference on Mechanical, Electric and Industrial Engineering (MEIE2018)*. 2018. 26–28 May, Hangzhou, China. DOI: 10.1088/1742-6596/1074/1/012140.
9. *Hui S.-Y.R., Yang Y., Zhang C.* Wireless Power Transfer: A Paradigm Shift for the Next Generation // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2023. Vol. 11, No. 3. P. 2412–2427. DOI: 10.1109/jestpe.2023.3237792. EDN: YKJKZA.
10. *Xu F., Wong S.-C., Tse C.K.* Inductive power transfer system with maximum efficiency tracking control and real-time mutual inductance estimation // *IEEE Trans. Power Electron.* 2022. Vol. 37, No. 5. P. 6156–6167. DOI: 10.1109/tpel.2021.3126884. EDN: ZXTYWZ.
11. *Tang X., Zeng J., Pun K.P., Mai S., Zhang C., Wang Z.* Low-cost maximum efficiency tracking method for wireless power transfer systems // *IEEE Trans. Power Electron.* 2018. Vol. 33, No. 6. P. 5317–5329. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2726085.
12. *Liu Y., Madawala U.K., Mai R., He Z.* An optimal multivariable control strategy for inductive power transfer systems to improve efficiency // *IEEE Trans. Power Electron.* 2020. Vol. 35, No. 9. P. 8998–9010. DOI: 10.1109/TPEL.2020.2970780. EDN: WMKNPP.
13. *Zhong W., Hui S.Y.R.* Charging time control of wireless power transfer systems without using mutual coupling information and wireless communication system // *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017. Vol. 64, No. 1. P. 228–235. DOI: 10.1109/TIE.2016.2598725.
14. *Rahman M., Shanto S., Sarker N.* A comprehensive review of wireless power transfer methods, applications, and challenges // *Engineering Reports*. 2024. Vol. 6, Issue 10. DOI: 10.1002/eng2.12951. EDN: SIQEBF.
15. *Singh S., Hasarmani T.S., Holmukhe R.M.* Wireless transmission of electrical power overview of recent research & development // *International Journal of Computer and Electrical Engineering*. 2012. Vol. 4, No. 2. P. 207–211. DOI: 10.7763/IJCEE.2012.V4.480.

Статья поступила в редакцию 28.12.2024

Электроника, фотоника, приборостроение и связь

УДК 681.391:543/545

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСРЕДНЕННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ХРОМАТОГРАММЫ ПРИ МНОГОКРАТНОМ ВВОДЕ ПРОБ

*М.Ж. Сайфулин*¹

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

E-mail: sayfulinmarsel@yandex.ru

Аннотация. Показана связь входного и выходного сигналов хроматографа. Отмечена целесообразность повышения отношения сигнал/шум и использования для этого корреляционной обработки данных. Приводится алгоритм вычисления хроматограммы, усредненной по множеству вводов пробы некоторого отдельно взятого образца. Далее этот алгоритм модифицируется на случай вычисления дифференциальной усредненной хроматограммы, когда требуется определить различие компонентного состава двух различных образцов. Для формирования входных сигналов используется псевдослучайная последовательность Лежандра. Алфавит этой последовательности 1 или 0: 1 означает ввод пробы, 0 – отсутствие ввода пробы в данный момент времени. В случае анализа двух образцов входные последовательности, управляющие вводом проб первого и второго образцов, являются дополнительными: если проба первого образца не вводится, то вводится проба второго образца, и наоборот. Алгоритм вычисления усредненной хроматограммы сводится к регрессионному анализу. Вводится информационная матрица плана эксперимента. Точность оценивания характеризуется с помощью ковариационной матрицы оценок. Выбор оптимальной входной последовательности ввода проб осуществляется исходя из условия D-оптимальности (условия максимизации определителя информационной матрицы), что обеспечивает минимум обобщенной дисперсии всех оценок ординат усредненной хроматограммы. Приведены результаты численного имитационного эксперимента, доказывающие эффективность использования корреляционного метода обработки данных для усреднения хроматограмм.

Ключевые слова: корреляционная обработка данных, многократный ввод пробы, отношение сигнал/шум, точность оценивания, дифференциальная хроматограмма.



© Автор(ы), 2024

¹ Марсель Жаудатович Сайфулин, аспирант кафедры информационно-измерительной техники.

Качество оценок параметров хроматографического сигнала, полученных на этапе первичной обработки, и качество результатов всего анализа в целом определяется в первую очередь качеством исходной хроматограммы. Поэтому ее улучшению, повышению отношения сигнал/шум необходимо уделять внимание уже в ходе хроматографического эксперимента. Особенно это важно, когда измерения проводятся на пределе обнаружения хроматографа [1]. Снижение предела обнаружения компонентов позволяет проводить эксперименты с малыми объемами пробы и быстрым их вводом в колонку, что позволяет получать хроматограммы с хорошо разделенными пиками. Это особенно важно при обработке быстро элюируемых компонентов. Однако в результате проведения таких анализов часто получаются хроматограммы низкого качества, т. е. с малым отношением сигнал/шум. Таким образом, важнейшая проблема – повышение качества хроматографических сигналов до проведения их первичной и вторичной обработки [2].

Выходной сигнал хроматографа $s(t)$ как реакция на входное воздействие $x(t)$, имеющее форму узкого импульса, описывается интегралом линейной суперпозиции:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau)x(t-\tau)d\tau. \quad (1)$$

Входное воздействие $x(t)$ представляют дельта-функцией $\delta(t)$, тогда интегральное соотношение (1) примет вид

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau)\delta(t-\tau)d\tau = g(t). \quad (2)$$

Сигнал $s(t)$ называют хроматограммой (совпадает с приборной функцией). В случае анализа многокомпонентных смесей $s(t)$ может быть представлена в виде аддитивной модели совмещенных хроматографических пиков [3]. Длительность хроматограммы определяется временем элюирования последнего компонента смеси T_s , из условия $s(t) = g(t) \cong 0$ при $t \geq T_s$.

Практически выходной сигнал хроматографа $y(t)$ представляет собой аддитивную смесь полезного сигнала $s(t)$, несущего информацию о качественном и количественном составе анализируемых веществ, и флуктуационной помехи (шума) $n(t)$:

$$y(t) = s(t) + n(t). \quad (3)$$

Шум $n(t)$ представляют распределенным по нормальному закону $n(t) \sim N(0, \sigma_n^2)$ с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_n^2 . Нормальный характер распределения шума в хроматографическом сигнале подтверждается измерениями [3].

В хроматографии именно шумом определяется предел обнаружения (детектирования) компонента: высота пика определяемого вещества должна не менее чем вдвое превышать уровень флуктуации шума (нулевого сигнала). По существующим методикам отношение сигнал/шум (s/n) также часто рекомендуют определять как отношение удвоенной высоты пика на хроматограмме к размаху h флуктуации шума [4]. Этот размах можно оценить в единицах СКО σ_n ,

например принять $h = 6\sigma_n$. Таким образом, для понижения предела обнаружения компонентов необходимо повышать отношение сигнал/шум хроматографического сигнала.

На практике эффект повышения отношения сигнал/шум может достигаться предварительным концентрированием компонентов анализируемой пробы. Однако при количественном анализе ко всем методам предварительной обработки пробы и концентрирования следует относиться осторожно и стремиться выполнить анализ без химического и физического изменения состава пробы. Кроме того, отсутствие предварительной обработки пробы облегчает автоматизацию анализа.

Традиционно используемые методы подавления помехи, основанные на цифровой фильтрации хроматографического сигнала, в большинстве случаев изменяют форму сигнала [5]. Например, на хроматограмме после фильтрации шумов может измениться форма пиков, и чем лучше результат фильтрации шумов, тем более существенно изменение формы пика.

Для уменьшения влияния $n(t)$ и повышения отношения сигнал/шум можно использовать усреднение по ансамблю реализаций, когда осуществляется регулярный ввод проб с интервалами между вводами, большими T_s . Каждая реализация отсчитывается от момента ввода очередной пробы. Если таким образом осуществить p вводов пробы, а затем рассчитать усредненную по множеству полученных реализаций хроматограмму, то отношение сигнал/шум будет возрастать пропорционально \sqrt{p} . Однако такой подход к повышению соотношения сигнал/шум требует обеспечения стабильности работы хроматографа в течение длительного времени и приводит к увеличению общего времени проведения эксперимента $T_{\text{экс}} = pT_s$. Если, например, T_s составляет 30 минут, то это может привести к неприемлемо большим значениям $T_{\text{экс}}$.

В этой связи перспективным методом получения усредненных на некотором множестве вводов проб хроматограмм, позволяющим увеличить отношение сигнал/шум при приемлемом суммарном времени проведения эксперимента $T_{\text{экс}}$, является корреляционная обработка данных [6, 7].

Анализ известных результатов в области корреляционной обработки хроматографических сигналов позволил выделить комплекс нерешенных проблем, связанных с созданием эффективных и точных алгоритмов вычислений, позволяющих определять несмещенные оценки усредненной хроматограммы.

Необходимо отметить, что практически во всех работах в качестве входной последовательности используются M -последовательности. Эта разновидность псевдослучайных последовательностей часто применяется в задачах идентификации объектов управления, а алгоритм их получения прост в реализации. Однако использование M -последовательностей сужает возможность корреляционной обработки, поскольку период этой последовательности изменяется большими скачками, что является нежелательным при корреляционной обработке хроматографических сигналов.

Таким образом, важным представляется выбор входных последовательностей, позволяющих упростить вычислительные алгоритмы при сохранении высокой точности результатов, без дополнительных систематических погрешностей. В данной работе в качестве входной последовательности используется псевдослучайная последовательность Лежандра.

В соответствии с этим разработан алгоритм получения оценок усредненного хроматографического сигнала, учитывающий вид входной последовательности, конечность как длины последовательности, так и времени усреднения. Далее этот алгоритм модифицирован для вычисления усредненной дифференциальной хроматограммы, когда интересуют различие компонентного состава двух образцов (например, исследуемого и эталонного).

Определение усредненной хроматограммы при многократном вводе проб одного образца. При этом на вход хроматографа подается последовательность проб $x(t)$. Обработка связана с вычислением оценок автокорреляционной функции $R_{xx}(\tau)$ входного сигнала и взаимно-корреляционной функции $R_{xy}(\tau)$ входного $x(t)$ и выходного $y(t)$ сигналов.

Пусть $g(t)$ – искомая хроматограмма, $g(t) = 0$, при $t < 0$ и $t \geq T_s$, где T_s – время элюирования хроматограммы. Представим функции $g(t)$, $y(t)$, $x(t)$ в виде последовательности дискретных отсчетов: g_j , $j = 0, 1, 2, \dots, m$; y_j , $j = 0, 1, 2, \dots, k \geq m$; x_l , $l = -m, -(m-1), \dots, 0, 1, 2, \dots, k$; $m = \frac{T_s}{\Delta}$, $k = \frac{T}{\Delta}$, Δ – интервал дискретизации по времени. Здесь T – время, соответствующее последнему вводу пробы. Таким образом, в дискретном виде отсчеты входного воздействия могут действовать от $-m$ до k .

В дискретной форме для динамической системы справедливо соотношение [8]

$$\hat{R}_{xy}(j) = \sum_{l=0}^m g_l \hat{R}_{xx}(j-l), \quad j = 0, 1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

где $\hat{R}_{xy}(j) = \frac{1}{k+1} \sum_{l=0}^k y_l x_{l-j}$; $\hat{R}_{xx}(j) = \frac{1}{k+1} \sum_{l=0}^k y_l x_{l-j}$.

После введения матричных обозначений

$$G = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ \dots \\ g_m \end{bmatrix}; \quad Y = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \dots \\ y_k \end{bmatrix}; \quad X = \begin{bmatrix} x_0 & x_{-1} & x_{-2} & \dots & x_{-m} \\ x_1 & x_0 & x_{-1} & \dots & x_{-m(-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_k & x_{k-1} & x_{k-2} & \dots & x_{-(m-k)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

соотношение (4) можно представить в виде

$$X^T Y = (X^T X) G, \quad (6)$$

где T – знак транспонирования матрицы.

Обозначим вектор оценок приборной функции (усредненную хроматограмму) через \hat{G} , тогда из (6)

$$\hat{G} = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (7)$$

Алгоритм вычисления усредненной хроматограммы эквивалентен методу наименьших квадратов, и все результаты регрессионного анализа могут быть использованы при корреляционной обработке хроматографических данных [9–11]. При этом матрицу $C = X^T X$ будем рассматривать как информационную матрицу плана эксперимента [12].

Точность оценивания ординат \hat{G} описывается ковариационной матрицей оценок $\text{cov}(\hat{G})$. При равенстве дисперсий всех отсчетов выходного сигнала и их некоррелированности ковариационная матрица $\text{cov}(\hat{G})$ равна

$$\text{cov}(\hat{G}) = \sigma_n^2 C^{-1}, \quad (8)$$

где C^{-1} – матрица, обратная информационной матрице $C = X^T X$; σ_n^2 – дисперсия помехи.

Тогда дисперсии $\sigma_{\hat{g}_j}^2$ оценок \hat{g}_j , $j = 0, 1, 2, \dots, m$ вектора \hat{G} и коэффициенты корреляции r_{jg} между оценками \hat{g}_j и \hat{g}_g будут определяться соотношениями:

$$\sigma_{\hat{g}_j}^2 = \sigma_n^2 c_{jj}^{-1}; \quad (9)$$

$$r_{jg} = \frac{c_{jg}^{-1}}{\sqrt{c_{jj}^{-1} c_{gg}^{-1}}}, \quad (10)$$

где c_{jj}^{-1} , c_{jg}^{-1} , c_{gg}^{-1} – элементы матрицы C^{-1} .

Дисперсии оценок значений усредненной хроматограммы $\sigma_{\hat{g}_j}^2$, $j = 0, 1, 2, \dots, m$ зависят не только от дисперсии помехи σ_n^2 , но и от вида выбранных последовательностей вводов проб (регулярная, псевдослучайная), их длительностей, размещения во времени и т. д.

Хроматография связана с активным экспериментом, поэтому может быть поставлена задача планирования эксперимента как задача выбора входной последовательности, обеспечивающей наибольшую точность оценивания всей совокупности ординат \hat{g}_j , $j = 0, 1, 2, \dots, m$. В качестве показателя, интегрально характеризующего точность оценивания этой совокупности, можно выбрать определитель ковариационной матрицы $\det \text{cov}(\hat{G})$. Тогда выбор оптимальной входной последовательности может быть осуществлен исходя из условия минимизации определителя $\det \text{cov}(\hat{G})$ (критерий D -оптимальности) или, что то же самое, из условия максимизации определителя $\det C$. В статистическом смысле D -оптимальность обеспечивает минимум обобщенной дисперсии всех оценок \hat{g}_j , $j = 0, 1, 2, \dots, m$ [13].

Входные последовательности ввода проб. Генерирование последовательности Лежандра. Если в некоторый момент l дискретного времени осуществляется ввод пробы, то соответствующее значение x_l принимается равным единице ($x_l = 1$); если нет, то $x_l = 0$. Таким образом, входной сигнал представляет собой последовательность единиц и нулей, соответствующих вводу или отсутствию ввода пробы в данный момент времени. При этом длина последовательности L – это общее количество элементов (нулевых и единичных). Она должна быть равна или незначительно превышать длительность хроматограммы от однократного ввода пробы [7].

Входные последовательности должны позволять гибко изменять их длину, этому требованию удовлетворяют последовательности с одноуровневой корре-

ляционной функцией [14], в частности последовательности Лежандра. Период последовательности Лежандра определяется соотношением $L = 4t + 3$, где L – простое число, t – положительное целое число. Допустимые значения длин L последовательности Лежандра для $L < 200$: 11, 19, 23, 31, 43, 47, 55, 67, 71, 79, 83, 103, 107, 127, 131, 139, 151, 163, 167, 179, 191, 199.

В отличие от M -последовательностей для последовательности Лежандра не существует генератора, легко реализуемого на сдвиговых регистрах и логических элементах, и она требует более специфических вычислений [15].

Пусть задана длина последовательности L . Обозначим через $\{a_l\} = a_0, a_1, a_2, \dots, a_{L-1}$ искомую последовательность Лежандра. Символ $a_l = 1$, если для соответствующего $l = 1, 2, \dots, L-1$ выполняется тождество

$$z^2 = l_z \pmod{L}, \quad (11)$$

где z принимает все возможные значения от 1 до $L-1$; все остальные символы $a_l = 0$, $a_0 = 1$.

Таким образом, синтез последовательности сводится к тому, что, постепенно увеличивая значения z от 1 до $L-1$, находят номера l , удовлетворяющие соотношению (11) (повтор номера не учитывается). Общее количество найденных единичных символов будет равно $p = \frac{L+1}{2}$. Оно определяет общее число вводов

пробы. Конкретные примеры последовательностей Лежандра разной длины приведены в таблице.

В общем случае произвольная входная последовательность может быть задана на интервале $(-m, k)$, причем $k > 0$, $k \geq m$. В зависимости от конкретных значений параметров k , m матрица X будет иметь различный вид.

Анализ входной последовательности относительно интервала усреднения $(0 \div k)$ позволяет выделить вариант, когда входная последовательность $\{x\}$ содержит две части: основную – длительностью L , начинающуюся в момент времени $l=0$ и заканчивающуюся в момент времени $k=L-1$, и предысторию, представляющую собой фрагмент основной части, имеющей длину m , значения которой удовлетворяют условию: $x_{-l} = x_{k-l+1}$; $l=1, 2, \dots, m$. Это позволяет сформировать симметричную теплицевую матрицу $C = X^T X$, что упрощает анализ информационной матрицы и алгоритм вычисления усредненного сигнала.

Результаты анализа псевдослучайных входных воздействий

Входная последовательность*	p	L	$m+1$	c_{jj}^{-1}	$\det C$
$1^5 0101^2 0^2 1^2 0^2 1010^4$	12	23	23	0,1597	$1,8954 \cdot 10^{19}$
$1^3 01^2 0^2 1^4 010^2 101^6 01^2 0^4 1^2 0^3 10101010$ $1^3 0^2 1^4 0^2 10^6 101^2 010^4 1^2 0^2 10^2$	40	79	79	0,0494	$4,8357 \cdot 10^{104}$
$1^2 01^3 0^3 10^2 1^6 01^2 010^2 10101010^4 10^2 10^2$ $1^2 01^5 01^2 0^3 1^3 0^2 1^5 010^3 1^4 0^2 1^4 0101^3 0^3 10$ $10^4 1^2 0^4 1^3 010^5 1^2 0^3 10^2 1^3 0^2 10^5 10^2 101^2$ $01^4 01010101^2 010^2 10^6 1^2 01^3 0^3 10$	90	179	179	0,0221	$1,5157 \cdot 10^{298}$

*Краткая запись последовательности со степенями, показывающими количество следующих подряд единичных или нулевых значений.

