

На правах рукописи



ПАЛКИН Георгий Александрович

**УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ УЧАСТКА
ПЕРВОГО ПОДЪЕМА В СЛОЖНЫХ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ
ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Забайкальский государственный университет» на кафедре энергетики.

Научный руководитель –

Батухтин Андрей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, декан энергетического факультета, Забайкальский государственный университет.

Официальные оппоненты:

Карякин Александр Ливиевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры электрификации горных предприятий, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.

Менакер Константин Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение», Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Чита.

Ведущая организация –

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск.

Защита состоится 29 июня 2022 г., в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 909.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на официальном сайте ЮУрГУ по адресу: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229805/palkin-georgiy-aleksandrovich>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76, гл. корпус, Учёный совет ЮУрГУ, тел./факс: +7 (351)-267-91-23, e-mail: grigorevma@susu.ru

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.298.05
д-р техн. наук. профессор



М.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Оптимизация режимов работы электротехнических комплексов систем водоснабжения является очень важной составляющей эффективного функционирования гражданских и промышленных объектов. Насосы систем водоснабжения ежегодно потребляют от 10 до 20 % от общей выработки электроэнергии, при этом перебои в работе оборудования насосных станций могут привести к прекращению подачи воды и тяжелым экономическим и социальным последствиям.

На территории Российской Федерации (РФ), в том числе и в Забайкальском крае, широко распространены системы водоснабжения, использующие накапливающие резервуары. Территория от водозабора до накапливающего резервуара называется участком первого подъема. Участок первого подъема является важным звеном системы водоснабжения, поскольку обеспечивает забор воды из естественного источника для последующего распределения и подачи потребителю. Ключевым элементом электротехнического комплекса участка первого подъема (ЭТК УПП) является электропривод скважинного насоса или насосов, тесно связанный технологическим процессом с трубопроводной системой и накапливающим резервуаром.

Превышение производительности ЭТК УПП над уровнем водопотребления является распространенной проблемой, которая ведет к переливу воды из накапливающего резервуара и неоправданным затратам электроэнергии на переработку электроприводов насосов, величина которых в некоторых случаях может достигать 50 % от общего энергопотребления. Второй серьезной проблемой является возникновение аварийных ситуаций в ЭТК УПП. Особенно актуальна данная проблема в районах крайнего Севера и подобных территориях со сложными природными условиями, такими как: отрицательные температуры окружающей среды, болотистые грунты, резкопересеченная местность и вечные мерзлоты. Распространенной аварией в данных условиях является замерзание перекачиваемой воды в трубопроводе при снижении производительности электропривода насоса.

Соответственно, важной и актуальной задачей является снижение потерь водных и энергетических ресурсов при эксплуатации ЭТК УПП, за счет разработки и внедрения системы автоматического управления электроприводами насосов, учитывающей тепловые параметры трубопровода для предотвращения возможных аварийных ситуаций, связанных с замерзанием воды.

Задачи, решаемые в диссертационном исследовании, затрагивают пункты Федеральной Государственной программы «Чистая вода», реализуемой с 01.10.2018 по 25.12.2024, а также региональной программы Забайкальского края «Повышение качества водоснабжения Забайкальского края» (Постановление Правительства Забайкальского края от 31 июля 2019 года № 312).

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в изучение проблем управления электротехническими комплексами систем водоснабжения внесли ученые и исследователи: Лиходеев А.Д., Фащиленко В.Н., Попкович Г.С., Горюнов А.Н., Карелин В.Я., Лезнов Б.С., Гумерова Р.Х., Черняхов-

ский В.А., Мустафин Э.Н., Tamminen J., Zhuan X., Jahmeerbacus M. I., Wanjiru E.M. и др.

Вопросами эксплуатации систем водоснабжения в сложных природных условиях и защиты трубопроводов от замерзания занимались следующие ученые: Терехов Л.Д., Майны Ш.Б., Акимов О.В., Фаттахов И.Г., Китаев Д.Н., Самарин О.Д., Моисеев Б.В., Гинзбург А.В., Петров В.М., Карев Д.С., Кузнецов Г.В., Zhao J.Q., Rajani B.B., Daigle L., Sepehr K., Goodrich L.E., Reeve H.E. и др.

Моделированием электротехнических комплексов и иных элементов систем водоснабжения занимались следующие ученые: Дадабаев Ш.Т., Горюнов А.Н., Гинзбург А.В., Батухтин А.Г., Терехов Л.Д., Лиходеев А.Д., Макаров А.М., Гумерова Р.Х., Черняховский В.А., Моисеев Б.В., Карев Д.С., Sirovú M., Kera U., Yacamini R., Gevorkov L., Rassõlkin A. и др.

Обзор существующих работ по тематике исследования выявил недостаточную проработанность вопроса, связанного с изменением тепловых параметров транспортируемой воды при регулировании производительности ЭТК УПП. При этом, определенные способы защиты трубопроводов от замерзания могут быть нерентабельными в текущих условиях, либо требуют выполнения дополнительной оптимизации. Для предварительного исследования режимов работы ЭТК УПП, определения оптимальных способов и параметров процесса управления, целесообразно использовать методы компьютерного имитационного моделирования. В рассмотренных работах выявлен недостаточный уровень реализации системного подхода к анализу параметров моделируемых систем, что ограничивает возможности эффективной оценки взаимовлияния параметров ЭТК УПП различной физической природы.

Цели и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является разработка способа и системы управления ЭТК УПП, обеспечивающих повышение экономической эффективности и безаварийности участка первого подъема систем водоснабжения с накапливающим резервуаром в сложных природных условиях эксплуатации.

В соответствии с поставленной целью, в работе решаются следующие научные и практические задачи:

- анализ особенностей функционирования участков первого подъема и их электротехнических комплексов, выявление основных проблем, обзор и классификация предполагаемых путей решения;
- разработка компьютерной имитационной и лабораторной моделей участка первого подъема, охватывающих его электротехнический комплекс и систему управления.
- разработка способа управления ЭТК УПП в сложных природных условиях эксплуатации;
- разработка схемы и элементов аппаратной части системы управления;
- разработка методики оптимизации параметров ЭТК УПП для защиты трубопровода от замерзания по критерию минимальной стоимости;
- создание компьютерных средств, позволяющих выполнить предварительную оценку и оптимизацию параметров автоматизируемого объекта.

Объект исследования – электротехнические комплексы участка первого подъема систем водоснабжения с накапливающим резервуаром.

Предмет исследования – способы управления электроприводами скважинных насосов, повышающие экономическую эффективность и безаварийность участков первого подъема, эксплуатируемых в сложных природных условиях.

Научная новизна работы.

