

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Забайкальский государственный университет»

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»

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук
доцент **Батухтин А. Г.**

Чита – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УЧАСТКА ПЕРВОГО ПОДЪЕМА В СЛОЖНЫХ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ	13
1.1 Состояние объектов водоснабжения Российской Федерации, как потребителей электроэнергии жилищно-коммунальной сферы	13
1.2 Проблемы эксплуатации электротехнического комплекса участка первого подъема в сложных природных условиях.....	17
1.3 Обзор способов регулирования производительности электротехнического комплекса участка первого подъема	26
1.4 Обзор способов защиты от замерзания трубопроводных систем участка первого подъема.....	37
1.5 Особенности и подходы моделирования электротехнического комплекса участка первого подъема	43
1.6 Выводы.....	46
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УЧАСТКА ПЕРВОГО ПОДЪЕМА	48
2.1 Структура и основные параметры математической и компьютерной имитационной моделей	48
2.2 Математическая модель электротехнического комплекса участка первого подъема	50
2.3 Компьютерная имитационная модель электротехнического комплекса участка первого подъема	58
2.4 Физическая модель электротехнического комплекса участка первого подъема	67
2.5 Сопоставление результатов имитационного и физического моделирования	72

2.6 Выводы.....	81
3 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УЧАСТКА ПЕРВОГО ПОДЪЕМА	83
3.1 Постановка задачи, разработка способа и структуры системы управления.....	83
3.2 Моделирование системы управления	87
3.3 Аппаратно-программная реализация системы управления.....	98
3.4 Выводы.....	102
4 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	103
4.1 Оптимизация параметров электротехнического комплекса участка первого подъема.....	103
4.2 Оценка экономического эффекта от внедрения системы управления	117
4.4 Автоматизация электротехнического комплекса участка первого подъема пгт. Новоорловск Забайкальского края	122
4.5 Выводы.....	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	138
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	141
ПРИЛОЖЕНИЕ А Табличные данные	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Программный скрипт MatLab для оптимизации параметров участка первого подъема.....	163

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Оптимизация режимов работы электротехнических комплексов систем водоснабжения является очень важной составляющей 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, в том числе и в Забайкальском крае, широко распространены системы водоснабжения, использующие накапливающие резервуары. При подобной схеме 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., Черняховский 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., Rassölkin 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 и 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 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 запаздывания (задержки) изменения уровня воды в резервуаре и температуры воды в конце

трубопровода с учетом теплоты внутреннего трения жидкости при динамическом изменении подачи и внешних условий. Также модель позволяют 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 повысить 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 тепломассообмена, 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 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 –3 0 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 2020г.), 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.

1 ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УЧАСТКА ПЕРВОГО ПОДЪЕМА В СЛОЖНЫХ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ

1.1 Состояние объектов водоснабжения Российской Федерации, как потребителей электроэнергии жилищно-коммунальной сферы

В настоящее время экономия природных не возобновляемых ресурсов является важным направлением повышения экологического благополучия в сфере жизнедеятельности человека. Снижение объемов выработки электроэнергии, производимой традиционными способами, косвенным образом позволяет уменьшить добычу полезных ископаемых и снизить отрицательное влияние техногенных процессов на окружающую среду.

Большая доля вырабатываемой электроэнергии тратится на обеспечение жилищно-коммунальной сферы, в первую очередь, на организацию процесса централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. На обеспечение функционирования оборудования систем водоснабжения приходится около 10 % мирового потребления электроэнергии [1, 2]. На работу центробежных насосов в системах водоснабжения и водоотведения в Российской Федерации (РФ) расходуется около 120 – 130 млрд кВт·ч электроэнергии в год [3], при средней годовой выработке за последнее время около 1 трлн кВт·ч [4]. Таким образом, насосное оборудование систем водоснабжения потребляет порядка 10 % всей электроэнергии страны, а за некоторые периоды данный показатель мог подниматься до 20 % [5].

Количество объектов централизованного питьевого водоснабжения на территории Российской Федерации за последний полностью учтенный период (2020 год) составляет 94 299 штук [6]. Динамика изменения количества данных объектов за последние 12 лет имеет отрицательный характер (рисунок 1.1).

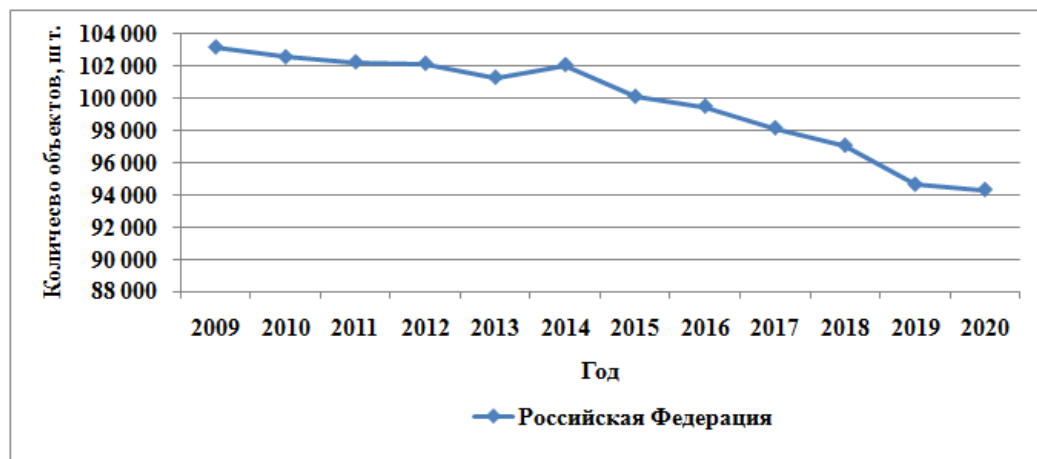


Рисунок 1.1 – Динамика изменения количества объектов водоснабжения РФ

Исходя из статистических данных [6], около 3 % источников централизованного водоснабжения находятся на территории Арктики и субъектов со схожими природными условиями, а как минимум 20 % продолжительное время эксплуатируются при низких температурах окружающей среды, 13 % из них сосредоточены на территории Сибири и Дальнего Востока. Сложные природные условия оказывают дополнительное отрицательное влияние на режимы работы систем водоснабжения. Следует отметить, что под сложными природными условиями, помимо отрицательных температур, подразумеваются особенности рельефа местности (гористая и резкопересеченная местность), большая протяженность трубопроводных линий и свойства почвогрунта (болотистые территории, зыбуны, вечные мерзлоты).

Наибольшие проблемы создает наличие вечных мерзлот. Изменение уровня промерзания почвы в течении сезонов года помимо охлаждения грунта приводит к пучению и просадке грунтов, образованию провалов и трещин [7]. При этом вечная мерзлота распространяется достаточно глубоко на юг Сибири и Дальнего востока. На территории Забайкальского края имеются участки с вечными мерзлотами и глубиной сезонного промерзания более 6 м [8]. Коммунальное водоснабжение северной климатической зоны и приравненных к ним территорий охватывает 78 % городов и 30 % поселков [9]. Издержки на водоснабжение в

данных районах выше, чем в средней полосе. Тем не менее, данные регионы представляют стратегическую ценность и активно осваиваются.

Дальневосточный федеральный округ (ДФО) является перспективным субъектом РФ, поскольку через него осуществляется транзитное сообщение со странами Восточной и Юго-Восточной Азии, на его территории ведется активная добыча полезных ископаемых и иных природных ресурсов, находится значительная часть Российской Арктики, а также располагается космодром «Восточный». При этом регион характеризуется сложными природными условиями и является наиболее удаленным от центральных районов страны, что вносит дополнительные сложности при строительстве и эксплуатации промышленных и жилищно-коммунальных объектов, в том числе и систем водоснабжения.

По способу добычи водных ресурсов в ФО РФ преобладает подъем из подземных источников (более 90 %) [6]. Например, в Забайкальском крае количество скважинных водозаборов составляет 408 штук (98 %). Среди подземных источников хозяйственно – питьевого водоснабжения преобладают артезианские скважины, вода из которых представляет особую природную ценность.

Для организации эффективного водозабора из скважин чаще всего используется схема водоснабжения с накапливающим резервуаром, которая позволяет стабилизировать процесс водоснабжения при кратковременных сбоях и переходных процессах, путем аккумуляирования определенного запаса жидкости [10, 11]. Данная система состоит как минимум из двух участков: первого подъема или основного водоподъемного, и последующих подъемов (второй, третий и т.д.). На участке первого подъема находятся насосы, которые перекачивают воду из естественного источника в накапливающий резервуар. Из накапливающего резервуара вода поступает конечному потребителю самотеком или при помощи вспомогательных насосных станций более высокого подъема.

Основой подобной системы водоснабжения является участок первого подъема, поскольку именно там осуществляется добыча и накопление водных ресурсов, а также задается общая производительность всего технологического процесса. В то же время данный элемент системы водоснабжения является основным источником эксплуатационных расходов и наиболее подвержен угрозе возникновения аварийных ситуаций, которые могут нарушить весь процесс водоснабжения. Основной составляющей эксплуатационных затрат на участке первого подъема является электроэнергия. Системы водоснабжения городов РФ с населением до 500 тыс. жителей потребляют от 37 до 50 % всей электроэнергии. В условиях скважинного водозабора данный показатель увеличивается до величин от 50 до 85 % [2].

Всесторонняя оптимизация работы участка первого подъема является приоритетной задачей. При этом наиболее важными аспектами организации процесса водоснабжения, регулируемые государственными стандартами РФ являются [12]:

- повышение эффективности, надежности и качества работы систем коммунального водоснабжения и канализации;
- обеспечение энергоресурсосбережения.

В итоге, актуальными задачами является повышение рентабельности и уровня надежности существующих и строящихся систем водоснабжения, особенно в сложных природных условиях эксплуатации. Электротехнический комплекс участка первого подъема (ЭТК УПП) является основой технологического процесса водоснабжения и обеспечения вспомогательных нужд. Параметры ЭТК УПП определяют величину затрат ресурсов, бесперебойность и уровень качества процесса водоснабжения. Соответственно, выявление и устранение проблем, возникающих при эксплуатации ЭТК УПП, позволит повысить уровень экономической эффективности и безаварийности процесса водоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий, особенно для территорий со сложными природными условиями.

1.2 Проблемы эксплуатации электротехнического комплекса участка первого подъема в сложных природных условиях

Основу типичного электротехнического комплекса участка первого подъема составляют (рисунок 1.2): воздушные или кабельные линии сети электропередачи; трансформаторы; коммутационная и защитная электротехническая аппаратура; приборы контроля, защиты и автоматики; электроприводы насосов; системы освещения, вентиляции и обогрева; иные вспомогательные потребители.

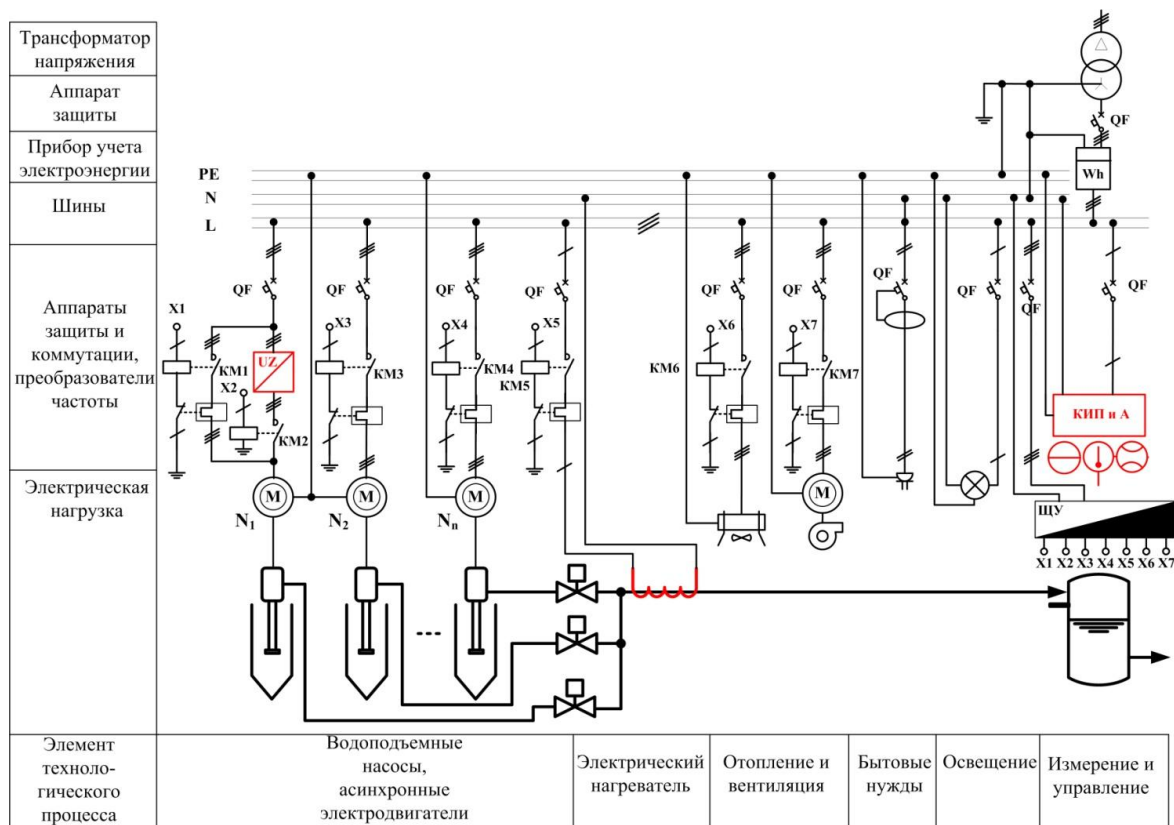


Рисунок 1.2 – Комбинированная однолинейная схема ЭТК УПП

Также в состав электротехнического комплекса целесообразно включить неэлектрические элементы технологического процесса, напрямую взаимосвязанные с эксплуатируемым электрооборудованием. К таковым относятся: насос, трубопроводная система, накапливающий резервуар и конечный потребитель. К дополнительному электрооборудованию также можно отнести

элементы, повышающие качество и надежность технологического процесса, такие как элементы регулируемого электрического привода, нагревательные устройства, приборы контроля и автоматики.

Ключевым элементом технологического процесса и наиболее существенным потребителем электроэнергии ЭТК УПП является электропривод водоподъемных насосов. Обычно на участке первого подъема имеется несколько скважин, и соответственно, насосов. Насос, который осуществляет подачу воды в постоянном нормальном режиме работы УПП, называется основным. Для обеспечения дополнительной подачи, в случае повышенного водоразбора могут периодически подключаться вспомогательные насосы. Резервные насосы служат для дублирования основных и вспомогательных на случай возникновения аварий. На функционирование насосов по нормативным данным используется более 90 % электроэнергии [13]. В практической деятельности на долю основных насосов приходится от 75 % до 95 % доли электроэнергии ЭТК УПП [3].

Основным направлением улучшения экономических показателей функционирования ЭТК УПП является снижение затрат на работу насосов и взаимосвязанного с ними оборудования, сюда входит снижение затрат на оплату электроэнергии, добычу водных ресурсов, оплату ремонтных работ и заработную плату дежурного персонала. Главными ресурсами является электроэнергия и вода. Также немаловажным фактором является обеспечение достаточного уровня надежности, и, в первую очередь, безаварийности эксплуатируемого оборудования, что позволит сократить расходы на проведение регламентированного технического обслуживания, ремонта и устранения последствий внезапных аварийных ситуаций. Автоматизация технологического процесса водоснабжения также позволит обеспечить экономию за счет сокращения дежурного персонала [14]:

При снижении затрат ресурсов необходимо минимизировать их излишнее потребление. Основным источником таких излишек является переработка насосов первого подъема, которая возникает при ошибках проектирования или

значительных изменениях параметров функционирования ЭТК УПП. Под термином переработка понимается превышение производительности насосов над требуемым водопотреблением, что влечет за собой перелив артезианской воды из накапливающего резервуара, повышенные затраты электроэнергии на переработку электроприводов насосов, чрезмерный износ насосов и трубопроводной сети, ведущий к сокращению интервалов технического обслуживания и преждевременному выходу оборудования из строя.

Косвенно оценить объемы переработки электроприводов насосов, возможно проанализировав статистику по общему объему утечки воды, поскольку переработка является наиболее весомой составляющей данных потерь. Динамика изменения величины суммарной утечки воды по РФ за последние 10 лет (до 2019 года) приводится на рисунке 1.3 [15].

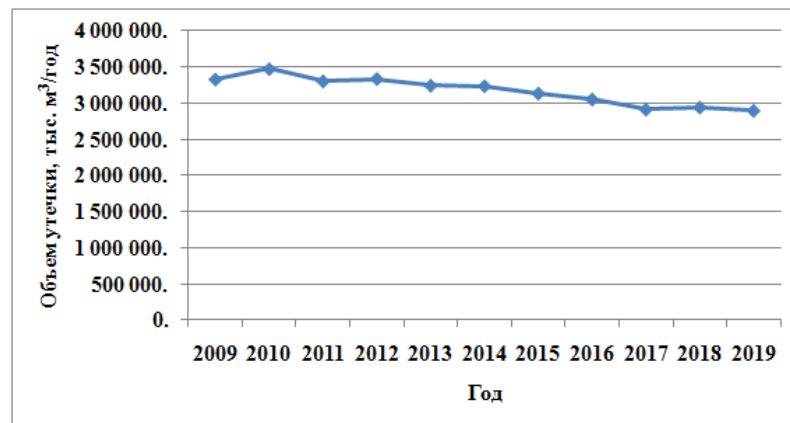


Рисунок 1.3 – Динамика изменения суммарной величины утечки воды по РФ

Анализируя показатели за 2019 год, выявлено, что за данный период общий объем утечки составил 2 893 639 610 м³, при общей добыче водных ресурсов в объеме 63 640 000 000 м³ [16]. На рисунке 1.4 – а) приводится соотношение объема утечки по ФО РФ (ЦФО – Центральный, СФО – Сибирский, ДФО – Дальневосточный, СЗФО – Северо-Западный, ЮФО – Южный, СКФО – Северо-Кавказский, ПФО – Поволжский, УФО – Уральский), а на 1.4 – б) по субъектам ДФО.

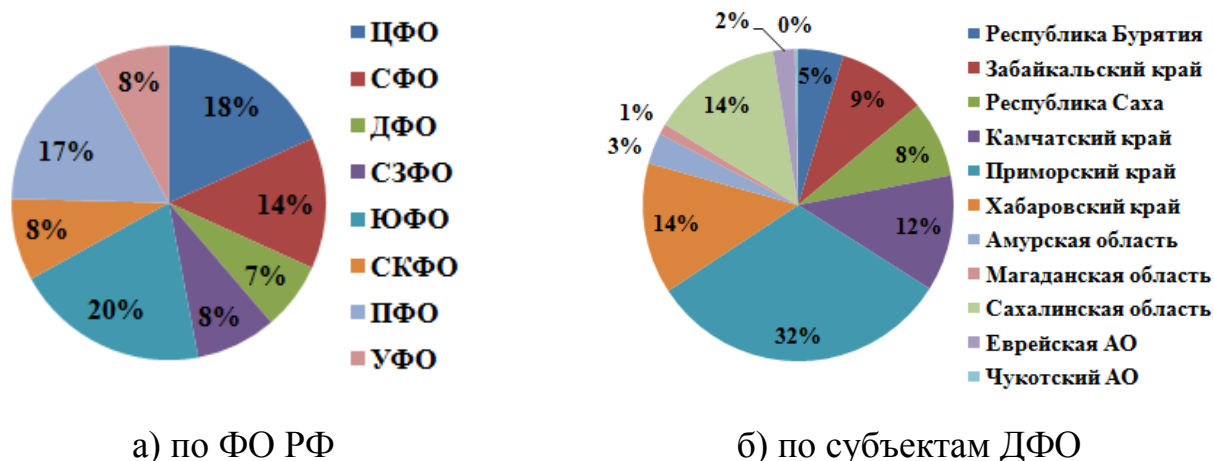


Рисунок 1.4 – Соотношение объемов утечки за 2019 год

ДФО имеет наименьшие показатели по данному параметру, однако, учитывая разницу в количестве населения с остальными ФО, утечки остаются достаточно ощутимыми. В соответствии с рисунком 1.4 – б), лидером негативной статистики по утечкам водных ресурсов в ДФО является Приморский край, Сахалинская область и Хабаровский край. Достаточно большая доля утечек присуща Забайкальскому краю. Для более достоверной оценки масштабов потерь ресурсов от утечек, целесообразно вычислить соотношение объема утечки, к общему объему добытых водных ресурсов, что позволит в процентном соотношении оценить потери воды. На рисунке 1.5 приводится процентное соотношение потерь воды по РФ в целом и по каждому ФО в отдельности.

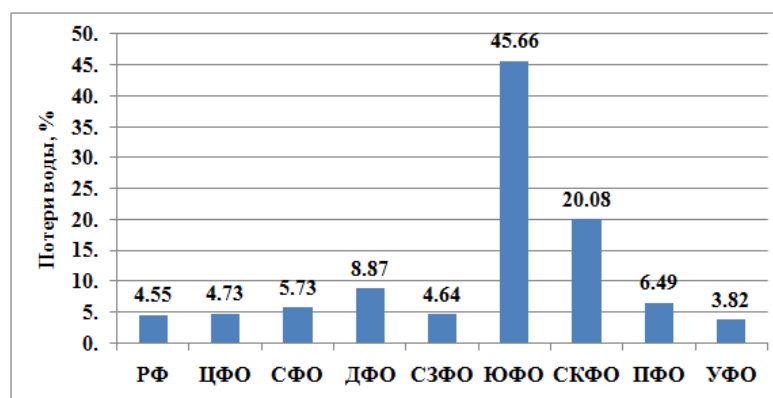


Рисунок 1.5 – Потери водных ресурсов от утечек по ФО РФ

Общий объем потерь по РФ составил 4,5 %, что является достаточно высоким показателем. Среднее значение потерь воды по субъектам составляет 12,5 %. Следует отметить, что наибольшее количество потерь свойственно ЮФО, как и объем утечки.

Помимо перелива причиной утечек могут быть и другие факторы, например неучтенный расход, хищение водных ресурсов, потери на собственные нужды и утечки из негерметичных элементов гидравлического оборудования. Для точного определения доли величины утечек, связанных с переливом и переработкой электроприводов насосов, были проанализированы режимы работы некоторых объектов водоснабжения Забайкальского края.