Как следует из соотношения (9), дисперсия $\sigma_{\hat{g}_j}^2$ оценки любой ординаты \hat{g}_j , $j = 0, 1, \dots, m$ одна и та же и равна

$$\sigma_{\hat{g}_j}^2 = c_{jj}^{-1} \sigma_n^2.$$

Значения коэффициентов c_{jj}^{-1} зависят от длины последовательности L и длительности хроматограммы $(m+1)$. Для конкретных псевдослучайных последовательностей ввода проб значения коэффициентов c_{jj}^{-1} представлены в таблице. При сравнении СКО оценок $\sigma_{\hat{g}_j}$ и помехи σ_n коэффициент $\sqrt{c_{jj}^{-1}}$ можно рассматривать как коэффициент подавления помехи. Например, при $L = (m+1) = 23, 79, 179$ значения этого коэффициента равны соответственно $\sim 0,4$; $\sim 0,22$; $\sim 0,15$.

Вычисление усредненной дифференциальной хроматограммы. Пусть имеются два образца А и В, каждый из которых является смесью некоторых компонентов. Интересует различие компонентного состава этих образцов между собой. Такая задача возникает, например, при необходимости выявления маркерных соединений для идентификации лекарственного сырья.

При получении лекарственного сырья предпочтение отдают определенным сортам. Изучение компонентного состава эфирного масла растений методом газовой хроматографии может подтвердить или опровергнуть принадлежность образца к искомому виду и, соответственно, определить возможность его использования в качестве источника для получения лекарственного растительного сырья [16].

Представим приборные функции (хроматограммы от однократного ввода проб) первого и второго образцов соответственно как векторы отсчетов G_1 и G_2 .

Для дифференциальной хроматограммы входные последовательности, управляющие вводом проб соответственно первого и второго образцов, являются дополнительными: если проба первого образца в данный момент времени не вводится, то вводится проба второго образца, и наоборот.

Рассмотрим алгоритм вычисления усредненной дифференциальной хроматограммы. В качестве входной последовательности используется псевдослучайная последовательность Лежандра с периодом L , выбираемым из условия

$$L \geq \max \{ (m_1 + 1), (m_2 + 1) \},$$

где $(m_1 + 1)$, $(m_2 + 1)$ – длительности хроматограмм первого и второго образцов при их однократном вводе.

Для формирования последовательности вводов проб первого образца используется последовательность $\{x\}$, содержащая основную часть x_l , $l = 0, 1, \dots, k$ длительностью L и предысторию $x_{-l} = x_{k-l+1}$, $l = 1, 2, \dots, m$. На основе последовательности $\{x\}$ формируется дополнительная последовательность $\{1 - x_l\}$, которая служит для управления вводом второй пробы.

С учетом всех введенных проб первого и второго образцов можно записать матричное уравнение

$$Y = XG_1 + (T - X)G_2. \quad (12)$$

Здесь G_1 и G_2 – отсчеты хроматограмм соответственно первого и второго образцов; X – матрица, сформированная из входной последовательности $\{x\}$; T – матрица соответствующей размерности, все элементы которой равны 1.

Из соотношения (12)

$$Y = \bar{X}(G_1 - G_2) + TG_2,$$

где матрица \bar{X} соответствует матрице X , в которой единичные элементы сохраняются, а нулевые элементы заменяются на (-1) . Следовательно,

$$(G_1 - G_2) = (\bar{X}^T \bar{X})^{-1} \bar{X}^T [Y - TG_2] \text{ или } (G_1 - G_2) + B = (\bar{X}^T \bar{X})^{-1} \bar{X}^T Y,$$

где B – это вектор-столбец, все значения которого одинаковы и равны $\sum_{j=0}^k g_j$.

Таким образом, получаем оценку разностной хроматограммы $(G_1 - G_2)$, которая будет приподнята или опущена на некоторый постоянный уровень B . Этот уровень возникает за счет того, что число введенных проб одного из образцов при использовании многократного ввода проб на единицу больше числа вводов другого образца. Он определяется на этапе настройки алгоритма вычислений для конкретного эксперимента.

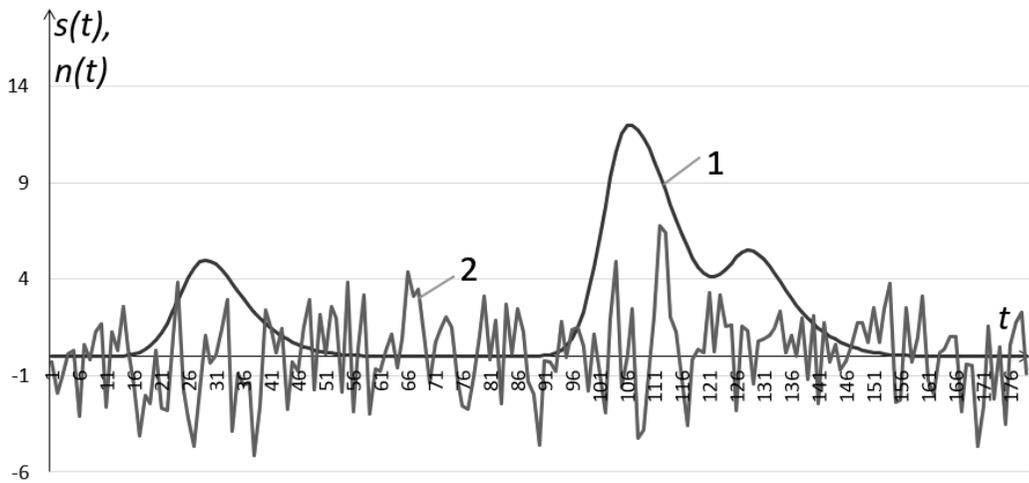
Моделирование. Для проверки работы алгоритма корреляционной обработки хроматографического сигнала, полученного при многократном вводе проб одного образца и двух образцов при сравнении их компонентного состава, проведены численные имитационные эксперименты. Методика проведения эксперимента заключается в моделировании заданных приборных функций хроматографического сигнала при многократном вводе проб одного или двух образцов с наложенной помехой, генерировании соответствующих входных последовательностей, корреляционной обработке данных и сопоставлении результатов обработки с заданной приборной функцией.

Для реализации методики разработан комплекс программ компьютерного моделирования в среде MATLAB. Имитационное моделирование проводилось для разных входных последовательностей $\{x\}$, видов приборной функции $g(t)$ и уровня помехи $n(t)$. Некоторые из результатов моделирования приведены ниже.

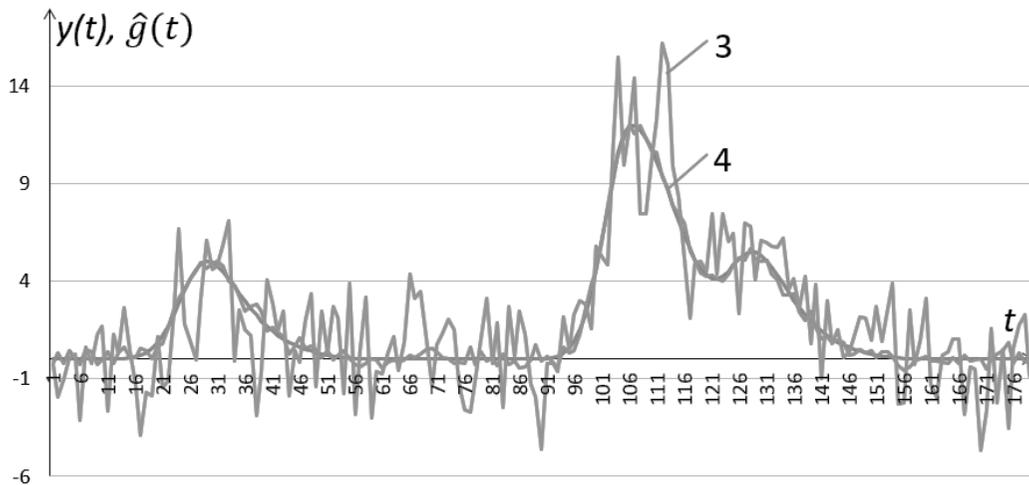
На рис. 1 кривая 4 представляет результат оценки усредненного сигнала на множестве вводов проб. Ввод проб производился с использованием псевдослучайной последовательности Лежандра длительностью 179 отсчетов. Число вводов проб – 90.

Зашумленный сигнал от однократного ввода пробы представлен кривой 3. Кривая 1 соответствует полезной составляющей сигнала с пиками несимметричной формы. В качестве математической модели несимметричных пиков использована комбинированная функция, предложенная в работе [17]. Кривая 2 соответствует высокочастотной помехе, для генерирования которой использовалась стандартная программа MATLAB: $n(t) \sim N(0, \sigma_n^2)$, СКО помехи $\sigma_n = 2$.

Сопоставление сигнала 3 с результатом корреляционной обработки (кривая 4) показывает существенное уменьшение помехи (коэффициент подавления помехи $\sim 0,15$).

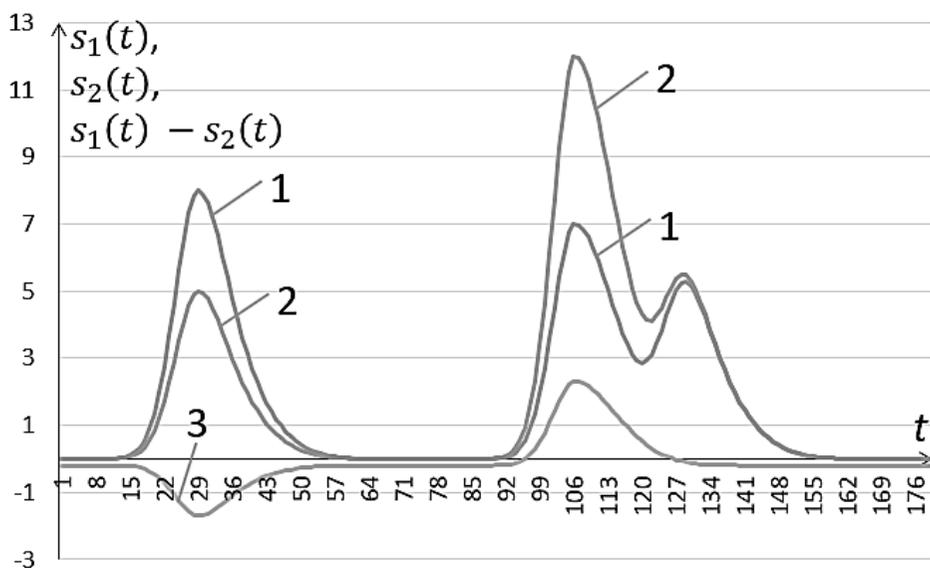


a

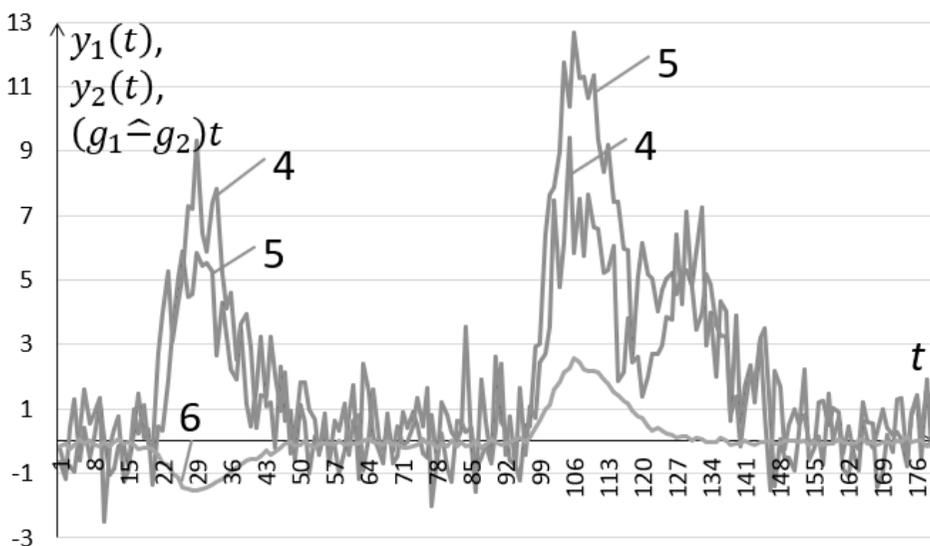


б

Рис. 1. Корреляционная обработка хроматограмм: *a* – сигнал от однократного ввода пробы: 1 – $s(t)$ без наложенной помехи; 2 – высокочастотная помеха $n(t)$ ($\sigma_n = 2$); *б* – 3 – сигнал $y(t)$ с наложенной помехой при однократном вводе пробы; 4 – усредненный хроматографический сигнал $\hat{g}(t)$ на множестве вводов проб: $p = 90$



a



б

Рис. 2. Дифференциальная хроматограмма: а – 1 – сигнал без помехи $s_1(t)$ от однократного ввода пробы первого образца; 2 – сигнал без помехи $s_2(t)$ от однократного ввода пробы второго образца; 3 – разностный сигнал $s_1(t) - s_2(t)$; б – 4 – сигнал $y_1(t)$ с наложенной помехой ($\sigma_n = 2$) от однократного ввода пробы первого образца; 5 – сигнал $y_2(t)$ с наложенной помехой ($\sigma_n = 2$) от однократного ввода пробы второго образца; 6 – усредненный разностный сигнал $(\hat{g}_1 - \hat{g}_2)t$: $p = 90$ для первого образца, $p = 89$ для второго образца

На рис. 2 представлена дифференциальная хроматограмма (кривая б). Кривые 1, 2 – хроматограммы без помехи от однократного ввода проб первого и вто-

рого образцов. Кривые 4, 5 – сигналы с наложенной помехой первого и второго образцов при их однократном вводе. Кривая 6 соответствует усредненному разностному сигналу, когда производится 90-кратный ввод проб первого образца и 89-кратный ввод проб второго образца.

Простое сравнение зашумленных хроматограмм первого и второго образцов (кривые 4 и 5 на рис. 2) не позволяет оценить различие компонентного состава этих образцов, однако это можно сделать по усредненному разностному сигналу (кривая 6 на рис. 2).

В целом результаты моделирования подтвердили эффективность использования корреляционной обработки данных для вычисления дифференциальной хроматограммы и правильность предложенных алгоритмов оценок усредненного хроматографического сигнала. Корреляционная обработка позволяет значительно уменьшить помеху, тем самым понизить предел обнаружения компонентов анализируемой пробы и расширить диапазон измеряемых концентраций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Платонов И.А., Новикова Е.А., Платонов В.И.* Хроматографические методы анализа: учебное пособие. Самара: Самарский университет, 2021. 96 с. EDN: JXKOWU.
2. *Гуревич А.Л., Русинов Л.А., Сягаев Н.А.* Автоматический хроматографический анализ. Л.: Химия, 1980. 192 с.
3. *Русинов Л.А.* Автоматизация аналитических систем определения состава и качества веществ. Л.: Химия, 1984. 160 с.
4. *Эшштейн Н.А.* О допустимых значениях порога игнорирования примесей и отношение сигнал/шум при проверке чувствительности хроматографической системы // *Ведомости НЦЭСМП.* 2014. Т. 7, № 2. С. 85–90.
5. *Каламбет Ю., Мальцев С., Козьмин Ю.* Фильтрация шумов: окончательное решение проблемы // *Аналитика.* 2011. № 1. С. 50–55. EDN: PIEIFT.
6. *Кальюранд М.* Анализ нестационарных потоков вещества: возможности компьютерной хроматографии // *Химия.* 1989. № 28. С. 25–33. DOI: 10.3176/chem.1989.1.06.
7. *Филаретов Г.Ф., Сайфуллин Ж.Т.* Корреляционный метод измерений в системах автоматизации хроматографического эксперимента // *Заводская лаборатория.* 1991. № 10. С. 59–63.
8. *Сайфуллин Р.Т.* Использование корреляционного метода для усреднения хроматограмм // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки.* 2009. Вып. № 3 (25). С. 109–116. EDN: LALEMB.
9. *Вуколов Э.А.* Регрессионный анализ. М.: МИЭТ, 2000. 52 с.
10. *Гроп Д.* Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979. 302 с.
11. *Эйххофф П., Ванечек А., Савараги Е. и др.* Современные методы идентификации систем. М.: Мир, 1983. 400 с.
12. *Мелас В.Б., Шпилев П.В.* Планирование и анализ регрессионных моделей. СПб: СПбГУ, 2014. 94 с.
13. *Маслов Г.Г., Трубилин Е.И., Цибульский В.В.* Моделирование в агроинженерии. Краснодар: КубГАУ, 2019. 304 с.
14. *Дейч А.М.* Методы идентификации динамических систем. М.: Энергия, 1979. 240 с.
15. *Сайфуллин Р.Т.* Ввод пробы по случайному закону в корреляционной хроматографии // *Информационно-измерительные и управляющие системы: сб. науч. ст.* Самара: СамГТУ, 2009. С. 80–84.
16. *Маланкина Е.Л., Козловская Л.Н., Кузьменко А.Н., Евграфов А.А.* Определение компонентного состава эфирного масла видов тимьяна методом газовой хроматографии // *Вестник Моск. ун-та. Серия 2: Химия.* 2019. Т. 60, № 6. С. 411–415. EDN: OXNJTQ.
17. *Бочкарев А.В.* Повышение точности количественного хроматографического анализа с помощью новой модели пика // *Автоматизация в промышленности.* 2022. № 7. С. 36–41. DOI: 10.25728/avtprom.2022.07.11. EDN: EPPYCW.