1. Разработана классификация методов изменения производительности ЭТК УПП и методов защиты трубопроводов от замерзания. Выявлено, что наиболее перспективным методом регулирования производительности является частотное управление электродвигателем насоса по контуру обратной связи, а для защиты трубопровода УПП от замерзания целесообразно применять циркуляцию воды, предварительный электроподогрев и пассивную теплоизоляцию.

2. Предложен способ управления ЭТК УПП, изменяющий подачу насоса за счет применения двухканального пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора, вычисляющего требуемую величину подачи по значениям уровня воды в резервуаре, и температуры воды в трубопроводе (подтверждено патентом РФ на изобретение № 2593649С1 от 10.08.2016 г.).

3. Разработана имитационная компьютерная модель участка первого подъема, реализованная в пакете блочного моделирования Simulink математической среды Matlab, реализующая системный подход при расчете параметров электротехнического комплекса «Электрическая сеть – Частотно регулируемый асинхронный электропривод – Насос – Трубопровод – Резервуар – Потребитель – Система управления» путем вычисления связующих параметров различной физической природы. В модели предложены выражения для расчета уровня воды в резервуаре и температуры воды в конце трубопровода, учитывающие запаздывание (задержку) изменения данных величин при динамическом изменении подачи и внешних условий. Также модель позволяет применять предложенную систему управления ЭТК УПП.

4. Получены результаты имитационного моделирования, подтверждающие эффективность предложенного способа управления ЭТК УПП.

5. Разработана методика определения наиболее экономичной комбинации способов защиты трубопровода от замерзания, основанная на многомерной условной нелинейной оптимизации стоимостной функции затрат на применение рассматриваемых способов, с учетом накладываемых ограничений.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработан лабораторный стенд для моделирования ЭТК УПП, с возможностью имитации отрицательных температур окружающей среды, позволяющий подтвердить правильность построения имитационной модели. Имитационная модель и стенд используются в учебном процессе кафедры информатики, вычислительной техники и прикладной математики Забайкальского государственного университета при изучении дисциплин «Разработка автоматизированных систем управления технологическими процессами» и «Имитационное моделирование», а также кафедры энергетики Забайкальского государственного университета при изучении дисциплины «Электрический привод».

2. Разработана аппаратная структура и программный алгоритм системы управления электротехническим комплексом первого подъема. Впервые предложено использовать датчик температуры воды в конце трубопровода для вычисления оптимальной подачи насоса, с целью предотвращения замерзания водовода в сложных природных условиях эксплуатации при изменении производительности ЭТК УПП. Система позволяет минимизировать неоправданные финансовые затраты на переработку насосов и обеспечить безаварийность УПП за счет предотвращения замерзания трубопровода.

3. Разработаны программный скрипт Matlab и компьютерное приложение, позволяющие определить тепловые параметры трубопровода и наиболее экономичный способ его защиты от замерзания при управлении ЭТК УПП.

Методология и методы диссертационного исследования. В процессе исследований использованы основы теории автоматического управления, теория электрического привода, основы гидродинамики, основы термодинамики и теплообмена, методы компьютерного имитационного моделирования и физического лабораторного эксперимента, теория вероятности и математическая статистика, методы оптимизации.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Способ и система управления ЭТК УПП, осуществляющие регулирование производительности насоса по уровню наполнения накапливающего резервуара, отличающиеся от известных обеспечением приемлемых тепловых параметров перекачиваемой воды для предотвращения замерзания трубопроводной линии в сложных природных условиях эксплуатации с минимальными экономическими затратами.

2. Математическая и имитационная компьютерная модели ЭТК УПП, отличающиеся от известных системным подходом к анализу электротехнического комплекса «Электрическая сеть – Частотно регулируемый асинхронный электропривод – Насос – Трубопровод – Резервуар – Потребитель – Система управления», учитывающие запаздывание изменения температуры воды в трубопроводе и уровня воды в резервуаре, и реализующие предложенный способ управления.

3. Методика оптимизации параметров ЭТК УПП для защиты трубопровода от замерзания по критерию минимальной стоимости, отличающаяся от известных одновременным вычислением оптимальных величин избыточной подачи насоса, предварительного водоподогрева, толщины и теплопроводности изоляции, обеспечивающих заданную температуру воды в конечной части трубопровода с минимальными капитальными и эксплуатационными затратами.

Реализация основных результатов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы были внедрены в систему водоснабжения ООО «Гарант» (в настоящее время АО «Забайкальская топливно-энергетическая компания») пгт. Новоорловск Агинского района Забайкальского края, что подтверждается актом внедрения № 225 от 23.10.2017, а также в учебный процесс кафедры информатики, вычислительной техники и прикладной математики и кафедры энергетики Забайкальского государственного университета, что подтверждается справкой о внедрении в учебный процесс.

Достоверность полученных результатов. Достоверность основных результатов диссертационного исследования подтверждаются корректным использованием соответствующих математических выражений и программных средств расчета, а также удовлетворительной сходимостью результатов компьютерного моделирования с результатами физических экспериментов в лабораторных условиях.

Апробация работы. Основные положения диссертационного исследования докладывались и обсуждались на XVIII, XIX, XX международных научно-практических конференциях «Кулагинские чтения» (г. Чита, 28 – 30 ноября 2018 и 2019 гг., 30 ноября – 4 декабря 2020 г.), 51-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (г. Новосибирск, 12 – 18 апреля 2013 г.), III и VI Всероссийских студенческих конференциях (с международным участием) «Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи» (г. Челябинск, 29-30 апреля 2014 г., 22-23 апреля 2021 г.), VI Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии» (г. Челябинск, 2015 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Электроэнергетика байкальского региона: проблемы и перспективы» (г. Улан-Удэ – с. Горячинск, 10 – 12 июня 2016), I Всероссийской научной конференции «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения» (г. Тольятти, 12 – 14 декабря 2017 г.), III Всероссийской научно-практической конференции «Наука и образование: актуальные исследования и разработки» (г. Чита, 29 – 30 апреля 2020 г.), Международной научно-технической конференции «Возобновляемая энергетика, энерго- и ресурсосбережение» International Ural Conference on Green Energy (г. Челябинск, 4 – 6 октября 2018 г.), Международной научно-практической конференции «Инновационный потенциал развития науки в современном мире: технологии, инновации, достижения» (г. Уфа, 6 декабря 2019 г.), Международной научно-технической конференции «Автоматизация» International Russian Automation Conference (г. Сочи, 6 – 12 сентября 2020 г.), Научном семинаре в рамках международной научно-технической конференции «Автоматизация»: Фундаментальные проблемы управления производственными процессами в условиях перехода к индустрии 4.0 (г. Сочи, 6 – 12 сентября 2020 г.), Международном симпозиуме «Устойчивая энергетика и энергомашиностроение – 2021: SUSE-2021» (г. Казань, 18 – 20 февраля 2021 г.).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тема диссертационного исследования соответствует следующим пунктам паспорта специальности **05.09.03:** п.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»; п.3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления»; п.4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Публикации. Результаты работы в рамках диссертации изложены в 25 печатных трудах, опубликованных лично автором либо в соавторстве, в том числе: в 2 патентах РФ на изобретение; в 2 свидетельствах о регистрации программы ЭВМ; в 2 статьях в журналах, рекомендованных ВАК, учитываемых по специальности 05.09.03; в 3 статьях в журналах, рекомендованных ВАК, учитываемых по группе специальностей 05.13.00; в 3 статьях, входящих в базу SCOPUS и Web of Science; в 1 учебном пособии.