На рисунке 1.6 приводится среднегодовое соотношение объемов добытой артезианской воды на полезную нагрузку и перелив в системах водоснабжения пгт. Новоорловск и пгт. Жирекен Агинского и Чернышевского районов Забайкальского края соответственно.

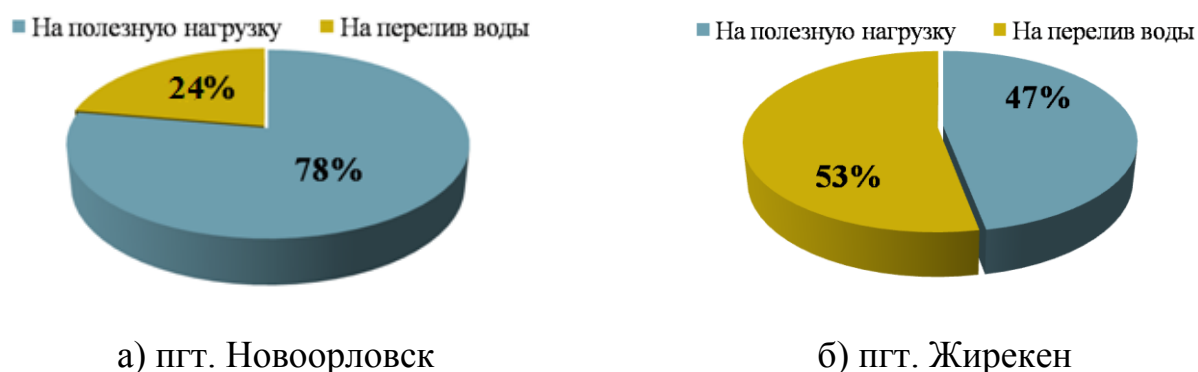


Рисунок 1.6 – Процентное соотношение распределения добытых водных ресурсов

Таким образом, величина утечек воды, связанных с переработкой электроприводов насосов, по отношению к общему объему добываемых водных ресурсов на некоторых предприятиях, может колебаться от 20 % до 50 %, что значительно превышает средние показатели общих утечек по краю и

Федеральным округам. Это позволяет полагать, что потери от переработки чаще всего являются основной составляющей утечек воды. Серьезные потери могут быть связаны с кардинальными изменениями режимов работы объектов водоснабжения по сравнению с условиями, закладываемыми на этапе проектирования [17]. Потенциал возможного энергосбережения ЭТК УПП за счет уменьшения утечек и минимизации переработки по разным данным оценивается от 20 до 60 % [2, 18].

Исходя из вышеприведенных данных, можно сделать вывод, что утечки, связанные с переработкой электроприводов насосов ЭТК УПП, являются источником серьезных экономических затрат, минимизация которых является важной и актуальной задачей повышения качества процесса централизованного водоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий.

В некоторых случаях, избыточная производительность насосов необходима для поддержания требуемых значений определенных параметров, обеспечивающих безаварийную работу системы. Поэтому, при минимизации эксплуатационных затрат ЭТК УПП, необходимо также уделять пристальное внимание безаварийности технологического процесса водоснабжения, несмотря на то, что это может ухудшать показатели снижения эксплуатационных расходов.

Аварийные ситуации на УПП могут являться источником серьезных эксплуатационных и капитальных затрат, а также нести угрозу материальному и санитарно – эпидемиологическому благополучию, жизни и здоровью населения. В условиях низких отрицательных температур окружающей среды данные аварии могут стать причиной возникновения чрезвычайной ситуации. Например, авария, произошедшая в пгт. Золотореченск Забайкальского края в 2014 году, повлекла за собой полное прекращение подачи воды и остановку котельной в зимний период (при температуре окружающей среды минус 30 °С), что привело к возникновению чрезвычайной ситуации муниципального масштаба. Ликвидация аварии длилась более суток с привлечением большого числа единиц техники, ремонтного

персонала и МЧС РФ. Причиной аварии стало истощение дебета скважины с дальнейшей поломкой основного насоса [19, 20, 21].

К наиболее распространенным авариям на участке УПП можно отнести внезапную поломку электропривода насоса или его насосной части, истощение дебета скважины или её замерзание, а также аварии водопровода.

На аварии элементов насоса приходится значительная доля всех аварийных ситуаций УПП. Существуют различные способы предотвращения и устранения подобных аварий. Перспективным направлением обеспечения безаварийности и бесперебойности технологического процесса функционирования насосов является проведение их диагностики в рабочем режиме. В этом случае предполагается, что специализированное диагностическое устройство обеспечивает мониторинг основных параметров электрической и/или механической части насоса, и при выявлении отклонении от эталонных значений сигнализирует о раннем этапе развития поломки [22, 23, 24].

Проблема истощения дебета скважины может быть решена путем применения датчиков уровня воды в скважине. В сложных природных условиях эксплуатации также существует угроза замерзания скважины. На практике чаще всего защита скважины осуществляется путем принудительной циркуляции воды и использованием греющего кабеля [9].

Аварии на трубопроводной линии являются наиболее опасными и трудно устранимыми, ввиду большой протяженности и низкой доступности поврежденных объектов.

Общее количество объектов водопроводной инфраструктуры по РФ за 2020 год составило 63 471 штуки [6], при общей протяженности 584 131,43 км [25]. Количество трубопроводов, которые эксплуатируются в условиях продолжительных отрицательных температур на 2020 год, составляет около 25 %,

Динамика возникновения аварий трубопроводов по ФО РФ приводится на рисунке 1.7 [26]. За 2019 год на территории РФ произошло 60 212 аварий, процентное распределение которых по округам приводится на рисунке 1.8. В

целом по округам прослеживается явная тенденция к снижению аварийности, за исключением Южного ФО (ЮФО). На территории со сложными природными условиями приходится около 33 % аварий.

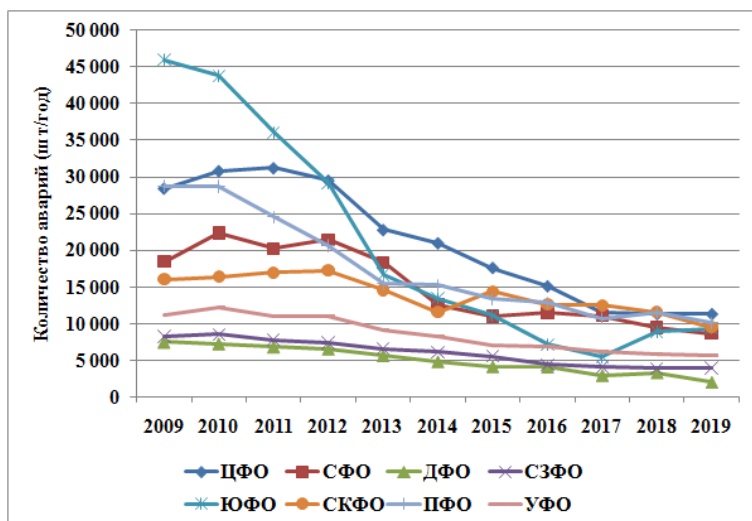


Рисунок 1.7 – Динамика возникновения аварий водопроводов по ФО РФ

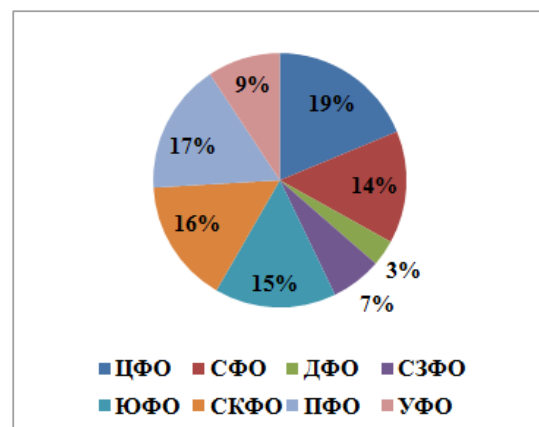


Рисунок 1.8 – Распределение количества аварий по ФО РФ на 2019 год

Для более достоверной оценки степени аварийности на рисунке 1.9 приводится процентное соотношение количества аварий, к общему количеству водопроводов по ФО РФ за 2019 год (относительная аварийность).

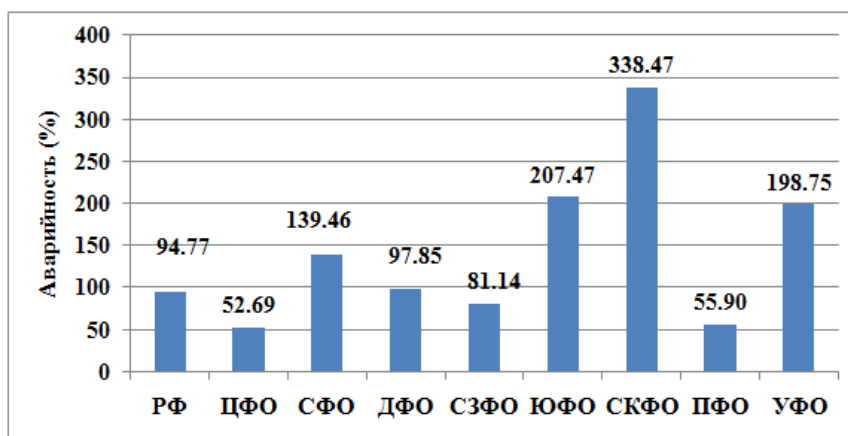


Рисунок 1.9 – Аварийность водопроводов по ФО РФ за 2019 год

Как видно из приведенных данных, аварийность водопроводов по всем ФО достаточно высока, и практически везде количество аварий ощутимо превышает количество водопроводов, что означает возникновение нескольких аварий на одном объекте в течении года. Забайкальский край имеет средние показатели аварийности около 50 % [6, 26].

В сложных природных условиях эксплуатации, присущих большей части территории ДФО, и многим субъектам Российской Федерации, частой причиной аварий является замерзание воды в трубопроводах [7, 27]. По статистическим данным только на Байкало-Амурской Магистрали ежегодно происходит до 20 аварий связанных с перемерзанием водоводов [8].

За последнее время на территории Забайкальского края происходило несколько значительных аварий в системах водоснабжения, связанных с замерзанием водоводов [20]. В качестве наиболее ярких примеров, преданных широкой огласке в средствах массовой информации, можно назвать перемерзание водопроводов в пгт. Балей [28] и в селе Верх-Усугли [29] в январе 2021 года.

В итоге, наиболее рациональным и доступным способом минимизации эксплуатационных затрат, связанных с переработкой ЭТК УПП, является изменение его производительности в зависимости от текущих запросов конечного потребителя воды. При этом важно поддерживать тепловые трубопроводов в допустимых пределах, обеспечивающих безаварийное функционирование системы в сложных природных условиях эксплуатации [30]. Решение поставленных задач заключается в создании способа и специализированной системы автоматического регулирования производительности ЭТК УПП, обеспечивающих защиту трубопровода от замерзания путем поддержания допустимых тепловых параметров.

1.3 Обзор способов регулирования производительности электротехнического комплекса участка первого подъема

При регулировании производительности ЭТК УПП необходимо оценивать изменение двух основных параметров: количество перекачиваемой воды (включая утечки на перелив) и уровень потребляемой электроэнергии. Эти критерии будут определять эффективность процесса регулирования [14].

Для уменьшения переработки следует контролировать уровень воды в резервуаре и менять объемный расход в напорном трубопроводе, задаваемый подачей насоса, которая будет являться основным регулируемым параметром. Тем не менее, для оценки величины производительности целесообразно в качестве основной контролируемой величины использовать уровень воды в резервуаре [31].

Величина объемного расхода в трубопроводе задается гидравлическими характеристиками насоса и трубопроводной системы.

Насос включает в себя электропривод и насосную часть. Электропривод, в свою очередь, состоит из электродвигателя, передаточного механизма, элементов электропитания и автоматики. Насосная установка объединяет в себе насосы и гидравлическое оборудование, такое как трубопроводы и задвижки. Насосная станция представляет собой совокупность производственных и бытовых помещений, насосных установок, систем энергоснабжения и вспомогательных механизмов [32].

Рабочими характеристиками насоса, являются давление, напор и подача.

Напор зависит от давления следующим образом:

$$H = P / (\rho \cdot 9,8066), \quad (1.1)$$

где H – напор, м;

P – давление, Па;

ρ – плотность, кг/м³;

Подача (объемный расход) определяет количество жидкости, перекачиваемой насосом за заданное время. Рабочие свойства насоса определяются зависимостью величины напора от подачи, изменяющейся во времени. Данная зависимость называется напорно-расходной характеристикой насоса и рассчитывается следующим образом:

$$H = H_f - S_f \cdot Q^2, \quad (1.2)$$

где H_f – фиктивный напор насоса, м;

S_f – гидравлическое фиктивное сопротивление насоса, $\text{с}^2/\text{м}^5$;

Q – подача насоса (объемный расход), $\text{м}^3/\text{с}$.

Следует отметить, что напорно-расходная характеристика большинства насосов на начальном участке обладает свойством лабильности (неустойчивости), выражающейся падением напора при малых величинах подачи [33].

Помимо гидравлических характеристик, при работе насоса оценивается его мощность и коэффициент полезного действия (КПД), также зависящие от величины подачи [34].

На напор и подачу в системе также влияют свойства трубопровода и установленных на нем запорно-регулирующих элементов. Напор трубопроводной системы зависит от подачи и вычисляется по следующей формуле:

$$S_p = H_c + S \cdot Q^2, \quad (1.3)$$

где S_p – напор трубопроводной системы, м;

H_c – статический напор системы, м;

S – удельное сопротивление трубопровода, $\text{с}^2/\text{м}^6$.

Общая величина объемного расхода задается рабочей (режимной) точкой системы – точкой пересечения напорно-расходной характеристик насоса и трубопровода [33]. Определить мощность насоса, требуемую для перекачивания заданного объема воды и обеспечения нужного напора, можно путем вычисления площади прямоугольника, построенного от рабочей точки до начала координат

Основой эффективного управления любым объектом является правильный выбор типа и способа воздействия на регулируемый параметр, а также закона и типа регулятора, применяемого в управляющей системе. Наиболее перспективным является автоматическое управление, которое эффективней

ручного за счет исключения человеческого фактора, но требует применения более сложного оборудования и детальной настройки алгоритма управления.

Для более эффективного управления технологическими процессами, где значения контролируемых параметров и возмущающих воздействий трудно прогнозируемы и имеют значительную случайную составляющую целесообразно применять системы управления с обратной связью. В регуляторах технологических процессов, в том числе и в водоснабжении, чаще применяется отрицательная обратная связь, позволяющая стабилизировать автоматизируемый параметр. Регулирование по контуру отрицательной обратной связи может осуществляться по принципам дискретного релейного включения/отключения или непрерывно и плавно.

В первом случае производительность ЭТК УПП изменяется скачкообразно в режимах «есть подача» - «нет подачи» или «ступенчатое изменение подачи». При этом происходит либо попеременное включение и выключение электродвигателя насоса при достижении определенных условий, либо, реже, открытие и закрытие запорной арматуры. Такой релейный метод позволяет регулировать требуемую величину достаточно грубо и с большой инерционностью. Зачастую, данные недостатки являются некритичными при наполнении резервуара, что сделало данный простой метод автоматического управления довольно распространенным [33, 36].

Релейные системы обычно применяются для включения и отключения электродвигателей насосов и ступенчатого изменения производительности насосной группы [37]. Основным недостатком релейных систем является повышенный износ узлов насоса и гидравлического оборудования, связанный с постоянными включениями и выключениями, создающими гидравлические удары [31, 38]. Таким образом, релейное управление может применяться только при условии низких требований к точности и скорости регулирования в системах с допущением большой инерционности технологического процесса и минимальным количеством циклов включения/выключения оборудования. Также релейное

управление может эффективно применяться в совокупности с другими методами регулирования производительности ЭТК УПП.

Для непрерывного управления производительностью ЭТК УПП часто применяются одноконтурные системы управления с отрицательной обратной связью и расчетом управляющего воздействия по вариации пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) закона [34]. Для реализации ПИД регулятора могут использоваться простые и недорогие программируемые логические контроллеры или специализированные аналоговые устройства. Недостатками ПИД закона является необходимость перенастройки его коэффициентов при значительном изменении параметров технологического процесса для поддержания допустимых параметров регулятора. Для решения данной проблемы предполагается применение механизмов нечеткой логики и нейросетевых технологий [39, 40].

Еще одним способом построения регуляторов, применяемых в системах управления объектами водоснабжения, являются оптимальные регуляторы. Для управления элементами системам водоснабжения, включая УПП с накапливающим резервуаром, часто применяются оптимальные регуляторы, построенные на основе принципов динамического программирования [41, 42, 43, 44]. В последнее время, одним из распространенных методов оптимального управления системами водоснабжения является управление с прогнозирующими моделями (УПМ или MPC – model predictive control).

Сопоставление УПМ и ПИД методик управления в системах водоснабжения с накапливающим резервуаром описано в различных научных работах, таких как [45, 46]. Авторы сходятся во мнении, что УПМ по сравнению с ПИД управлением позволяет значительно снизить величину перерегулирования, время переходного процесса и отклонение от уставки контролируемого параметра в установившемся режиме. УПМ также позволяет учитывать ограничения на процесс управления объектом [47]. Основной проблемой метода является пересчет модели на каждой итерации [44], что приводит к необходимости применения более мощных

вычислительных средств и линеаризованной модели объекта. При этом, ПИД регуляторы имеют более простую и компактную структуру [46], что обуславливают их широкую распространенность при решении практических задач управления.

Таким образом, при реализации системы управления ЭТК УПП, применяемой на практике, целесообразно использовать наиболее простые и надежные методы и аппаратные средства. Большинство существующих систем водоснабжения уже снабжено ПИД регуляторами, поэтому более экономичным решением является разработка системы и алгоритма управления, основанными на принципах ПИД регулирования, с внедрением дополнительных элементов, улучшающих качество процесса управления.

Важным этапом автоматизации является выбор способа воздействия на регулируемый параметр. Способы перемещение рабочей точки на напорно-расходной характеристики УПП по характеру воздействия делятся на гидравлические и электрические.

В первом случае положение рабочей точки определяется гидравлическими свойствами трубопроводной системы или насоса, путем корректировки крутизны напорно-расходных характеристик. Удельное сопротивление трубопровода может изменяться путем создания местных (точечных) сопротивлений. Для этого применяются специальные сужающие шайбы, затворы и задвижки. Методы изменения сопротивления трубопроводной линии просты в реализации и широко применяются на практике. Основной недостаток таких методов связан с тем, что изменение сопротивления трубопроводной магистрали для снижения объемного расхода приводит к возрастанию напора насоса. При этом, потребляемая мощность насоса отличается несущественно от номинального режима работы и энергопотребление при таком методе регулирования практически не изменяется [18]. Для компенсации избыточного напора в совокупности с дросселированием или обособленно могут применяться перепуск и слив воды из трубопроводной системы. Но данный метод также имеет низкий энергосберегающий потенциал.

При изменении гидравлических параметров насоса применяют комбинацию из нескольких насосов одинаковой или различной производительности, многосекционные или многоступенчатые насосы, модификацию крыльчатки насосов, поворотно-лопастные входные направляющие аппараты или ширмы. Данные методы требуют усложнения структуры насоса, малопригодны для применения в системах автоматического управления и имеют низкий энергосберегающий потенциал.

Наиболее эффективным способом регулирования подачи, для точной компенсации водопотребления, является изменение частоты вращения рабочих колес лопастных насосов [5]. При подобном регулировании обеспечивается параллельное смещение напорно-расходной характеристики насоса и перемещение рабочей точки по характеристике трубопровода, что позволяет исключить возникновение избыточных напоров [32]. Изменить частоту вращения вала насоса возможно путем использования устройств, изменяющих передаточное число оборотов, отбираемых с ротора электропривода насоса. Для этих целей могут применяться механические редукторы или согласующие муфты [48]. Основным недостатком промежуточных передач является затраты электроэнергии, связанные с работой двигателей насосов на мощностях, близких к номинальным, при любых подачах [18]. Поэтому наиболее энергоэффективными являются методы управления производительностью приводного двигателя насоса, как основного потребителя подводимой энергии.

Насосы УПП используют в качестве привода электродвигатели переменного тока, зарекомендовавшие себя низкой себестоимостью, надежностью и простотой обслуживания [49]. При этом применяются как синхронные, так и асинхронные. Синхронные двигатели имеют высокий коэффициент мощности и КПД, а также более стабильную взаимосвязь между питающим напряжением и частотой вращения ротора [50] что позволяет применять их в мощных насосах [34]. Но ввиду меньшей стоимости, для организации водозабора в насосах чаще

применяются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Реже используются асинхронные электродвигатели с фазным ротором.

Главными выходными параметрами асинхронных машин, подверженными регулированию, является число оборотов (частота вращения) ротора и вращающий момент двигателя. Для насосов основным параметром являются частота вращения ротора, определяющая гидравлические характеристики насоса. Частота вращения вала трехфазного асинхронного электродвигателя определяется выражением [32]:

$$n = \left(60 \cdot \frac{f}{p} \right) \cdot (1 - s), \quad (1.4)$$

где n – механическая частота вращения ротора и вала электродвигателя, об/мин;

f – частота питающего напряжения, Гц;

p – число пар полюсов асинхронного электродвигателя, шт;

s – скольжение электродвигателя.

Таким образом, для изменения скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя применяются три стратегии: изменение числа пар полюсов статора электродвигателя, воздействие на величину скольжения и изменение питающей частоты [32]. Первые два метода требуют усложнения конструкции электродвигателя, обычно сложно применимы в системах автоматического управления, и обеспечивают недостаточное снижение потребляемой электрической мощности.

Изменение частоты напряжения, питающего статор электродвигателя, позволяет избежать энергетических затрат на потери при увеличении скольжения [32, 37]. Данный способ позволяет производить плавную регулировку частоты вращения электродвигателя с максимальным снижением потребляемой мощности [18, 34, 51, 52, 53].