CORRELATION DATA PROCESSING FOR DETERMINING THE AVERAGED DIFFERENTIAL CHROMATOGRAM IN THE CASE OF MULTIPLE SAMPLE INJECTIONS

*M.Zh. Sayfulin*¹

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

E-mail: sayfulinmarsel@yandex.ru

Abstract. *The relationship between the input and output signals of a chromatograph is demonstrated. The expediency of improving the signal-to-noise ratio and using correlation data processing for this purpose is noted. An algorithm for calculating a chromatogram averaged over multiple injections of a sample from a specific individual specimen is presented. This algorithm is then modified for the case of calculating a differential averaged chromatogram, which is required to determine the difference in the component composition of two different specimens. A Legendre pseudorandom sequence is used to generate the input signals. The alphabet of this sequence is 1 or 0: 1 indicates a sample injection, and 0 indicates the absence of a sample injection at a given time. In the case of analyzing two specimens, the input sequences controlling the injection of the first and second specimens are complementary: if the sample of the first specimen is not injected, the sample of the second specimen is injected, and vice versa. The algorithm for calculating the averaged chromatogram is reduced to regression analysis. An information matrix of the experimental design is introduced. The accuracy of estimation is characterized using the covariance matrix of estimates. The choice of the optimal input sequence for sample injection is based on the D-optimality condition (the condition for maximizing the determinant of the information matrix), which ensures the minimum generalized variance of all estimates of the ordinates of the averaged chromatogram. The results of a numerical simulation experiment are presented, proving the effectiveness of using the correlation data processing method for averaging chromatograms.*

Keywords: *correlation data processing, multiple sample injection, signal-to-noise ratio, estimation accuracy, differential chromatogram.*

REFERENCES

1. *Platonov I.A., Novikova E.A., Platonov V.I.* Hromatograficheskie metody analiza [Chromatographic Methods of Analysis]: uchebnoe posobie. Samara: Samarskij universitet, 2021. 96 p. (In Russian)
2. *Gurevich A.L., Rusinov L.A., Syagaev N.A.* Avtomaticheskij hromatograficheskij analiz [Automatic Chromatographic Analysis]. L.: Himiya, 1980. 192 p. (In Russian)
3. *Rusinov L.A.* Avtomatizaciya analiticheskikh sistem opredeleniya sostava i kachestva veshestv [Automation of Analytical Systems for Determining the Composition and Quality of Substances]. L.: Himiya, 1984. 160 p. (In Russian)
4. *Epshtejn N.A.* O dopustimyh znacheniyah poroga ignorirovaniya primesej i otnoshenie signal/shum pri proverke chuvstvitelnosti hromatograficheskoy sistemy [On the Permissible Values of the Impurity Ignoring Threshold and the Signal-to-Noise Ratio in Testing the Sensitivity of a Chromatographic System] // Vedomosti NCSMP. 2014. Vol. 7, № 2. P. 85–90. (In Russian)
5. *Kalambet Yu., Malcev S., Kozmin Yu.* Filtraciya шумов: okonchatelnoe reshenie problemy [Noise Filtering: The Ultimate Solution to the Problem] // Analitika. 2011. № 1. P. 50–55. (In Russian)



© The Author(s), 2024

¹ *Marsel Zh. Sayfulin, Postgraduate Student.*

6. *Kalyurand M.* Analiz nestacionarnykh potokov veshchestva: vozmozhnosti kompyuternoj hromatografii [Analysis of Non-Stationary Substance Flows: Capabilities of Computer Chromatography] // *Himiya*. 1989. № 28. P. 25–33. DOI: 10.3176/chem.1989.1.06. (In Russian)
7. *Filaretov G.F., Sajfullin Zh.T.* Korrelyacionnyj metod izmerenij v sistemah avto-matizacii hromatograficheskogo eksperimenta [Correlation Method of Measurements in Systems for Automating Chromatographic Experiments] // *Zavodskaya laboratoriya*. 1991. № 10. P. 59–63. (In Russian)
8. *Sajfullin R.T.* Ispolzovanie korrelyacionnogo metoda dlya usredneniya hromatogramm [Application of the Correlation Method for Averaging Chromatograms] // *Vestnik Samarskogo gos. tehn. un-ta. Seriya: Tehnicheskie nauki*. 2009. Vyp. № 3 (25). P. 109–116. (In Russian)
9. *Vukolov E.A.* Regressionnyj analiz [Regression Analysis]. M.: MIET, 2000. 52 p. (In Russian)
10. *Grop D.* Methods of System Identification. M.: Mir, 1979. 302 p.
11. *Ejkhoff P., Vanechek A., Savaragi E. i dr.* Sovremennye metody identifikacii system [Modern Methods of System Identification]. M.: Mir, 1983. 400 p. (In Russian)
12. *Melas V.B., Shpilev P.V.* Planirovanie i analiz regressionnykh modelej [Planning and analysis of regression models]. SPb: SPbGU, 2014. 94 p. (In Russian)
13. *Maslov G.G., Trubilin E.I., Cibulskij V.V.* Modelirovanie v agroinzhenerii [Modeling in Agricultural Engineering]. Krasnodar: KubGAU, 2019. 304 p. (In Russian)
14. *Deutsch A.M.* Methods of Dynamic Systems Identification. M.: Energiya, 1979. 240 p.
15. *Sajfullin R.T.* Vvod probe po sluchajnomu zakonu v korrelyacionnoj hromatografii [Introduction of a sample according to a random law in correlation chromatography] // *Informacionno-izmeritelnye i upravlyayushie sistemy: sb. nauch. st.* Samara: SamGTU, 2009. P. 80–84. (In Russian)
16. *Malankina E.L., Kozlovskaya L.N., Kuzmenko A.N., Evgrafov A.A.* Opredelenie komponentnogo sostava efirnogo masla vidov timyana metodom gazovoj hromatografii [Determination of the component composition of essential oils from thyme species using gas chromatography] // *Vestnik Mosk. un-ta. Seriya 2: Himiya*. 2019. Vol. 60, № 6. P. 411–415. (In Russian)
17. *Bochkarev A.V.* Povyshenie tochnosti kolichestvennogo hromatograficheskogo analiza s pomoshyu novoj modeli pika [Improving the accuracy of quantitative chromatographic analysis using a new peak model] // *Avtomatizaciya v promyshlennosti*. 2022. № 7. P. 36–41. (In Russian)

Original article submitted 03.06.2024

УДК.621.389

СОЗДАНИЕ И ОТРАБОТКА ГИБКОЙ СИСТЕМЫ ЗАХВАТА ИЗОБРАЖЕНИЯ НА БАЗЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ РАДИАЦИОННО СТОЙКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

*К.И. Сухачёв, Д.П. Григорьев, А.С. Дорофеев, А.А. Артюшин,
А.С. Кирюшкина¹*

Самарский университет
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

E-mail: sukhachev.ki@ssau.ru, grigorev.dp@ssau.ru, dorofeev.as@ssau.ru, artyushin.aa@ssau.ru

Аннотация. Цель работы состоит в создании универсальной гибкой системы захвата изображения, необходимой для регистрации изображений различных диапазонов длин волн в космической научной аппаратуре. Главная проблема реализации такой системы заключается в ограниченной пропускной способности канала для формирования полного кадра изображения. Для решения проблемы ограниченной пропускной способности канала авторами был разработан алгоритм, основой которого является процесс записи кадра с накоплением, что позволяет сформировать полный кадр изображения с использованием нескольких реальных кадров с прореживанием пикселей, полученных с матричного фотоприемника.

Результатом проделанной работы является система, построенная по принципу этажной конструкции, имеющая малые габариты, высокую помехоустойчивость, повышенную надежность и стойкость к внешним воздействующим факторам, а также полную поддержку FMU (Flexible Microcontroller Unit) ядра. В качестве материалов применялись радиационно стойкие электронные компоненты отечественного производства. Основные модули HDL (Hardware Description Language) были оптимизированы по минимальному количеству используемых вентилях, а также адаптированы для использования в ПЛИС бытового назначения. Сравнение параметров реализации модуля захвата изображения на различных ПЛИС приведено в материалах статьи. Данная система может быть использована в космической аппаратуре (при использовании радиационно стойких электронных компонентов), а также найти бытовое или образовательное применение (при реализации системы на компонентах бытового назначения). Также система имеет ряд программно регулируемых параметров, позволяющих настроить системные регистры матрицы. Для разработанной системы создано программное обеспечение на персональном компьютере для захва-



© Автор(ы), 2024

¹ *Кирилл Игоревич Сухачев, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник института космического приборостроения.*

Данил Павлович Григорьев, младший научный сотрудник института космического приборостроения, аспирант.

Александр Сергеевич Дорофеев, младший научный сотрудник института космического приборостроения.

Андрей Алексеевич Артюшин, инженер-конструктор института космического приборостроения, аспирант.

та и обработки изображений. Приведены результаты отладки системы и примеры тестовых снимков.

Ключевые слова: ПЗС-матрица, КМОП-матрица, SPAD-матрица, ПЛИС, микроконтроллер, FMU, IP-ядро.

Введение

Для получения снимка окружающего нас пространства фотоприбору необходимы две вещи – оптическая система и светочувствительный элемент. Первым предметом может выступать любая линза или отверстие в пластине (камера обскура). Вторым предметом является любой полупроводник, так как он реагирует на свет и с помощью внутреннего фотоэффекта начинает испускать электроны (впоследствии – ток, сила которого зависит от яркости света). Самый простой фотоэлемент – фотодиод. Если сложить фотодиоды в виде матрицы с 512 строками и 512 столбцами, то получим простейшую матрицу с разрешением 512×512 пикселей. Однако она будет выдавать черно-белое изображение. Для цветного изображения необходимо наложить цветные фильтры на три фотодиода в каждом пикселе – красный, синий и зеленый. Так выглядит простейшая модель любой светочувствительной цветной матрицы. Для технологического процесса все не так просто, и существует целый ряд технологий, по которым на сегодняшний момент изготавливаются матрицы для захвата изображений. Рассмотрим кратко некоторые технологии работы матриц.

Виды матриц и способы кодирования свет – сигнал

ПЗС – приборы с зарядовой связью [1] (англ. **CCD** – Charge Coupled Device). Эта технология включает в себя матрицу из фотодиодов, на которых при попадании света выделяется некоторый заряд Q . Этот заряд с каждого пикселя поступает через вертикальную и горизонтальную шины переноса зарядов в усилители, в которых заряды усиливаются и преобразуются в электрические сигналы. Затем сигналы попадают в тракт обработки на базе АЦП и микроконтроллера. Каналы переноса зарядов представляют собой большие проводящие шины, количество которых напрямую зависит от числа фотодиодов. Чтобы заряд с каждого пикселя прошел на магистральную шину, необходимо подать на затвор каждого фотодиода отпирающее напряжение. Структура одного ПЗС пикселя показана на рис. 1.

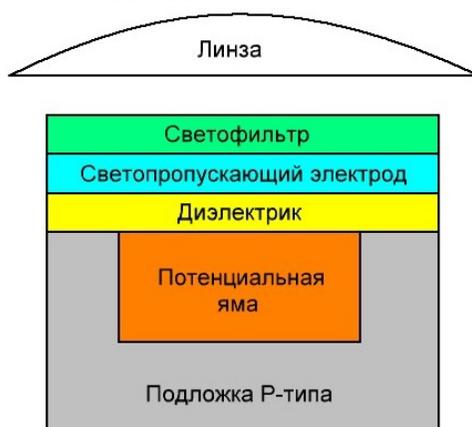


Рис. 1. Структура ПЗС пикселя

Принцип работы ПЗС пикселя заключается в следующем. Свет через линзу собирается в равномерный пучок и проходит через светофильтр (красный / си-

ний / зеленый). После светофильтра отфильтрованный свет проходит на светопропускающий электрод. Диэлектрик имеет прозрачную структуру, которая пропускает свет на кристалл. На верхней части кристалла подается положительный потенциал. Падающий свет проникает внутрь полупроводниковой структуры, и образуется электрон-дырочная пара. Электрическое поле разделяет появившуюся пару, электрон попадает в зону хранения (потенциальную яму), а дырка – в подложку. В итоге заряд перемещается по каналам вертикального и горизонтального переноса зарядов.

ПЗС-пиксели обладают следующими параметрами:

1) емкость потенциальной ямы (зоны хранения) – максимальное количество электронов, помещающихся в зону хранения;

2) спектральная чувствительность – зависимость отношения величины фотопотока к величине светового потока от длины волны излучения;

3) квантовая эффективность – физическая величина, равная отношению количества поглощенных фотонов, которые вызвали образование квазичастиц, к общему числу фотонов;

4) динамический диапазон – отношение напряжения или тока насыщения к среднему квадратичному напряжению.

Три вида способов чтения пикселей ПЗС-матрицы [3]: межстрочные; кадровые; полнокадровые.

Достоинствами этой структуры являются: простота в изготовлении матрицы; лучший коэффициент заполнения по сравнению с КМОП, что увеличивает квантовую эффективность и уменьшает уровень шумов.

Из недостатков стоит отметить коллизии, возникающие в момент освещения матрицы ярким светом. При таком облучении на изображении возникают характерные светлые полосы. Такие полосы вызваны тем, что электрический заряд большой величины наводится на остальные линии вертикальной шины переноса зарядов. Помимо этого ПЗС-пиксели считываются последовательно, без произвольного доступа к пикселям, что влияет на оптимизацию программного обеспечения. Также стоит отметить большие энергетические затраты на открывание затворов для каждого пикселя.

Разновидностью CCD является **EMCCD** (Electron Multiplying CCD), где ключевую роль играет дополнительное внедрение регистров умножения между ПЗС-ячейкой и потенциалом +50 В [4]. Ввиду этого умножения под действием ионизационного эффекта возникает дополнительная случайная электронно-дырочная пара, что приводит к увеличению общего числа электронов (в рамках каждого пикселя). Такой способ понижает внутренние шумы и увеличивает квантовую эффективность, что делает чувствительность сенсора более высокой. Из недостатков отмечают повышение цены сенсора и малая износоустойчивость, поскольку на регистры умножения постоянно подается высокое напряжение.

КМОП – комплементарный металл-окисел-полупроводник (англ. **CMOS** – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). Такая технология имеет усилитель на каждом пикселе, который преобразует заряд в электрический сигнал заданного номинала. Эти сигналы формируются в столбцы на вертикальной шине, доступ к которой осуществляется в момент коммутации переключателя выбора пикселей. Вертикальная шина коммутируется к горизонтальной шине путем переключателей выбора столбца; таким образом, имеется возможность аппаратным методом выбирать требуемый пиксель для захвата изображения как по строкам,

так и по столбцам (оконное считывание). Структура одного КМОП пикселя показана на рис. 2 [2].

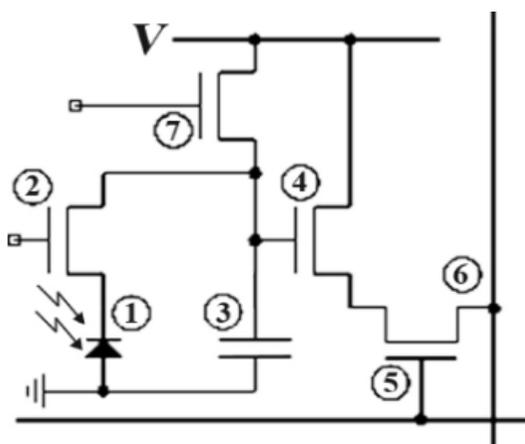


Рис. 2. Структура КМОП пикселя: 1 – фотодиод; 2 – электронный затвор; 3 – конденсатор, накапливающий заряд с фотодиода; 4 – усилитель; 5 – шина выбора строки; 6 – вертикальная шина вывода информации; 7 – управляющий вывод сигнала сброса

Принцип работы пикселя состоит в следующем. При необходимости захвата изображения открывается транзистор 2, что позволяет ввести фотодиод в рабочий режим. В зависимости от яркости света ток фотодиода 1 (и, как следствие, заряд) будет изменяться. Заряд с фотодиода 1 через затворный транзистор 2 подается на конденсатор 3, который накапливает заряд и переводит его в напряжение. Чем ярче картинка – тем больше заряд и, как следствие, выше напряжение. В противном случае прибегают к усилителям, если изображение снято при малом освещении, но тут стоит помнить об усилении шумов. Далее с конденсатора 3 по окончании зарядки напряжение поступает на усилительный транзистор 4, который усиливает напряжение конденсатора и подает его на ключ 5 вертикальной шины 6. Ключ 5 открывается только при подаче соответствующего опорного напряжения на шине выбора строки. В этот момент все пиксели одной строки начинают подавать заряды на отдельные столбцы. Все элементы выполнены по технологии КМОП, откуда и следует название матрицы. Транзистор 7 используется для сброса пикселя, т. е. для разрядки конденсатора 3.

Достоинства: дешевизна; отсутствие коллизии засветки, в отличие от ПЗС-матриц, поскольку передача идет электрическим сигналом при коммутировании каждого пикселя; меньшие энергетические затраты и геометрические размеры; на одном кристалле с матрицей можно расположить вычислительный блок обработки изображения, благодаря которому с матрицы можно выводить изображение в каком-либо формате, и проводить различные операции; имеется доступ к каждому пикселю по отдельности; каждый пиксель имеет свой усилитель, что позволяет оперировать сигналами внутри матрицы.

Недостатки: высокий уровень шума; дополнительный нагрев ввиду дополнительных элементов схемы на одном кристалле с матрицей; низкий коэффициент заполнения пикселей; низкая чувствительность.

SPAD – Single Photon Avalanche Diode – матрицы на базе однофотонных лавинных диодов. Такой тип датчика регистрирует не количество света (как в КМОП- или ПЗС-структурах), а каждую отдельную частицу, достигающую пиксель (фотон). Схематично сравнение между CMOS и SPAD показано на рис. 3 [5].

Каждый фотон, дошедший до диода SPAD, вызывает внутренний фотоэффект, который извлекает один электрон. После этого сразу же возникает лавинное умножение электронов, которое можно будет зарегистрировать в электрическом сигнале. В это же время КМОП-сенсор не имеет электронного умножения на квантовом уровне, ввиду чего регистрируется наименьшее количество информации (света). Следовательно, SPAD-сенсор имеет высокую чувствительность к слабо освещенным объектам и малое временное разрешение – до 100 пикосекунд, что позволяет фиксировать световые следы, движущиеся со скоростью примерно 300 000 км/с.

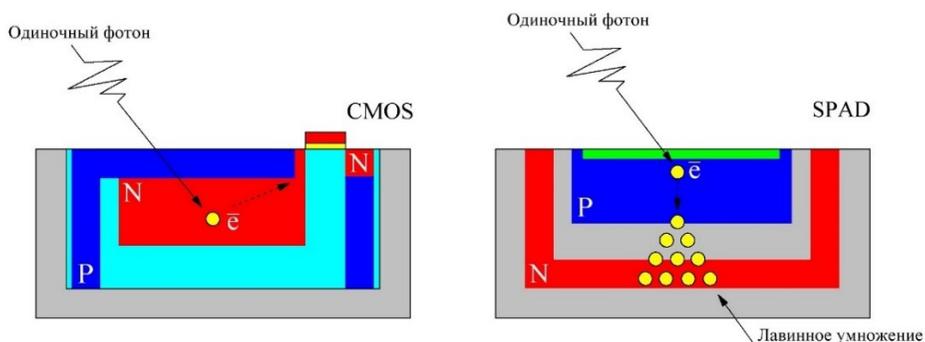


Рис. 3. Пояснение разницы в работе CMOS- и SPAD-датчиков

Данный тип матрицы широко применяется как для обычных камер, так и для научной аппаратуры, где нередко появляется необходимость наблюдения за чрезвычайно быстрыми процессами (в ускорителе микрочастиц). На конец 2019 года имеется ряд исследований по временной производительности матрицы и регистрации 2D- и 3D-объектов, продемонстрированных в статье [6].

Особенности системы захвата изображения FICS

Для реализации гибкой системы захвата изображения (FICS – Flexible Image Capture System) применялась отечественная радиационно стойкая КМОП-матрица 1205XB014 [7, 10], ПЛИС 5578TC034 [11] и СОЗУ ОП 1663РА06. Структурная схема системы показана на рис. 4.

Система имеет всего три модуля – модуль матрицы, модуль ПЛИС и модуль питания. Платы собраны по этажной конструкции, что позволяет избежать длинных сигнальных линий и в то же время обеспечить компактность системы в целом с точки зрения массогабаритных параметров. Внешний вид системы показан на рис. 5. Габаритные размеры системы в сборе – 66×66×30 мм.