Личный вклад автора состоит в: проведении анализа проблем эксплуатации ЭТК УПП систем водоснабжения в сложных природных условиях; построении классификации методов управления электроприводами насосов и методов защиты трубопроводов от замерзания; разработке имитационной и физической моделей участка первого подъема; подтверждении корректности имитационной модели, путем проведения вычислительных и лабораторных экспериментов; разработке способа (алгоритма), схемы и элементов аппаратной части системы управления ЭТК УПП; разработке методики и программных средств нахождения оптимальных параметров участков первого подъема, обеспечивающих защиту трубопровода от замерзания с минимальными затратами. Все приведенные работы выполнены соискателем лично под контролем научного руководителя.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа представлена на 164 страницах, содержит 157 страниц основного текста, 66 рисунков, 10 таблиц, 59 формул и 2 приложения на 7 страницах, 130 наименований библиографического списка, включая 31 наименование иностранных источников.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность доктору технических наук, профессору, профессору кафедры энергетики Забайкальского государственного университета Суворову Ивану Флегонтовичу, за неоценимую помощь на всех этапах выполнения диссертационного исследования и оперативное решение организационных вопросов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, обозначены объект и предмет исследования, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы диссертационного исследования, представлены положения, выносимые на защиту, отражены сведения о степени достоверности и апробации полученных результатов, описан личный вклад автора.

В первой главе рассматривается состояние объектов хозяйственного и питьевого водоснабжения, как основных потребителей электроэнергии в жилищно-коммунальной сфере, определены важные элементы систем водоснабжения и проблемы, возникающие при их эксплуатации. Предложены пути решения данных проблем.

Участки первого подъема являются ключевым элементом систем водоснабжения с накапливающим резервуаром. Основным потребителем электроэнергии являются водоподъемные насосы, на долю которых может приходиться до 90 % электропотребления. Избыточная производительность водоподъемных насосов влечет за собой потери электроэнергии и водных ресурсов. Потери водных ресурсов по РФ за 2019 год составили 4,5 % от общего объема перекаченной воды, а по Дальневосточному федеральному округу (ДФО) – 8,9 %. Анализ режимов работы систем водоснабжения некоторых населенных пунктов Забайкальского края показал, что потери, связанные с переработкой водоподъемных насосов, могут достигать 50 % от общего энергопотребления.

Путем классификации методов регулирования производительности ЭТК УПП выявлено, что наиболее эффективным способом является частотное управление производительностью электроприводов насосов по контуру обратной связи с применением пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора. В сложных природных условиях регулирование производительности насосов может привести к замерзанию воды в трубопроводе. Данная авария является достаточно распространенной на территории ДФО и неоднократно приводила к серьезным экономическим и социальным последствиям.

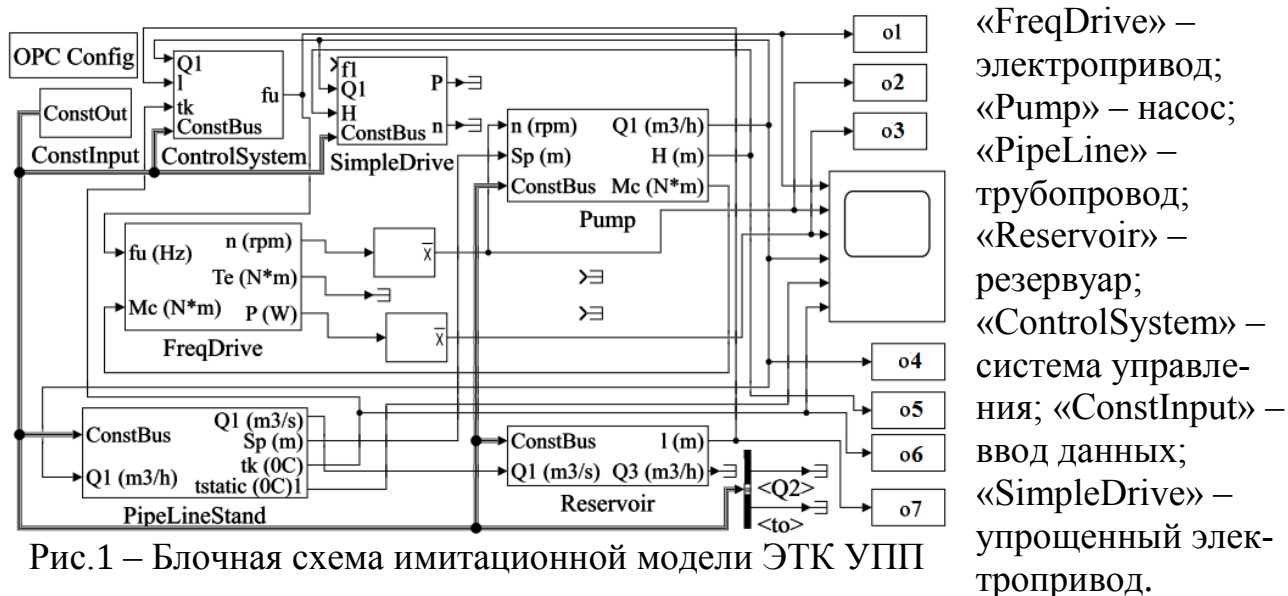
Анализ и классификация способов защиты трубопровода от замерзания показали, что одним из перспективных способов защиты трубопровода от замерзания является обеспечение достаточной интенсивности циркуляции воды в системе. На практике, при отрицательных температурах окружающей среды задается максимальная производительность ЭТК УПП, что приводит к значительной переработке насосов и снижает годовую эффективность стандартной системы управления, не учитывающей температуру воды, на 10 – 30 %, а иногда и более. В то же время, для защиты трубопровода от замерзания зачастую требуется подача, значительно ниже максимальной. Поэтому, при управлении производительностью электроприводов насосов необходимо вычислять и поддерживать оптимальную подачу, которая обеспечит защиту трубопровода от замерзания и минимизирует переработку ЭТК УПП.