При реализации метода питающее напряжение промышленной частоты (50 Гц для РФ) преобразуется в напряжение нужной частоты. При этом подачу и

напор регулируемого привода можно вычислить, используя формулы приведения (1.5) и (1.6) [32] соответственно.

$$Q_1 = Q_n \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{n}{n_n}\right)^2 - \frac{H_c}{H_f}}{1 - \frac{H_c}{H_f}}}, \quad (1.5)$$

где Q_1 – регулируемая подача насоса (объемный расход), м³/с;

Q_n – номинальная подача насоса (определяется рабочей точкой на номинальной частоте вращения вала), м³/с;

n_n – номинальная частота вращения вала насоса, об/мин.

$$H = H_f \cdot \left(\frac{n}{n_n}\right)^2 - S_f \cdot Q_1^2. \quad (1.6)$$

Энергетическая эффективность частотного регулирования (ЧР) обусловлена: отсутствием превышения напора; потреблением электрической мощности, эквивалентной подаче; минимальными добавочными потерями [54]. Экономия энергопотребления может достигать 60 % и более при глубоком регулировании [3]. При ЧР снижается износ гидравлического оборудования и утечки ценных водных ресурсов [55]. Метод обеспечивает гибкость и плавность изменения параметров технологического процесса и хорошо сочетается с ПИД и оптимальными регуляторами [18].

Изменение частоты питающего напряжения осуществляется специальными устройствами – преобразователями частоты или частотными преобразователями (ЧП). Современные ЧП строятся на полупроводниковых элементах – тиристорах и, чаще, на базе полевых транзисторов (MOSFET) или гибридных биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT).

ЧР может осуществляться по векторному или скалярному принципу. Векторный способ позволяет с высокой точностью поддерживать требуемую частоту вращения и крутящий момент вала электродвигателя. В настоящее время активно ведутся исследования для увеличения производительности и качества

частотных векторных преобразователей [37, 56]. При этом векторные регуляторы имеют большую вычислительную сложность и требуют детальной настройки ЧП под каждый конкретный электродвигатель.

На практике при частотном регулировании электроприводов насосов чаще используется простой и легко реализуемый скалярный метод управления [57, 58]. Основным условием методики является поддержание постоянного соотношения между амплитудой и частотой питающего напряжения:

$$\frac{V_1}{f_1} = \text{const}, \quad (1.7)$$

где V_1 - амплитуда напряжения на выходе ЧП, В;

f_1 - частота напряжения на выходе ЧП, Гц.

Основным недостатком скалярного ЧР является отсутствие возможности контроля развиваемого момента без использования специальных датчиков и его снижение на малых частотах (при $f_1 < 0.1 \cdot f$) [37]. Данные недостатки являются незначительными в системах регулирования производительности ЭТК УПП, где не требуется глубокого и точного изменения частоты вращения и момента электродвигателя [59]. ЧП также применяются и для высоковольтных электродвигателей, обеспечивая значительную экономию электроэнергии по сравнению с гидравлическими методами регулирования.

Встроенные в ЧП ПИД-регуляторы позволяют эффективно реализовывать скалярные регуляторы производительности ЭТК УПП с обратной связью [60]. Для достижения оптимальных параметров технологического процесса частотное регулирование может совмещаться с дросселированием и релейным подключением дополнительных насосов в режиме «помощника» [18, 33, 61].

Методу ЧР присущи определенные недостатки. Одним из ограничивающих факторов является высокая себестоимость системы автоматического управления с частотным регулированием [18]. В действующих установках применение ЧП экономически целесообразно, если срок окупаемости составляет от 3 до 4 лет [32]. На практике обычно данный период не превышает 3 лет [36].

Следующим недостатком является изменение коэффициента полезного действия (КПД) электродвигателя и всего насоса. Применение серийных АД в частотно-регулируемых электроприводах приводит к снижению КПД и повышению установленной мощности от 15 до 30 % [62]. Для сохранения приемлемого КПД отечественные производители насосов определяют предельный диапазон регулирования от 70 % до 120 % от номинальной подачи, а зарубежные устанавливают верхний предел до 130 % [2].

При работе от ПЧ изменяется момент на валу электродвигателя, особенно при скалярном управлении. В общем случае рекомендуется обеспечивать кратность допустимого момента в пределах от 80 % до 100 % от номинального [63]. Насосная нагрузка в меньшей степени подвержена изменению момента.

Изменение КПД и момента при частотном регулировании обусловливается влиянием добавочных потерь от высших гармоник и падением напряжения в ПЧ [18, 63]. Наиболее распространенным способом снижения отрицательного влияния ЧП на электродвигатель и электрическую сеть является применение различного рода фильтров [18, 49], что снижает их величину от 8 до 10 %.

Превышение частоты для асинхронных электродвигателей не должно превышать 120 % от номинальной [64]. В противном случае срок эксплуатации оборудования может быть сокращен более чем в два раза [18].

При снижении подачи методом частотного регулирования может возникнуть ситуация значительного падения напора, выдаваемого насосом. Также серьезной проблемой является эффект «помпажа» у насосов имеющих лабильную (неустойчивую) напорно-расходную характеристику. Выражается помпаж одновременным наличием двух рабочих точек, что дестабилизирует работу насоса и может привести к постоянным гидроударами в водопроводной сети [33, 38]. Для предотвращения данных явлений снижение подачи ограничивается минимально допустимым значением.

В сложных природных условиях эксплуатации на процесс управления производительностью ЭТК УПП накладываются ограничения, связанные с

необходимостью поддержания приемлемых тепловых параметров насосной станции. На практике для предотвращения замерзания скважины и трубопровода в период низких температур окружающей среды обеспечивается максимально возможная подача, при этом системы автоматического управления производительностью отключаются, что снижает эффективность управления на величину от 10 до 30 %.

Существует ряд научно-технических работ и изобретений, направленных на комплексную автоматизацию и повышение надежности УПП [65, 66, 67]. Все проанализированные решения ориентированы на поддержание основного технологического параметра (уровня воды в резервуаре и давления в трубопроводе). Предложены различные способы повышения энергоэффективности применения ЧР электропривода насосов ЭТК УПП в составе систем автоматического управления. Вопрос изменения температуры транспортируемой воды в процессе автоматического управления практически не освещается, и, соответственно, проработан недостаточно.

Пренебрежение данной проблемой в условиях низких температур окружающей среды может привести к возникновению аварийных ситуаций на объектах водоснабжения, в первую очередь к замерзанию трубопровода, или к необоснованным затратам электроэнергии и иных ресурсов. Поэтому актуальной и новой задачей является разработка системы управления производительностью ЭТК УПП, учитывающей тепловые параметры транспортируемой по трубопроводу воды, в условиях отрицательных температур окружающей среды.

1.4 Обзор способов защиты от замерзания трубопроводных систем участка первого подъема

Для предотвращения замерзания трубопровода целесообразно анализировать температуры воды в приграничном слое наиболее уязвимого участка трубы. Чаще всего это конечная координата трубопроводной системы [7,

8]. Для задач автоматического управления вопрос поперечного нестационарного распределения температурного поля [68, 69] является не существенным, поскольку для защиты трубы достаточно анализировать усредненную температуру воды в заданном поперечном срезе.

С целью вычисления установившейся температуры воды в конце трубопровода могут применяться различные известные методики [7, 9, 69, 70, 71, 72]. В качестве основной расчетной формулы конечной температуры t_k (°C) целесообразно использовать выражение (1.8), предложенное Л. Д. Тереховым [9], отличающееся относительной простотой выполнения расчета, отсутствием итерационных вычислений и учетом дополнительных параметров, таких как диссипативная теплота внутреннего трения жидкости и наличие теплоизоляции.

$$t_k = t_o + \frac{q_t}{k_l + k_{pr}} + \left(t_n - t_o - \frac{q_t}{k_l + k_{pr}} \right) \cdot e^{-\frac{L}{C_v \cdot Q_l \cdot \left(\frac{1}{k_l} + \frac{1}{k_{pr}} \right)}}, \quad (1.8)$$

где t_n – температура воды в начальной части трубопровода, °C;

t_o – температура окружающей среды, °C;

q_t – диссипативная теплота трения, Вт/м;

k_l – коэффициент теплопередачи от воды к стенке трубы, Вт/м·°C;

k_{pr} – приведенный коэффициент теплопередачи, учитывающий термические свойства трубопровода, теплоизоляции и окружающей среды, Вт/м·°C;

L – длина трубопровода, м;

C_v – объемная теплоемкость воды, Дж/м³·°C.

Стратегии защиты трубопровода от замерзания строятся на изменении определенных параметров данной формулы.

На основе проанализированных научных работ и технических решений была построена классификация возможных способов защиты трубопровода от замерзания (рисунок 1.11).

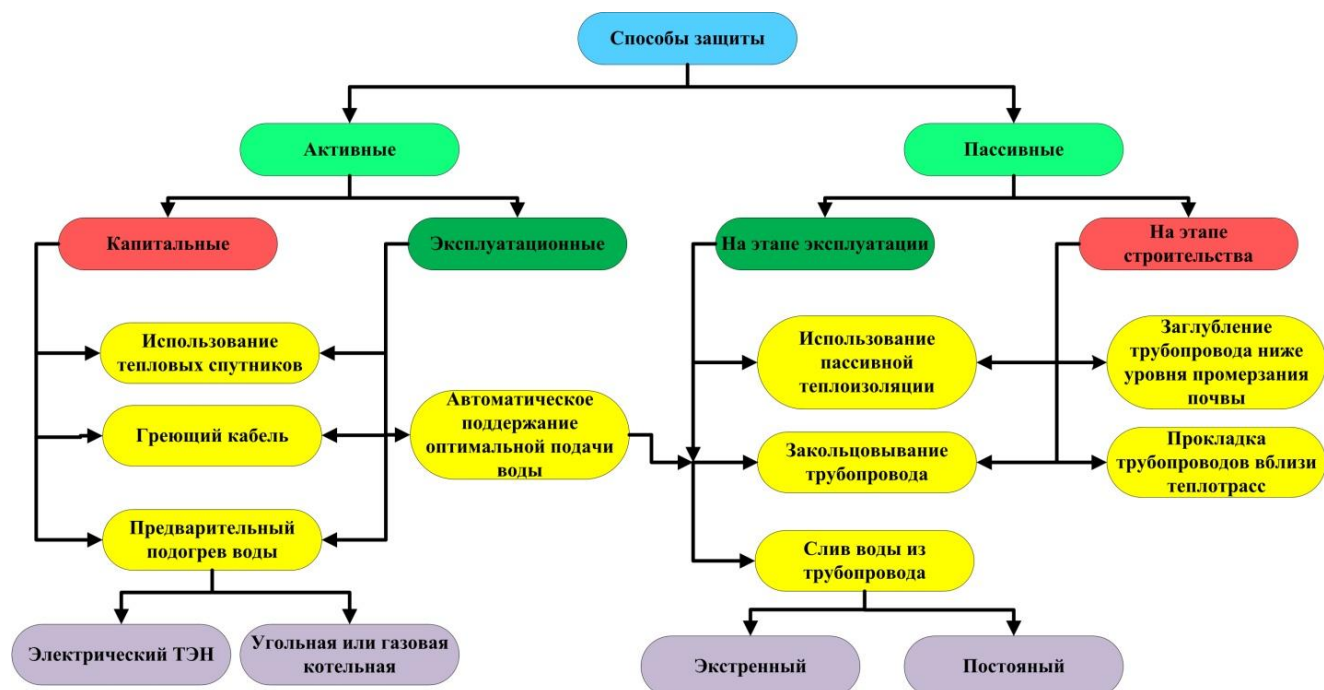


Рисунок 1.11 - Классификация способов защиты трубопроводов от замерзания

При строительстве или серьезной реконструкции трубопроводной системы наиболее надежным способом защиты от замерзания является заглубление трубопровода ниже уровня сезонного промерзания почвы [9, 73]. При этом глубина траншеи обычно составляет более двух метров [74]. В настоящее время в мировой и отечественной практике рекомендуется заглубление трубопроводов на глубину от 0,7 до 1,2 м при использовании дополнительных способов защиты [7, 75].

В сложных природных условиях рентабельность подземного способа прокладки трубопроводов может быть достаточно низкой [76]. В подобных условиях предпочтение отдается наземной и надземной прокладке трубопроводов. Данные способы значительно снижают строительные и ремонтные затраты, облегчают визуальный контроль состояния и локализацию аварийных участков трубопроводных линий.

Широко применяемым способом снижения тепловых потерь на этапе строительства системы водоснабжения является совместное расположение водовода с сетями теплоснабжения в общем канале [77]. Способ рентабелен

только в пределах населенных пунктах, где имеется централизованное теплоснабжение. Альтернативой является утепление трубопровода теплоизоляционными материалами [74, 78]. Пассивная теплоизоляция может осуществляться различными материалами и способами и позволяет значительно снизить тепловые потери трубопроводной системы [69, 79]. Недостатками данного способа являются дополнительные капитальные затраты на теплоизоляционный материал и его монтаж. Для минимизации данных расходов требуется качественно выполнять монтаж теплоизоляции и точно рассчитывать тепловые параметры системы [80]. Также необходимо учитывать процессы старения и износа изоляции, сопровождающиеся значительным ухудшением её полезных свойств [78, 81].

В активных способах защиты от замерзания применяются специальные внешние средства для влияния на тепловые параметры трубопровода [82]. Одним из таких способов является обеспечение непрерывной циркуляции воды в трубопроводе. Движущаяся вода подвержена замерзанию в гораздо меньшей степени [8, 83] в связи с увеличением температуры за счет энергии внутреннего трения жидкости (диссипативная теплота трения, вычисляемая по формуле (1.12)) [70], постоянным подводом тепла от воды, перемещаемой с более прогретого участка трубопровода, и отрывом кристаллов льда со стенок трубопровода [8].

$$q_t = g \cdot \rho \cdot Q_1 \cdot I, \quad (1.9)$$

где I - гидравлический уклон трубопровода.

На практике при угрозе замерзания трубопровода чаще всего обеспечивается максимально возможная подача, которая в большинстве случаев является избыточной и приводит к неоправданным затратам электроэнергии и артезианских водных ресурсов [80]. Соответственно, необходимо найти баланс между запросами конечного потребителя и температурой воды в трубопроводе, для того чтобы определить минимальную величину подачи, предотвращающую замерзание трубопровода и минимизирующую переработку [84].

Следует отметить, что при особо неблагоприятных условиях окружающей среды и малом водоразборе оптимальной подача может превышать водоразбор. Для этого может осуществляться перепуск воды по возвратному трубопроводу или её слив из системы. Для защиты от замерзания допускается слив воды в размере 20 % от расчетного расхода [9].

Для того, чтобы снизить потери от избыточной циркуляции воды в крайне тяжелых условиях функционирования водоводов существует ряд технических решений, направленных на активное повышение температуры перекачиваемой жидкости.

В мировой и отечественной практике широко распространено использование трубопроводов малого диаметра с циркулирующим теплоносителем – тепловых спутников [78]. Данный способ обладает низкой рентабельностью на протяженных трубопроводных линиях УПП.

Другим распространенным способом повышения температуры транспортируемой воды является применение электрического греющего кабеля [8]. На коротких трубопроводах греющий кабель монтируется на всю длину, в случае большой протяженности он может быть разделен на секции [9].

На УПП установка протяженных участков греющего кабеля сопряжена со значительным повышением монтажных и эксплуатационных расходов, в связи с достаточно большой длиной трубопроводных линий.

На практике широко распространен метод предварительного подогрева воды в начале водовода перед транспортировкой по трубопроводу [7, 78]. Целесообразность предварительного подогрева обусловлена низкими температурами воды при заборе из источника, например вода из скважины может быть ниже 2 °С при низких температурах грунта и наличии вечных мерзлот [78]. По нормативным данным конечная температура воды должна быть не ниже 3 °С. На протяженных трубопроводах для соблюдения данного условия воду может потребоваться подогревать до 10 ÷ 20 °С [7].

Источником тепла могут быть электрические нагревательные элементы, в том числе трубчатые электронагреватели (ТЭН) или участок греющего кабеля, либо котлы на твердом топливе или газе. Строительство и эксплуатация котельных требуют значительных финансовых затрат. На УПП целесообразно применение электрических методов подогрева [78]. Системы электрического подогрева являются неотъемлемой частью ЭТК УПП, и при правильном подборе и применении могут оказаться значительно экономичнее в эксплуатации, чем котельные.

Таким образом, перспективными методами защиты трубопровода от замерзания, пригодными для использования как на строящихся, так и на эксплуатируемых объектах водоснабжения, являются: поддержание оптимального объемного расхода воды в трубопроводе, применение пассивной теплоизоляции и предварительный подогрев воды при помощи электрических нагревателей.

Существующие работы в сфере обеспечения приемлемых тепловых режимов ЭТК УПП в основном сводятся к расчету и поддержанию определенной температуры в начале трубопровода путем предварительного подогрева и автоматизации расчетов оптимального слоя теплоизоляции. Особый интерес представляют труды ряда авторов [7, 8, 75], в которых предлагается снижать температуру транспортируемой воды до минимальных значений порядка $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ с целью образования на внутренней поверхности трубы тонкой корки льда, что обеспечивает экономию электроэнергии за счет снижения напора трубопроводной системы. В то же время автоматическое изменение подачи насоса является достаточно перспективным дополнением к предложенным решениям, поскольку позволит повысить экономическую эффективность процесса.

В итоге, разработка способа и системы управления ЭТК УПП, обеспечивающих поддержание оптимальной подачи насоса с максимальной экономической эффективностью при минимальном риске возникновения аварийных ситуаций, является важной, новой и актуальной задачей. Границы применимости системы и её эффективность могут быть расширены путем

применения дополнительных способов защиты трубопровода от замерзания, при условии адекватного выбора параметров применяемых методик. Для определения наилучших параметров рассматриваемого способов защиты трубопровода от замерзания требуется выполнять моделирование ЭТК УПП, а также разработать методику оптимизации параметров рассматриваемых способ защиты трубопровода от замерзания по критерию минимальной стоимости.

1.5 Особенности и подходы моделирования электротехнического комплекса участка первого подъема

Моделирование в научной и опытно-конструкторской деятельности является достаточно распространенным методом исследования различных технологических процессов. Основными направлениями моделирования технических процессов является построение натуральных (физических) и математических моделей.

Математическая модель позволяет экономить материальные ресурсы, гибкого изменять параметров модели для адаптации к любым реальным объектам исследования, ускорять исследование растянутых во времени технологических процессов. Оценить уровень достоверности математической модели возможно путем сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными, получаемыми методом физического моделирования. Для этого следует использовать лабораторный стенд и рассчитывать математическую модель объекта, применяя параметры данного стенда.

Большое количество работ по моделированию ЭТК УПП посвящено исследованию частотно-регулируемого электропривода. При этом целью моделирования является оценка технико-экономического эффекта применения частотного регулирования в сравнении с гидравлическими методами изменения производительности насосов [18, 38, 51, 53, 85]. Также оцениваются преимущества различных типов и структур частотно-регулируемых насосных

систем [18, 86]. При моделировании частотно-регулируемого привода упор делается на определение зависимостей гидравлических и энергетических параметров насосной станции от угловой скорости насоса [53], влияние статического противодействия и параметров гидравлической нагрузки на механические характеристики электропривода [87]. В работах [57, 85] осуществляется комплексное моделирование взаимосвязанной системы скважина - насос - трубопровод - накапливающий резервуар, что позволяет более детально описать общий технологический процесс водозаборной станции. В работах [39, 42, 45, 46, 50, 53, 88] оценивается эффективность применения различных стратегий управления и подбора эффективных параметров регуляторов.

В рассмотренных работах недостаточное внимание уделяется моделированию тепловых параметров систем водоснабжения в процессе управления основным технологическим параметром.

Моделирование тепловых процессов в системах водоснабжения обычно ориентировано на применение в задачах оценки систем теплоснабжения потребителей. При этом оцениваются тепловые потери и строятся конфигурации теплового поля в канале трубопровода [68, 72]. Изучается влияние эффективности пассивной теплоизоляции различных типов на тепловые режимы трубопровода [69]. При моделировании тепловых режимов трубопроводов первого подъема обычно оцениваются процессы охлаждения и замерзания транспортируемой воды при изменяющихся внешних условиях [7, 51, 71, 83]. В приведенных работах не рассматривают вопрос поддержания заданной температуры воды в конце трубопровода путем увеличения подачи, данные модели не учитывают приток тепла от сил внутреннего трения жидкости, а также инерционность и запаздывание изменения температуры при смене внешних условий.

Для оценки длительных процессов, протекающих в ЭТК УПП, при изменяющихся внешних условиях, целесообразно представлять математическую модель в форме имитационной модели, позволяющей выполнять динамический расчет выходных параметров при изменяющихся входах [89]. С этой целью

применяются различные программные пакеты компьютерного имитационного моделирования. Для моделирования частотно-регулируемого электропривода широко применяется программная среда Matlab [37], и, в частности, пакет Simulink [39, 45, 46, 51, 85, 89], либо иные вычислительные инструменты [50, 71, 90].

Лабораторное моделирование систем водоснабжения не слишком распространено ввиду габаритов и сложности построения модели, особенно при оценке тепловых параметров. Тем не менее, в данной сфере также имеется ряд работ [7, 8, 83], направленных на исследование процесса охлаждения транспортируемой воды и режимов работы водовода в условиях оледенения. Недостатком разработанных стендов является отсутствие системного комплексного подхода для оценки всех важных параметров объекта водоснабжения различной физической природы и их взаимосвязей. Также разработанные стенды малопригодны для интеграции и исследования систем автоматического частотного управления производительностью насосов. Поэтому разработка физической модели, обеспечивающей системный подход к анализу моделируемого объекта, является актуальной и новой задачей.

Таким образом, задача моделирования ЭТК УПП в текущей работе сводится к разработке компьютерной имитационной и лабораторной моделей рассматриваемого объекта. Основными задачами моделирования ЭТК УПП является настройка и оценка эффективности применения предлагаемой системы управления.

Имитационную модель целесообразно реализовывать в виде блочной схемы, максимально приближенной к структуре реального объекта водоснабжения. Подобную структуру возможно эффективно реализовать в пакете Simulink математической среды Matlab, который имеет мощные средства построения и расчета блочных моделей. Лабораторное моделирование носит вспомогательный характер для подтверждения корректности разработанной имитационной модели.

1.6 Выводы

На основании вышеизложенного материала и его анализа можно сделать следующие выводы.

1. Оптимизация режимов работы ЭТК УПП является актуальной и сложной задачей, зависящей от достаточно большого количества факторов и условий. Эта задача остается актуальной для всех систем водоснабжения, но особую актуальность она приобретает для районов со сложными природными условиями эксплуатации.

2. В результате анализа структуры и особенностей функционирования ЭТК УПП было выявлено, что основными проблемами данного объекта является переработка насосов и аварийные ситуации, в первую очередь замерзание трубопровода. Убытки от переработки насосов складываются из затрат на электроэнергию и артезианскую воду и могут достигать 50 % от общих эксплуатационных затрат.