Особенность FICS на базе КМОП-матрицы (1205XB014) состоит в том, что она генерирует непрерывный поток данных со скоростью от 0,6 до 4,8 Гб/с. Такой объем невозможно в реальном времени отправить во внешние устройства из-за отсутствия в целевых ИМС ПЛИС (5578TC034) высокоскоростных аппаратных передатчиков. Также невозможно в реальном времени записать весь кадр в целевую статическую ОЗУ (радиационно стойкая СОЗУ ОП 1663РА06). Таким

пропущено. Далее захватываются следующие актуальные данные с параллельных шин матрицы и процесс записи с накоплением повторяется вновь, однако адрес ячейки СОЗУ смещается с учетом пропущенных пикселей, и т. д. Таким образом, после первого кадра с матрицы в СОЗУ остаются «прореженные» данные, полная информация об изображении собирается из нескольких реальных кадров, т. к. каждый следующий пишется со смещением адреса как пикселя, так и ячейки СОЗУ на единицу. Полный кадр в СОЗУ формируется за количество реальных кадров матрицы, равное количеству пропущенных пикселей за время записи с накоплением в СОЗУ (стабильное значение для указанных ИМС составляет 8). Иллюстрация описанного метода показана на рис. 6. DSYN – синхроимпульс для тактирования пакетов данных. Data AB и CD – потоки данных с квадрантов матрицы, поскольку матрица разбита на области А, В, С и D.

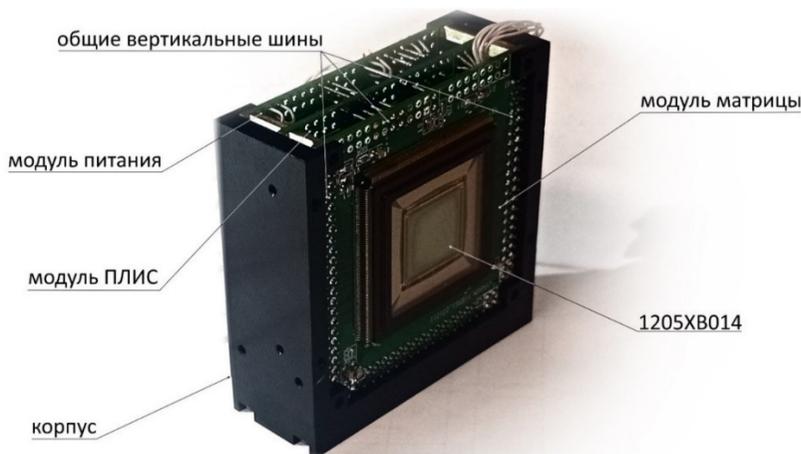


Рис. 5. Конструкция системы захвата изображения

Для возможности использования разработанных HDL-модулей в различных ПЛИС была проведена оптимизация по количеству используемых вентилях. Сравнительные характеристики приведены в таблице.

Дополнительные особенности системы:

1. Накопление данных происходит непосредственно в процессе записи данных в СОЗУ, для этого из ячейки сначала считываются данные, потом суммируются с актуальными данными от матрицы, и результат записывается обратно в ту же ячейку. Параметры накопления могут задаваться в диапазоне от 1 до 16, т. е. при параметре 16 будет использована вся область доступной СОЗУ, имеющая разрядность одного слова 16 бит, при параметре накопления 1 будет занято только 14 бит, что соответствует разрядности АЦП КМОП матрицы.

2. Кроме накопления доступен режим с усреднением по нескольким кадрам, доступны режимы 2X, 4X, 8X и 16X.

3. Аппаратная поддержка для работы с FMCU-микроконтроллером [8, 12, 14, 15] на базе интерфейса SPI [9, 11, 13].

Сравнение параметров реализации модуля захвата изображения на различных ПЛИС

Параметр	ПЛИС				
	5578 TC034	EPF10 K100E BC356-1	EP2C8 F256C6	EP3C5 F256C6	EP3C16 U484C6
Занимаемый объем	2079 (42%)	2049 (42%)	1829 (22%)	1833 (33%)	1835 (12%)
Количество регистров	–	–	834 (10%)	834 (16%)	834 (5%)
Количество выводов	84 (46%)	84 (31%)	84 (46%)	88 (48%)	88 (25%)

Параметр	ПЛИС			
	EP3C40 F484C6	EP4C55F 780C8	EP4C120 F780C7	EP3SE50 F780C2
Занимаемый объем	1834 (5%)	2688 (5%)	2700 (3%)	911 (2%)
Количество регистров	834 (2%)	36864+(5%)	36864 + (<2%)	692 (2%)
Количество выводов	88 (27%)	88 (17%)	88 (17%)	84 (17%)

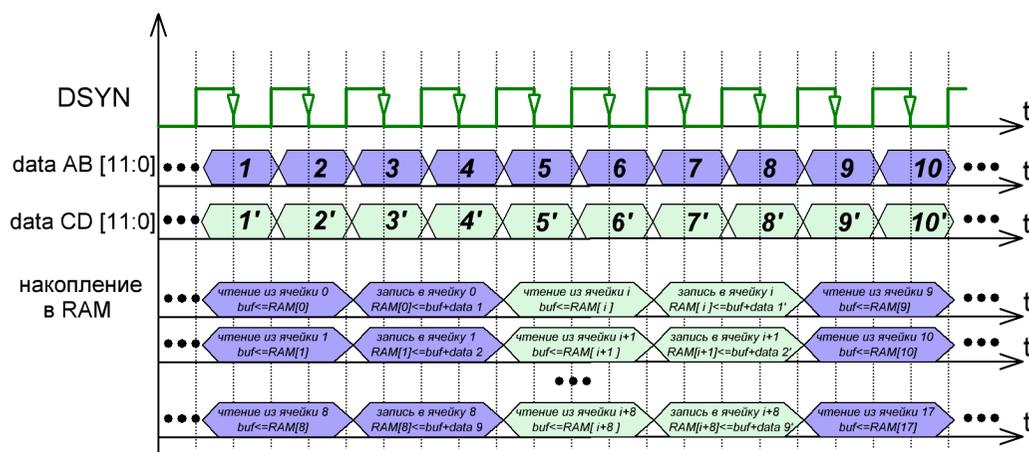


Рис. 6. Временные диаграммы захвата и записи данных с матрицы

Отладка и испытание системы

Для первичной отладки разработана модель самой матрицы 1205XB014 с помощью HDL-описания. Модель генерирует импульсы, идентичные импульсам от реальной ИМС-матрицы, и позволяет выдавать потоки данных настроечных таблиц. Результат испытаний с моделью показан на рис. 7, где представлена одна и та же настроечная картинка без накопления (рис. 7, а) и с 10-кратным накоплением соответственно (рис. 7, б). Изображение на рис. 7, в демонстрирует испытание с моделью матрицы, выдающей градиентную заливку в секторах «CD», и горизонтальные полосы с заливкой в секторах «AB». Программируемые настройки матрицы, задающиеся по SPI, были одинаковые для всех 4 секторов и находились в состоянии «по умолчанию». Важно отметить, что конфигурацию

и формат импульсов синхронизации пришлось изменить от состояния «по умолчанию», чтобы они соответствовали технической документации на матрицу.

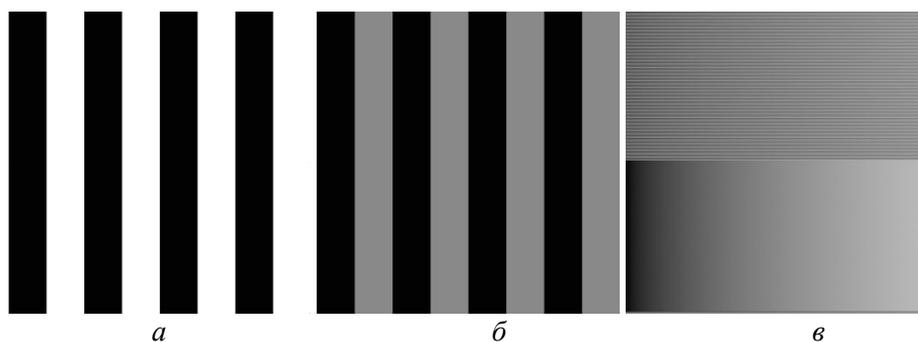


Рис. 7. Тестовые изображение модели матрицы

Для реальных испытаний системы был напечатан на 3D-принтере оптически непрозрачный корпус и добавлена оптическая система в виде объектива «ЛОМО» от пленочного фотоаппарата «СМЕНА». Макет системы в разборе показан на рис. 8, где также показан внешний вид электроники без корпуса.



Рис. 8. Макет системы захвата изображения

Для отладки работы системы захвата изображения была написана программа на языке C# с возможностью контроля поступающего изображения и изменения потока данных в реальном времени, а именно: поворот и совмещение двух половин изображения (поскольку матрица выдает изображение двумя зеркальными половинами), гамма кодирование/декодирование, переключение MSB/LSB пакета (рис. 9). Протокол прописан в рамках обмена данными между ПЛИС и ПК. Слева добавлена область по контролю пришедших данных. Алгоритм работы следующий:

1. ПК посылает запрос в ПЛИС на захват изображения.
2. ПЛИС записывает пакеты с матрицы в СОЗУ и по окончании отправляет в ПК команду «ready».

3. При принятии команды «ready» ПК посылает запросы на пакеты, реализуя систему запрос-ответ.

4. При приеме пакета происходят парсинг данных, склейка байт и заполнение буфера с одновременным выводом изображения по частям. В случае если ПЛИС зависает, прописана дополнительная команда повтора и сброса системы, если время ожидания превысило тайм-аут.

Один принимаемый пакет состоит из 32768 байт и содержит всегда в начале команду о готовности. При сбое ПК повторно запрашивает данные, которые пришли с ошибкой. Итого необходимо принять 127 пакетов по 32 768 байт, что в сумме даст 2 097 152 байта, в которых содержится 1 048 576 слов для формирования изображения в 1 мегапиксель. Полученное изображение можно сохранить в трех форматах: JPG, BMP, PNG. Помимо этого в программе предусмотрен интерфейс передачи управляющих команд в матрицу, которая настраивается ПЛИС через интерфейс SPI. Для этого выделено два поля: Address и Data. Все команды и временные диаграммы для работы и настройки матрицы описаны в документации на соответствующую матрицу.



Рис. 9. Скриншот программы по захвату изображения с оптической системой

С помощью системы в сборе, показанной на рис. 8, были получены серии тестовых изображений без оптической системы (рис. 10) при разных параметрах опорного напряжения столбцовых АЦП. Причем белые квадратики на самом деле черные, а черные – светлые, поскольку особенность матрицы состоит в том, что при сильной засветке она выдает величину напряжения равной нулю. На снимках показана матрица квадратиков, напечатанных на прозрачной пленке черной краской. Засветка проходила с помощью лампы, запитанной от аккумулятора (во избежание паразитных мерцаний).

Снимки на рис. 10 получены следующим образом. Один снимок разбит на две половины, и для каждой половины заданы разные настройки времени экспозиции. По итогу лучший результат показан на рис. 10, в в верхней половине.

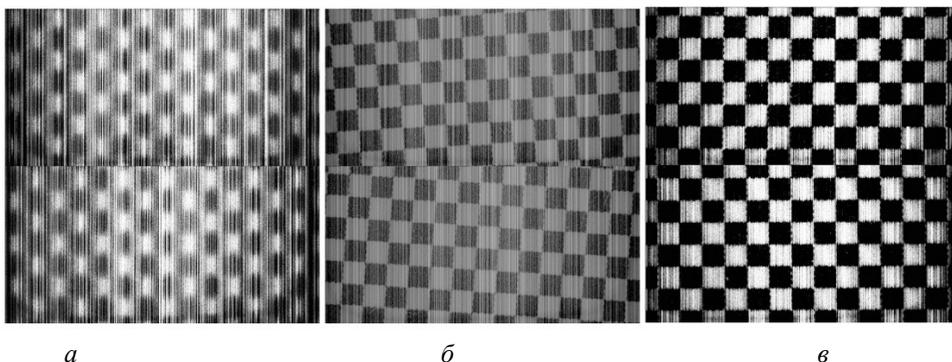


Рис. 10. Снимок фотошаблона без оптической системы: *а* – высокое опорное напряжение; *б* – низкое опорное напряжение; *в* – среднее опорное напряжение

На рис. 11 показаны изображения, полученные с помощью оптической системы при фокусном расстоянии, равном шести метрам. Настройки регистров выдержки матрицы – «по умолчанию», режим накопления – 8X.

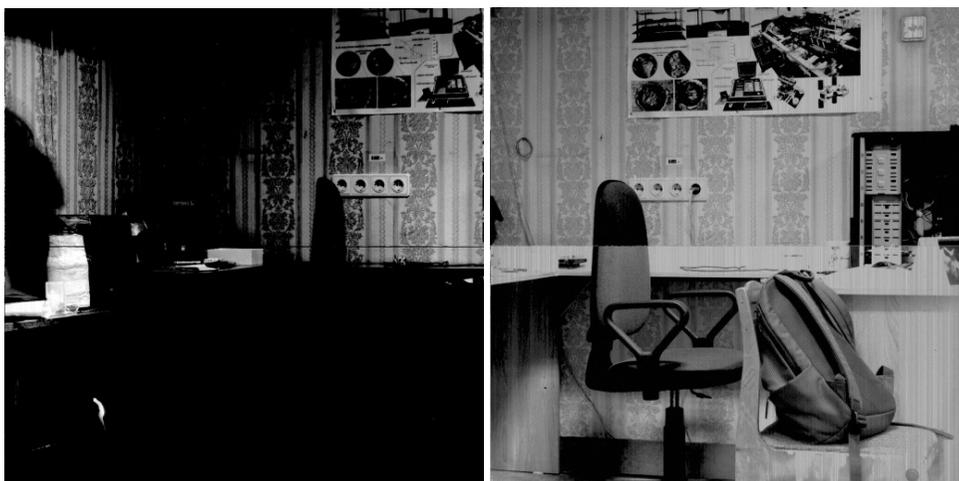


Рис. 11. Снимок с помощью оптической системы ЛОМО Т-43 4/40

Заключение

Итогом проделанной работы служит создание универсальной электронной системы захвата изображения с варьируемыми параметрами, задаваемыми как для матрицы, так и для самой ПЛИС. Электроника выполнена полностью на отечественной элементной базе с использованием радиационно стойких компонентов, что повышает надежность устройства и делает возможным его использование в среде с жесткими внешними воздействующими факторами.

Созданные HDL-модули и схемотехнические решения универсальны и могут быть использованы для создания устройства на ПЛИС бытового назначения, что делает возможным ее использование как в образовательных, так и в бытовых целях. Способы захвата изображения с матрицы 1205XB014, разработанные АО «НИИ телевидения» [10], не могут считаться универсальными и обладают боль-

шими массогабаритными характеристиками, а также требуют значительных финансовых вложений.

В дальнейшем планируется увеличить скорость приема изображения, реализовать передачу данных через более скоростной интерфейс, прописать автоматические команды на изменения параметров матрицы для регулировки изображения и внедрить поддержку системы захвата в виде отдельного блока периферии FMU микроконтроллера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Удовина А.С.* Исследование технологических характеристик CCD (ПЗС) и CMOS (КМОП) электронно-оптических преобразователей // Вестник Московского государственного университета печати им. Ивана Фёдорова. 2011. № 1. С. 197–201. EDN: VMBVMR.
2. *Артюшин А.А.* Анализ основных типов матриц для измерения профиля пучка лазерного излучения // Вестник молодых учёных и специалистов Самарского университета. 2023. № 2 (21). С. 187–192.
3. Camera technology basics. CCD sensor [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vision-doctor.com/en/camera-technology-basics/ccd-sensors.html> (дата обращения: 05.08.2024).
4. EMCCD камеры – принцип работы, достоинства и недостатки [Электронный ресурс]. URL: https://www.biotechnologies.ru/catalog/_emccd.html?ysclid=lzjh2g16gk589838408 (дата обращения: 05.08.2024).
5. SPAD Sensor – Canon global [Электронный ресурс]. URL: <https://global.canon/en/technology/spad-sensor-2023.html> (дата обращения: 05.08.2024).
6. *Kazuhiro M., Andrei A., Ming-lo Wu, Arin Can Ulku, Ivan M.A., Claudio Bruschini, Edoardo Charbon.* A megapixel time-gated SPAD image sensor for 2D and 3D imaging applications // Instrumentation and Detectors. 2019. P. 11.
7. Радиационно-стойкий фотоприемник матричный 1205XB014 [Электронный ресурс]. URL: <https://niitv.ru/product-categories/product/27> (дата обращения: 05.08.2024).
8. *Сухачев К.И., Григорьев Д.П., Исмаилова Е.В.* Разработка микроконтроллерного FMU ядра на базе ПЛИС для научной космической аппаратуры // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16. № 5. С. 12–23. DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-12-23. EDN: WTMNAF.
9. *Сухачев К.И., Григорьев Д.П., Шестаков Д.А. и др.* Разработка кольцевой полудуплексной сети для обмена данными между устройствами в научной космической аппаратуре // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 84. С. 34–45. DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-34-45. EDN: AHVMXO.
10. *Умбиталиева А.А., Цыцулина А.К. и др.* Теория и практика космического телевидения. СПб.: НИИ телевидения, 2017. 368 с.
11. АО «Воронежский завод полупроводниковых приборов» (ВЗПП-С). Каталог изделий 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vzpp-s.ru/production/catalog.pdf> (дата обращения: 27.07.2024).
12. *Atehortúa J.C.B.* Desarrollo e implementación del procesador soft-core LatticeMico32 en una FPGA. 2016. URL: <https://1library.co/document/ye9524eq-desarrolloimplementacion-procesador-soft-core-latticemicofpga.html> (дата обращения: 30.07.2024).
13. *Старшинов В.С., Ткачев С.А.* Разработка IP-Core для соединения интерфейсов AXI и SPI с использованием микропроцессорных систем в связке с ПЛИС // Наука. Технологии. Инновации: Сб. научных трудов. В 10 т. Т. 1 / Под ред. Д.Н. Достовалова. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2018. С. 110–117.
14. *Никитин А.А.* Реализация радиационно-стойкого кодирования в рамках межкристалльной связи систем, состоящих из нескольких программируемых логических интегральных схем // Космическая техника и технологии. 2018. № 4 (23). С. 100–110. EDN: YUJJNB.
15. *Козаченко В.Ф., Алямкин Д.И., Анучин А.С. и др.* Практический курс микропроцессорной техники на базе процессорных ядер ARM-Cortex-M3/M4/M4F. Архитектура, система команд, разработка и отладка программного обеспечения на Ассемблере в интегрированной среде Keil uVision. М.: Изд-во МЭИ, 2019. 543 с.