Применение дополнительных способов защиты трубопровода от замерзания, таких как пассивная теплоизоляция и предварительный подогрев воды, позволяет снизить неизбежную переработку насосов, но требуют дополнительных капитальных и эксплуатационных расходов. Для определения наилучших параметров применения данных способов защиты от замерзания необходимо выполнить их оптимизацию по критерию минимальной стоимости.

Таким образом, основной целью диссертационного исследования является разработка системы управления ЭТК УПП, решающей поставленные задачи. Для оценки основных параметров ЭТК УПП в процессе исследования и настройки регулятора, а также определения технико-экономической эффективности применяемых решений необходимо разработать математическую и компьютерную имитационную модели объекта и системы управления.

Во второй главе описывается структура и основные параметры модели ЭТК УПП. Приводятся выражения для описания математической модели объекта, а также блочная структура компьютерной имитационной модели, разрабо-

танной в среде Simulink математического пакета Matlab. Адекватность имитационной модели проверяется путем сравнения результатов расчетов и физических экспериментов на лабораторном стенде, имитирующем ЭТК УПП.



Для расчета температуры воды в конце трубопровода (t_k , °C), с учетом времени переходного процесса при изменении внешних воздействий, в математической модели было предложено выражение:

где t_i – момент времени моделирования, с; t_{kn} – температура воды в конце трубопровода в начальный момент времени; Q_1 – подача (объемный расход), м³/с; L – длина трубопровода, м; d_1 – внутренний диаметр трубопровода, м; τ_n – момент времени начала переходного процесса, с; t_o – температура окружающей среды, °С; q_t – диссипативная теплота трения, Вт/м; k_1 – коэффициент теплопередачи от воды к стенке трубы, Вт/м·°С; k_{pr} – приведенный коэффициент теплопередачи, учитывающий термические свойства трубопровода, теплоизоляции и окружающей среды, Вт/м·°С; t_n – начальная температура воды, °С; C_v – объемная теплоемкость воды, Дж/м³·°С.

$$l(\tau_i) = \frac{Q_1 - Q_2}{S} \cdot (\tau_i - \tau_n) + l_n, 0 \leq l(\tau_i) \leq h. \quad (2)$$

где Q_2 – водопотребление $\text{м}^3/\text{с}$; s – площадь дна накапливающего резервуара, м^2 ; h – высота накапливающего резервуара, м .

С целью подтверждения корректности имитационной модели был разработан лабораторный стенд, имитирующий ЭТК УПП системы водоснабжения с накапливающим резервуаром (рис. 2 и рис. 3).

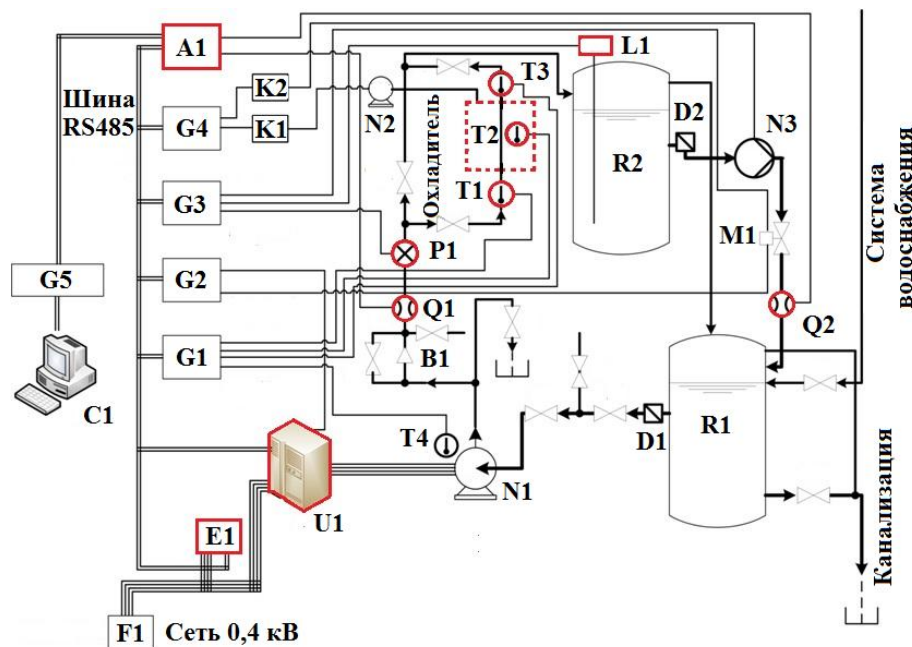


Рис. 2 – Схема лабораторного стенда

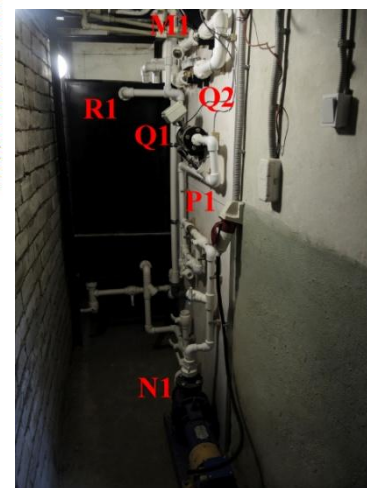


Рис. 3 – Внешний вид стенда

Для интерактивного управления лабораторным стендом, а также для отображения и сбора основной технологической информации разработано специализированное программное обеспечение, функционирующее на персональном компьютере (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ РФ №2020666293).

Результаты расчетов имитационной модели были сопоставлены, с данными, полученными экспериментальным путем на лабораторном стенде. При этом анализировались статические значения потребляемой электрической мощности, подачи и напора насоса, а также температуры воды в конце трубопровода при изменении питающих частот от 0 до 50 Гц с интервалом в 5 Гц. На рис. 4 приводятся относительные отклонения результатов расчетов и экспериментальных измерений. Также была выполнена оценка переходного процесса изменения уровня воды в резервуаре (рис. 5) и температуры в трубопроводе (рис. 6).

Значительные отклонения некоторых параметров, связанные с низкой чувствительностью измерительных приборов и особенностью выполнения экспериментов, наблюдаются на малых частотах до 25 Гц, при отсутствии подачи и ламинарном течении жидкости. Данные режимы являются нежелательными, поэтому могут быть исключены из рассмотрения. На остальной части диаграммы (рис. 4) в рабочем режиме относительные отклонения не превышают 4 %. При оценке переходных процессов разброс экспериментальных и расчетных величин также является незначительным, что подтверждает адекватность разработанной имитационной модели.