3. Наилучшим методом решения описанных проблем является снабжения участка первого подъема комплексом управления, при этом в качестве объекта регулирования производительности ЭТК УПП следует выбрать электропривод насоса. В сложных природных условиях эксплуатации снижение производительности ЭТК УПП ограничивается подачей, предотвращающей замерзание водовода. На практике при отрицательных температурах окружающей среды задается максимальная производительность насосов, что снижает годовую эффективность стандартной системы управления, не учитывающей температуру воды, на 10–30 %.

4. Путем построения классификации и анализа существующих методик, было выявлено, что производительность насоса эффективней всего изменять при помощи частотного регулирования его электродвигателя. Данный метод позволяет избежать более 60 % неоправданных эксплуатационных затрат ЭТК УПП при отсутствии дополнительных ограничений на процесс регулирования. На

практике необходимо учитывать возможные ограничения, возникающие вследствие негативного влияния, оказываемого частотным преобразователем на технологический процесс и электрическую часть регулируемой системы. Для защиты трубопровода от замерзания на преобладающем промежутке времени эксплуатации объекта допустимо поддерживать подачу, значительно ниже максимальной. Поэтому при управлении производительностью электроприводов насосов необходимо вычислять оптимальную подачу, которая обеспечит защиту трубопровода от замерзания и минимизирует переработку ЭТК УПП.

5. Применение дополнительных способов защиты трубопровода от замерзания, таких как пассивная теплоизоляция и предварительный подогрев воды, могут значительно повысить энергетическую эффективность и безаварийность процесса управления ЭТК УПП в сложных природных условиях. Для определения наилучших параметров применения данных способов защиты от замерзания необходимо выполнить их оптимизацию по критерию минимальной стоимости.

6. С целью оценки основных параметров ЭТК УПП в процессе исследования и настройки регулятора, а также определения технико-экономической эффективности применяемых решений необходимо разработать компьютерную имитационную модели объекта и системы управления. Для подтверждения корректности модели необходимо выполнить лабораторные эксперименты в аналогичных условиях.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УЧАСТКА ПЕРВОГО ПОДЪЕМА

2.1 Структура и основные параметры математической и компьютерной имитационной моделей

Для решения задач моделирования, поставленных в предыдущем разделе, необходимо определить состав элементов и структурные связи имитационной модели.

На рисунке 2.1 приводится структурная блочная схема модели, отражающая основные моделируемые элементы ЭТК УПП [91].

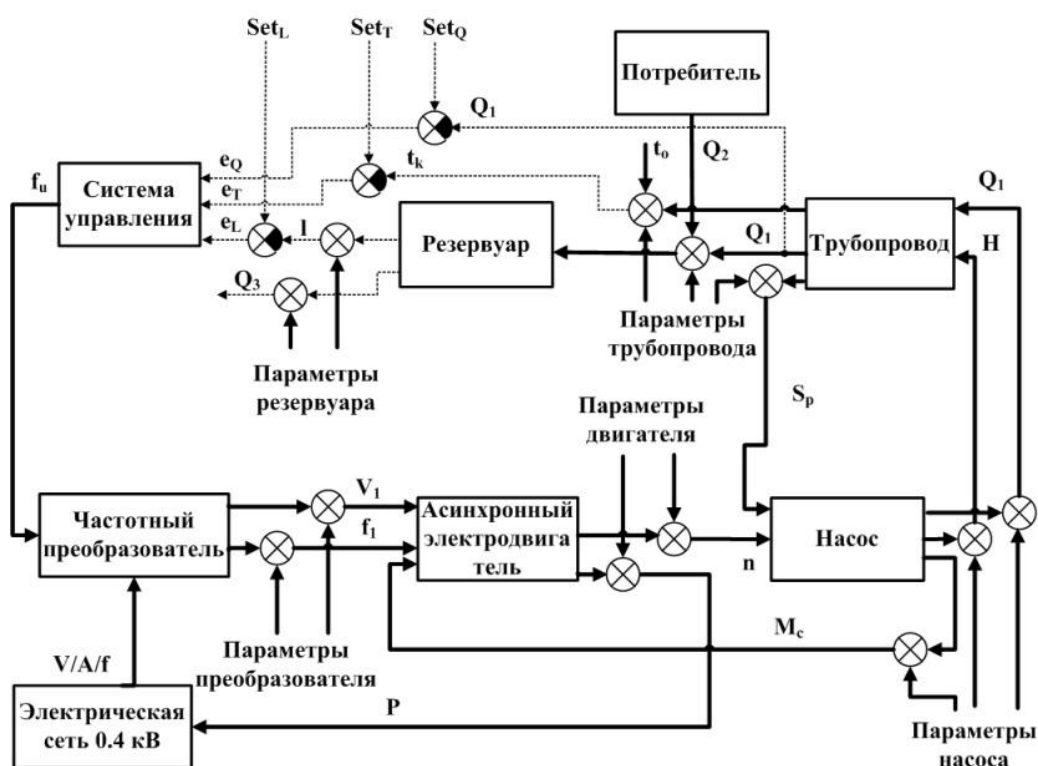


Рисунок 2.1 – Структурная схема имитационной модели участка первого подъема

Каждый элемент схемы выполняет преобразование данных поступающих с предыдущего элемента в зависимости от внутренних свойств или внешних условий. Для описания внутренних преобразований данных каждого элемента

разработана математическая модель, в которой выходные и промежуточные параметры определяются путем вычисления соответствующих математических выражений. Взаимосвязи между элементами осуществляются путем передачи результатов расчетов с предыдущего элемента в качестве значений переменных для последующего.

Выходными параметрами электрической сети 0,4 кВ являются: линейное номинальное напряжение электрической сети – V , В; ток электрической сети – A , А; частота электрической сети – f . Также оценивается потребляемая электроприводом мощность – P , Вт.

На выходе частотного преобразователя анализируется уровень напряжения – V_1 , В и его частота – f_1 , Гц, которые задаются управляющим воздействием f_u , Гц.

От асинхронного электродвигателя на насос передается механическая частота вращения вала электродвигателя – n , а от насоса на электродвигатель момент сопротивления на валу – M_c , Н·м. От насоса на трубопровод передается величина подачи (объемного расхода) – Q_1 , м³/с и напора насоса – H , м.

На выходе из трубопровода анализируется температура воды – t_k , °С, а на выходе из резервуара величина объемного перелива – Q_3 , м³/с, зависящая от величины водопотребления Q_2 , м³/с, а также уровень воды в резервуаре – l , м.

Сигнал f_u является выходным сигналом системы управления и основным управляющим воздействием на исполнительный механизм; сигналы Q_1 , l , t_k – являются выходными технологическими параметрами и формируют отрицательную обратную связь путем вычисления соответствующих ошибок регулирования e_Q , e_L , e_T от заданных уставок подачи Set_Q , м³/с, уровня Set_L , м и температуры Set_T , °С. Q_2 , t_n и t_o – основные возмущающие воздействия, задаваемые как константы или временные функции.

Потребляемая мощность P и объем перелива Q_3 являются дополнительными выходными параметрами и служат для оценки технико-экономической эффективности функционирования системы.

2.2 Математическая модель электротехнического комплекса участка первого подъема

Целью построения математической модели ЭТК УПП является формальное описание набора выражений, обеспечивающих расчет выходных и вспомогательных параметров имитационной модели.

Исходным параметром, определяющим результаты вычисления всех последующих блоков модели является управляющее воздействие f_u . Данный параметр рассчитывается системой управления, по принципу, приведенному в выражении (2.1):

$$f_u(\tau_i) = f_u(\tau_{i-1}) + \Delta f_u(\tau_i), \quad (2.1)$$

где τ – время моделирования, с;

i – порядковый номер временного момента моделирования;

Δf_u – изменение управляющего воздействия, определяемое основным управляющим сигналом.

Запуск, остановку и значительное изменение частоты питания электродвигателя с насосной нагрузкой крайне нежелательно выполнять мгновенно. Для решения данной проблемы вводится задержка изменения частоты запуска и остановки. Удобней описывать данную задержку при помощи коэффициента T_d , который задает время изменения частоты от нулевого значения до номинальной величины. В этом случае процесс изменения частоты может быть описан линейной функцией при помощи системы (2.2):

$$\begin{cases} \tau_e = \tau_n + \frac{T_d \cdot |\Delta f_u(\tau_n)|}{f}, \\ f_u(\tau_i) = \text{sign}(\Delta f_u(\tau_n)) \cdot \frac{f}{T_d} \cdot \tau_i + f_u(\tau_n), & \tau_n \leq \tau_i < \tau_e, \\ f_u(\tau_i) = f_u(\tau_n) + \Delta f_u(\tau_n), & \tau_e \leq \tau_i, \\ f_u(\tau_i) = 0, & f_u(\tau_i) \leq 0, \\ f_u(\tau_i) = f, & f_u(\tau_i) \geq f \end{cases}, \quad (2.2)$$

где τ_n – момент времени начала переходного процесса, с;

τ_e – момент времени окончания переходного процесса, с;

В качестве управляющего сигнала используется значение с момента начала переходного процесса. В случае изменения управляющего сигнала переходной процесс останавливается и запускается новый, в котором в качестве начальных значений используются текущие.

При частотном преобразовании значению управляющего воздействия точно соответствует частота на выходе преобразователя ($f_1 = f_u$). При расчете амплитуды напряжения на выходе частотного преобразователя используется основное соотношение скалярного метода частотного регулирования (1.7), которое при использовании номинальных значений электропитания преобразуется в формулу (2.3):

$$V_1 = \frac{V \cdot f_1}{f}. \quad (2.3)$$

Ток A в цепи питания и A_1 на выходе частотного преобразователя зависят от производительности насоса, и определяется из потребляемой мощности путем экспериментального измерения или косвенного расчета. Поскольку источник электроэнергии является идеальным, влияние сети на уровень потребляемого тока не учитывается.

Для моделирования трехфазной асинхронной машины с короткозамкнутым ротором используется стандартный блок Matlab Simulink Asynchronous Machine, описываемый базовой системой уравнений с вращающимися координатами [92]. Входные данные, задаваемые при настройке блока асинхронной машины (приводятся в таблице А.1 приложения А), используются как коэффициенты данной системы. При этом электрические величины определяются при помощи стандартных схем замещения асинхронных электродвигателей [34, 93] и заносятся в специальные сводные таблицы характеристик различных серий электродвигателей [94], либо указываются производителем электродвигателя.

Основными связующими и выходными параметрами асинхронной машины являются механическая частота вращения вала ротора и потребляемая мощность. Для снижения вычислительной нагрузки в процессе моделирования, возможно использовать упрощенные формулы для оценки данных параметров.

Для определения приближенной линейной зависимости скорости вращения вала электродвигателя от выходной частоты частотного преобразователя может использоваться выражение, основанное на подобии зависимости изменения электрической частоты и частоты вращения вала электродвигателя [32]:

$$n = \frac{n_n \cdot f_1(\tau_i)}{f}. \quad (2.4)$$

Формула не учитывает сопротивление моменту нагрузкой, а также трение и вязкость среды. Тем не менее, у центробежных насосов данные параметры достаточно малы и, зачастую, ими можно пренебречь.

Для приблизительной оценки потребляемой мощности, с учетом падения КПД насоса при частотном регулировании, может использоваться следующая зависимость [5]:

$$P = \frac{9,81 \cdot k_Q \cdot Q_1 \cdot H}{\eta_f \cdot \eta_p \cdot (1 - (1 - \eta) \cdot n_n \cdot n^{-1})}, \quad (2.5)$$

где k_Q – коэффициент коррекции мощности по подаче. Оценивается на основании паспортных данных насоса для номинальной подачи в текущих условиях с учетом коэффициента полезного действия электродвигателя и частотного преобразователя. Необходим, поскольку формула в исходном виде в случае большого сопротивления трубопроводной линии не учитывает смещение рабочей точки для номинальной подачи и потери мощности на дросселирование;

η_f – коэффициент полезного действия частотного преобразователя, %;

η_p – номинальный коэффициент полезного действия электродвигателя, %;

η – коэффициент полезного действия насоса, %.

Зависимость не учитывает переходные процессы в электрической части, добавочные потери электроэнергии при частотном регулировании, колебания момента на валу, но также может применяться при соответствующем обосновании и оценки погрешности.

Подача и напор насоса при частотном регулировании рассчитываются по модифицированным формулам подобия (1.5) и (1.6) соответственно. Номинальная подача Q_n , при стандартной питающей частоте электропривода и текущих параметрах трубопроводной сети, определяется графически как точка пересечения кривых напорно-расходных характеристик насоса (1.2) и трубопровода (1.3).

Фиктивное сопротивление и напор оцениваются либо по паспортным данным, либо по имеющейся из документации напорно-расходной характеристике насоса при помощи выражений (2.6) и (2.7) соответственно [32].

$$S_f = \frac{H_{p1} - H_{p2}}{Q_{p2}^2 - Q_{p1}^2}, \quad (2.6)$$

где H_{p1} – напор насоса в точке 1 рабочей части напорно-расходной характеристики, м;

H_{p2} – напор насоса в точке 2 напорно-расходной характеристики, м;

Q_{p2} – подача насоса в точке 2 рабочей части напорно-расходной характеристики, м³/с;

Q_{p1} – подача насоса в точке 1 рабочей части напорно-расходной характеристики, м³/с.

$$H_f = H_{p1} - S_f \cdot Q_{p1}^2, \quad (2.7)$$

Момент сопротивления насоса на валу электродвигателя рассчитывается по формуле [3, 18]:

$$M_c = \frac{93,83 \cdot \rho \cdot k_{Q1} \cdot Q_1 \cdot H}{n \cdot (1 - (1 - \eta) \cdot n_n \cdot n^{-1})}, \quad (2.19)$$

где k_{Q1} – коэффициент k_Q без учета коэффициента полезного действия электродвигателя и частотного преобразователя.

Гидравлическая часть трубопровода может быть описана при помощи выражения (1.3). Вычисление общего коэффициента удельного сопротивления трубопровода осуществляется на основании модифицированной формулы Вейсбаха-Дарси, учитывающей местные сопротивления и динамические свойства трубопроводной системы [32]

$$S = \frac{8}{\pi^2 \cdot d_1^4 \cdot 9,81} \cdot \left(\frac{L \cdot \lambda}{d_1} + LR \right). \quad (2.8)$$

где d_1 – внутренний диаметр трубопровода, м;

λ – коэффициент гидравлического сопротивления линейного участка трубопровода;

LR – сопротивление нелинейных участков трубопровода.

Коэффициент местных сопротивлений LR может оцениваться как сумма сопротивлений всех нелинейных элементов трубопровода, определяемых из табличных данных [33] или экспериментально. Коэффициент сопротивления линейного участка трубопровода λ зависит от характера течения воды в трубопроводе и рассчитывается по правилам, описанным в источнике [32].

Для нахождения установившейся температуры в конце трубопровода используется наиболее достоверная формула (1.8). Вычисление коэффициента теплопередачи к стенке трубы и приведенного коэффициента теплопередачи, учитывающего термические свойства трубопровода, теплоизоляции и окружающей среды, осуществляется по методикам, описанным в источнике [9].

При расчете диссипативной теплоты трения по формуле (1.9) оценивается гидравлический уклон трубопровода по методике из источника [95].

В представленном виде формула (1.8) не учитывает транспортную задержку изменения температуры при возмущениях подачи и других внешних условий. Для получения аналитического выражения для оценки переходного процесса

изменения конечной температуры воды, можно взять за основу следующее дифференциальное уравнение [72].

$$\frac{\partial t_k(\tau)}{\partial \tau} = - \frac{4 \cdot Q_I(\tau) \cdot (t_k(\tau) - t_k^s)}{\pi \cdot L \cdot d_1^2}, \quad (2.9)$$

где t_k^s – температура воды в конце трубопровода при $\tau \rightarrow \infty$ (момент окончания переходного процесса).

Применение формулы (2.9) предполагает, что параметры воды, такие как плотность, теплоемкость, вязкость и т.д. принимаем постоянными, поскольку их изменения являются незначительными в исследуемых температурных диапазонах. Для оценки влияния подачи насоса на тепловые свойства транспортируемой воды необходимо учитывать энергию внутреннего трения. Поэтому при получении искомой зависимости для расчета t_k^s используется выражение (1.8). После подстановки и группировки, форма записи дифференциального уравнения для расчета конечной температуры воды с учетом транспортного запаздывания примет вид:

$$\frac{\partial t_k(\tau)}{\partial \tau} + P(\tau) \cdot t_k(\tau) = P(\tau) \cdot R(\tau), \quad (2.10)$$

где:

$$P(\tau) = \frac{4 \cdot Q_I(\tau)}{\pi \cdot L \cdot d_1^2}, \quad (2.11)$$

$$R(\tau) = t_o(\tau) + \frac{q_t(\tau)}{k_1(\tau) + k_{pr}(\tau)} + \left(t_n(\tau) - t_o(\tau) - \frac{q_t(\tau)}{k_1(\tau) + k_{pr}(\tau)} \right) \times \times e^{\frac{-L}{C_v \cdot Q_I(\tau) \cdot \left(\frac{1}{k_1(\tau)} + \frac{1}{k_{pr}(\tau)} \right)}}. \quad (2.12)$$

Решая уравнение методом вариации произвольной постоянной и учитывая, что в течении переходного процесса значения переменных параметров не изменяются, и соответствуют началу переходного процесса, получаем следующее решение:

$$t_k(\tau) = C_1 \cdot e^{-P\tau} + R. \quad (2.13)$$

Приняв в качестве начального условия $t_k = t_{kn}$, при $\tau = \tau_n$ получим значение постоянной:

$$C_1 = (t_{kn} - R) \cdot e^{P\tau_n}, \quad (2.14)$$

Отличие τ_n от нуля позволяет смоделировать сложный переходной процесс с изменяющимися параметрами. Момент изменения внешних параметров расценивается как начало нового переходного процесса и перезапуск расчетов.

Формула вычисления конечной температуры по временной шкале примет вид:

$$t_k(\tau) = (t_{kn} - R) \cdot e^{P(\tau_n - \tau)} + R, \quad (2.15)$$

После выполнения подстановки и группировки подобных слагаемых, значение температуры в текущий момент времени моделирования при значениях внешних параметров, соответствующих началу переходного процесса равно:

$$t_k(\tau_i) = t_{kn} \cdot e^{\frac{4Q_l}{\pi \cdot L \cdot d_l^2}(\tau_n - \tau_i)} + t_o \cdot \left(1 - e^{\frac{4Q_l}{\pi \cdot L \cdot d_l^2}(\tau_n - \tau_i)} \right) + \frac{q_t}{k_l + k_{pr}} \times \\ \times \left(1 - e^{\frac{4Q_l}{\pi \cdot L \cdot d_l^2}(\tau_n - \tau_i)} \right) + \left(t_n - t_o - \frac{q_t}{k_l + k_{pr}} \right) \cdot e^{-\frac{L}{C_v \cdot Q_l \cdot \left(\frac{1}{k_l} + \frac{1}{k_{pr}} \right)}} \cdot \left(1 - e^{\frac{4Q_l}{\pi \cdot L \cdot d_l^2}(\tau_n - \tau_i)} \right). \quad (2.16)$$

Чтобы оценить длительность переходного процесса требуется выразить из выражения (2.15) время достижения установившегося значения конечной температуры с заданной ошибкой $\pm \varepsilon$:

$$t_k^s \pm \varepsilon = (t_{kn} - R) \cdot e^{P(\tau_n - \tau)} + R. \quad (2.17)$$

Учитывая, что конечная температура определяется коэффициентом R , формула (2.17) может быть преобразована к следующему виду:

$$\tau = \tau_n - \frac{1}{P} \cdot \ln \left(\left| \frac{\varepsilon}{t_{kn} - R} \right| \right), \quad (2.18)$$

Формула (2.18) позволяют найти момент времени окончания переходного процесса. Чтобы оценить его длительность в качестве τ_n принимается 0.

При вычислении основного технологического параметра – уровня воды в резервуаре, используется его динамическая модель, описываемая уравнением:

$$\frac{\partial l(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{s} \cdot (Q_1(\tau) - Q_2(\tau)). \quad (2.19)$$

где s – площадь дна накапливающего резервуара, м^2 .

Обыкновенное однородное дифференциальное уравнение решается интегрированием левой и правой части. Как и в случае с расчетом переходного процесса изменения температуры, полагаем, что подача и водопотребление не изменяются в течении расчета и соответствуют значениям в начальный момент времени τ_n . Тогда решение уравнения будет иметь вид:

$$l(\tau) = \frac{Q_1 - Q_2}{s} \cdot \tau + C. \quad (2.20)$$

Принимаем, что при $\tau = \tau_n$ значение уровня $l(\tau) = l_n$, тогда постоянная выражается как:

$$C = l_n - \frac{Q_1 - Q_2}{s} \cdot \tau. \quad (2.21)$$

И решение уравнения примет вид:

$$l(\tau_i) = \frac{Q_1 - Q_2}{s} \cdot (\tau_i - \tau_n) + l_n, \quad 0 \leq l(\tau_i) \leq h. \quad (2.22)$$

где h – высота накапливающего резервуара, м.

Для оценки технико-экономических показателей функционирования ЭТК УПП следует оценивать мгновенный объем перелива воды из резервуара, который определяется следующим выражением:

$$\begin{cases} Q_3 = Q_1 - Q_2, & l > h, \\ Q_3 = 0, & l \leq h \end{cases}, \quad (2.23)$$

Суммарный объем перелива за исследуемый период позволит оценить неоправданные эксплуатационные затраты водных ресурсов.

Основные возмущающие воздействия, такие как водопотребление и температура окружающей среды вводятся в модель в виде аппроксимированных статистических данных за предполагаемый период моделирования. Температура окружающей среды приблизительно может задавать синусоидальной функцией.

2.3 Компьютерная имитационная модель электротехнического комплекса участка первого подъема

Математическая модель, описанная в предыдущем подразделе, реализуется в программном пакете Simulink среды Matlab в виде блочной схемы, представленной на рисунке 2.2 [96, 97].