DEVELOPMENT AND TESTING OF A FLEXIBLE IMAGE CAPTURE SYSTEM BASED ON DOMESTIC RADIATION-HARDENED ELECTRONIC COMPONENTS

K.I. Sukhachev, D.P. Grigorev, A.S. Dorofeev, A.A. Artyushin, A.S. Kiryushkina¹

Samara University
34, Moskovskoye Shosse, Samara, 443086, Russian Federation

E-mail: sukhachev.ki@ssau.ru, grigorev.dp@ssau.ru, dorofeev.as@ssau.ru, artyushin.aa@ssau.ru

Abstract. *The aim of the work is to create a universal flexible image capture system required for recording images of various wavelength ranges in space scientific equipment. The main problem of implementing such a system is the limited bandwidth of the channel for forming a full image frame. To solve this problem, the authors designed an algorithm based on the process of recording a frame with accumulation, that allowed to form a full image frame using several real frames with reduced number of pixels got with the matrix photodetector.*

The result of the work is a system built on the principle of a tiered design, having small dimensions, high noise immunity, high reliability and resistance to external factors, as well as full support for the FMU (Flexible Microcontroller Unit) core. Russian radiation-resistant electronic components were used as materials. The main HDL (Hardware Description Language) modules were optimized to reduce the number of gates and to adapt for household FPGAs. Parameters comparison of the image capture module implementation on various FPGAs is given in this article. This system can be used both in space equipment (using radiation-resistant electronic components) and for household or educational use (implementing the system on household components). The system also has a number of program-controlled parameters that allow to configure the matrix system registers. For capturing and processing images was created software on a personal computer. The results of debugging the system and examples of test shots are given.

Keywords: *CCD matrix, CMOS matrix, SPAD matrix, FPGA, microcontroller, FMU, IP-core.*

REFERENCES

1. *Udovina A.S. Issledovanie tehnologicheskikh harakteristik CCD (PZS) i CMOS (KMOP) elektronno-opticheskikh preobrazovatelej [Study of Technological Characteristics of CCD (Charge-Coupled Devices) and CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) Electro-Optical Converters] // Vestnik Moskovskogo gosudar-stvennogo universiteta pechati im. Ivana Fyodorova. 2011. № 1. P. 197–201. (In Russian)*
2. *Artyushin A.A. Analiz osnovnykh tipov matric dlya izmereniya profilya puchka lazer-nogo izlucheniya [Analysis of Main Types of Matrices for Laser Beam Profile Measurement] // Vestnik molodyh uchyonyh i specialistov Samarskogo universite-ta. 2023. № 2 (21). P. 187–192. (In Russian)*



© The Author(s), 2024

¹ *Kirill I. Sukhachev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Senior Researcher at the Institute of Space Instrumentation.*

Danil P. Grigorev, Junior Researcher at the Institute of Space Instrumentation, Postgraduate Student.

Alexander S. Dorofeev, Junior Researcher at the Institute of Space Instrumentation.

Andrey A. Artyushin, Design Engineer at the Institute of Space Instrumentation, Postgraduate Student.

3. Camera technology basics. CCD sensor [Online]. Available: <https://www.vision-doctor.com/en/camera-technology-basics/ccd-sensors.html> (Accessed: August 5, 2024).
4. EMCCD cameras – principle of operation, advantages and disadvantages [Online]. Available: https://www.biotechnologies.ru/catalog/_emccd.html?ysclid=lzjh2g16gk589838408 (Accessed: August 5, 2024).
5. SPAD Sensor – Canon global [Online]. Available: <https://global.canon/en/technology/spad-sensor-2023.html> (Accessed: August 5, 2024).
6. *Kazuhiro M., Andrei A., Ming-lo Wu, Arin Can Ulku, Ivan M. A., Claudio Bruschini, Edoardo Charbon.* A megapixel time-gated SPAD image sensor for 2D and 3D imaging applications // *Instrumentation and Detectors*. 2019. P. 11.
7. Radiation-resistant matrix photodetector 1205XB014 [Online]. Available: <https://niitv.ru/product-categories/product/27> (Accessed: August 5, 2024).
8. *Suhachev K.I., Grigorev D.P., Ismagilova E.V.* Razrabotka mikrokontrolernogo FMU yadra na baze PLIS dlya nauchnoj kosmicheskoy apparatury [Development of a microcontroller FMU core based on FPGA for scientific space equipment] // *Izvestiya SPbGETU «LETI»*. 2023. V. 16. № 5. P. 12–23. DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-12-23. (In Russian)
9. *Suhachev K.I., Grigorev D.P., Shestakov D.A. i dr.* Razrabotka kolcevoj poludup-leksnoj seti dlya obmena dannymi mezhdou ustrojstvami v nauchnoj kosmicheskoy apparature [Development of a ring-based half-duplex network for data exchange between devices in scientific space equipment] // *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2023. № 84. P. 34–45. DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-34-45. (In Russian)
10. *Umbitalieva A.A., Cyculina A.K. i dr.* Teoriya i praktika kosmicheskogo televideniya [Theory and Practice of Space Television]. SPb: NII televideniya, 2017. 368 p. (In Russian)
11. JSC “Voronezh Semiconductor Devices Plant” (VZPP-S). Product catalog 2020 [Online]. Available: <http://www.vzpp-s.ru/production/catalog.pdf> (Accessed: July 27, 2024).
12. *Atehortúa J.C.B.* Desarrollo e implementación del procesador soft-core LatticeMico32 en una FPGA. 2016. URL: <https://1library.co/document/ye9524eq-desarrolloimplementacion-procesador-soft-core-latticemicofpga.html> (Accessed: July 30, 2024).
13. *Starshinov V.S., Tkachev S.A.* Razrabotka IP-Core dlya soedineniya interfejsov AXI i SPI s ispolzovaniem mikroprocessornykh sistem v svyazke s PLIS [Development of an IP-Core for interfacing AXI and SPI using microprocessor systems in conjunction with FPGA] // *Nauka. Tehnologii. Innovacii: Sb. nauchnykh trudov*. V 10 t. T. 1 / Pod red. D.N. Dostovalova. Novosibirsk: Novosibirskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet, 2018. P. 110–117. (In Russian)
14. *Nikitin A.A.* Realizaciya radiacionno-stojkogo kodirovaniya v ramkah mezhkristalnoj svyazi sistem, sostoyashih iz neskolkih programmiruemyh logicheskikh integralnykh shem [Implementation of radiation-hardened encoding for inter-chip communication in systems consisting of multiple programmable logic integrated circuits] // *Kosmicheskaya tehnika i tehnologii*. 2018. № 4 (23). P. 100–110. (In Russian)
15. *Kozachenko V.F., Alyamkin D.I., Anuchin A.S. i dr.* Prakticheskij kurs mikroprocessornoj tehniki na baze processornykh yader ARM-Cortex-M3/M4/M4F. Arhitektura, sistema komand, razrabotka i otladka programmogo obespecheniya na Assemblere v integrirovannoj srede Keil uVision [Practical Course in Microprocessor Technology Based on ARM Cortex-M3/M4/M4F Processor Cores. Architecture, Instruction Set, Development, and Debugging of Assembly Language Software in the Keil uVision Integrated Environment]. M.: Izd-vo MEI, 2019. 543 p. (In Russian)

Original article submitted 10.12.2024

Энергетика и электротехника

УДК 62-631.2:665.65

МОДЕРНИЗАЦИЯ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

С.А. Гулина¹, К.Ю. Шабанов², Л.П. Шелудько¹

¹Самарский государственный технический университет

Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

²ООО «Газпром трансгаз Самара»

Россия, 443068, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 106А, строение 1

E-mail: kr_oeg@mail.ru, K.Shabanov@samaratransgaz.gazprom.ru, chel_lp@mail.ru

Аннотация. В данной работе предложено интегрировать в типовую технологическую схему газораспределительной станции (ГРС) магистральных газопроводов (МГ) энергетическую газотурбодетандерную установку (ЭГТДУ) и протонообменную гидролизную установку (ПОГУ). Это решение представляет собой эффективный системный подход к модернизации типовых ГРС, позволяющий не только повысить их энергетическую эффективность, но и существенно снизить экологическую нагрузку. Разработана тепловая схема и приведен принцип работы нового типа ГРС. На основе термодинамического анализа оценен потенциал возможного получения дополнительной электрической мощности в ЭГТДУ для производства водорода в ПОГУ.

Модернизируя типовые ГРС, можно получить электрическую мощность с КПД от 60 %, и этой мощности будет достаточно для электроснабжения установок сверх большого производства водорода. Это хорошие перспективы для получения на ГРС метано-водородной смеси как перспективного топлива для потребителей, которое может значительно улучшить экологические характеристики по сравнению с традиционным природным газом.

Ключевые слова: газораспределительная станция, газотурбинная установка, метано-водородная смесь, природный газ, протонообменная гидролизная установка, турбодетандер.

Газораспределительные станции (ГРС) являются ключевым производственным объектом в единой системе газоснабжения РФ. С помощью технологических



© Автор(ы), 2024

¹ Светлана Анатольевна Гулина, кандидат технических наук, доцент кафедры трубопроводного транспорта.

Шабанов Константин Юрьевич, кандидат технических наук.

Шелудько Леонид Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

операций, осуществляемых на ГРС, поддерживается заданное давление в газораспределительных сетях для бесперебойной подачи газа потребителям. С учетом растущих потребностей в энергоресурсах и экологической ответственности к газотранспортной системе предъявляются требования по повышению энергетической эффективности ГРС. Одним из основных направлений повышения энергетической эффективности является оптимизация работы существующего оборудования. Современные технологии позволяют модернизировать основное технологическое оборудование и системы его управления, что способствует снижению потребления энергии. Это направление отражено в энергетической стратегии России до 2030 года [1] в части реконструкции и модернизации основного оборудования газотранспортной системы.

На сегодняшний день основными технологическими операциями на ГРС являются очистка технологического газа, его редуцирование и поддержание заданного договорного давления для потребителя, учет переданного количества газа потребителю и его одоризация. Редуцирование природного газа в существующих регуляторах при больших перепадах давления сопровождается большими потерями потенциальной энергии. Эти потери, в свою очередь, приводят к неэффективному использованию ресурсов и увеличению затрат на эксплуатацию ГРС. Современные технологии позволяют с внедрением технических систем преобразовать избыток давления в электрическую энергию или механическую работу [2, 3]. Эти инновационные решения не только способствуют снижению энергозатрат, но и минимизируют негативное воздействие на окружающую среду, а в конечном итоге приводят к снижению стоимости конечного продукта для потребителей. Решение проблемы потерь энергии давления не только экономически оправдано, но и отвечает современным требованиям устойчивого развития и экологической безопасности.

Авторами статьи предлагается способ модернизации ГРС с использованием перепада давления для генерации электрической энергии и получения водорода в процессе гидролиза воды. Разработана принципиальная технологическая схема модернизации типовой ГРС с дополнительно установленным оборудованием. Перед блоком редуцирования газа устанавливается энергетическая газотурбодетандерная установка (ГТДУ) с электрогенератором. Отдельным блоком устанавливается протонообменная гидролизная установка (ПОГУ) для получения водорода через процесс гидролиза с блоком сепарации водорода H_2 и кислорода O_2 . Водород используется для создания метано-водородной смеси после смешения с природным газом, поступающем к потребителю.

Принцип работы ПОГУ основан на использовании ионопроводящих мембран, которые позволяют эффективно разделять протоны и электроны, создавая необходимые условия для получения водорода. Деминерализованная вода подается в ионопроводящие мембраны, и под действием постоянного электрического тока на аноде происходит окисление молекул воды на кислородные молекулы и протоны. Протоны проходят через специальную мембрану и перемещаются к катоду, без пропускания электронов. На катоде протоны реагируют с электронами, создавая молекулы водорода. ПОГУ вырабатывает водород с давлением до 3 МПа. Выработанный водород смешивают с природным газом. Полученная метано-водородная смесь (МВС) подается потребителям.

Метано-водородная смесь представляет собой перспективное топливо, которое может значительно улучшить экологические характеристики по сравнению с традиционным природным газом. При сжигании природного газа выделяется

углекислый газ, который является одним из основных факторов глобального потепления. Водород, содержащийся в МВС, при сгорании образует только водяные пары, что существенно уменьшает углеродный след. Важно отметить, что МВС обладает высоким энергетическим потенциалом и может быть использована в различных отраслях, включая транспорт, производство электроэнергии и отопление, и является универсальной, более экологически чистой альтернативой природному газу.

В Нижнем Новгороде на заводе компании ЭкоГазСистем серийно выпускаются генераторы водорода Proton OnSite с протонообменной мембраной с малой производительностью – от 2 до 6 $\text{нм}^3/\text{ч}$; промышленные генераторы водорода с производительностью от 10 до 30 $\text{нм}^3/\text{ч}$ и генераторы водорода сверхбольшой производительности – 250 или 500 $\text{нм}^3/\text{ч}$. На стороне катода, где образуется водород, создается давление до 3МПа; такое давление достигается без использования насоса или дожимного компрессора. Кислород при этом никоим образом не может попасть в производционный водород. Это гарантирует высочайшую чистоту водорода и повышает безопасность всего процесса [4].

Специалисты «Центротеха» (входит в топливную компанию «Росатома») изготовили опытный образец электролизной установки производительностью 50 $\text{нм}^3/\text{ч}$ [5]. Ранее в «Росатоме» была создана линейка электролизных установок производительностью от 5 до 40 $\text{нм}^3/\text{ч}$. Оборудование работает на базе импортонезависимой технологии электролиза воды с применением уникальной анионопроводящей матрицы, с удельным энергопотреблением электролизной батареи не более 4 кВт·ч на 1 $\text{нм}^3/\text{ч}$ производимого водорода.

Конструкцией предусмотрена возможность использования дополнительной системы осушки и очистки водорода для получения товарного продукта сверхвысокой чистоты, которая изготовлена в контейнерном исполнении со всем комплектом вспомогательного оборудования. Установка имеет конкурентные преимущества перед технологией электролиза на основе протонообменной мембраны, так как требования к степени очистки воды для электролиза существенно ниже. При этом электролизные элементы «Центротеха» имеют существенный потенциал для повышения эффективности, что позволит в дальнейшем создавать установки большей производительности в существующих компоновочных решениях.

С учетом достигнутых результатов перспективно электроснабжение гидролизных установок с получением водорода из воды за счет ЭГТДУ на газораспределительных станциях МГ. Авторами подана заявка на изобретение [6] способа работы гидролизной установки, энергоснабжение которой производится от энергетической газотурбодетандерной установки ГРС. Технологическая схема модернизированной ГРС представлена на рис. 1.

На ГРС устанавливают ЭГТДУ с электрогенератором и гидролизную установку, блок электроснабжения переменным током высокого напряжения для гидролизной установки, собственных нужд ГРС и внешних потребителей. Гидролизная установка содержит блок водоподготовки, протонообменный электролизер, блоки сепарации H_2 и кислорода O_2 . Энергетическая газотурбодетандерная установка состоит из двухступенчатого турбодетандера, который является приводом воздушного компрессора ЭГТДУ, регенератора и газовой турбины, которая приводит электрогенератор, вырабатывающий переменный электрический ток. Топливом для ЭГТДУ является полученная метано-водородная смесь.

Природный газ (ПГ) высокого давления после блока очистки на ГРС подогривают в теплообменном аппарате (ТА) до 80–100 °С, расширяют в ступени I турбодетандера (ТД). Полученный в электролизере водород с давлением 3 МПа сепарируют и подают во вторую ступень турбодетандера с образованием метано-водородной смеси. МВС расширяют в турбодетандере до давления 1,5 МПа и основную часть подают в блок редуцирования газа ГРС для поддержания заданного договорного давления для потребителя, а меньшую часть – в блок подготовки топливного газа для ЭГТДУ.

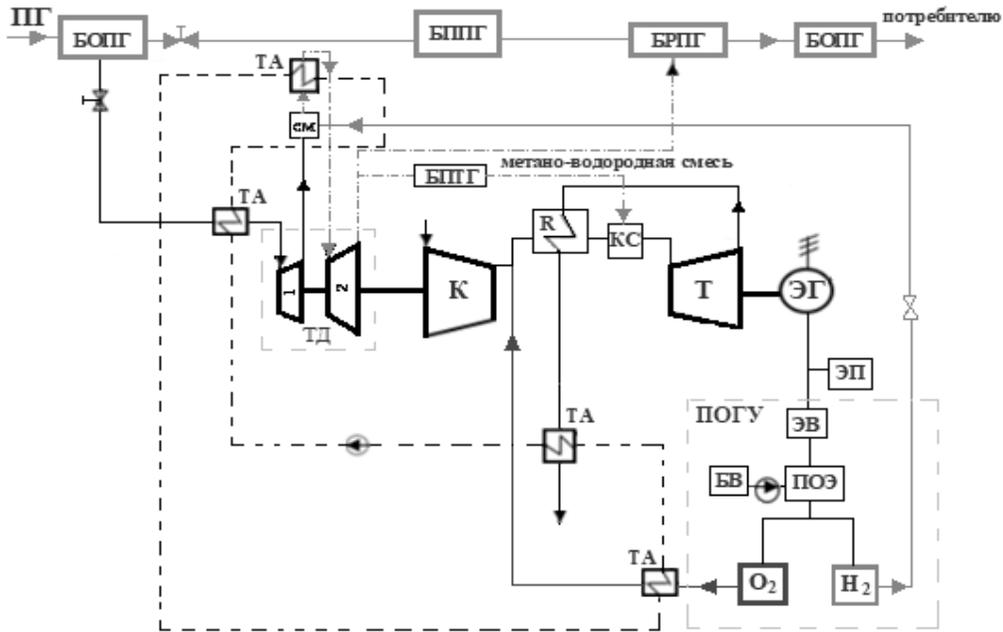


Рис. 1. Технологическая схема модернизированной ГРС с интегрированной в нее ЭГТДУ и ПОГУ: ПГ – природный газ, поступающий через бок подключения из МГ; БОПГ – блок очистки ПГ; БППГ – блок подогрева ПГ; БРПГ – блок редуцирования ПГ; БОдПГ – блок одоризации ПГ; ТД – турбодетандер (1 – первая ступень, 2 – вторая ступень), К – воздушный компрессор; Т – газовая энергетическая турбина; ЭГ – электрогенератор; БПТГ – блок подготовки топливного газа; R – регенератор; КС – камера сгорания; ЭП – блок собственных нужд ГРС и внешних потребителей; ПОГУ – протонообменная гидролизная установка: ЭВ – выпрямитель электрического тока, БВ – блок водоподготовки, ПОЭ – протономембранный электролизер, O₂ – блок сепарации O₂, H₂ – блок сепарации H₂; ТА – теплообменные подогреватели с промежуточным теплоносителем; - - - трубопровод теплоносителя, - · - · - трубопровод МВС

Кислород с давлением 0,1 МПа подают из блока кислорода на вход в регенератор за компрессором ЭГТДУ. Теплоту выхлопных газов газовой турбины используют в регенераторе для подогрева воздуха за компрессором и далее в теплообменном аппарате для подогрева промежуточного теплоносителя.

Задачей работы являлось оценить энергетический потенциал регенеративной ЭГТДУ для получения водорода в ПОГУ. Используя типовые параметры природного газа современных магистральных газопроводов (Бавоненково – Ухта, «Сила Сибири» и др.), задались диапазоном изменения давления на входе в тур-

бодетандер (с учетом гидравлических потерь) от 10 до 5 МПа. По производительности ГРС разделены на три группы: малой производительности при $Q_{ГРС} \leq 50$ т.м³/час, средней производительности при $50 \geq Q_{ГРС} \geq 100$ т.м³/час, большой производительности при $Q_{ГРС} \geq 100$ т.м³/час.