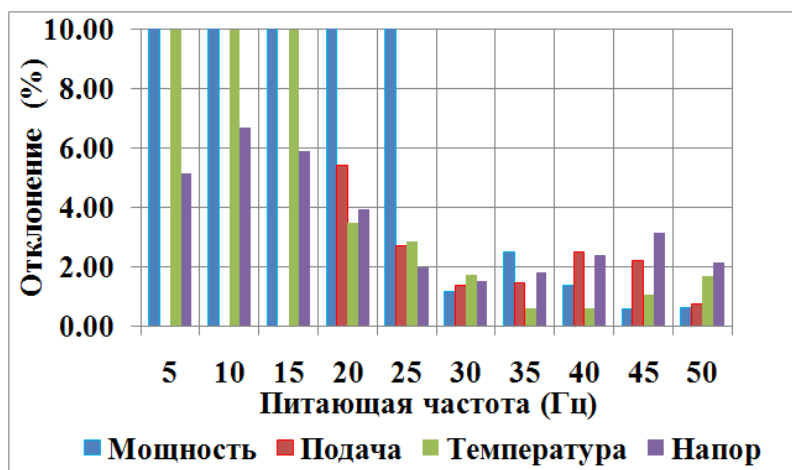


Рис. 4 – Относительные отклонения

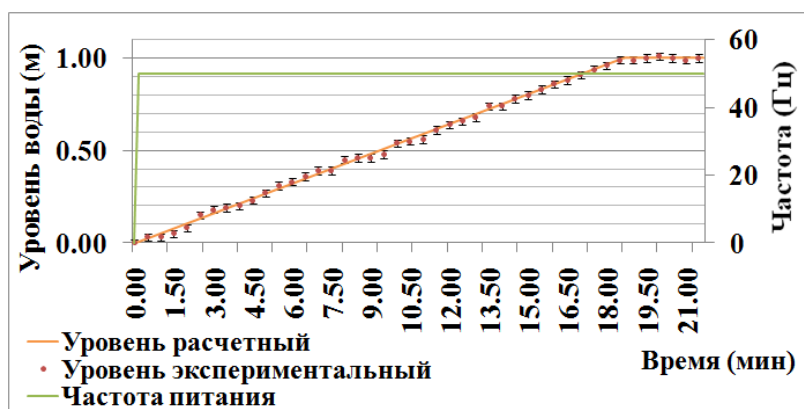


Рис. 5 – Процесс наполнения резервуара

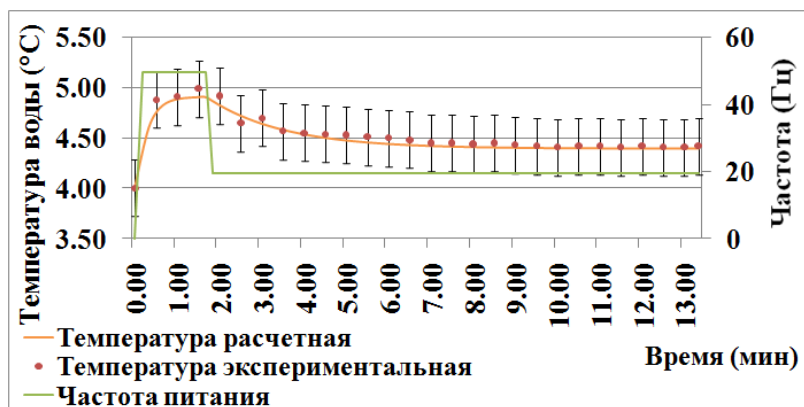


Рис. 6 – Процесс изменения температуры

ков при помощи двух ПИД - каналов. Далее сигналы приводятся к размерности подачи коэффициентами масштабирования, и наибольший из них определяет изменение уставки по подаче, которая формирует управляющее воздействие для частотного преобразователя (Пат. РФ № 2593649С1).

Для реализации поставленной задачи была разработана блочная структурная схема системы управления (рис. 7). На схеме присутствуют следующие обозначения: 1 – расходомер; 2 – датчик температуры воды в трубопроводе; 3 – датчик уровня воды в резервуаре; 4, 6, 8 – ПИД регулятор по уровню; 5, 7, 9 – ПИД регулятор по температуре; 10 – элемент вычисления уставки подачи; 11 – регулируемый электропривод насоса; 12, 13, 14 15, 16 – элементы сравнения и сумматоры.

В третьей главе описывается предложенный способ и система управления ЭТК УПП, позволяющие минимизировать переработку электроприводов насосов и обеспечить защиту трубопровода от замерзания в сложных природных условиях. При помощи имитационной модели выполнялась настройка коэффициентов регулятора, а также оценка снижения уровня потребляемой мощности по сравнению с процессом без применения автоматизации и стандартной системой регулирования, не учитывающей температуру. Предложена аппаратная структура системы управления ЭТК УПП и устройство управления авторской сборки.

Способ управления заключается в параллельном расчете двух управляющих сигналов по уровню воды в резервуаре и температуры воды в конце трубопровода. Сигналы вычисляются на основании обратных связей от соответствующих датчиков

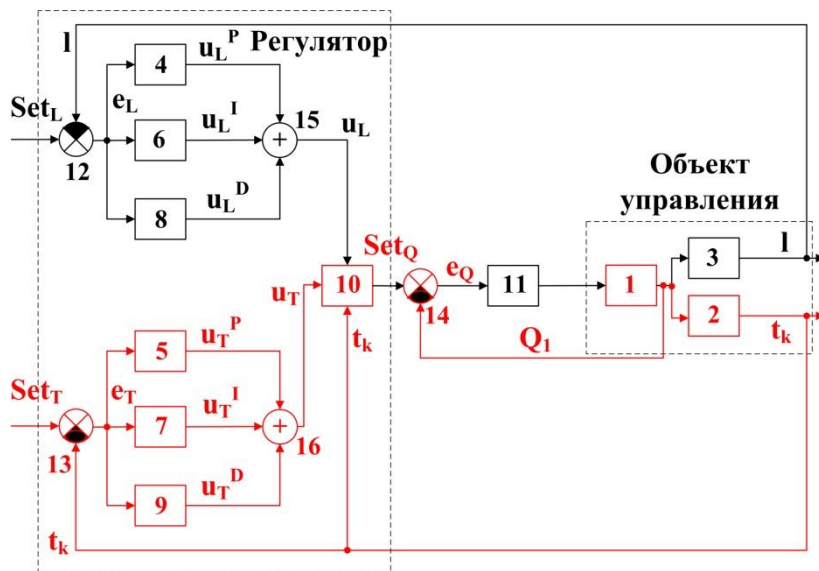


Рис. 7 – Блочная схема системы управления

u_L^P , u_L^I , u_L^D , u_L – пропорциональная, интегральная, дифференциальная составляющие и полный управляющий сигнал по уровню; u_T^P , u_T^I , u_T^D , u_T – пропорциональная, интегральная, дифференциальная составляющие и полный управляющий сигнал по температуре; e_Q , e_L , e_T – ошибки регулирования от уставок подачи Set_Q , уровня Set_L и температуры Set_T .