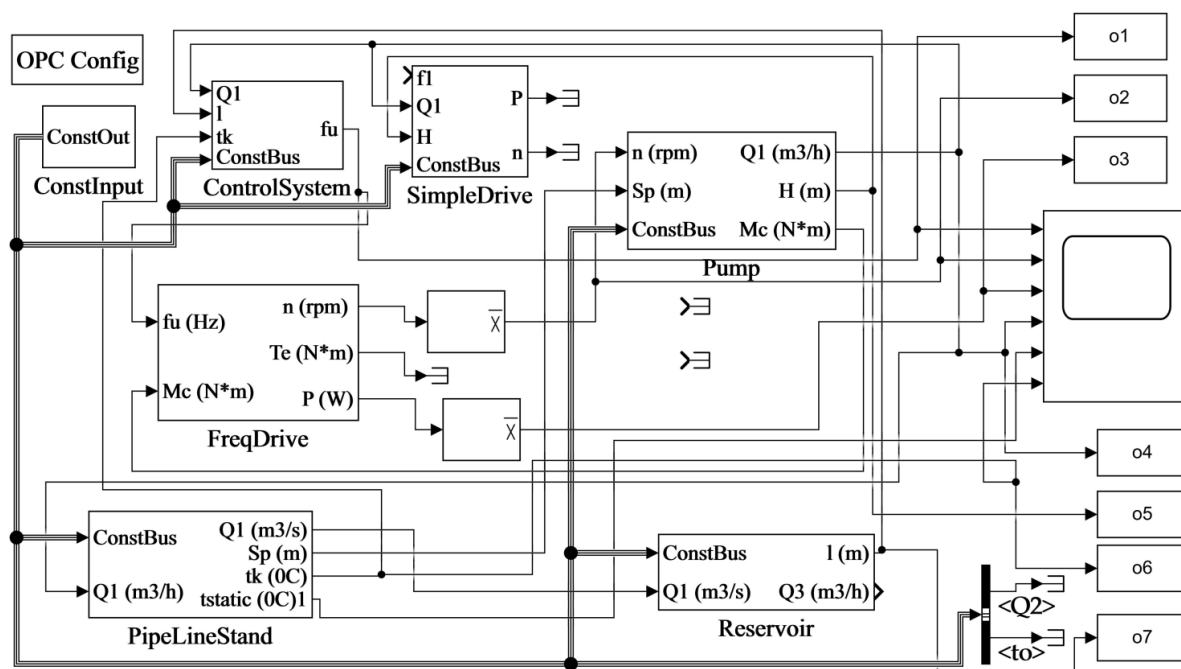


Рисунок 2.2 – Блочная схема имитационной модели ЭТК УПП

Данная модель состоит из основных блоков-подсистем:

- 1) «FreqDrive» – частотно-регулируемый электропривод;

- 2) «Pump» – насос;
- 3) «PipeLine» – трубопровод;
- 4) «Reservoir» – накапливающий резервуар;
- 5) «ControlSystem» – система управления;
- 6) «ConstInput» – ввод внешних данных и параметров в модель;
- 7) «SimpleDrive» – упрощенная модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода.

Подсистема «ConstInput» позволяет осуществлять ввод постоянных или изменяющихся по заданному закону параметров модели в едином блоке с последующей подачей информации на остальные подсистемы по шинам с выборочным доступом. Подсистема также позволяет построить входную функцию основных возмущающих воздействий по водопотреблению и температуре окружающей среды при помощи подсистемы «Distrubances», схема которой приводится на рисунке 2.3.

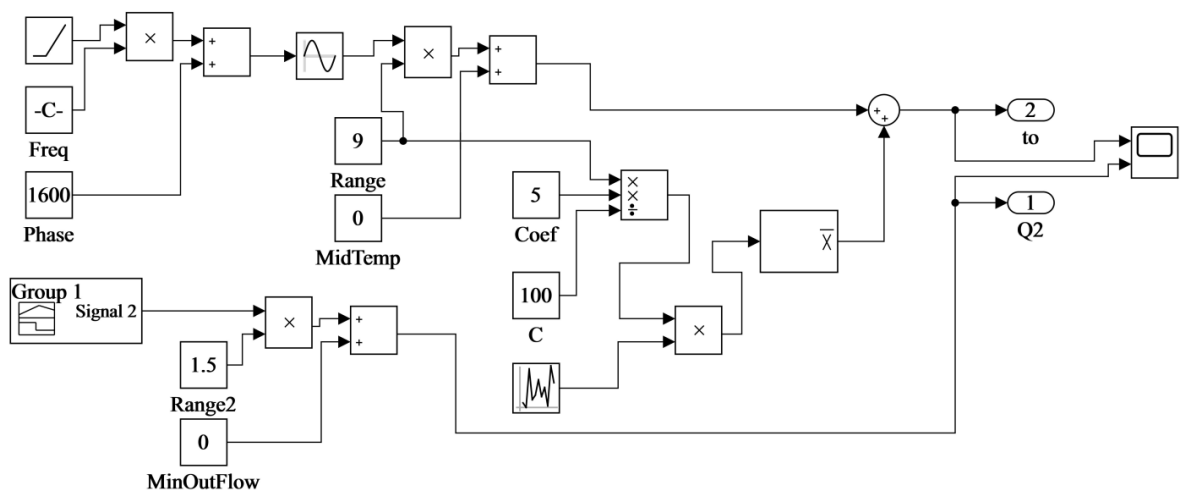


Рисунок 2.3 – Подсистема «Distrubances»

Сигнал температуры окружающей среды в этой подсистеме задается в виде синусоидальной зависимости с переменной амплитудой, частотой, фазой и смещением. Предполагается, что в течение циклического периода времени (сутки, год) колебания температуры будут приблизительно соответствовать

синусоидальному закону. Сигнал водопотребления устанавливается на основе аппроксимированной статистической информации о количестве потребления воды на текущем объекте за заданный интервал времени.

Подсистема «FreqDrive», представленная на рисунке 2.4, объединяет в себе трехфазный источник питания, частотный преобразователь и трехфазный асинхронный электродвигатель.

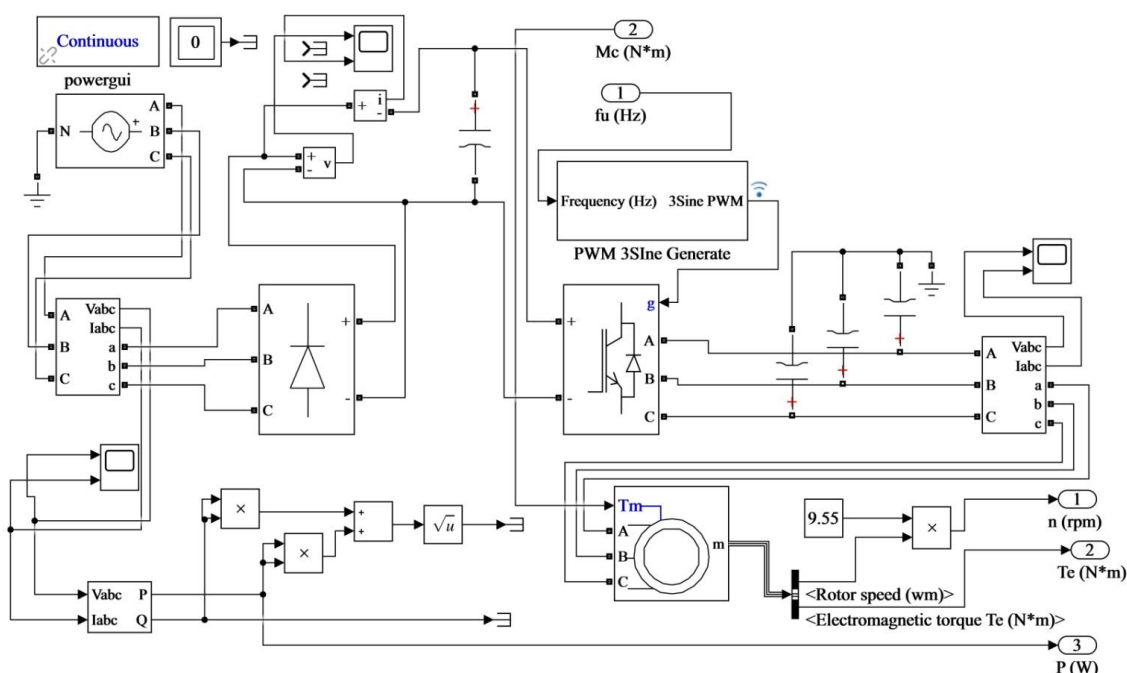


Рисунок 2.4 – Блочная схема подсистемы «FreqDrive»

В блоке «FreqDrive» присутствует источник идеального трехфазного переменного линейного напряжения 380 В со стандартной частотой 50 Гц. Данное напряжение выпрямляется полномостовым трехфазным диодным выпрямителем и поступает на трехфазный полномостовой инвертор напряжения [37] на основе IGBT. Режим работы инвертора задается специальной схемой «PWM 3Sine Generate», авторской разработки, представленной на рисунке 2.5. Открытие транзисторных ключей инвертора осуществляется при помощи 6 сигналов широтно-импульсной модуляции, на основе трех эталонных синусоид,

соответствующих фазным напряжениям. Частота эталонных синусоид определяется параметром f_u , рассчитываемым при помощи выражения (2.1) или (2.2). Амплитуда эталонных синусоид рассчитывается по формуле (2.3), что соответствует скалярному способу частотного регулирования.

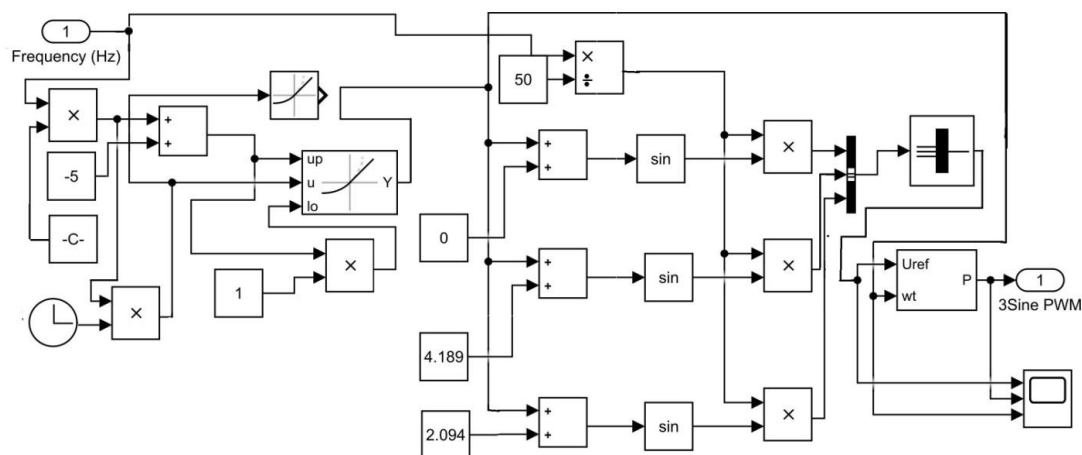


Рисунок 2.5 – Блочная схема «PWM 3Sine Generate»

Преобразованное напряжение требуемой частоты поступает на стандартный элемент, описывающий асинхронный двигатель переменного тока.

Подсистема «SimpleDrive», позволяет упрощенно моделировать частотно-регулируемый асинхронный электропривод. Схема подсистемы приводится на рисунке 2.6.

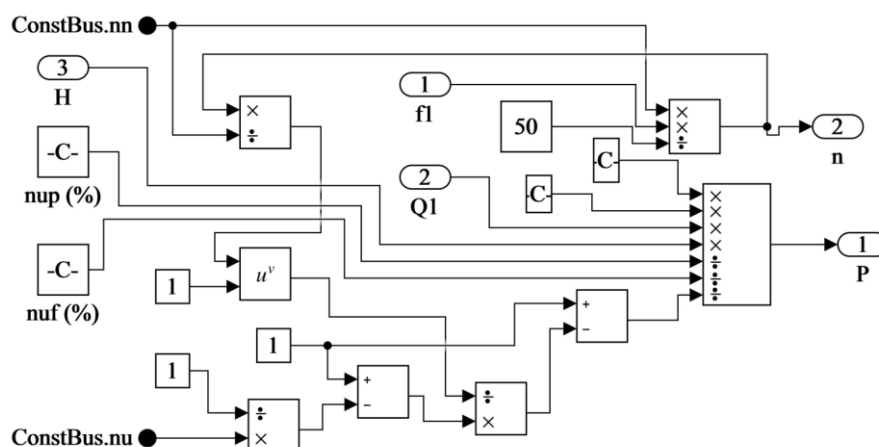


Рисунок 2.6 – Подсистема «SimpleDrive»

Расчет выходных параметров подсистемы, а именно механической частоты вращения вала электродвигателя и потребляемой мощности, выполняется по формулам (2.4) и (2.5) соответственно.

Подсистема «Pump» представлена на рисунке 2.7.

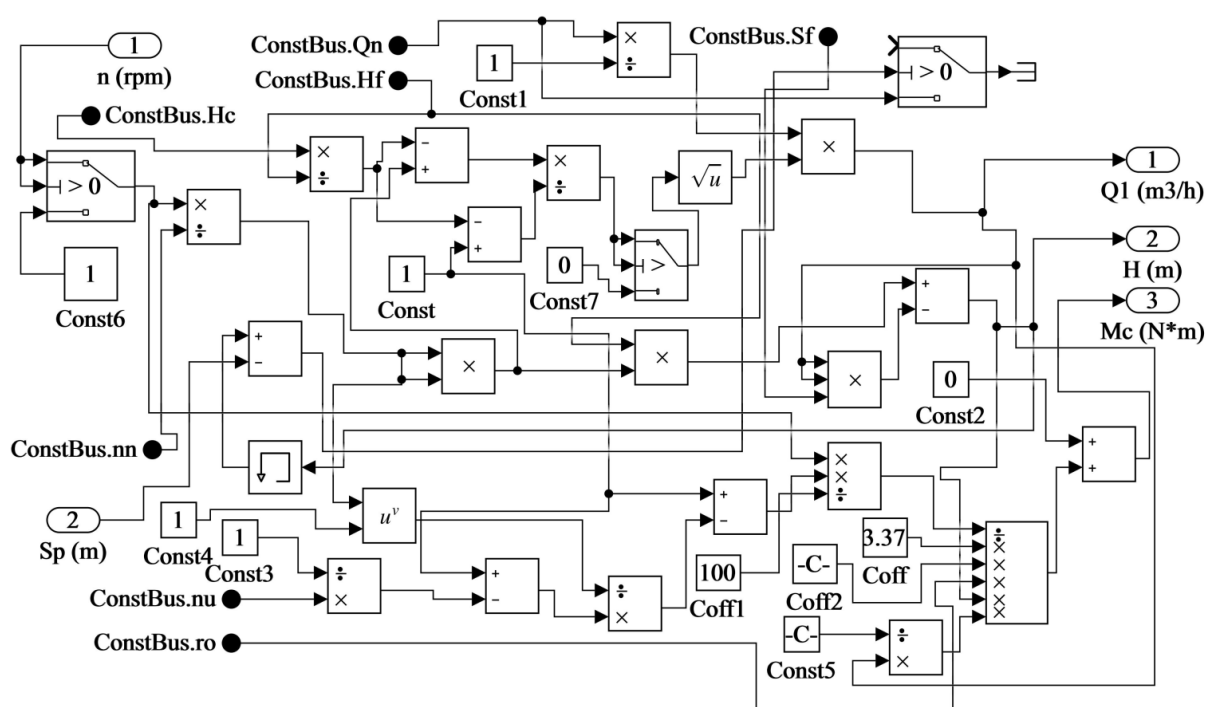


Рисунок 2.7 – Блочная схема подсистемы «Pump»

На выходе подсистемы присутствуют сигналы подачи (объемного расхода), напора насоса и момент сопротивления на валу привода, рассчитываемые по соответствующим формулам математической модели.

Подсистема «PipeLine», изображена на рисунке 2.8. Предложенная схема отличается декомпозиционным подходом к построению модели трубопроводной линии. Модель разбивается на набор однотипных секций, которые могут задавать участки прямого трубопровода, либо фитинги и иные нестандартные элементы. Каждая секция получает на входе различные параметры, что обеспечивает возможность моделирования различных участков линии, эксплуатируемых в разных условиях. Секции реализуются подсистемами «PipeElement».

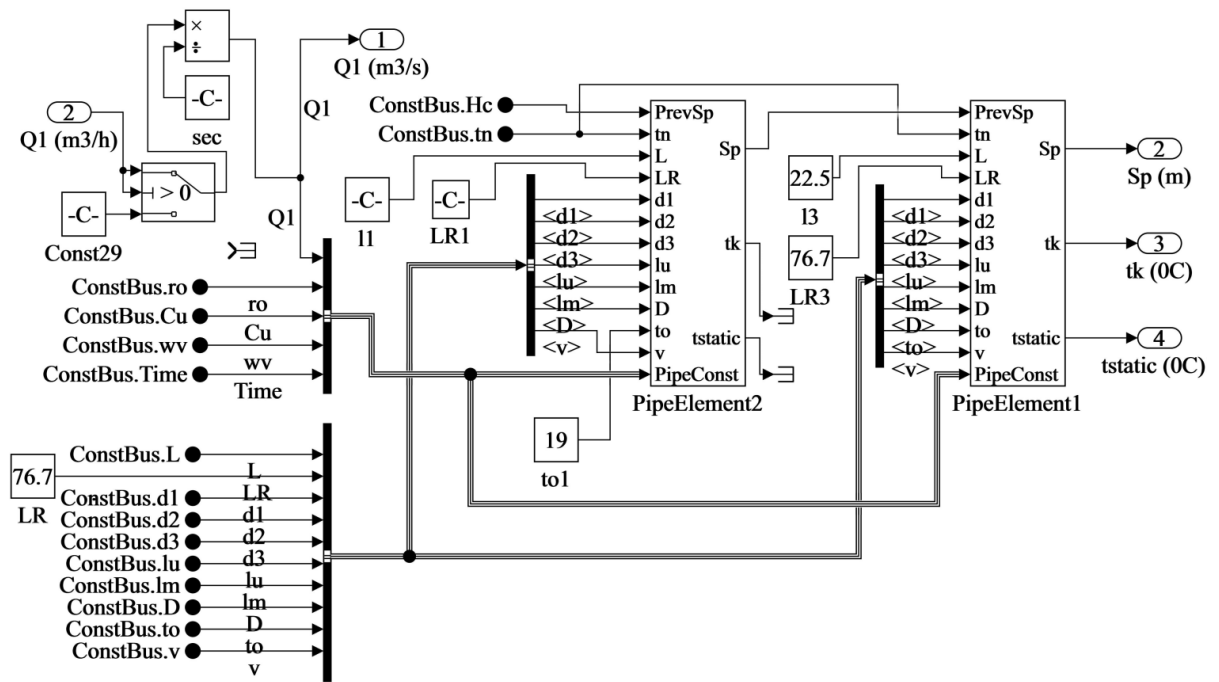


Рисунок 2.8 – Блочная схема подсистемы «PipeLine»

Внутри подсистемы «PipeElement» (рисунок 2.9) производится расчет напора участка трубопровода и его конечной температуры при помощи подсистем «SysPress» и «Temperature».

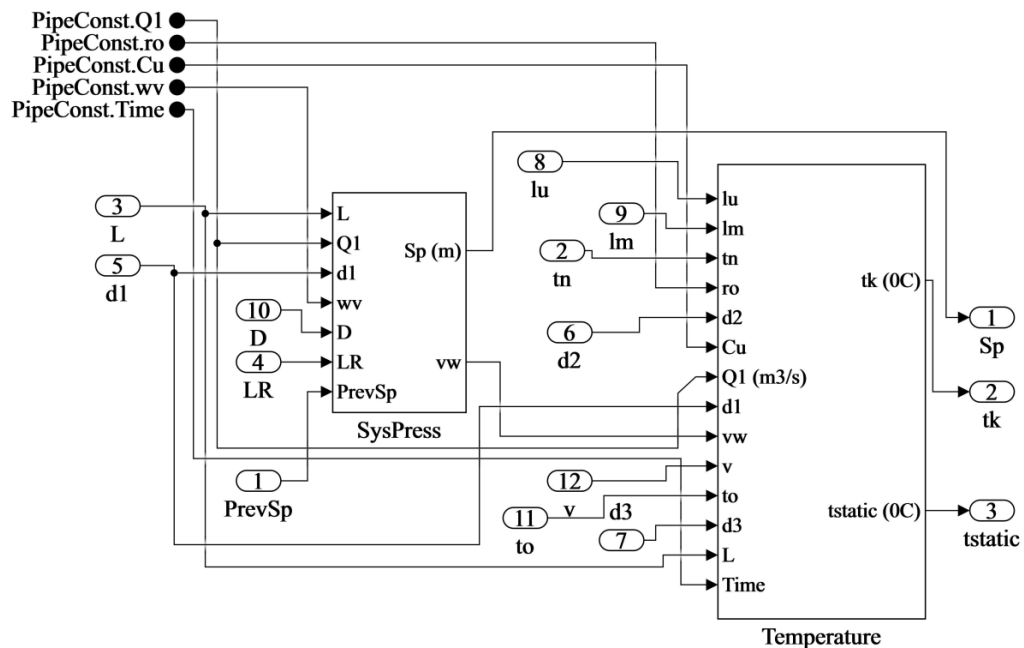


Рисунок 2.9 – Подсистема «PipeElement»

Каждая секция «PipeElement» получает на входе собственное значение длины, местного сопротивления, начальной температуры и т.д. Напор трубопроводной системы рассчитывается подсистемой «SysPress» по формуле (1.3), а температура воды в конце трубопровода подсистемой «Temperature» по формуле (2.16). Предложенная структура модели трубопровода позволяет задавать произвольную конфигурацию водовода, а также получать температуру и напор в любой его точке.

Подсистема «Reservoir», изображенная на рисунке 2.10, принимает на входе величину объемного расхода, величину водопотребления и геометрические параметры резервуара.