Первая ступень турбодетандера: срабатывает перепад давления поступающего природного газа после блока очистки до уровня 2,8 МПа. Вторая ступень турбодетандера работает на МВС, поступающей после смесителя.

На основе системного теплофизического анализа оценен потенциал возможного получения дополнительной электрической мощности в ЭГТДУ (рис. 2).

Мощность, вырабатываемая первой и второй ступенями ТД, и температура на выходе из ступени определяются по зависимостям [7, 8] с учетом теплофизических свойств рабочего тела, кДж/кг:

$$N_{Icm(IIcm)} = G_{ПГ(МВС)} L_{cm} = G_{ПГ(МВС)} c_{P_{ПГ(МВС)}} T_{вхcm} \left(1 - \pi_{cm}^{-m_{ПГ(МВС)}} \right) \eta_{cm} \eta_M,$$

$$T_{cm} = T_{вхcm} - \frac{L_{cm}}{c_{P_{ПГ(МВС)}}}, \quad m_{ПГ(МВС)} = \frac{k_{ПГ(МВС)} - 1}{k_{ПГ(МВС)}},$$

где $T_{вхcm}$ – температура рабочего тела на входе в ступень ТД, К; η_{cm} – изоэнтروпический КПД ступени ТД, $\eta_{cm} = 0.9$; $c_{P_{ПГ}}$ – изобарная удельная теплоемкость ПГ, $c_{P_{ПГ}} = 2.204$ кДж/Ккг; $k_{ПГ}$ – показатель адиабаты ПГ, $k_{ПГ} = 1.31$; $c_{P_{МВС}}$ – изобарная удельная теплоемкость МВС, $c_{P_{МВС}} = 2.21$ кДж/Ккг; $k_{МВС}$ – показатель адиабаты МВС, $k_{МВС} = 1.3$; $G_{ПГ(МВС)}$ – расход рабочего тела по ступеням турбодетандера, кг/с; η_M – КПД механических потерь, $\eta_M = 0.99$.

Природный газ перед расширением в ТД подогревают до температуры 80–100 °С, которая обеспечит отсутствие гидратообразования в трубопроводных коммуникациях после расширения в ТД и увеличит располагаемую мощность ТД. Мощность ТД рассчитывается, МВт:

$$N_{ТД} = N_{cmI} + N_{cmII}.$$

На графиках показано изменение мощности ТД (рис. 2, а) и количество производимого водорода за счет генерируемой энергии ТД (рис. 2, б) в зависимости от рабочего давления в современных МГ (11 МПа, 9,8 МПа, 7,5 МПа, 5,5 МПа) и производительности ГРС.

Располагаемая мощность ТД прямо пропорционально расходу природного газа через ГРС и изменяется от 0,75 до 7,55 МВт. Получаемой минимальной электрической мощности ТД достаточно для электроснабжения ПОГУ производительностью водорода от 150 нм³/ч, и при максимальных параметрах ГРС можно получить более 2000 нм³/ч.

Пропускная способность ТД непостоянна и зависит от величины расхода рабочего тела. Поддержание постоянной мощности электрогенератора ЭГТДУ производится за счет регулирования расхода топливного газа в камеру сгорания.

Мощность, потребляемая компрессором, зависит от мощности турбодетандера:

$$N_K = N_{ТД} \cdot \eta_M \text{ и далее } L_K G_{вГТУ} = L_{ТД} \cdot G_{ПГ} \cdot \eta_M, \quad (1)$$

где $G_{вГТУ}$ – расход воздуха через компрессор, кг/с; L_K – удельные работа сжатия в компрессоре, кДж/кг.

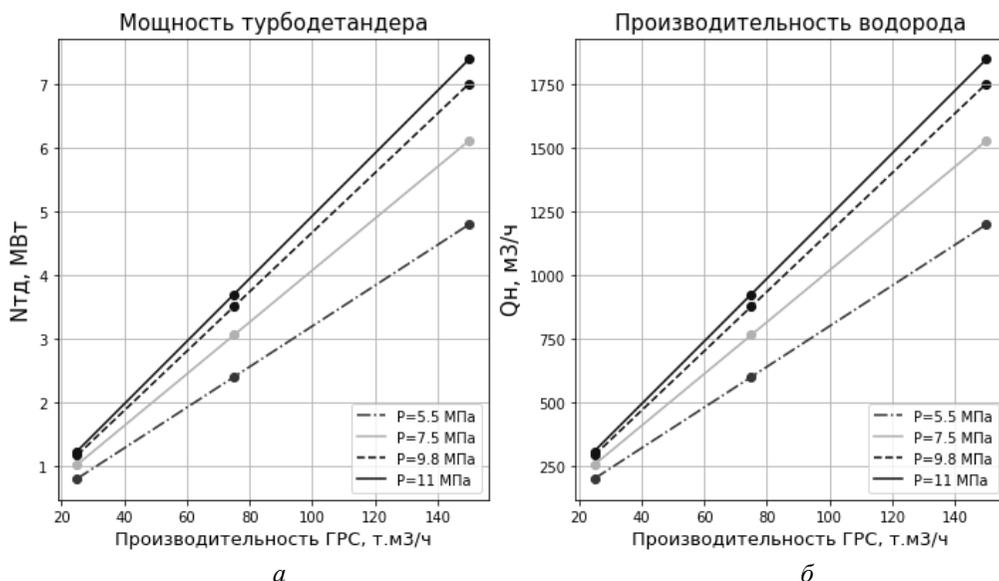


Рис. 2. Располагаемая мощность ТД и производительность водорода

В соответствии с методикой, приведенной в [5, 6], удельная работа сжатия в компрессоре определяется по формуле, кДж/кг:

$$L_K = c_{pB} \cdot T_{BxK} \cdot (\pi_K^{m_e} - 1) \cdot \frac{1}{\eta_K} \text{ и } m_e = \frac{k_e - 1}{k_e}, \quad (2)$$

где η_K – изоэнтروпический КПД компрессора; c_{pB} – изобарная удельная теплоемкость воздуха, $c_{pB} = 1.01$ кДж/Ккг; k_e – показатель адиабаты воздуха, $k_e = 1,4$.

Мощность, потребляемая компрессором, зависит от степени повышения давления π_K и расхода воздуха через компрессор $G_{ГТУ}$. Решая совместно уравнения 1, 2 и задавшись диапазоном изменения π_K от 2 до 14, рассчитываем расход воздуха для ЭГТДУ:

$$(\pi_K^{m_e} - 1) G_{ГТУ} = \frac{N_{TД} \cdot \eta_K}{c_{pB} \cdot T_{BxK}} \eta_M, \quad G_{ГТУ} = \frac{N_{TД} \cdot \eta_K}{c_{pB} \cdot T_{BxK} (\pi_K^{m_e} - 1)} \eta_M. \quad (3)$$

По результатам расчета на графике рис. 3 построена зависимость изменения расхода воздуха в ЭГТДУ. С уменьшением производительности ГРС и увеличением степени повышения давления в компрессоре расход воздуха снижается.

Для ГРС малой и средней производительности при рабочем давлении в МГ от 7,5 МПа и ниже и с увеличением $\pi_K \geq 4$ производительность компрессора составляет $G_{ГТУ} \leq 20$ кг/с. Такой расход воздуха для современных газотурбинных установок сопровождается снижением КПД за счет негативного влияния увеличения относительного радиального зазора в лопаточном аппарате турбомашин.

В этом случае для ГРС малой и средней производительности более целесообразно подключение турбодетандерной установки напрямую к электрогенератору для выработки электроэнергии для ПОГУ. Полученной электроэнергии будет достаточно для уже имеющихся ПОГУ с производительностью от 30 до 500 $\text{нм}^3/\text{ч}$ [4]. Полученный водород можно использовать для создания метано-

водородной смеси для подогревателей газа в блоке предотвращения гидратообразования и улучшить ее экологические показатели ГРС. В целях повышения энергетической эффективности ГРС малой производительности для использования ТД в качестве привода компрессора необходимо в тепловую схему ЭГТДУ включить одновальный газогенератор высокого давления. Данные схемы были подробно рассмотрены в работе [9].

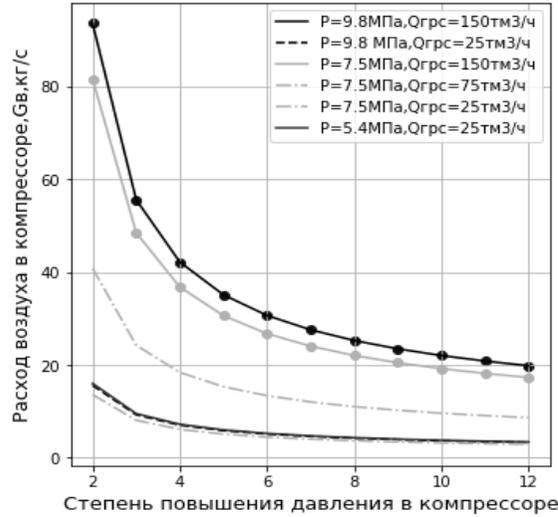


Рис. 3. Изменение расхода воздуха через компрессор в зависимости от степени повышения давления в компрессоре

При максимальных параметрах газотранспортной системы с давлением от 7,5 МПа и выше и с производительностью ГРС от 100 тм³/час расход воздуха через компрессор $G_{вГТУ} \geq 30$ кг/с. Следовательно, необходимо оценить удельную работу турбины электрогенератора и эффективный КПД ЭГТДУ по зависимостям [5, 6] для схемы рис. 1.

Удельная работа турбины электрогенератора определяется:

$$L_T = c_{p_2} T_G (1 - \pi_T^{-m_2}) \eta_T, \quad (4)$$

$$m_2 = \frac{k_2 - 1}{k_2}, \quad \pi_T = \pi_K \cdot \sigma_{зид};$$

эффективный КПД определяется:

$$\eta_e = \frac{L_T}{Q_1} \cdot \eta_{КС}, \quad (5)$$

где T_G – температура газа перед турбиной, К; π_T – степень понижения давления в турбине; $\sigma_{зид}$ – гидравлические потери давления в тракте ГТУ; η_T – изоэнтропический КПД турбины; c_{p_2} – изобарная удельная теплоемкость газа, $c_{p_2} = 1,15$ кДж/Ккг; k_2 – показатель адиабаты газа, $k_2 = 1,33$; $\eta_{КС}$ – коэффициент полноты сгорания топлива, $\eta_{КС} = 0,99$.

Удельная теплота, подводимая в цикле с топливом, рассчитана по зависимостям, кДж/кг:

$$Q_1 = c_{p_2} T_G \cdot v_{вхК-вхТ} - c_{p_2} T_R \cdot v_{вх-К}; \quad (6)$$

$$T_R = r(T_T - T_K) + T_K, \quad v_{ex-exK} = 1 - q_{ym} - q_{oxl}, \quad v_{exK-exT} = 1 - q_{ym} - q_{oxl} + q_{mon},$$

где $v_{ex-exK}; v_{exK-exT}$ – коэффициенты изменения массы рабочего тела на входе в камеру сгорания и в турбину; T_K и T_R – температуры рабочего тела на выходе из компрессора и из регенератора; $q_{ym}; q_{oxl}; q_{mon}$ – относительные расходы рабочего тела на охлаждение и утечки топлива (задаются из опыта эксплуатации ГТУ).

Удельная работа турбины зависит от температуры в камере сгорания и степени повышения давления в компрессоре. Также будет увеличиваться и КПД установки. На рис. 4 построены графические зависимости удельной работы турбины электрогенератора (4) и КПД установки (5) для температуры перед турбиной $T_T=1350$ К и $T_T=1550$ К.

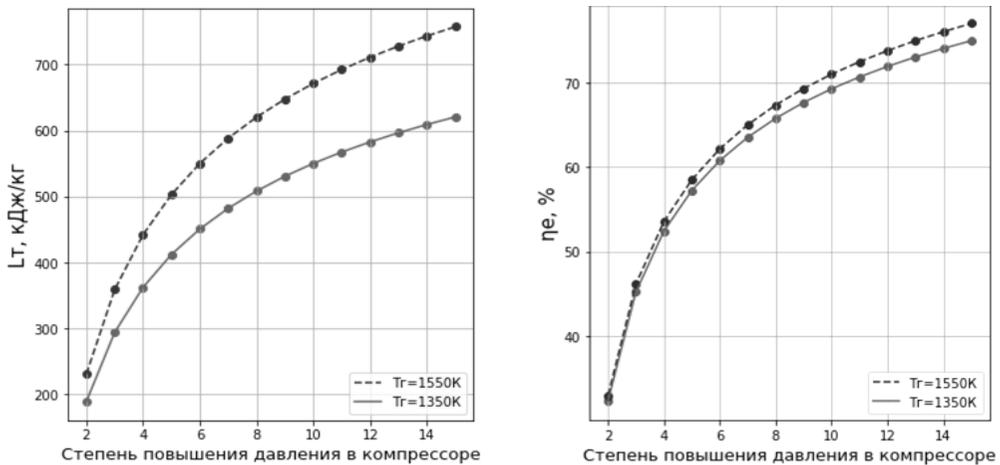


Рис. 4. Изменение параметров эффективности ЭГТДУ в зависимости от степени повышения давления в компрессоре π_K и температуры газа перед турбиной

Эффективность предложенной схемы очевидна, применение газотурбодетандерной установки позволит получить дополнительную электрическую мощность с КПД 65–70 % установки.

Электрическая мощность ЭГТДУ определяется по уравнению

$$N_T = G_{гТУ} v_{exK-exT} L_T \eta_M = G_{гТУ} v_{exK-exT} c_{p_2} T_T (1 - \pi_T^{-m_2}) \eta_T \eta_M \quad (7)$$

и зависит от удельной работы турбины, от производительности компрессора $G_{гТУ}$ и степени повышения давления воздуха, а также от температуры рабочего тела перед турбиной, как это видно из уравнения (4).

Для степени повышения давления от 4 до 12 и расхода воздуха через компрессор от 20 до 42 кг/с и $T_T=1550$ К мощность ЭГТДУ составляет от 9 до 30 МВт с КПД от 60 до 72 %. Этой мощности будет достаточно для электроснабжения установок сверх большого производства водорода и дополнительного электроснабжения внешних потребителей. В гидролизных установках для получения 1 м³ водорода на сегодняшний день затрачивается в среднем 5,5 кВт/ч; следовательно, на ГРС большой производительности можно получить от 1,5 до 6 тыс. м³ водорода.

На современном этапе технического развития большие инвестиции направляются в создание опытно-промышленного производства электролизного оборуду-

дования для получения водорода с сокращением энергопотребления [5]. Это дает возможность использования гидролизных установок на ГРС для получения метано-водородной смеси. Теплотворная способность у метано-водородной смеси значительно выше, чем у природного газа, поэтому ее применение в качестве топливного газа в энергетических и теплоэнергетических установках потребителей позволит повысить их тепловую экономичность с уменьшением расходов потребляемого топлива и снизить негативные факторы, влияющие на окружающую среду.

Технический результат модернизации ГРС достигается за счет включения в типовую технологическую схему ГРС энергетической газотурбодетандерной и протонообменной гидролизной установок, что позволит получить с высоким КПД электроэнергию и метано-водородную смесь, подаваемую для потребителей. Разработанная схема модернизации ГРС способствует улучшению общей надежности и устойчивости газораспределительных систем в условиях современных вызовов энергетического рынка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Распоряжение Правительства РФ «Энергетическая стратегия России до 2035 года» от 9 июня 2020 г. № 1523-р. М., 2020.
2. *Стребков А.Н., Осипов А.В., Жывронский С.К.* Термодинамические основы использования детандер-компрессорной ГТУ // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2021. № 1. С. 166–181. DOI: 10.18698/0236-3941-2021-1-166-184. EDN: SGNQQF.
3. *Ткаченко В.В., Гириш С.М.* Анализ и обоснование эффективности применения детандер-генераторных агрегатов в энергетических системах // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2019. № 1. С. 82–92.
4. Водородные PEM-электролизеры [Электронный ресурс]. URL: <https://gasonsru.ru/hydrogen-pem> (дата обращения: 27.07.2024).
5. Росатом разработал новую электролизную установку [Электронный ресурс]. URL: <https://strana-rosatom.ru/2023/05/28/rosatom-razrabotal-novuju-elektrol> (дата обращения: 27.07.2024).
6. *Шелудько Л.П., Ларин Е.М., Гулина С.А.* Заявка на изобретение «Способ работы газораспределительной станции с энергетической регенеративной газотурбодетандерной и протонообменной гидролизной установками и устройство для его осуществления».
7. *Гулина С.А., Шелудько Л.П.* Моделирование термодинамического цикла ГТД, работающего на газообразном топливе произвольного состава // Сборник трудов XXIX международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ – 29». Т. 12. Саратов, 2016. С. 67–73. EDN: YFOOLV.
8. *Гулина С.А.* Газотурбинные установки: учебное пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2023. 180 с.
9. *Гулина С.А., Шелудько Л.П.* Оптимизация тепловых схем комбинированных газотурбодетандерных энергетических установок // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2023. Т. 31, № 3 (79). С. 22–42. DOI: 10.14498/tech.2023.3.2. EDN: HZMIGE
10. *Юдин Ю.В., Хованский Я.В., Артемьев С.Н.* Совершенствование системы теплоснабжения с применением детандер-генераторных агрегатов // Вестник Удмуртского университета. Серия: Техника и технологии. 2017. № 2. С. 5–10.
11. *Худолей В.И., Кокоткина А.М.* Моделирование и анализ эксплуатационных характеристик детандер-генераторных агрегатов // Научный вестник Чернивецкого университета. Механика, материаловедение, инженерное образование. 2016. № 795. С. 33–39.
12. *Потехина Н.В., Сорокина О.П., Пашенькин В.И.* Оптимизация параметров работы детандер-генераторных агрегатов для повышения энергоэффективности газотранспортной системы // Промышленная энергетика. 2018. № 6. С. 24–28. EDN: XUSBJR.
13. *Баранов Г.Г., Шабалина Г.М.* Влияние границ температур на параметры работы детандер-генераторных агрегатов // Теплоэнергетика. 2015. № 12. С. 40–43.

14. *Sangeetha G., Srinivas T.* Thermodynamic analysis of combined gas turbine and organic Rankine cycle using expander-generator // *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4, № 2. P. 1080–1090.
15. *Hui S., Min J., Jiandong G., Chao H.* Thermo-economic optimization and performance analysis of a combined cycle power plant based on an expander-generator // *Energy Conversion and Management*. 2016. № 108. P. 343–355.
16. *Li J., Shu G., Yan J., Li G., Zhou B.* Performance analysis of gas turbine power plants with expander-generator unit // *Energy Procedia*. 2016. № 8. P. 487–492.