Для описания логики работы блока 10 впервые предложено соотношение:

$$\begin{cases} Set_Q(i) = Set_Q(i-1) + \max\left(\frac{Q_n}{h} \cdot u_L(i), \frac{Q_n}{\max(t_o(i), t_n(i))} \cdot u_T(i)\right), & t_k(i) \geq Set_T(i) - d, \\ Set_Q(i) = Q_n, & t_k(i) < Set_T(i) - d \end{cases}, \quad (3)$$

где Q_n – номинальная подача, $м^3/с$; d – величина допустимого отклонения требуемой температуры.

Способ обеспечивает эффективное наполнение накапливающего резервуара, если температура воды в трубопроводе позволяет уменьшать подачу, либо предотвращает замерзание трубопровода за счет пренебрежения уровнем воды в резервуаре. В последнем случае возможна минимальная переработка электропривода насоса и перелив жидкости из резервуара. Таким образом, достигается наилучший в текущих условиях технико-экономический баланс между потребностями в жидкости конечного потребителя и необходимость поддержания минимальной подачи, предотвращающей замерзание трубопровода.

Для оценки технико-экономической эффективности предложенной системы управления было выполнено её имитационное моделирование с параметрами ЭТК УПП, соответствующими лабораторному стенду на интервале времени в 24 часа. Для сравнительной оценки при текущих условиях также было выполнено моделирование одноконтурной системы регулирования по уровню с непрерывным частотным и дискретным релейным управлением. Поскольку в данном случае регулятор не учитывал температуру воды в конце трубопровода, предполагалась, что в условиях отрицательных температур окружающей среды подача была максимальной.

Предлагаемый способ управления позволил полностью исключить перелив воды из резервуара, в случае регулирования без учета температуры перелив составил 39,7 %, а при релейном регулировании – 39,1 %. Снижение потребляемой мощности при реализации предложенного алгоритма управления, по сравнению с номинальным режимом работы системы, составило около 80 %, по сравнению с одноконтурным – 56 %, с релейным – 71 % (рис. 8).

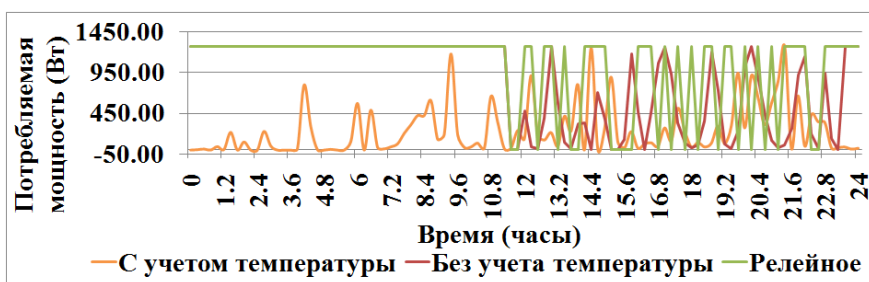


Рис. 8 – Потребляемая электрическая мощность



Рис. 9 – Устройство управления

В четвертой главе описываются методы и средства оценки эффективности практического применения предлагаемых в работе решений, а именно: методика оптимизации параметров ЭТК УПП для защиты трубопровода от замерзания по критерию минимальной стоимости и методика расчета экономической эффективности и срока окупаемости системы управления. Описываются программные средства для выполнения оптимизационных расчетов. Рассматриваются особенности автоматизации системы водоснабжения пгт. Новоорловск Забайкальского края, приводятся результаты оптимизации параметров данного объекта и оценка экономической эффективности предлагаемой системы.

Для оптимизации параметров ЭТК УПП минимизируется стоимостная функция общих приведенных затрат на переработку насосов, предварительный подогрев воды и установку теплоизоляции:

$$C = C_{QS} \cdot (E_Q \cdot K_Q + A_{FC}) + \sum_{i=1}^k \left(\frac{P_{pn}}{Q_n} \cdot C_r \cdot k_f + C_w \right) \cdot x_1 \cdot \sigma_i + \\ + C_{TS} \cdot (E_T \cdot K_T + A_{HE}) + C_r \cdot C_u \cdot \rho \cdot \frac{0,278 \cdot 10^{-6}}{\eta_k} \cdot \sum_{i=1}^k Q_{1i} \cdot x_2 \cdot \sigma_i +, \quad (4) \\ + C_{IS} \cdot (E_I \cdot K_I + A_{CI}) \cdot \pi \cdot L \cdot (x_3^2 + d_2 \cdot x_3) \rightarrow \min$$

где x_1 – величина перерасхода (подлежит оптимизации), м³/ч; x_2 – величина предварительного нагрева воды (подлежит оптимизации), °С; x_3 – толщина теплоизоляции (подлежит оптимизации), м; C_{QS} , C_{TS} , C_{IS} – капитальные затраты на установку элементов частотного управления, системы электроподогрева и теплоизоляции (за один кубический метр), руб; E_Q , E_T , E_I – нормативные коэффициенты экономической эффективности, 1/год; K_Q , K_T , K_I – коэффициенты учета нормативного срока эксплуатации; A_{FC} , A_{HE} , A_{CI} – коэффициенты нормативных амортизационных отчислений, 1/год; k – количество исследуемых отсчетов с разными параметрами объекта; P_{pn} – потребляемая электродвигателем насоса мощность при номинальной подаче, кВт; C_r – текущий тариф на электроэнергию, руб./кВт·ч; k_f – коэффициент дополнительных энергетических потерь при частотном регулировании; C_w – стоимость кубометра воды, руб./м³; σ_i – количество часов с текущими

Для практической реализации способа предложена схема системы управления ЭТК УПП, основным элементом которой является устройство управления авторской разработки (рис. 9).

параметрами объекта, ч/год; η_k – КПД нагревательных элементов; d_2 – внешний диаметр трубопровода, м.

Основным ограничением оптимизационной модели является необходимость обеспечения требуемой температуры воды в конце трубопровода. Ограничение задается неравенством:

$$t_k \leq t_o + \frac{q_t}{k_1 + k_{pr}} + \left(x_2 + t_b - t_o - \frac{q_t}{k_1 + k_{pr}} \right) \cdot e^{\frac{-L}{C_v \cdot (x_1 + Q_2) \cdot \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_{pr}} \right)}}, \quad (5)$$

где t_b – температура воды до подогрева, °С.