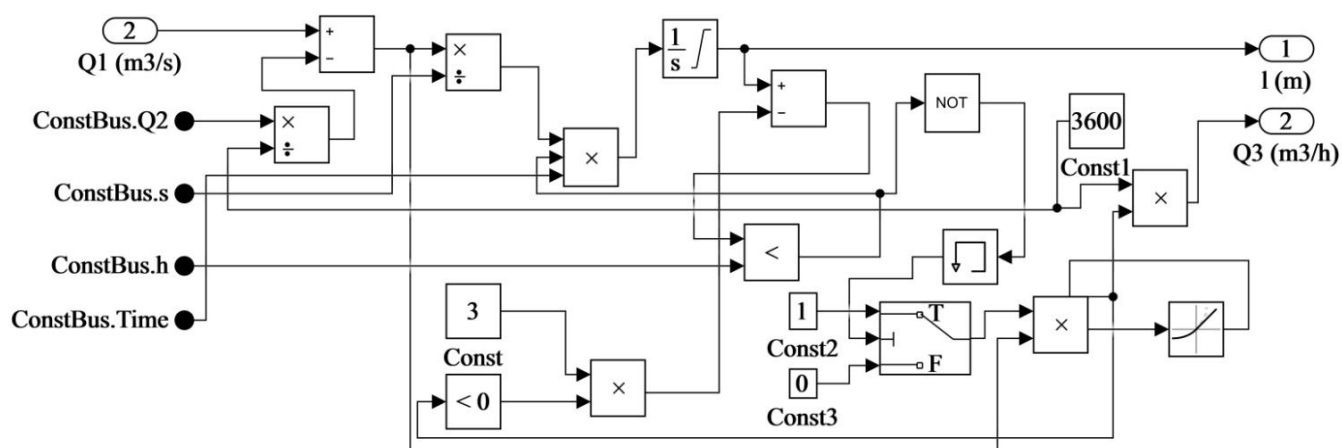


Рисунок 2.10 – Блочная схема подсистемы «Reservoir»

Основным выходным сигналом является уровень воды, вычисляемый по формуле (2.22). Подсистема отличается возможностью расчета объемного перелива воды по формуле (2.23), в случае превышения подачи насоса над разбором конечным потребителем, что важно для оценки экономических убытков от переработки насосов.

Система управления ЭТК УПП реализуется в виде подсистемы, приведенной на рисунке 2.11. Подсистема имеет гибкую структуру, состоящую из нескольких стандартных блоков ПИД - регуляторов.

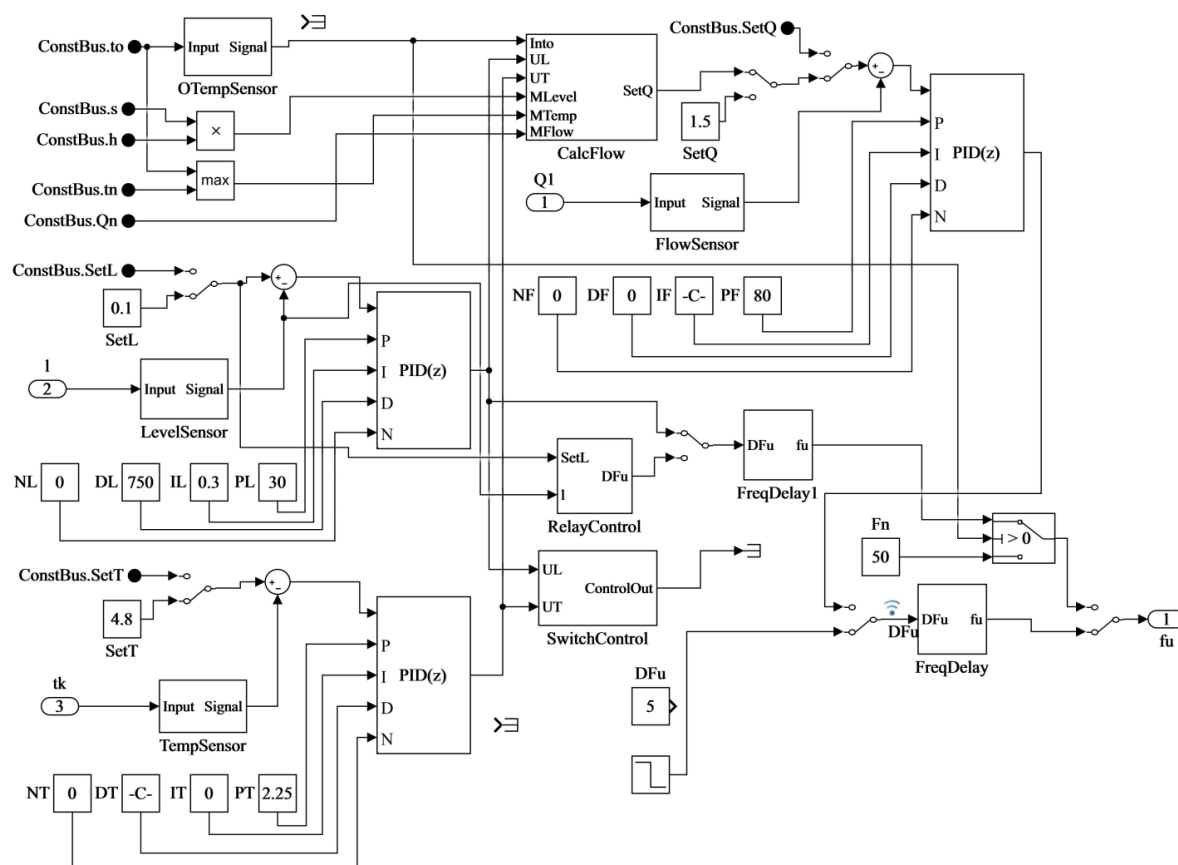


Рисунок 2.11 – Подсистема «ControlSystem»

Для моделирования дискретных режимов работы системы управления, принимаемые сигналы должны быть дискретизированы и квантованы. Кроме того, информация может быть искажена при измерении датчиками. Для учета данных особенностей был разработан универсальный блок моделирования различных датчиков (рисунок 2.12).

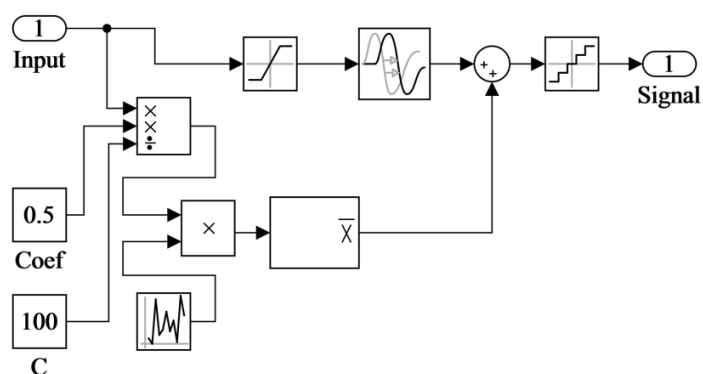


Рисунок 2.12 – Подсистема «xSensor»

Для реализации механизма задержки изменения управляющего воздействия по частоте с целью обеспечения достаточной плавности регулирования производительности насоса, была разработана подсистема «FreqDelay», представленная на рисунке 2.13 и вычисляющая выражение (2.2).

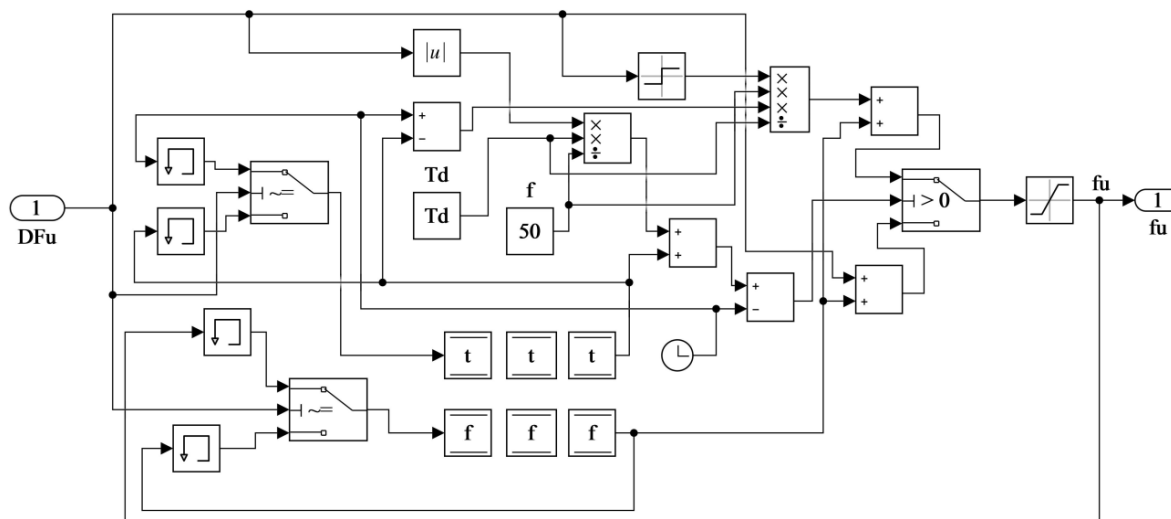


Рисунок 2.13 – Подсистема «FreqDelay»

Также, в «ControlSystem» имеется две вспомогательные подсистемы «CalcFlow» и «SwitchControl», предназначенные для расчета оптимального расхода на основе управляющих воздействий уровня и температуры и выбора наибольшего сигнала с наложением масштабирующих коэффициентов.

Подсистема «RelayControl» позволяет выполнить релейное управление процессом наполнения резервуара с целью сравнительной оценки эффективности предлагаемого способа управления. Подсистема реализует простой алгоритм двухточечного контроля уровня с отключением насоса при достижении верхнего уровня, и включением при достижении нижней отметки. Верхний и нижний уровень определяются как заранее заданное отклонение от уставки по уровню с учетом габаритов резервуара и запасом на опорожнение и переполнение.

2.4 Физическая модель электротехнического комплекса участка первого подъема

Для подтверждения корректности математической модели и оценки правильности результатов имитационного моделирования был разработан лабораторный стенд, имитирующий ЭТК УПП системы водоснабжения с накапливающим резервуаром [17, 98, 99, 100]. Схема лабораторного стенда приводится на рисунке 2.14.

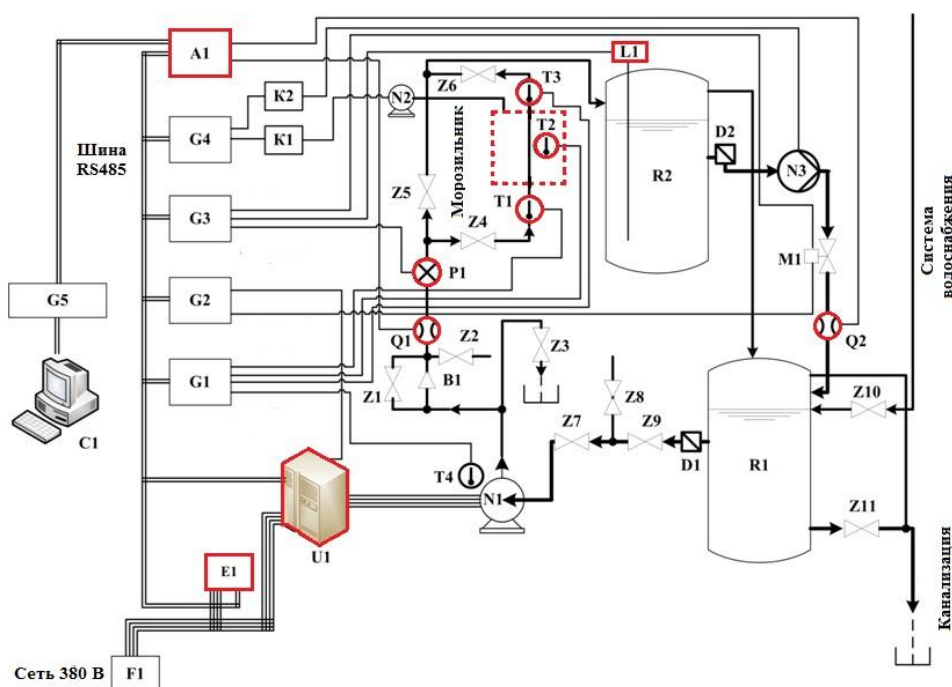


Рисунок 2.14 – Схема лабораторного стенда

Для реализации требуемых функциональных возможностей стенд содержит следующие элементы:

- 1) накапливающий резервуар (R2);
- 2) буферный резервуар (R1),
- 3) электрический вводно-распределительный щиток (F1);

4) трехфазный счетчик электрической энергии (E1 – Меркурий 230 AR-02 R, диапазон мгновенной мощности при прямом измерении от 0,027 до 69 кВт, относительная погрешность измерения $\pm 1,5 \%$);

5) персональный компьютер (C1);

6) преобразователь интерфейсов (G5);

7) частотный преобразователь (U1);

8) устройство управления авторского изготовления (A1);

9) модуль дискретного вывода (G4);

10) модуль аналогового ввода (G3), модуль аналогового вывода, модуль для подключения температурных датчиков (G1);

11) датчик давления (P1 – Карат СДВ-И-1.6М-DA422206053, диапазон измерения от 0 до 1,6 МПа (163,1 м), относительная погрешность $\pm 0,5 \%$);

12) расходомер (Q1 – КАРАТ-551-25-0, диапазон измерения от 0,07 до 18 м³/ч, относительная погрешность измерения $\pm 3 \%$);

13) расходомер (Q2 – КАРАТ-520-32-T150-0, диапазон измерения от 0,06 до 12 м³/ч, относительная погрешность измерения $\pm 2 \%$);

14) насос (N1 – K50-32-125);

15) регулирующий клапан с электроприводом (M1);

16) поплавковый датчик динамического уровня (L1 – ОВЕН ПДУ-И, диапазон измерения от 0 до 1,5 м, абсолютная погрешность измерения $\pm (0,01 + 0,01 \cdot l)$ м);

17) врезные датчики температуры жидкости в трубопроводе (T1, T3 – ОВЕН ДТС064-100М.В3, диапазон измерения от минус 50 до 150 °С, абсолютная погрешность измерения $\pm (0,25 + 0,005 \cdot |t|)$ °С);

18) камера охлаждения с компрессором (N2);

19) датчик температуры холодильной камеры (T2 – ОВЕН ДТС125-Л.И, диапазон измерения от минус 50 до 180 °С, относительная погрешность измерения $\pm 0,5 \%$);

20) сетчатые водяные фильтры (D1, D2);

- 21) обратный клапан (B1);
 - 22) ручная запорная арматура (Z1 – Z11);
 - 23) датчик температуры электродвигателя насоса (Т4);
 - 24) циркуляционный насос обратного контура (N3).
- Внешний вид стенда приводится на рисунке 2.15.



Рисунок 2.15 – Внешний вид лабораторного стенда

Для размещения элементов системы управления стендом был разработан пункт автоматизированного контроля (рисунок 2.16).

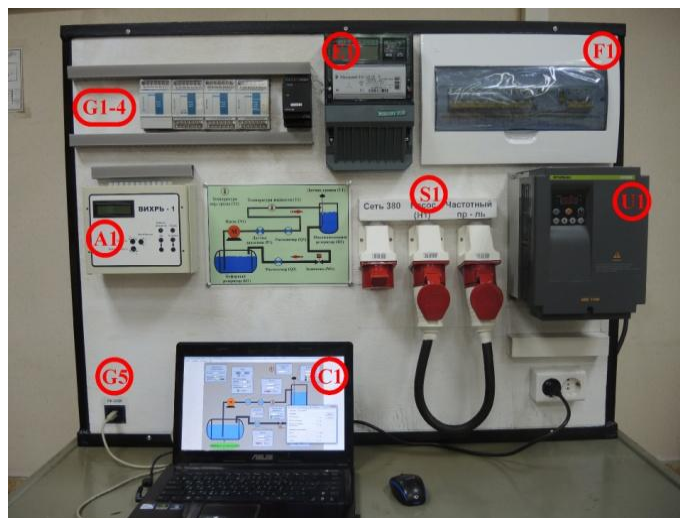


Рисунок 2.16 – Внешний вид пункта автоматизированного контроля

На рисунке S1 – блок перемычек для подключения электродвигателя насоса к частотному преобразователю, либо напрямую к сети.

Для охлаждения воды на участке трубопровода используется камера охлаждения, внешний вид которой приводится на рисунке 2.17.



Рисунок 2.17 – Камера охлаждения

Длина трубопровода внутри холодильной камеры составляет 22,5 м. Минимальная температура, достигаемая в камере, составляет минус 9 °С. Управления камерой осуществляется путем релейного включения/выключения компрессора N2. Замеры температуры воды осуществляются до камеры датчиком T1, и после – датчиком T3.

Для интерактивного управления лабораторным и стендом, а также для отображения и сбора основной технологической информации разработано специализированное программное обеспечение, функционирующее на персональном компьютере [101, 102]. Внешний вид главного окна приложения для управления стендом приводится на рисунке 2.18.

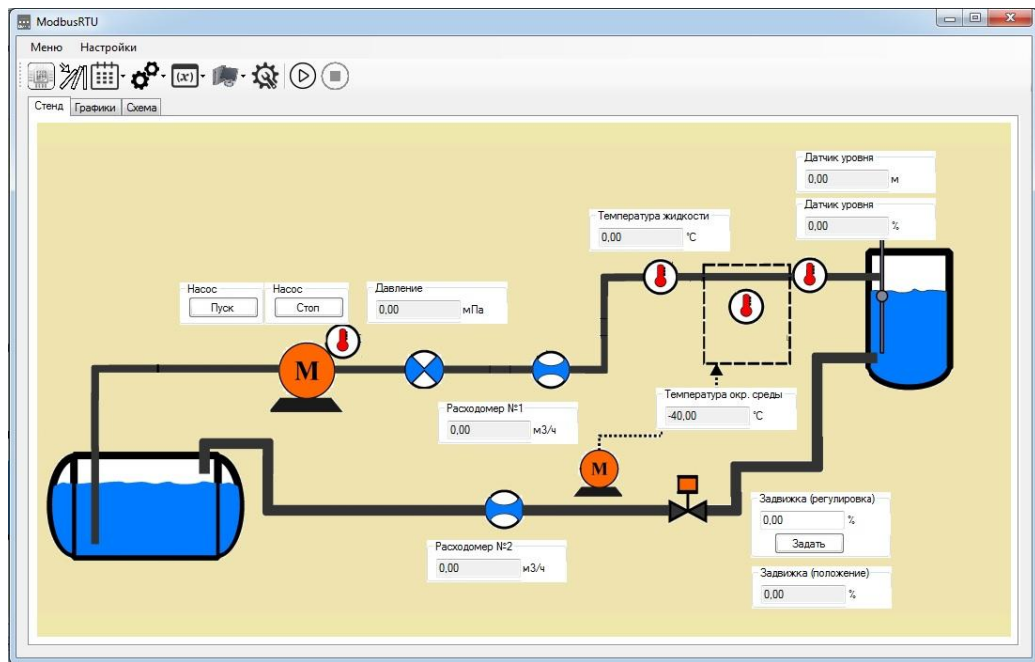


Рисунок 2.18 – Главное окно приложения для управления стендом

Программа выполнена в формате miniSCADA. Вся рассматриваемая система водоснабжения отображается в виде мнемосхемы. Около элементов схемы, параметры которых можно просматривать или изменять, имеются окна с соответствующими функциональными возможностями. Программа предназначена для отображения и изменения текущих параметров лабораторного стенда. Анализируемые параметры могут сохраняться в архив с последующим отображать в виде графиков. Программа позволяет создавать простые триггеры и события, для имитации базовых алгоритмов автоматического управления.

В итоге, разработанный лабораторный стенд позволяет:

- моделировать ЭТК УПП системы водоснабжения с накапливающим резервуаром;
- осуществлять частотное регулирование производительности насоса и охлаждение воды в трубопроводе;
- собирать, хранить и графически интерпретировать основные параметры объекта.

2.5 Сопоставление результатов имитационного и физического моделирования

Для пробного расчета имитационной модели объекта в неё были внесены значения основных параметров, соответствующих характеристикам лабораторного стенда. Значения параметров приводятся в таблице А.1 приложения А [103, 104, 105].

Для нахождения номинальной подачи для частоты питания 50 Гц при текущей конфигурации трубопроводной системы была графически определена рабочая точка системы. В соответствии с рисунком 2.19 рабочая точка лабораторного стенда соответствует подаче в $1,99 \text{ м}^3/\text{ч}$.



Рисунок 2.19 – Рабочая точка системы и номинальная подача

Далее выполнялась оценка возможности применения выражения (2.4) для расчета частоты вращения вала электродвигателя насоса. На рисунке 2.20 приводятся результаты вычисления частоты вращения вала при помощи полного стандартного расчета в подсистеме «FreqDrive» и облегченного упрощенного расчета в подсистеме «SimpleDrive» при разгоне, номинальном режиме работы и остановке электропривода.

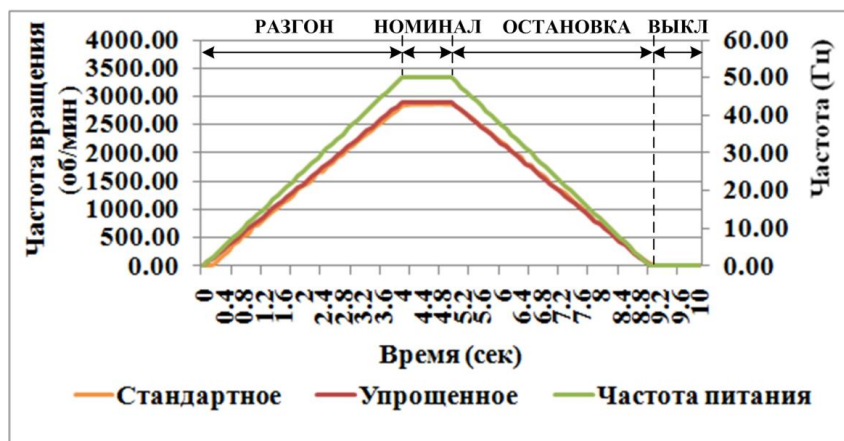


Рисунок 2.20 – Частота вращения вала электропривода

В процессе эксперимента питающая частота сначала изменялась от 0 до 50 Гц в течении 4 секунд, затем в течении 1 секунды находилась на номинальном уровне (50 Гц), после чего уменьшалась до нуля в течении 4 секунд до полного выключения электропривода насоса. Из рисунка видно, что результаты расчетов по упрощенной методике практически совпадают с данными, полученными при использовании стандартного блока асинхронной машины. Максимальное приведенное относительное отклонение составило 4,65 % (134,8 об/мин). На остальном участке кривой отклонения незначительны и в среднем составляют 1,3 %, что позволяет утверждать о возможности использования формулы (2.4).

На рисунке 2.21 оцениваются результаты вычисления потребляемой мощности стандартным и упрощенным методом.