Статья поступила в редакцию 30.12.2024

GAS DISTRIBUTION STATION UPGRADE MAIN GAS PIPELINES

S. Gulina¹, K.Y. Shabanov², L.P. Sheludko¹

¹Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

²Gazprom Transgaz Samara LLC
106, Novo-Sadovay str., Samara, 443068, Russian Federation

E-mail: kr_oeg@mail.ru, K.Shabanov@samaratransgaz.gazprom.ru, chel_lp@mail.ru

Abstract. *This paper proposes integrating an energy gas turbine expander unit (EGTEU) and a proton exchange membrane (PEM) electrolysis unit into the standard technological scheme of a gas distribution station (GDS) for main gas pipelines (MGP). This solution represents an effective systematic approach to modernizing standard GDS, which not only increases their energy efficiency but also significantly reduces their environmental impact. A thermal scheme has been developed, and the operating principle of the new type of GDS is described. Based on thermodynamic analysis, the potential for generating additional electric power in the EGTEU to produce hydrogen in the PEM electrolysis unit has been evaluated.*

By modernizing standard GDS, it is possible to achieve electric power generation with an efficiency of up to 60 %, which is sufficient to power ultra-large-scale hydrogen production facilities. This presents promising opportunities for producing methane-hydrogen mixtures at GDS as a prospective fuel for consumers, which can significantly improve environmental performance compared to traditional natural gas.

Keywords: *gas distribution station, gas turbine unit, methane-hydrogen mixture, natural gas, proton exchange membrane electrolysis unit, turboexpander.*

REFERENCES

1. Decree of the Government of the Russian Federation “Energy Strategy of Russia until 2035” dated June 9, 2020, No. 1523-r. Moscow, 2020.
2. *Strebkov A.N., Osipov A.V., Zhyvronskej S.K.* Termodinamicheskie osnovy ispolzovaniya detander-kompressornoj GTU [Thermodynamic fundamentals of using GTU expander-compressor] // Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie. 2021. № 1. P. 166–181. DOI: 10.18698/0236-3941-2021-1-166-184. (In Russian)
3. *Tkachenko V.V., Girsh S.M.* Analiz i obosnovanie effektivnosti primeneniya detander-generatornyh agregatov v energeticheskikh sistemah [Analysis and substantiation of efficiency of use of detan-der-generator units in power systems] // Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. 2019. № 1. P. 82–92. (In Russian)
4. Hydrogen PEM Electrolyzers [Online]. Available: <https://gasonsita.ru/hydrogen-pem> (Accessed: 27.07.2024).
5. Rosatom Developed a New Electrolysis Unit [Online]. Available: <https://stranarosatom.ru/2023/05/28/rosatom-razrabotal-novuju-elektrol> (Accessed: 27.07.2024).
6. *Sheludko L.P., Larin E.M., Gulina S.A.* Zayavka na izobretenie “Sposob raboty gazoraspre-delitelnoj stancii s energeticheskoy regenerativnoj gazoturbodetandernoj i protonoobmennoj gidroliznoj ustanovkami i ustrojstvo dlya ego osushestvleniya” [Method of operation of a gas detection station with power regenerative gas turbine expander and proton exchange hydrolysis plants and a device for its implementation]. (In Russian)
7. *Gulina S.A., Sheludko L.P.* Modelirovanie termodinamicheskogo cikla GTD, rabotayushego na gazoobraznom toplive proizvolnogo sostava [Modeling of the thermodynamic cycle of gas turbine engines operating on gaseous fuel of arbitrary composition] // Sbornik trudov XXIX



© The Author(s), 2024

¹ Svetlana A. Gulina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Pipeline Trans.
Konstantin Y. Shabanov (Ph.D. (Techn.)).
Leonid P. Sheludko (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

- mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii “Matematicheskie metody v tehnike i tehnologii MMTT – 29”. Vol. 12. Saratov, 2016. P. 67–73. (In Russian)
8. *Gulina S.A.* Gazoturbinnye ustanovki [Gas turbine units]: uchebnoe posobie. Samara: SamGTU, 2023. 180 p. (In Russian)
 9. *Gulina S.A., Sheludko L.P.* Optimizaciya teplovyh shem kombinirovannyh gazoturbodetandernyh energeticheskikh ustanovok [Optimization of thermal schemes of combined gas turbo expander power plants] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Seriya: Tehničeskije nauki. 2023. V. 31, № 3(79). P. 22–42. DOI: 10.14498/tech.2023.3.2. (In Russian)
 10. *Yudin Yu.V., Hovanskij Ya.V., Artemev S.N.* Sovershenstvovanie sistemy teplosnabzheniya s primeneniem detander-generatornyh agregatov [Improvement of the heat supply system using expander-generator units] // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya: Tehnika i tehnologii. 2017. № 2. P. 5–10. (In Russian)
 11. *Hudolej V.I., Kokotkina A.M.* Modelirovanie i analiz ekspluacionnyh harakteristik detander-generatornyh agregatov [Modeling and analysis of operational characteristics of expander-generator units] // Nauchnyj vestnik Cherniveckogo universiteta. Mehanika, materialoznavstvo, inzhenerne obladnannya. 2016. № 795. P. 33–39.
 12. *Potehina N.V., Sorokina O.P., Pashenkin V.I.* Optimizaciya parametrov raboty detander-generatornyh agregatov dlya povysheniya energoeffektivnosti gazotransportnoj sistemy [Optimization of the parameters of the expander-generator units to increase the energy efficiency of the gas transmission system] // Promyshlennaya energetika. 2018. № 6. P. 24–28. (In Russian)
 13. *Baranov G.G., Shabalina G.M.* Vliyanie granic temperatur na parametry raboty detander-generatornyh agregatov [Influence of temperature limits on operating parameters of detander-generator units] // Teploenergetika. 2015. № 12. P. 40–43. (In Russian)
 14. *Sangeetha G., Srinivas T.* Thermodynamic analysis of combined gas turbine and organic Rankine cycle using expander-generator // Materials Today: Proceedings. 2017. Vol. 4, № 2. P. 1080–1090.
 15. *Hui S., Min J., Jiandong G., Chao H.* Thermoeconomic optimization and performance analysis of a combined cycle power plant based on an expander-generator // Energy Conversion and Management. 2016. № 108. P. 343–355.
 16. *Li J., Shu G., Yan J., Li G., Zhou B.* Performance analysis of gas turbine power plants with expander-generator unit // Energy Procedia. 2016. № 8. P. 487–492.

Original article submitted 30.12.2024

УДК 621.313

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА НЕФТЕПЕРКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЯХ

Ю.А. Макаричев¹, Н.А. Носиков²

¹Самарский государственный технический университет

Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

²ТПП «РИТЭК-Самара-Нафта» ООО «РИТЭК»

Россия, 443041, г. Самара, ул. Ленинская, 120А

E-mail: makarichev2801@mail.ru, nosikovn@yandex.ru

Аннотация. Одной из важных задач повышения энергоэффективности нефтеперекачивающих станций (НПС) магистральных нефтепроводов является проведение научно-технического анализа структуры потребления электроэнергии на основных и вспомогательных комплексах и системах оборудования. По результатам этого анализа должна строиться теоретическая модель структуры потребления электроэнергии, которая необходима для прогнозирования затрат на действующих и реконструируемых НПС с учетом изменений технологических режимов перекачки.

Существует ряд проблем при создании подобных моделей, построенных на основе отраслевых регламентов: невозможно в полной мере учесть существенные изменения, происходящие в отрасли, в связи с меняющейся геополитической обстановкой и связанными с ней процессами, влияющими на структуру энергопотребления объектов трубопроводного транспорта.

В статье изложены результаты анализа потребления электроэнергии на примере одной из типовых НПС АО «Транснефть-Приволга» для двух характерных периодов при полной и частичной загрузке станции. На основании проведенного анализа получены данные для математической модели, связывающей потребление электроэнергии с основными технологическими параметрами перекачки нефти.

Верификация теоретических положений проведена в ходе сравнения результатов моделирования с фактическими данными потребления электроэнергии на станции. Сравнение показало хорошую сходимость расчетных и инструментально зафиксированных параметров.

Ключевые слова: нефтеперекачивающая станция, электрооборудование, энергоэффективность.

Актуальность вопроса

Задачей настоящего исследования является анализ влияния наиболее важных технологических параметров, характеризующих процесс транспортировки



© Автор(ы), 2024

¹ Юрий Александрович Макаричев, доктор технических наук, профессор, и.о. декана электротехнического факультета, заведующий кафедрой электромеханики и автомобильного электрооборудования.

² Николай Александрович Носиков, аспирант кафедры электромеханики и автомобильного электрооборудования, главный энергетик – руководитель группы главного энергетика.

нефти, на потребление электроэнергии основным и вспомогательным оборудованием НПС. Разработка математической модели, описывающей зависимость электропотребления станцией от объемов перекачиваемой нефти, значения входного и выходного напора в трубопроводе, физических свойств перекачиваемого продукта, а также от режима работы вспомогательных комплексов электрооборудования, позволит рассчитывать как суммарное потребление электроэнергии НПС, так и ее удельные, на единицу продукции, значения.

Математическая модель предназначена быть основой для прогнозных расчетов потребления электроэнергии, а также для коммерческого прогнозирования электротехнических комплексов и систем действующих и реконструируемых объектов трубопроводного транспорта. С ее помощью можно решать задачи оптимизации энергопотребления, повышения эффективности оборудования и энергосбережения. Выявление потенциальных возможностей экономии и затрат на электроэнергию невозможно без математического описания указанных процессов и их анализа [9, 14, 17].

Из-за сложности и неоднозначности соотношения величины потребляемой электроэнергии и множества факторов, которые меняются не только от технологических параметров, но и даже от геополитической обстановки, получить прямую детерминированную зависимость не представляется возможным [1, 16]. Поэтому предлагаемая математическая модель была построена на основе регрессионного анализа статистического материала по одной из типовых НПС АО «Транснефть-Приволга». Причем для общности материала выбраны два периода работы трубопровода: первый – когда НПС работала практически с полной загрузкой (2004–2006 гг.), второй – когда загрузка станции была снижена более чем на 30 % (2021–2023 гг.).

Общая структура электропотребления

Используемая в настоящее время в ПАО «Транснефть» система учета потребления электроэнергии дает возможность оценить расход электроэнергии на основной технологический процесс, а также на собственные нужды НПС. Порядок планирования и учета электроэнергии определен отраслевым регламентом [13]. В соответствии с этим регламентом для планирования электропотребления требуется подготовка планов-графиков работы магистрального трубопровода на определенный период. Процесс представляет собой сложную и трудоемкую задачу и не позволяет делать достоверные прогнозы затрат на электроэнергию при существенном изменении режима перекачки нефти, и тем более при технической реконструкции станции.

Для решения этой проблемы был проведен регрессионный анализ [6, 7] и на его основе построена математическая модель электропотребления комплекса НПС по общему объему и по основным статьям технического учета электроэнергии из архивных данных автоматизированной системы учета электроэнергии на примере НПС «Б. Черниговка» Самарского РНУ АО «Транснефть-Приволга» (см. таблицу) [3–5, 10–12].

Для анализа были взяты два характерных периода, характеризующиеся существенным различием в объемах перекачки нефти: период наибольшей загрузки магистрального нефтепровода (2004–2006 гг.) и период, когда загрузка нефтепровода значительно снизилась, в основном по причине геополитических событий (2021–2023 гг.).

Потребление электроэнергии НПС «Б. Черниговка» в 2004–2026 и 2021–2023 гг.

Показатель	2004 г.	2005 г.	2006 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
ТТР (товаротранспортная работа), <i>A</i> , млн т·км	1662	1681	1727	1339	1038	1135
Общее потребление электроэнергии, \mathcal{E}_{Σ} , тыс. кВт·ч	36691	37963	38615	25595	17791	19439
Потребление электроэнергии на транспорт нефти, \mathcal{E}_T , тыс. кВт·ч	35601	36883	37524	24091	16469	18303
Потребление электроэнергии на транспорт нефти, % от \mathcal{E}_{Σ}	97,03	97,16	97,17	94,12	92,57	94,16
Затраты электроэнергии на вспомогательные системы, $\mathcal{E}_{вс}$, тыс. кВт·ч	525	520	518	780	658	465
Затраты электроэнергии на вспомогательные системы, % от \mathcal{E}_{Σ}	1,43	1,37	1,34	3,05	3,7	2,39
Затраты электроэнергии на коммунально-бытовое потребление, $\mathcal{E}_к$, тыс. кВт·ч	255	250	253	385	375	379
Затраты электроэнергии на коммунально-бытовое потребление, % от \mathcal{E}_{Σ}	0,69	0,66	0,66	1,5	2,11	1,95
Затраты электроэнергии на освещение, $\mathcal{E}_о$, тыс. кВт·ч	210	210	220	180	178	177
Затраты электроэнергии на освещение, % от \mathcal{E}_{Σ}	0,57	0,55	0,57	0,7	1	0,91
Затраты электроэнергии на «Прочее потребление», $\mathcal{E}_п$, тыс. кВт·ч	100	100	100	159	111	115
Затраты электроэнергии на «Прочее потребление», % от \mathcal{E}_{Σ}	0,27	0,26	0,26	0,62	0,62	0,59
Удельное потребление электроэнергии на ТТР, $W_{ттр}$, тыс. кВт·ч/млн т·км	21,42	21,94	21,73	17,99	15,87	16,13

Структуру потребляемой электроэнергии отображают диаграммы на рис. 1 (2004 г.) и рис. 2 (2023 г.).

Как следует из приведенных данных, наибольший удельный вес имеет потребление электроэнергии основным оборудованием на транспорт нефти. В 2004 г. на транспорт нефти приходилось 97,03 % от общего потребления, в 2005 г. – 97,16 %, в 2006 г. – 97,17 %, в 2021 г. – 94,12 %, в 2022 г. – 92,57 %, в 2023 г. – 94,16 %. Удельный вес этой составляющей остается достаточно стабильным – изменение составляет немногим более 3 % и зависит в большей мере от загрузки магистрального нефтепровода.

Вторым по значимости является потребление электроэнергии вспомогательными системами. Удельный вес потребления по этой статье изменялся за рассматриваемые годы следующим образом: в первый период – от 1,43 % в 2004 г. до 1,34 % в 2006 г., во второй период – от 3,05 % в 2021 г. до 2,39 % в 2023 г. Рост этой составляющей во втором рассматриваемом периоде связан с проводимыми работами по модернизации нефтеперекачивающей станции и увеличением электроприемников вспомогательного оборудования (электроприводные устрой-

ства запорной арматуры, насосное оборудование, вентиляция, системы телемеханизации и автоматизации).

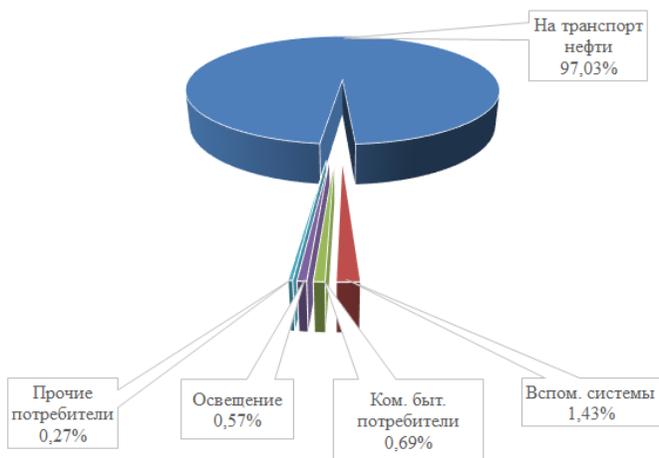


Рис. 1. Структура потребления электроэнергии в 2004 г.

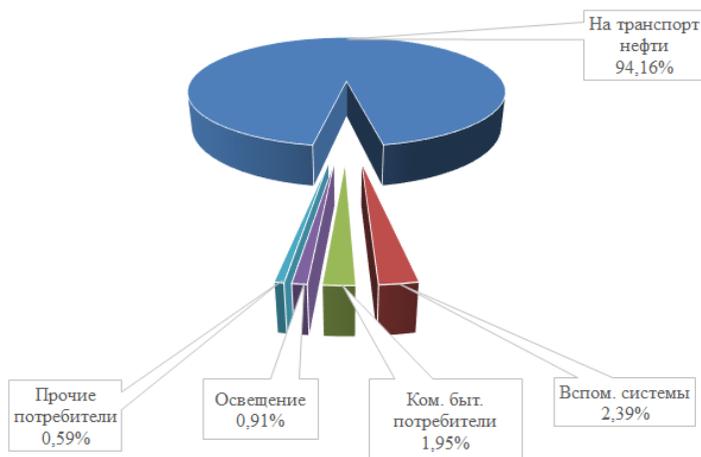


Рис. 2. Структура потребления электроэнергии в 2023 г.

Третьим по удельному весу является потребление электроэнергии на коммунально-бытовые нужды. По этой статье расходуется около 2 % от общего потребления электроэнергии. Во втором рассматриваемом периоде также отмечается рост потребления электроэнергии по этой статье. Это связано, в первую очередь, с улучшениями условий для работы и отдыха персонала. В этот период введены в эксплуатацию вахтовый жилой комплекс для командированного персонала, столовая для работников НПС, учебный класс.

Потребление электроэнергии на освещение на рассматриваемой станции составляет около 1 % от общего потребления электроэнергии и зависит, как правило, от общей площади станции и ее периметра. Оно может достигать 1,5 % от

общего потребления станции. Потребление электроэнергии на освещение во втором рассматриваемом периоде сократилось несмотря на увеличение количества осветительных приборов. Это связано с переходом на энергосберегающие осветительные приборы со светодиодными лампами и матрицами.

Анализ структуры электропотребления свидетельствует о достаточно стабильном весе отдельных составляющих и о доминирующем значении потребления электроэнергии на транспорт нефти.

Анализ общего потребления электроэнергии \mathcal{E}_Σ , а также потребления электроэнергии на транспорт нефти \mathcal{E}_T и выполненной товаротранспортной работы (ТТР) показывает, что во втором периоде по сравнению первым ТТР уменьшилась более чем на 30 %, при этом общее потребление энергии снизилось на 44,5 %.

Одним из наиболее информативных показателей энергетической эффективности технологических процессов транспорта нефти является удельный расход электроэнергии на единицу выполненной ТТР – $W_{уд}$, тыс. кВт·ч/млн т·км.

Удельный расход электроэнергии на единицу ТТР может служить основным интегральным показателем эффективности использования электроэнергии:

$$W_{ТТР} = \frac{\mathcal{E}_T}{A},$$

где \mathcal{E}_T – потребление электроэнергии на транспорт нефти, тыс. кВт·ч; A – ТТР, млн т·км.

На рис. 3 показана динамика изменения удельного потребления электроэнергии на ТТР.