При расчете параметров применения теплоизоляции оцениваются коэффициент теплопроводности (x_4) и стоимость одного кубического метра (x_5) анализируемого материала, который выбираются из допустимых вариантов методом перебора. Переменная x_4 влияет на k_{pr} , а x_5 на C_{IS} .

Методика оптимизации параметров ЭТК УПП была реализована в виде скриптов программного пакета MatLab. Для выполнения многомерной условной нелинейной оптимизации целевой функции (4) была использована стандартная подпрограмма (функция) *fmincon* данного пакета. Также было разработано программное приложение, позволяющее оценивать технико-экономические параметры автоматизируемого объекта и выполнять их частичную оптимизацию (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № 2019663047).

Была выполнена оптимизация параметров ЭТК УПП функционирующей системы водоснабжения пгт. Новоорловск, при этом наиболее экономичным методом защиты трубопровода от замерзания оказалось поддержание подачи воды при существующей теплоизоляции в виде присыпки из изоляционной смеси. Средняя величина перелива воды составила 3,1 м³/ч, что приводит к экономическим затратам в размере 395 728 руб./год (с учетом капитальных затрат на автоматизацию). Применение предложенной системы управления в пгт. Новоорловск, обеспечило снижение переработки ЭТК УПП на 18,7 %. Экономическая эффективность применения системы составила 272 392,9 руб./год (без учета экономии на сокращение персонала), а срок окупаемости – 2,1 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение актуальной научно-практической задачи повышения экономической эффективности и безаварийности ЭТК УПП системы водоснабжения с накапливающим резервуаром в сложных природных условиях эксплуатации путем разработки способа и системы автоматического управления электроприводами насосов, учитывающих такие ключевые параметры объекта, как уровень воды в резервуаре и температура воды в трубопроводе.

В процессе выполнения диссертационной работы были получены следующие результаты:

1. Выявлено, что основными проблемами эксплуатации ЭТК УПП систем водоснабжения с накапливающим резервуаром являются переработка насосов и

аварийные ситуации, в первую очередь замерзание трубопровода. Путем классификации путей решения поставленных проблем, было выявлено, что переработку насосов эффективней всего устранять при помощи частотного регулирования производительности электроприводов насосов, что позволяет обеспечить уровень экономии электроэнергии свыше 60 % в идеальных условиях. Для защиты трубопровода от замерзания требуется поддерживать определенную подачу насоса, в совокупности с использованием теплоизоляции и предварительным подогревом воды.

2. Разработаны и апробированы компьютерная имитационная и лабораторные модели ЭТК УПП системы водоснабжения с накапливающим резервуаром. Относительные отклонения расчетных и экспериментальных величин в рабочем диапазоне функционирования системы не превышают 4 %.

3. Разработан способ управления ЭТК УПП, заключающийся в изменении производительности электропривода основного насоса, учитывающий уровень жидкости в накапливающем резервуаре и температуру воды в трубопроводе для предотвращения его замерзания при эксплуатации в сложных природных условиях. Расчетная экономия электроэнергии при применении данного способа в лабораторных условиях составила 56 % по сравнению со стандартными способами управления. Разработана структура системы управления электротехническим комплексом участка первого подъема, программируемое устройство управления и программный алгоритм, реализующие предложенный способ.

4. Разработаны методика и компьютерные средства для определения оптимальных параметров функционирования участка первого подъема, обеспечивающих защиту трубопровода от замерзания с минимальными экономическими затратами. Применение предложенной методики для оптимизации параметров пгт. Новоорловск позволило определить, что наиболее экономичным способом защиты от замерзания трубопровода является поддержание подачи, обеспечивающей заданную температуру воды, при условии наличия на объекте текущей теплоизоляции и перелива воды со среднегодовым объемом 3,13 м³/ч. Экономические затраты при этом составляют 395 728 руб./год.

5. Результаты диссертационного исследования были внедрены в систему водоснабжения пгт. Новоорловск Агинского района Забайкальского края, что позволило снизить величину переработки ЭТК УПП на 18,7 % и повысить экономическую эффективность данного объекта водоснабжения на 272 392,9 руб./год при обеспечении защиты трубопроводной линии от замерзания.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в периодических научных изданиях, включённых в перечень ВАК Минобрнауки РФ (для спец. 05.09.03):

1. Палкин, Г.А. Оптимизация параметров функционирования электротехнического комплекса водоподъемных участков в арктических климатических условиях / Г.А. Палкин // Российская Арктика. – Москва: ООО «Центр информационного и правового обеспечения развития Арктики», 2021. – № 13. – С. 81-104. DOI: 10.24412/2658–4255–2021–2–81–104.

2. **Палкин, Г.А.** Исследование оптимального метода управления электроприводами насосов первого подъема, эксплуатируемых в условиях отрицательных температур / Г.А. Палкин, А.Ф. Гайсин // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2021. – № 23(3). – С. 209-223. 10.30724/1998-9903-2021-23-3-194-208.

Публикации в других периодических научных изданиях, включённых в перечень ВАК Минобрнауки РФ:

3. **Палкин, Г.А.** Управление насосными агрегатами первого подъема системы водоснабжения с накапливающим резервуаром / Г.А. Палкин, И.Ф. Суворов // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 7. – С. 55-60.

4. **Палкин, Г.А.** Компьютерное моделирование трубопроводов надземной прокладки с целью оценки их тепловых параметров / Г.А. Палкин, М.В. Кобылкин, И.Ф. Суворов // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2018. – № 12. – С. 271-274.

5. **Палкин, Г.А.** Лабораторный стенд для моделирования автоматизированного участка первого подъема систем водоснабжения с накапливающим резервуаром / Г.А. Палкин, И.Ф. Суворов // Научно-практический журнал «Перспективы науки». – Тамбов: ТМБпринт, 2020. – № 12(135) – С. 69-73.

Публикации в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus и Web of Science:

6. **Palkin, G.** Evaluation of ways to improve the energy efficiency of the sites of the first rise supply water systems with a storage tank by laboratory modeling / G. Palkin, I. Suvorov, R. Gorbunov // 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, IEEE Xplore, 2018. – P. 227-234. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544369.

7. **Palkin, G.** Development of a Simulation Model of the First Rise Area of a Water Supply System with a Storage Reservoir / G. Palkin, I. Suvorov // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, IEEE Xplore, 2020. –P. 804-809. doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208073.

8. **Palkin, G.** Simulation Modeling of First Rise Section of Water Supply System with Installed Complex of Automatic Pump Performance Control / G. Palkin, I. Suvorov // Machines 2021. – Volume 9. – Issue 3. – P. 63. – URL: <https://doi.org/10.3390/machines9030063>.