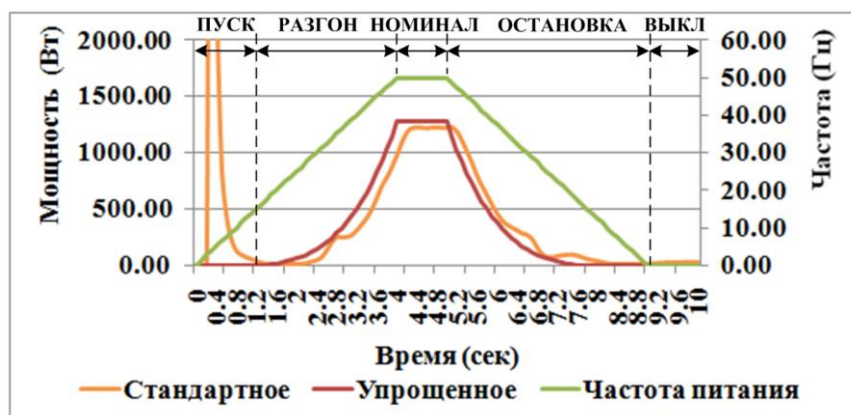


Рисунок 2.21 – Потребляемая электрическая мощность

На начальном этапе разгона электропривода наблюдается скачок потребляемой мощности в связи с возникновением пусковых токов для преодоления момента сопротивления нагрузки на низких частотах, до начала вращения ротора. При оценке номинальных режимов работы пусковой интервал времени может быть исключен из расчетов и сравнительной оценки вычислительных методов. На всем интервале времени наблюдается фазовое запаздывание изменения мощности и фиксированное снижение амплитуды при расчете по стандартной методике, использующей блок асинхронной машины. При этом форма кривой практически идентична графику, полученному при помощи выражения (2.5). В данных условиях максимальное приведенное отклонение величин составляет 19,76 % (296,4 Вт), а среднее 5,22 %.

Фазовое смещение между анализируемыми кривыми составляет 0,2 секунды или 5 % от времени переходного процесса. Следует отметить, что подобное смещение кривой мощности, полученной путем упрощенных расчетов, не внесет существенных погрешностей при анализе моделируемой системы, за счет большой длительности протекания основных технологических процессов. При совмещении фазы данных кривых, максимальное приведенное отклонение величин составляет 6,24 %, а среднее – 2,33 %. Таким образом, при применении выражения (2.5) для оценки потребляемой мощности, целесообразно полученные результаты уменьшать на величину 2,33 %.

На длительных интервалах моделирования, где секундные и минутные колебания величин не играют существенной роли, но требуется повысить скорость выполнения расчетов, возможно использовать подсистему «SimpleDrive», с учетом рекомендуемых корректировок результата.

Далее выполнялось сравнение результатов расчетов наиболее важных, с точки зрения технологического процесса, величин, с данными, полученными экспериментальным путем на лабораторном стенде. При этом анализировались потребляемая электрическая мощность, подача и напор насоса, а также температура воды в конце трубопровода. Расчет величин выполнялся в

статическом режиме, после окончания переходного процесса, на диапазоне питающих частот от 0 до 50 Гц с интервалом в 5 Гц.

Измерения на лабораторном стенде выполнялись многократно при одинаковых условиях, с учетом статистической погрешности многократных прямых равноточных измерений и приборной однократной погрешности. При оценке погрешностей использовался алгоритм действий, приведенный в пособии [102]. При расчетах использовалась доверительная вероятность $\alpha = 0,95$. При замерах мощности и подачи измерения проводились 10 раз, при замерах температуры – 3 раза, напора – 5 раз.

Приборная погрешность определяется на основании данных, указанных в технических паспортах соответствующих приборов, в абсолютной или относительной форме.

Средние значения величин, полученных экспериментальным путем, а также их полные погрешности сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты экспериментальных исследований

Частота напряжения, Гц	Подача, м ³ /ч			Потребляемая мощность, Вт			Температура в конце трубопровода, °С			Напор, м		
	Среднее значение	Абсолютная погрешность ±	Относительная погрешность ± (%)	Среднее значение	Абсолютная погрешность ±	Относительная погрешность ± (%)	Среднее значение	Абсолютная погрешность ±	Относительная погрешность ± (%)	Среднее значение	Абсолютная погрешность ±	Относительная погрешность ± (%)
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.
5	0.0	0.00	-	0.0	0.00	-	0.47	0.89	190.00	0.08	0.82	1021.16
10	0.0	0.00	-	0.0	0.00	-	0.63	0.52	82.49	0.80	0.82	102.46
15	0.0	0.00	-	0.0	0.00	-	0.57	0.40	70.54	1.84	0.82	44.35
20	0.3	0.01	3.33	0.0	0.00	-	4.31	0.27	6.32	3.43	0.82	23.78

Продолжение таблицы 2.1

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.
25	0.7	0.02	3.09	0.0	0.00	-	4.62	0.27	5.94	5.40	0.82	15.10
30	1.0	0.03	3.09	55.1	1.10	2.00	4.74	0.28	5.81	7.52	0.82	10.86
35	1.3	0.04	3.00	236.7	3.59	1.52	4.89	0.29	5.93	10.08	0.82	8.09
40	1.6	0.05	3.04	406.2	6.15	1.51	4.91	0.28	5.72	14.13	0.82	5.79
45	1.8	0.05	3.02	763.9	11.52	1.51	4.85	0.28	5.74	17.81	0.82	4.62
50	2.0	0.06	3.03	1207.4	18.13	1.50	4.99	0.28	5.52	21.51	0.83	3.85

Сопоставление результатов расчетов и экспериментальных измерений осуществляется графически. При этом точечные расчетные значения аппроксимируются кривой, а усредненные экспериментальные значения отображаются в виде точечных маркеров. Для экспериментальных значений указываются планки погрешностей, соответствующие минимальной величине наиболее стабильного типа погрешности (абсолютная или относительная).

На рисунке 2.22 оцениваются значения подачи насоса. Планки погрешностей задаются по минимальной относительной величине, равной $\pm 3\%$.

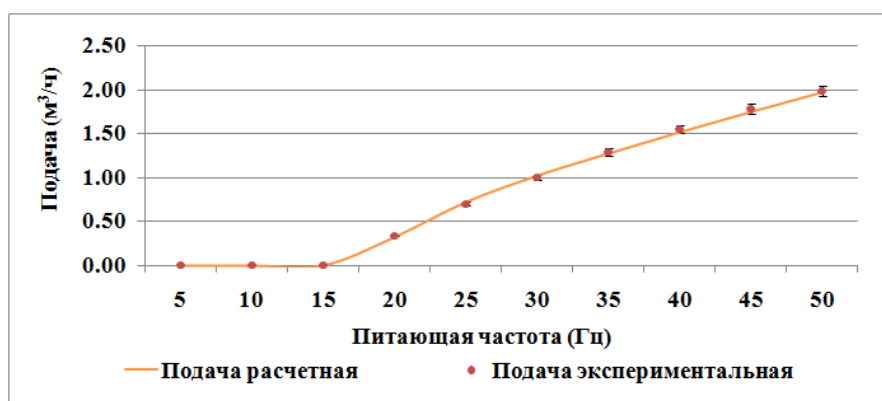


Рисунок 2.22 – Подача насоса

На рисунке 2.23 приводятся расчетные и экспериментальные значения потребляемой мощности.

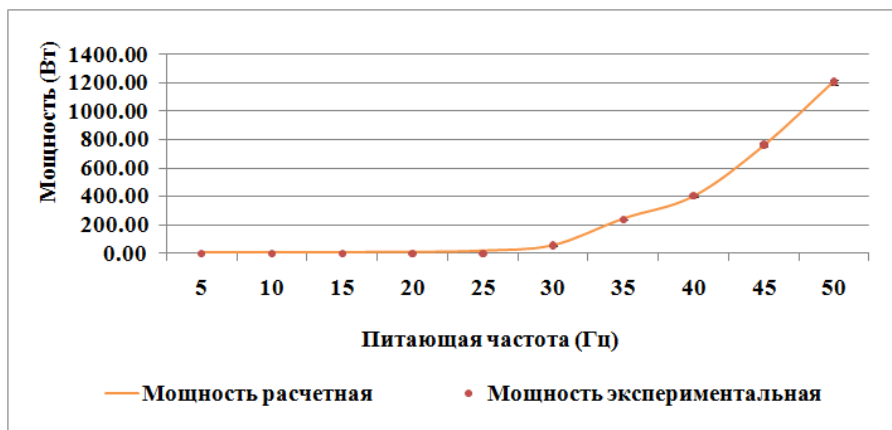


Рисунок 2.23 – Потребляемая электрическая мощность

Планки погрешности определялись минимальной относительной величиной, равной 1,5 %. На рисунке 2.24 приводятся расчетные и экспериментальные значения температуры воды в конце трубопровода.

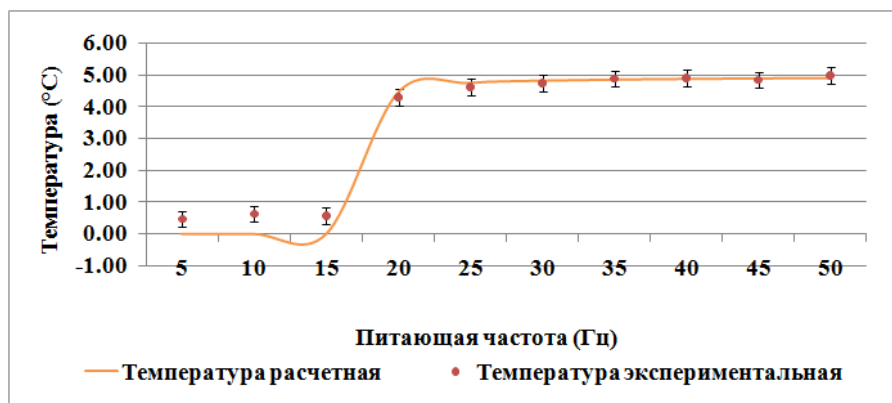


Рисунок 2.24 – Температура воды в трубопроводе

Планки погрешности определялись минимальной относительной погрешностью, равной 5,52 %.

На рисунке 2.25 приводятся расчетные и экспериментальные значения напора воды в трубопроводе. Планки погрешности определялись минимальной абсолютной погрешностью, равной 0,8 м. Среднее значение давления и абсолютная приведенная погрешность преобразуется в напор при помощи формулы (1.1), путем деления на константу 9806,6.

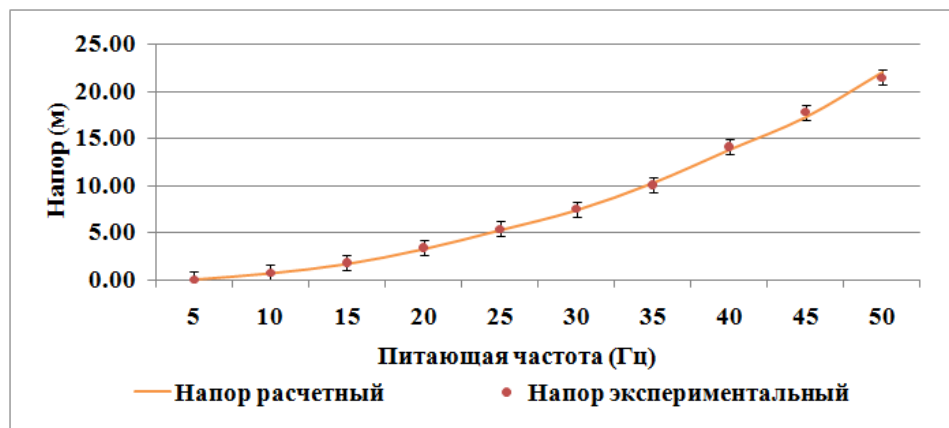


Рисунок 2.25 – Напор

Нулевая подача и температура, а также низкая потребляемая мощность до 20 Гц обусловлены недостаточным напором насоса, который, как видно из рисунка 2.25, начинает превышать статический напор трубопроводной системы, равный 3 м, в районе данной питающей частоты.

Для итоговой оценки были проанализированы относительные отклонения результатов вычислений и экспериментальных измерений, которые приводятся на рисунке 2.26.

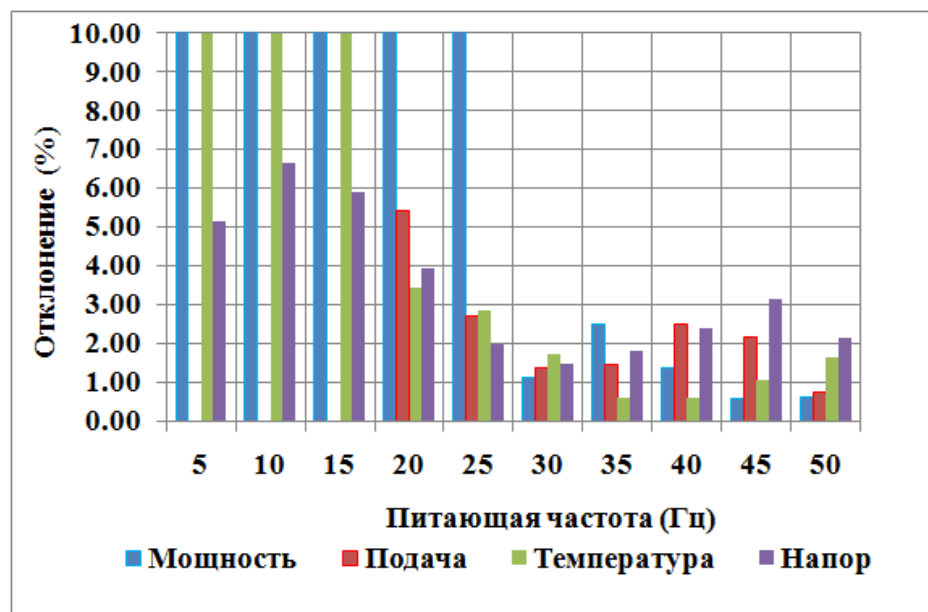


Рисунок 2.26 – Относительные отклонения результатов математического и физического моделирования

Максимальное отклонение потребляемой мощности составляет 100 %, а среднее 50,62 %. Данная ситуация связана с низкой чувствительностью используемого счетчика электроэнергии, что приводит к возникновению нулевых показаний до частоты 30 Гц и соответствующим стопроцентным отклонениям. Если не рассматривать зону нечувствительности счетчика, то максимальное отклонение потребляемой мощности на остальном диапазоне частот составляет 2,5 %, среднее относительное отклонение – 1,25 %.

Максимальное отклонение подачи составляет 5,41 %, среднее относительное отклонение – 2,35 %. Максимальное отклонение температуры воды в конце трубопровода составляет 100 %, а среднее 31,2 %. Высокие показатели отклонений связаны с тем, что до питающей частоты 20 Гц при нулевой подаче экспериментальные значения преднамеренно не снижались до нулевого уровня, в связи с опасностью замерзания трубопровода. Из-за ограничений при проведении эксперимента, данный режим возможно исключить из расчетов, при этом максимальное относительное отклонение температуры составит 3,46 %, а среднее относительное отклонение – 1,71 %. Максимальное отклонение напора воды, создаваемого насосом в трубопроводе, составляет 6,67 %, среднее относительное отклонение – 3,46 %.

Заметные отклонения практически у всех параметров наблюдаются на питающих частотах, соответствующих отсутствию подачи и режиму начала циркуляции воды в системе. Это связано с особыми режимами работы насоса при фиктивной работе без подачи, а также ламинарным и переходным режимами течения воды, которые возникают в этих условиях, и вносят дополнительную погрешность в методы расчета и результаты экспериментов. Данные режимы являются нежелательными в условиях эксплуатации с отрицательными температурами окружающей среды, поэтому могут быть исключены из рассмотрения. На остальной части диаграммы в рабочем режиме относительные отклонения не превышают общую инженерную ошибку в 4 % и входят, либо

находятся на границе диапазона основной погрешности измерения рассматриваемой величины.

Далее была выполнена оценка переходного процесса изменения основных технологических параметров, таких как уровень воды в резервуаре и температура в трубопроводе. Для оценки изменения уровня в накапливающем резервуаре выполнялось исследование процесса запуска и работы насоса на максимальной производительности до момента наполнения заранее опустошенного резервуара. Внешний вид процесса приводится на рисунке 2.27.

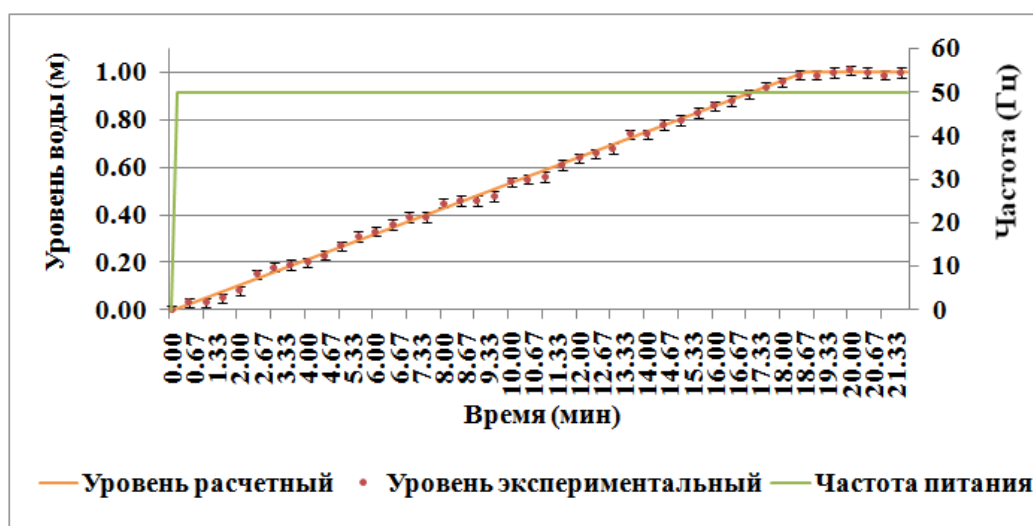


Рисунок 2.27 – Процесс наполнения резервуара водой

Уровень воды в резервуаре изменяется по линейной зависимости по мере накопления объема перекаченной воды при нулевом водопотреблении. Процесс наполнения резервуара является инерционным, и занимает порядка 18,5 минут. Сопоставление расчетной кривой и экспериментальных значений однократных измерений показало удовлетворительную сходимость результатов.

На рисунке 2.28 приводится график изменения температуры воды в конце трубопровода от 4 до 4,5 °С при запуске насоса на полную мощность в течении интервала 0 до 2 мин с последующим уменьшением питающей частоты до 19,5 Гц.

Разброс экспериментальных и расчетных величин является незначительным, форма кривых также достаточно близка. Отмечается, что процесс нагрева воды проходит значительно быстрее остывания. Соотношение для данных условий составляет порядка 1:5, что обусловлено низкой скоростью теплоотдачи при остывании, ввиду теплоаккумулирующих свойств жидкости и иных факторов.

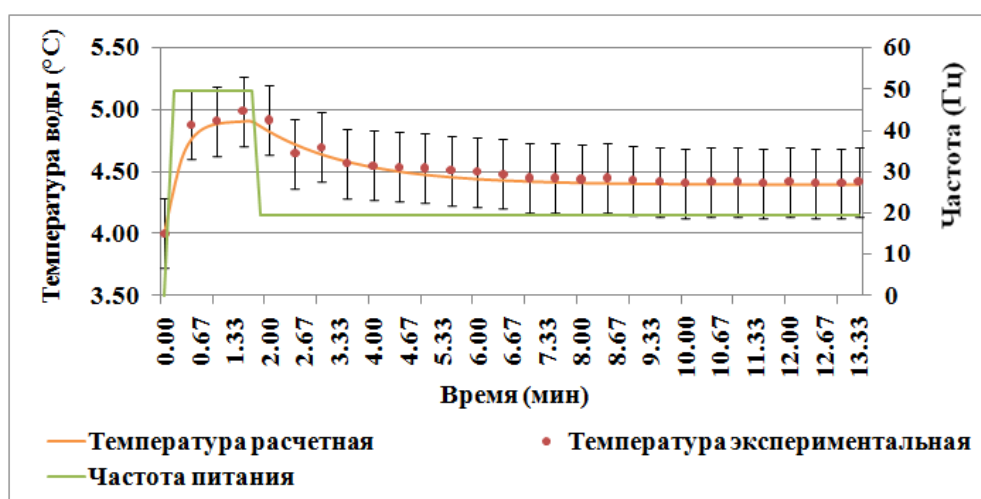


Рисунок 2.28 – Процесс изменения температуры воды

В итоге, сравнительный анализ показал соответствие результатов имитационного моделирования экспериментальным данным, с допустимыми отклонениями, что подтверждает правильность построения математической и имитационной моделей.

2.6 Выводы

1. Разработаны математическая и компьютерная имитационная модели ЭТК УПП системы водоснабжения с накапливающим резервуаром. Модели отличаются от существующих следующими особенностями:

- системным подходом к анализу параметров различной физической природы и их взаимосвязей в составе комплекса «Электрическая сеть –

Частотно регулируемый асинхронный электропривод – Насос – Трубопровод – Резервуар – Потребитель – Система управления»;

- учетом ряда дополнительных технико-экономических параметров, таких как: объем перелива воды из резервуара, изменение КПД насоса при частотном регулировании, основные внешние возмущения, такие как величина водопотребления и температура окружающей среды и т.д.;
- учетом задержки (запаздывания) изменения температуры воды в конце трубопровода и уровня воды в резервуаре при динамическом изменении регулируемой величины (подачи насоса) и внешних условий;
- возможностью интеграции в модель нестандартной системы управления ЭТК УПП, предложенной в текущей работе.

2. Разработана физическая лабораторная модель ЭТК УПП, обеспечивающая возможность исследования ключевых свойств моделируемого объекта при изменяющихся параметрах водопотребления, температуры окружающей среды и производительности насоса. Физическая модель позволяет воспроизвести практически все режимы работы имитационной модели.

3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показали, что в нормальных режимах работы исследуемого объекта относительные отклонения основных анализируемых величин не превышает 4 %, что подтверждает возможность применения разработанных математической и имитационной моделей для дальнейших исследований системы управления ЭТК УПП.

3 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УЧАСТКА ПЕРВОГО ПОДЪЕМА

3.1 Постановка задачи, разработка способа и структуры системы управления

Управление производительностью ЭТК УПП предлагается выполнять путем частотного регулирования электропривода основного насоса. Как было сказано ранее, регулируемой величиной при этом является подача насоса, а основными контролируемыми параметрами – уровень воды в резервуаре и температура воды в трубопроводе. Основными прогнозируемыми возмущающими воздействиями являются водопотребление и температура окружающей среды.