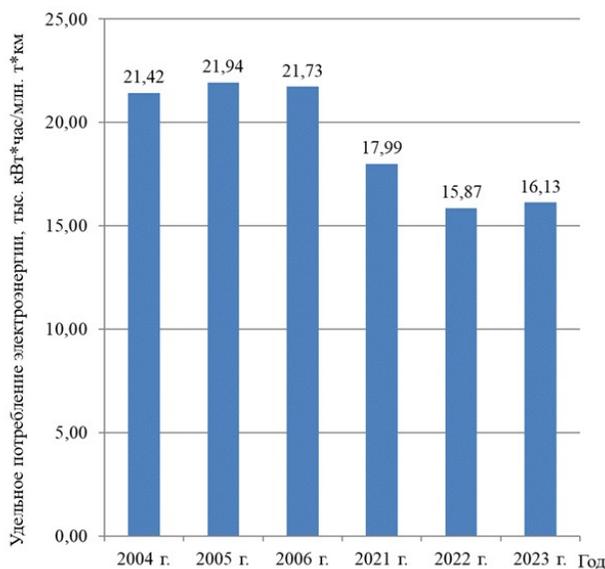


Рис. 3. Удельное потребление электроэнергии НПС

Основными электроприемниками нефтеперекачивающей станции являются электроприемники технологического оборудования, обеспечивающего транспорт нефти: подпорные (ПНА) и магистральные (МНА) насосные агрегаты. Мощность ПНА может достигать 2000 кВт, МНА – 8000 кВт.

Как следует из приведенных данных, в структуре потребления электроэнергии на ТТР наибольший удельный вес имеет потребление на транспорт нефти

основными насосными агрегатами. Удельный вес этой составляющей по годам оставался достаточно стабильным и составлял более 94 % от общего потребления. В связи с изложенным основное внимание при исследовании следует уделить анализу эффективности работы ПНА и МНА.

Физические основы модели удельного электропотребления приемниками НПС

Затраты электроэнергии на транспорт нефти определяются количеством и временем работы ПНА и МНА, а также степенью загрузки электродвигателей, которая зависит от производительности насосов. Коэффициент загрузки единичного электродвигателя при его питании напрямую от сети (без частотного преобразователя) в процессе работы, как правило, остается неизменным.

Количество работающих насосов и время их работы определяются прежде всего параметрами рабочего режима:

- объемом перекачиваемой нефти;
- давлением нефти на выходе из насоса.

Кроме плановых диспетчерских воздействий на работу магистрального нефтепровода (МНП) при заданном режиме, изменение пропускной способности всего эксплуатационного участка может произойти из-за влияния следующих факторов:

- переменная нагрузка нефтепровода, обусловленная графиком поставок нефти с промыслов, других нефтепроводов и (или) нефтеперерабатывающих заводов;

- изменение реологических характеристик перекачиваемых жидкостей, вызванное сезонными и местными изменениями температуры грунта, последовательной перекачкой партий разных сортов нефти с различным содержанием воды, парафинов, растворенного газа и т. д.;

- технологические факторы – изменение параметров насосов, их включение и выключение, наличие запасов нефти или свободных емкостей, изменение объема приемо-сдаточных операций, нестационарных процессов и т. д.;

- аварийные и ремонтные ситуации, вызванные авариями на линейной части нефтепровода или отказами оборудования.

Одни из этих факторов действуют систематически, другие – периодически или случайно. Все это создает условия, при которых режимы работы системы «питающая электрическая сеть – электродвигатель – насос – нефтепровод» непрерывно меняются во времени.

Колебания пропускной способности нефтепровода неизбежны, так как невозможно устранить воздействие всех изложенных факторов. Это затрудняет эксплуатацию нефтепроводов, приводит к повышенным затратам электроэнергии, что соответственно приводит к увеличению себестоимости перекачки, снижает надежность работы нефтепроводов. Неравномерность перекачки особенно отрицательно сказывается на КПД насосов и электродвигателей и расходе электроэнергии [8].

Эффективность работы насосов может быть охарактеризована удельными затратами электроэнергии на единицу объема перекачиваемой нефти. Вследствие этого возникает необходимость разработки такой математической модели, которая учитывала бы важнейшие параметры функционирования насосов.

Обозначим Q , т – количество перекачиваемой нефти; ΔP , кгс/см² – перепад давления, создаваемый центробежными насосами; ρ – плотность нефти, кг/м³; v –

вязкость нефти, сСт ($1\text{сСт} = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$); T – температуру нефти, градусов К, в МНП после смешения потоков от печей подогрева нефти и через байпас. При параллельном включении насосов, как в рассматриваемом случае, ΔP – разность между напором на выходном и всасывающем коллекторах. В случае последовательного соединения насосов под ΔP следует понимать разность между напором на выходе последнего и напором на входе первого насосов. Значение температуры T при прогнозных расчетах выбирается с учетом опыта эксплуатации нефтепровода по статистическим данным. Требуется, чтобы температура нефти в конце технологического участка была не менее величины, определенной технологическим регламентом.

Анализ расходов на электроэнергию по НПС «Б. Черниговка» Самарского РНУ АО «Транснефть-Приволга» показал, что наиболее значимыми переменными, влияющими на расход электроэнергии, являются количество перекачиваемой нефти и перепад давления, создаваемый центробежным насосом. В меньшей степени – температура нефти. Такие параметры, как плотность и вязкость перекачиваемого продукта, в рассматриваемой математической модели можно из анализа исключить, так как, несмотря на их существенное влияние на расход электроэнергии, для определенного МНП реологические характеристики нефти остаются постоянными. Это обусловлено тем, что свойства перекачиваемой нефти должны отвечать требованиям, заданным для определенного сорта. Разные товарные марки нефти перекачивают по разным нефтепроводам. Поэтому в предлагаемой математической модели в качестве независимых факторов были использованы три параметра: ΔP , Q и T .

В качестве функции регрессии предложен полный полином второго порядка, учитывающий как линейные члены $k_1\Delta P$, k_2Q , k_3T , так и нелинейные элементы парного $k_{12}\Delta PQ$ и тройного $k_{123}\Delta PQT$ взаимодействия, а также квадратичные члены $k_{11}\Delta P^2$, $k_{22}Q^2$, $k_{33}T^2$:

$$\text{Э}_{\text{расч}} = k_1\Delta P + k_2Q + k_3T + k_{123}\Delta PQT + k_{11}\Delta P^2 + k_{22}Q^2 + k_{33}T^2. \quad (1)$$

Коэффициенты весомости \mathbf{K} модели вычислены методом наименьших квадратов матричным способом [2]:

$$\mathbf{K} = (\mathbf{X}^T * \mathbf{X})^{-1} * \mathbf{X}^T * \mathbf{Y}, \quad (2)$$

где

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 & Q_1 & T_1 & \Delta P_1 Q_1 T_1 & \Delta P_1^2 & Q_1^2 & T_1^2 \\ \Delta P_2 & Q_2 & T_2 & \Delta P_2 Q_2 T_2 & \Delta P_2^2 & Q_2^2 & T_2^2 \\ \Delta P_3 & Q_3 & T_3 & \Delta P_3 Q_3 T_3 & \Delta P_3^2 & Q_3^2 & T_3^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta P_n & Q_n & T_n & \Delta P_n Q_n T_n & \Delta P_n^2 & Q_n^2 & T_n^2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} E_{1\text{опыт}} \\ E_{2\text{опыт}} \\ E_{3\text{опыт}} \\ \dots \\ E_{n\text{опыт}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

\mathbf{X} – исходная система нелинейных уравнений регрессии; \mathbf{Y} – матрица-столбец потребления электроэнергии, полученная по результатам обработки статистических данных, взятых из мониторинга электропотребления НПС (кВт·час). Данные определялись для фиксированных промежутков времени с относительно постоянными технологическими параметрами перекачки нефти.

Коэффициенты весомости при независимых факторах и их квадратичных функциях определялись в виде матрицы вектор-столбца:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_{123} \\ k_{11} \\ k_{22} \\ k_{33} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Для периода 2021–2023 гг. были рассчитаны коэффициенты регрессии матрицы математической модели для НПС «Б. Черниговка»:

$$k_1 = -121,4; k_2 = 0,474; k_3 = 18,322;$$

$$k_{123} = 2,403 \cdot 10^{-4}; k_{11} = 1,006; k_{22} = -6,659 \cdot 10^{-4}; k_{33} = -0,032.$$

Коэффициенты при квадратичных членах, например k_{11} , имеют величину, даже превышающую значение коэффициента линейного члена k_2 , и, следовательно, не могут быть исключены из анализа.

Значения величин для сравнения результатов расчета по математической модели и фактического электропотребления приведены на рис. 4. Расчет выполнен на основе данных инструментального контроля работы МН за 2021–2023 гг. Опытные значения выбирались по результатам мониторинга электропотребления МНП (кВт·час). Данные определялись для фиксированных промежутков времени с постоянными (установившимися) технологическими параметрами перекачки нефти при работе МНП в выбранный промежуток времени без смены режима.



Рис. 4. Опытная и расчетная диаграммы энергопотребления

Адекватность результатов, полученных по представленной математической модели, была оценена с помощью среднеквадратичной погрешности по отношению к фактическим данным, зафиксированным инструментально в рассматриваемые периоды работы станции:

$$\xi = \frac{\sqrt{\sum_1^N \Delta \varepsilon^2}}{N * E_{\text{опыт. ср.}}} \quad (6)$$

Это значение составило $\zeta = 0,69 \%$.

Таким образом, разработанная математическая модель дает хорошее совпадение расчетных характеристик с опытными [15].

Основные результаты и выводы

1. Определяющими технологическими параметрами процесса транспорта нефти, изменение которых существенно влияет на величину потребления электроэнергии, являются: количество перекачиваемой нефти; перепад давления, создаваемый центробежными насосами; температура входящей на станцию нефти.

2. Разработанная на основе обработки опытных данных математическая модель, представляющая зависимость электропотребления от объема перекачиваемой нефти, перепада давления в МНП и температуры нефти, отличается от используемых в настоящее время на практике методик расчета, основанных на величине установленной мощности потребителей электроэнергии и прогнозируемого коэффициента загрузки оборудования, позволяет более точно определить суммарное количество потребляемой электроэнергии и ее удельное значение на единицу транспортируемой продукции.

3. Расчетная математическая модель показала свою универсальность и адекватность для двух периодов эксплуатации НПС, существенно отличающихся по технологической нагрузке: с 2004 по 2006 гг., когда станция работала на практически полную проектную мощность, и с 2021 по 2023 гг., при нагрузке станции не более 70 %.

4. Разработанная математическая модель применима при прогнозировании величины потребления электроэнергии в коммерческих расчетах и разработке перспективных планов развития и реконструкции НПС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kim G., Lee G., An S., Lee J. Forecasting future electric power consumption in Busan New Port using a deep learning model // The Asian Journal of Shipping and Logistics. 2023. Vol. 39. Iss. 2. P. 78–93. DOI: 10.1016/j.ajsl.2023.04.001. EDN: VKTIVT
2. Адлер Ю.П. [и др.]. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 278 с. EDN: TOBZDM.
3. АО «Транснефть-Приволга». Годовой отчет за 2021 год. [Б. м.: б. и.], 2021.
4. АО «Транснефть-Приволга». Годовой отчет за 2022 год. [Б. м.: б. и.], 2022.
5. АО «Транснефть-Приволга». Годовой отчет за 2023 год. [Б. м.: б. и.], 2023.
6. Драйнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: в 2 кн. Кн. 1.; пер. с англ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.
7. Драйнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: в 2 кн. Кн. 2. пер. с англ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 1987. 351 с.
8. Зайцев Л.А., Ясинский Г.С. Регулирование режимов магистральных нефтепроводов. М.: Недра, 1980. 187 с.
9. Рахмонов И.У., Ушаков В.Я., Нажимова А.М., Обидов К.К., Сулейманов С.Р. Математическое моделирование минимизации расходов электроэнергии промышленными предприятиями с непрерывным характером производства // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 4. С. 43–51. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4423. EDN:GTEVCP.
10. ОАО «Приволжскнефтепровод». Годовой отчет за 2004 год. [Б. м.: б. и.], 2004.
11. ОАО «Приволжскнефтепровод». Годовой отчет за 2005 год. [Б. м.: б. и.], 2005.
12. ОАО «Приволжскнефтепровод». Годовой отчет за 2006 год. [Б. м.: б. и.], 2006.

13. ОР-91.140.50-КТН-0397-24. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Потребление электроэнергии (мощности). Порядок планирования и учета. М.: ПАО Транснефть, 2024. 141 с.
14. *Устюгов Н.В., Проталинский О.М.* Математическая модель потребления электроэнергии в организационно-технической системе // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 3. С. 116–124. DOI: 10.24143/2072-9502-2020-3-116-124. EDN: ХАІКРХ.
15. *Черноруцкий И.Г.* Методы принятия решений. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 408 с. EDN: QQIXNX.
16. *Шаюхов Т.Т.* Расчет удельных норм и прогнозирование электропотребления на промышленных предприятиях // Инновационный транспорт. 2016. № 3 (21). С. 74. DOI: 10.20291/2311-164X-2016-3-8-12. EDN: WXOVQX.
17. *Шаюхов Т.Т.* Математическое моделирование влияния внешних факторов на параметры электропотребления // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9. № 5. EDN: YKWHDE.

Статья поступила в редакцию 06.12.2024

MATHEMATICAL MODEL OF ELECTRICITY CONSUMPTION AT OIL PUMPING STATIONS

Yu.A. Makarichev¹, N.A. Nosikov²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

² LLC «RITEK-Samara-Nafta» TPP «RITEK»
120A, Leninskaya str., Samara, 443041, Russian Federation

E-mail: makarichev2801@mail.ru, nosikovn@yandex.ru

Abstract. *One of the key tasks for improving the energy efficiency of oil pumping stations (OPS) in main oil pipelines is conducting a scientific and technical analysis of the electricity consumption structure across primary and auxiliary complexes and equipment systems. Based on the results of this analysis, a theoretical model of the electricity consumption structure should be developed, which is necessary for forecasting costs at existing and reconstructed OPS, taking into account changes in pumping technological regimes.*

There are several challenges in creating such models based on industry regulations, as they cannot fully account for significant changes occurring in the industry due to the evolving geopolitical situation and related processes affecting the energy consumption structure of pipeline transport facilities.

The article presents the results of an analysis of electricity consumption using the example of a typical OPS of JSC "Transneft-Volga Region" for two characteristic periods: full and partial station load. Based on the analysis, data were obtained for a mathematical model linking electricity consumption with the main technological parameters of oil pumping.

Verification of the theoretical assumptions was carried out by comparing the simulation results with actual electricity consumption data at the station. The comparison showed good agreement between the calculated and instrumentally recorded parameters.

Keywords: *oil pumping station, electrical equipment, energy efficiency.*

REFERENCES

1. Kim G., Lee G., An S., Lee J. Forecasting future electric power consumption in Busan New Port using a deep learning model // The Asian Journal of Shipping and Logistics. 2023. Vol. 39. Iss. 2. P. 78-93. DOI: 10.1016/j.ajsl.2023.04.001.
2. Adler Yu.P. [i dr.]. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh uslovi [Experiment Design in Search of Optimal Conditions]. M.: Nauka, 1976. 278 p. (In Russian)
3. AO «Transneft-Privolga». Godovoj otchet za 2021 god [Annual Report 2021]. [B. m.: b. i., 2021. (In Russian)
4. AO «Transneft-Privolga». Godovoj otchet za 2022 god [Annual Report 2022]. [B. m.: b. i., 2022. (In Russian)
5. AO «Transneft-Privolga». Godovoj otchet za 2023 god [Annual Report 2023]. [B. m.: b. i., 2023. (In Russian)
6. Drajper N., Smit G. Prikladnoj regressionnyj analiz [Applied Regression Analysis]: v 2 kn. Kn. 1.; per. s angl. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Finansy i statistika, 1986. 366 p. (In Russian)
7. Drajper N., Smit G. Prikladnoj regressionnyj analiz [Applied Regression Analysis]: v 2 kn. Kn. 2. per. s angl. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Finansy i statistika, 1987. 351 p. (In Russian)



© The Author(s), 2024

¹ Yuri A. Makarichev (Dr. (Techn.)), Professor, Acting Dean of Electrical Engineering Faculty, Head Dept. of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment.

² Nikolai A. Nosikov, Postgraduate Student Dept. of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment, Chief Power Engineer - Head of the Chief Power Engineer Group.

8. *Zajcev L.A., Yasinskij G.S.* Regulirovanie rezhimov magistral'nyh nefteprovodov [Main Oil Pipeline Operation Modes Regulation]. M.: Nedra, 1980. 187 p. (In Russian)
9. *Rahmonov I.U., Ushakov V. Ya., Nazhimova A.M., Obidov K.K., Sulejmanov S.R.* Matematicheskoe modelirovanie minimizacii raskhodov elektroenergii promyshlenny-mi predpriyatiyami s nepreryvnym harakterom proizvodstva [Mathematical Modeling of Electricity Cost Minimization for Industrial Enterprises with Continuous Production Process] // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov.* 2024. V. 335. № 4. P. 43-51. DOI:10.18799/24131830/2024/4/4423.
10. OAO «Privolzhsknefteprovod». Godovoj otchet za 2004 god [Annual Report 2004]. [B. m.: b. i.], 2004. (In Russian)
11. OAO «Privolzhsknefteprovod». Godovoj otchet za 2005 god [Annual Report 2005]. [B. m.: b. i.], 2005. (In Russian)
12. OAO «Privolzhsknefteprovod». Godovoj otchet za 2006 god [Annual Report 2004]. [B. m.: b. i.], 2006. (In Russian)
13. OR-91.140.50-KTN-0397-24. Magistralnyj truboprovodnyj transport nefti i nefteproduktov. Potreblenie elektroenergii (moshchnosti). Poryadok planirovaniya i ucheta [Main Pipeline Transport of Oil and Oil Products. Electricity (Power) Consumption. Planning and Accounting Procedures]. M.: PAO Transneft, 2024. 141 p. (In Russian)
14. *Ustyugov N.V., Protalinskij O.M.* Matematicheskaya model' potrebleniya elektro-energii v organizacionno-tekhniceskoy sisteme [Mathematical Model of Electricity Consumption in Organizational-Technical Systems] // *Vestnik Astrahanskogo gosudar-stvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika.* 2020. № 3. P. 116-124. DOI:10.24143/2072-9502-2020-3-116-124. (In Russian)
15. *Chernoruckij I.G.* Metody prinyatiya reshenij [Decision Making Methods]. SPb: BHV-Peterburg, 2005. 408 p. (In Russian)
16. *Shayuhov T.T.* Raschet udelnyh norm i prognozirovanie elektropotrebleniya na promyshlennyh predpriyatiyah [Calculation of Specific Rates and Forecasting of Electricity Consumption at Industrial Enterprises]// *Innovacionnyj transport.* 2016. № 3(21). P. 74. DOI:10.20291/2311-164X-2016-3-8-12. (In Russian)
17. *Shayuhov T.T.* Matematicheskoe modelirovanie vliyaniya vneshnih faktorov na parametry elektropotrebleniya [Mathematical Modeling of External Factors Influence on Electricity Consumption Parameters] // *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE».* 2017. V.9. № 5. EDN: YKWHDE.

Original article submitted 06.12.2024 г.