Другие научные публикации:

9. **Палкин, Г.А.** Чрезвычайные ситуации на объектах водоснабжения, эксплуатируемых при отрицательных температурах / Г.А. Палкин, И.Ф. Суворов; под ред. А.И. Сидорова. // Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи: сборник материалов VI-й Всероссийской студенческой конференции (с международным участием): в 2 т. Т. 2. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2021. – 237 с.

10. **Палкин, Г.А.** Выявление параметров вычислительной методики для определения наиболее экономичного способа защиты от замерзания трубопроводов систем водоснабжения. Наука и образование: актуальные исследования и разработки / Г.А. Палкин, И.Ф. Суворов, А.В. Яковлева // Материалы III Все-

российской научно-практической конференции / Забайкальский государственный университет. – Чита: ЗабГУ, 2020. – С. 41-46.

11. **Палкин, Г.А.** Способы оценки эффективности автоматического управления участками первого подъема систем водоснабжения / Г.А. Палкин // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: материалы XX Международной научно-практической конференции: [в 3 ч.] / Забайкальский государственный университет. – Чита: ЗабГУ, 2020. – Ч. 1. – С. 85-90.

12. **Палкин, Г.А.** Моделирование участков первого подъема систем водоснабжения/ Г.А. Палкин // Сборник научных статей XIX Международной научно-практической конференции «Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов». – Чита: ЗабГУ, 2019. – Ч. 1. – 232 с.

13. **Палкин, Г.А.** Автоматизация первого подъема на примере системы водоснабжения пгт. Новоорловск Забайкальского края / Г.А. Палкин, И.Ф. Суворов // Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург: Компания ПОЛИГРАФИСТ, 2019. – №12 (90). – Ч.1 – С. 78-83, DOI:<https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.016>.

14. **Палкин, Г.А.** Лабораторный стенд для моделирования участков первого подъема систем водоснабжения / Г.А. Палкин, И.Ф. Суворов / Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Инновационный потенциал развития науки в современном мире: технологии, инновации, достижения». – Уфа: Изд. НИЦ Вестник науки, 2019 – 334 с.

15. Ломов, Д.А. Разработка микропроцессорного устройства управления скважинными насосами систем водоснабжения / Д.А. Ломов, **Г.А. Палкин**, О.В. Валова, И.Ф. Суворов // Материалы I Всероссийской заочной науч.-практ. конф. «Наука и образование: актуальные исследования и разработки». – Чита: ЗабГУ, 2018. – 173 с.

16. **Палкин, Г.А.** Повышение отказоустойчивости системы водоснабжения путем управления насосными агрегатами / Г.А. Палкин, Р.В. Горбунов, И.Ф. Суворов // Сборник научных статей I Всерос. науч. конф. «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения». – Тольятти: Издатель Качалин Александр Васильевич. – 2017. – Ч. 2.– 656 с.

17. **Палкин, Г.А.** Разработка комплекса автоматического управления насосными агрегатами первого подъема в системах водоснабжения с накапливающим резервуаром / Г.А. Палкин // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Электроэнергетика байкальского региона: проблемы и перспективы» – Улан-Удэ, 2016. – 112 с.

18. **Палкин, Г.А.** Способы повышения экономической эффективности и надежности эксплуатации участков первого подъема систем водоснабжения с накапливающим резервуаром / Г.А. Палкин, Р.В. Горбунов // Международный научно-исследовательский журнал issn 2303-9868 – Сборник по результатам XXXVI заочной научной конференции Research Journal of International Studies. – Екатеринбург: Компания ПОЛИГРАФИСТ, 2015. – №2 (33), Ч.1 – С. 59-60.

19. **Палкин, Г.А.** Пути повышения надежности эксплуатации систем водоснабжения с накапливающим резервуаром / Г.А. Палкин, Р.В. Горбунов, И.Ф. Суворов // Сборник материалов VI-й Международной научно-практической

конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии» / под ред. А.И. Сидорова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – Т.2 – 291 с.

20. **Палкин, Г.А.** Лабораторный стенд для моделирования системы автоматического управления процессом транспортировки жидкости / Г.А. Палкин, Р.В. Горбунов, П.П. Каштанкин // Сборник научных статей XV Международной научно-практической конференции «Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов». – Чита: ЗабГУ, 2015. – Ч. II.

Патенты и свидетельства о регистрации программ ЭВМ:

21. Пат. 2593649С1 Российская Федерация МПК G05D 9/00, G05D 7/00, G05D 23/00 Способ регулирования уровня жидкости в емкости-сборнике и цифровая система для его осуществления / **Г.А. Палкин**, Р.В. Горбунов, И.Ф. Суворов, Д.А. Дейс; патентообладатель Заб. гос. ун-т. – №2015118302/28; заявл. 15.05.2015; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 22. – 10 с.: ил.

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ №2019663047 Программа для расчета тепловых параметров трубопроводов / **Г.А. Палкин**, М.В. Кобылкин, А.В. Яковлева; правообладатель: Заб. гос. ун-т. – заявка № 2019662080 от 01.10.2019. Дата регистрации: 09.10.2019.

23. Пат. РФ № 2656113 С1, МПК G05D 9/12 (2006.01). Система регулирования уровня жидкости в емкости-сборнике / И.Ф. Суворов, **Г.А. Палкин**, Р.В. Горбунов; патентообладатель: Заб. гос. ун-т. – Заявка №2017122896 от 28.06.2017; опубл. 31.05.2018, Бюл. № 16. – 11 с.: ил.

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ №2020666293 Программа для мониторинга и управления объектом водоснабжения / **Г.А. Палкин**; правообладатель: Заб. гос. ун-т. – заявка № 2020665389 от 26.11.2020. Дата регистрации: 08.12.2020.

Учебные пособия:

25. **Палкин, Г.А.** Электропривод на основе трёхфазного асинхронного электродвигателя (на примере систем водоснабжения): учебное пособие / Г.А. Палкин, Р.В. Горбунов; Забайкальский государственный университет. – Чита: ЗабГУ, 2019. – 167 с.

Дальнейшее развитие результатов, полученных в диссертационной работе, предполагается в следующих направлениях:

- *модификация способа и системы управления для автоматического регулирования интенсивности подогрева воды, динамической коррекции уставок управляющего алгоритма, учета параметров скважины и технического состояния узлов насоса;*
- *уточнение тепловых расчетов в имитационной модели, а также расширение функциональных возможностей методики оптимизации параметров ЭТК УПП.*

ПАЛКИН Георгий Александрович

**УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ УЧАСТКА
ПЕРВОГО ПОДЪЕМА В СЛОЖНЫХ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ
ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __.__.2022.
Формат 60×84/16.
Бумага ксерографическая. Способ печати цифровой.
Усл. печ. л. 1,0.
Заказ № _____. Тираж _____ экз.

ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет»
672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30