Задачу управления можно свести к вычислению определенной оптимальной подачи, зависящей от уровня воды в резервуаре и температуры в конце трубопровода. Данная величина подается в качестве уставки на частотный преобразователь, который осуществляет её поддержание. Точно предсказать процесс изменения водопотребления и температуры окружающей среды, а также влияние ряда других факторов, не представляется возможным, поэтому наиболее рациональным способом определения оптимальной величины подачи является создание обратных связей, определяемых текущим уровнем в накапливающем резервуаре и конечной температурой воды [106].

Требуемые значения уровня и температуры задаются в виде уставок, на основании нормативных рекомендаций или условий функционирования автоматизируемого объекта. Обычно заданный уровень поддерживается с точностью ± 50 мм, но для снижения нагрузки на насос, данная величина может быть увеличена до ± 100 мм.

Основной целью задания уставки температуры воды в конце трубопровода, является предотвращение замерзания перекачиваемой жидкости. При этом

целесообразно учитывать время остывания и замерзания воды в случае аварии насосной станции и остановки циркуляции воды. Рекомендуемая стандартами минимальная температура воды в конце трубопровода УПП равна 3 °С [7], тем не менее существуют рекомендации по уменьшению данной величины [7, 8].

Наиболее простым и эффективным способом поддержания технологического параметра по контуру отрицательной обратной связи является ПИД-регулирование. Поскольку уровень и температура являются параметрами различной природы, имеют различную инерционность изменения, различные возмущающие воздействия и реакцию на них, не представляется возможным их объединение в один регулятор. Также неэффективным будет предварительный выбор сигналов обратной связи, перед поступлением в регулятор, поскольку в этом случае возможно возникновение постоянных значительных ошибок технологических параметров. Для решения проблемы предлагается параллельное вычисление управляющих воздействий по уровню и температуре, в отдельных ПИД - регуляторах с последующим определением результирующего воздействия на регулируемый орган. В данном случае так будет определяться уставка по подаче.

Для реализации поставленной задачи была разработана блочная структурная схема системы управления и регулятора, которая приводится на рисунке 3.1 [84].

В соответствии со схемой, система включает следующие элементы: расходомер 1; датчик температуры воды в трубопроводе 2; датчик уровня воды в накапливающем резервуаре 3; вычислители пропорциональной составляющей по уровню 4 и температуре 5; вычислители интегральной составляющей по уровню 6 и температуре 7; вычислители дифференциальной составляющей по уровню 8 и температуре 9; элемент вычисления подачи 10; исполнительный механизм (частотный преобразователь и насос) 11; элементы сравнения 12, 13, 14; сумматоры 15, 16. Элементы 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 15, 16 входят в регулятор. Регулятор и исполнительный механизм (со встроенным регулятором подачи)

входят в состав системы управления. Элементы 1, 2, 3 входят в состав управляемого объекта и образуют обратную связь.

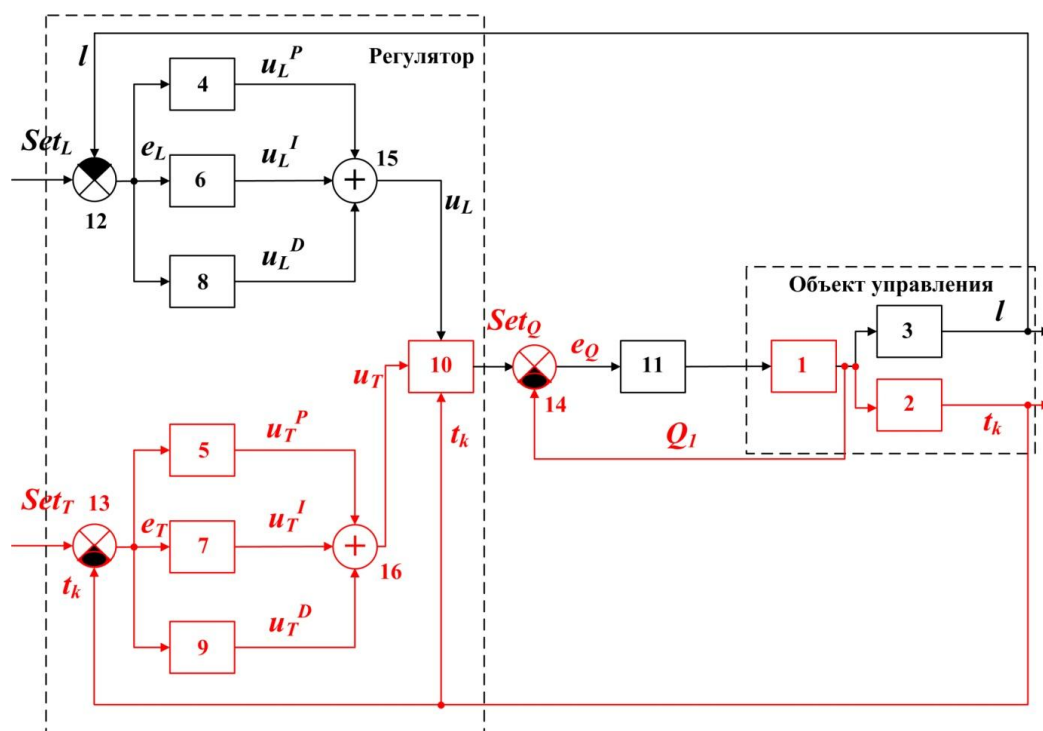


Рисунок 3.1 – Блочная схема системы управления

Кроме того на рисунке 3.1 используются следующие условные обозначения: u_L^P – пропорциональная составляющая управляющего сигнала по уровню; u_L^I – интегральная составляющая управляющего сигнала по уровню; u_L^D – дифференциальная составляющая управляющего сигнала по уровню; u_L – полный управляющий сигнал по уровню; u_T^P – пропорциональная составляющая управляющего сигнала по температуре; u_T^I – интегральная составляющая управляющего сигнала по температуре; u_T^D – дифференциальная составляющая управляющего сигнала по температуре; u_T – полный управляющий сигнал по температуре.

При адаптации схемы для реализации в цифровой системе управления ПИД закон может быть преобразован в дискретную форму путем выбора длительности

такта квантования T_0 в зависимости от требований к точности регулирования и составу аппаратных средств текущего объекта.

В процессе вычисления управляющего воздействия, производится расчет управляющих сигналов по уровню и температуре. Для этого в блоках 4, 6 и 8 определяются пропорциональная $u_L^P(i)$, интегральная $u_L^I(i)$ и дифференциальная $u_L^D(i)$ составляющие сигнала соответственно. Сумматор 15 складывает рассчитанные значения, которые формируют полный управляющий сигнал по уровню $u_L(i)$, передаваемый на элемент вычисления подачи 10. Сигнал по температуре $u_T(i)$ рассчитывается аналогично.

Для описания логики работы блока 10 было впервые предложено соотношение (3.1) [84]:

$$\begin{cases} Set_Q(i) = Set_Q(i-1) + \max(G_L \cdot u_L(i), G_T \cdot u_T(i)), & t_k(i) \geq z_k, \\ Set_Q(i) = Q_n, & t_k(i) < z_k \end{cases}, \quad (3.1)$$

где G_L – коэффициент масштабирования управляющего сигнала по уровню, вычисляемый по формуле (3.2);

G_T – коэффициент масштабирования управляющего сигнала по температуре, вычисляемый по формуле (3.3);

z_k – критическая температура, вычисляемая по формуле (3.4).

$$G_L = \frac{Q_n}{h}, \quad (3.2)$$

$$G_T = \frac{Q_n}{\max(t_o(i), t_n(i))}, \quad (3.3)$$

$$z_k = Set_T(i) - d, \quad (3.4)$$

где d – величина допустимого отклонения требуемой температуры.

Величина z_k оценивается на случай неэффективности алгоритма регулирования подачи для предотвращения замерзания трубопровода.

В качестве результирующего управляющего воздействия подачи, в соответствии с выражением (3.1), выбирается наибольшая из двух величин

управляющих сигналов по уровню или температуре, приведенных к величине подачи. Способ обеспечивает эффективное наполнение накапливающего резервуара, если температура воды в трубопроводе позволяет уменьшать подачу ($G_L \cdot u_L > G_T \cdot u_T$), либо предотвращает замерзание трубопровода за счет пренебрежения уровнем воды в резервуаре ($G_L \cdot u_L < G_T \cdot u_T$). 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.

Из величины уставки по подаче $Set_Q(i)$ в элементе сравнения 14 вычитается текущая величина подачи $Q_1(i)$. Полученная величина рассогласования по подаче $e_Q(i)$ преобразуется в дополнительном регуляторе в управляющее воздействие по подаче f_u , и подается на частотный преобразователь. Элемент сравнения 14 обычно встраивается в частотный преобразователь в совокупности со стандартным одноканальным ПИД - регулятором. В этом случае величина требуемой подачи $Set_Q(i)$ и текущего расхода $Q_1(i)$ подаются напрямую в частотный преобразователь.

3.2 Моделирование системы управления

При моделировании системы управления ЭТК УПП решались две задачи: определение наилучшей структуры и параметров регулятора, а также оценка технико-экономической эффективности предложенного способа и системы управления.

В имитационной модели система управления описана подсистемой «ControlSystem», схема которой приводится на рисунке 2.11. Подсистема объединяет в себе регулятор и элементы исполнительного механизма, участвующие в процессе регулирования.

Основными элементами подсистемы являются три стандартных ПИД-регулятора. Один из ПИД-регуляторов отслеживает изменение уровня воды в резервуаре, а второй - температуру воды в трубопроводе. Затем производится выбор результирующего управляющего воздействия по критерию максимальности и вычисление оптимальной величины подачи, которая поддерживается третьим ПИД-регулятором путем передачи требуемой уставки частоты частотному преобразователю. Таким образом, реализуется простой и малозатратный алгоритм управления.

Имитационная модель управляемого объекта позволила выбрать наилучшие коэффициенты ПИД-регуляторов [107]. Для каждого управляемого процесса в модели были выполнены исследования как ПИД, так и пропорционального (П), пропорционально-интегрального (ПИ), пропорционально-дифференциального (ПД) регуляторов. Коэффициенты пропорциональной (K_P^X), интегральной (K_I^X) и дифференциальной (K_D^X) составляющих регуляторов для данной задачи подбирались по принципу Циглера-Николса [108] (где X - регулируемая величина).

На рисунке 3.2 приводится анализ работы различных регуляторов для поддержания подачи (расхода) воды в трубопроводе.

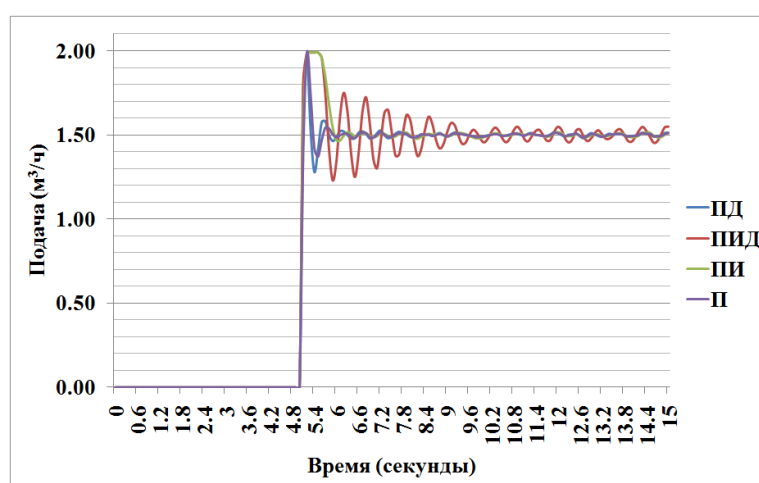


Рисунок 3.2 – Результаты управления подачей

Величина уставки по подаче (Set_Q): $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$. Уставка выставляется как скачок на 5-й секунде моделирования. Начальное значение подачи равно $0 \text{ м}^3/\text{ч}$. Остальные параметры модели соответствуют таблице А.1.

Ключевые параметры каждого закона для регулирования подачи (объемного расхода) приводятся в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры управляющих законов для регулятора подачи

Тип регулятора	Коэффициенты регулятора	Максимальное перерегулирование, %	Время затухания, с
П	$K_P^Q = 167,5$	25	4,6
ПИ	$K_P^Q = 150,75$ $K_I^Q = 452,25$	>25	3,4
ПД	$K_P^Q = 201$ $K_D^Q = 100,5$	25	5
ПИД	$K_P^Q = 201$ $K_I^Q = 1005$ $K_D^Q = 100,5$	>25	-

Наиболее перспективным для данного процесса является ПИ регулятор, обеспечивающий быстрое затухание флуктуаций управляемой величины. Из рисунка видно, что полный ПИД закон приводит к «расшатыванию» системы и недопустим в текущих условиях. Анализ частотного управляющего воздействия при регулировании подачи показал скачок частоты ПИ и ПИД регуляторов на этапе разгона двигателя, значительно превышающий максимально допустимое значение. Поэтому было принято решение искусственно ограничивать управляющее воздействие максимально возможным значением, которое может выдать частотный преобразователь для двигателей данного типа. Эта величина составляет 50 Гц. На рисунке 3.3 приводится график неограниченного изменения управляющего воздействия при регулировании подачи f_u^Q и с ограничением по максимальному значению f_{ucut}^Q .

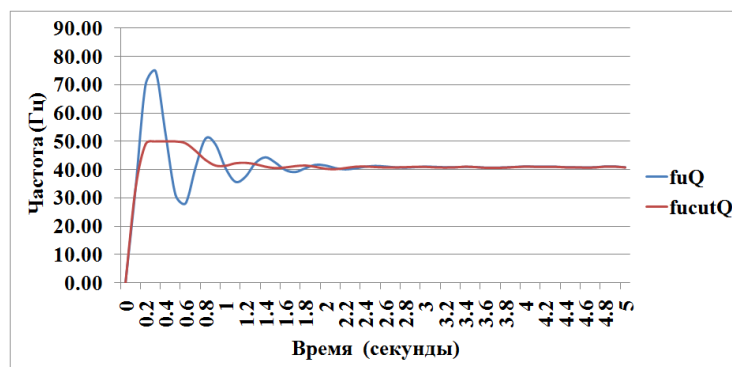


Рисунок 3.3 – Управляющее воздействие при регулировании подачи

Применение ограничения управляющего воздействия позволяет значительно уменьшить первоначальное перерегулирование и повысить качество процесса управления. Тот же принцип целесообразно применять и в остальных регуляторах системы.

Таким образом, для регулирования подачи был выбран ПИ-регулятор с ограничением по максимальной величине управляющего воздействия. При этом параметры регулятора составили:

- максимальное перерегулирование 25 %;
- период затухания основных колебаний 3,4 секунды.

На рисунке 3.4 приводится анализ работы различных регуляторов для поддержания уровня воды в накапливающем резервуаре. Величина уставки по уровню (Set_L): 0,1 м. Основное возмущение (водопотребление Q_2): 1,8 м³/ч. Начальное значение уровня равно 0 м. Остальные параметры модели соответствуют таблице А.1.

Регуляторы с интегральной составляющей имеют достаточно большую величину первоначального перерегулирования, не давая при этом существенного выигрыша в скорости переходных процессов, поэтому не рассматриваются для применения в данных условиях.

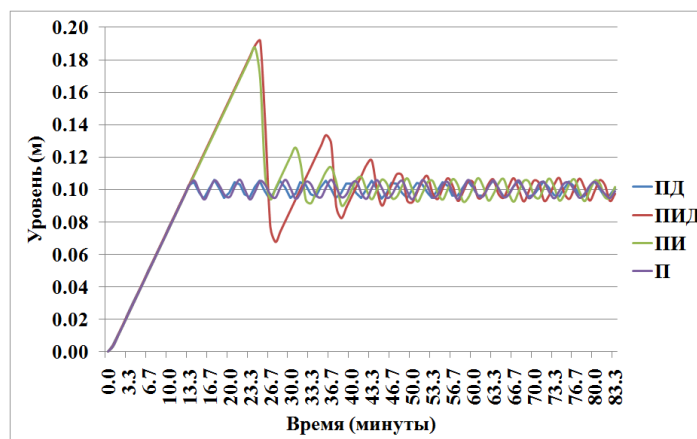


Рисунок 3.4 – Результаты управления по уровню воды в резервуаре

Ключевые параметры каждого закона для регулирования уровня приводятся в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры управляющих законов для регулятора уровня

Тип регулятора	Коэффициенты регулятора	Максимальное перерегулирование, %	Период колебаний, мин
П	$K_P^L = 25$	0,6	3,4
ПИ	$K_P^L = 22,5$ $K_I^L = 0,159$	7,7	5,9
ПД	$K_P^L = 30$ $K_D^L = 6375$	0,6	1,6
ПИД	$K_P^L = 30$ $K_I^L = 0,35$ $K_D^L = 6375$	8,1	4,1

Поскольку высокая инерционность процесса наполнения резервуара не позволяет избавиться от колебаний регулируемого параметра, необходимо выбрать регулятор, обеспечивающий наибольший период колебаний управляемой величины. При этом будет минимизировано негативное влияние постоянного изменения контролируемой величины. Данному условию удовлетворяет П-регулятор со следующими параметрами:

- максимальное перерегулирование составляет: 0,6 %;

– период колебаний: 3,4 минуты.

На рисунке 3.5 приводится анализ работы различных регуляторов для поддержания температуры воды в конце трубопровода. Величина уставки по температуре (Set_T): 4,8 °С. Основное возмущение (температура окружающей среды t_o): минус 9 °С; температура в начале трубопровода (t_k): 5 °С. Начальное значение температуры воды в конце трубопровода равно 0,5 °С.

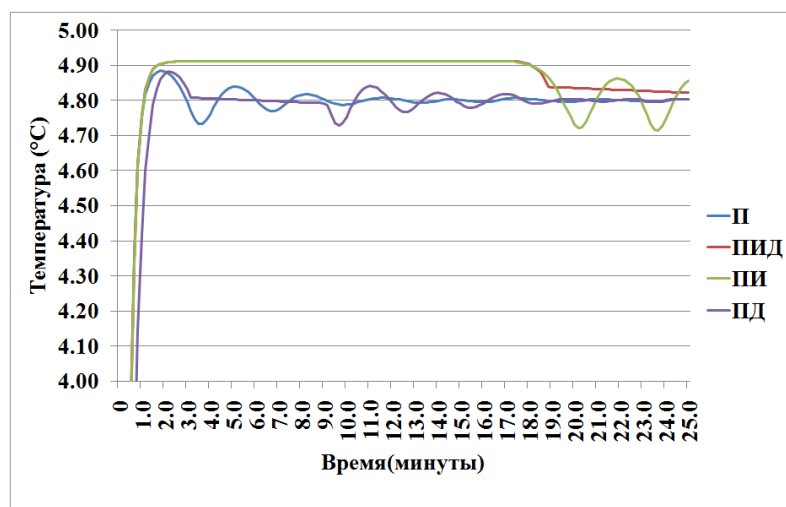


Рисунок 3.5 – Результаты управления по температуре воды в трубопроводе

Ключевые параметры каждого закона для регулирования температуры приводятся в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры управляющих законов для регулятора температуры

Тип регулятора	Коэффициенты регулятора	Максимальное перерегулирование, %	Время затухания, мин
П	$K_P^T = 4,75$	1,6	13,5
ПИ	$K_P^T = 4,275$ $K_I^T = 0,039$	>2	>25
ПД	$K_P^T = 5,7$ $K_D^T = 926,25$	1,6	18
ПИД	$K_P^T = 5,7$ $K_I^T = 0,088$ $K_D^T = 926,25$	>2	>25

В данном случае наиболее эффективным регулятором будет являться П - регулятор, обеспечивающий минимальное перерегулирование и быстрое затухание флуктуаций управляемой величины.

Максимальное перерегулирование составляет: 1,6 %; период затухания основных колебаний: 13,5 минут.

Таким образом, управляющее воздействие по температуре целесообразно вычислять, используя П-регулятор, по уровню также П-регулятор, по подаче - ПИ-регулятор.

После нахождения законов и коэффициентов регуляторов для каждой контролируемой величины, было выполнено моделирование системы целиком с аналогичными параметрами уставок и возмущающих воздействий на интервале времени 25 минут. На рисунке 3.6 приводятся зависимости изменения полного управляющего воздействия для обеспечения требуемой подачи, а также управляющие сигналы по уровню и температуре.

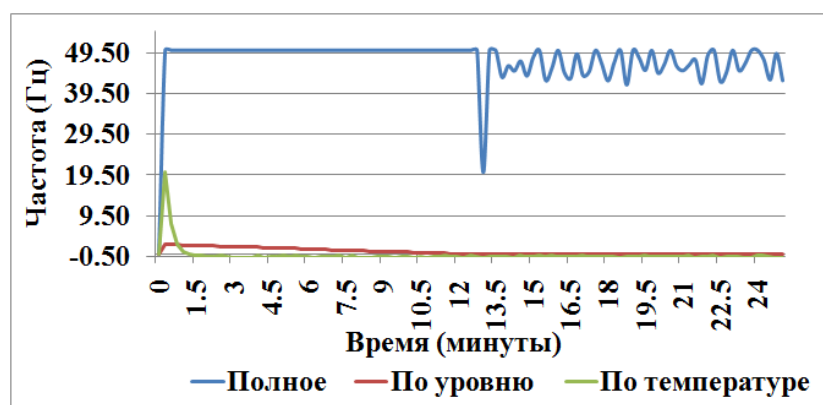


Рисунок 3.6 – Управляющие воздействия

В соответствии с графиками до момента времени около 1,5 минут происходило интенсивное наполнение резервуара с нулевого уровня по сигналу температуры воды в трубопроводе. После достижения уставки по температуре соответствующий управляющий сигнал находился на нулевом уровне, а до 12 минут происходило наполнение резервуара по сигналу уровня воды в резервуаре с

игнорированием факта достижения требуемой температуры. При этом управляющее воздействие по подаче имело максимально возможное значение. При достижении уставки уровня, управляющий сигнал по уровню стал равным нулю, а затем незначительно колебался для компенсации водопотребления.

Полученные результаты полностью соответствуют предложенной стратегии управления производительностью ЭТК УПП с обеспечением защиты трубопровода от замерзания и минимизацией переработки, что подтверждает правильность выбора структуры и коэффициентов системы управления.

Для оценки технико-экономической эффективности предложенной системы управления было выполнено её моделирование на параметрах, соответствующих таблице А.1, на интервале времени в 24 часа. Величина уставок $Set_T = 4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Set_L = 0,1\text{ м}$. Начальные значения нулевые. Основные возмущения задавались как величины, изменяющиеся во времени в соответствии с прогнозируемыми суточными колебаниями.

Температура окружающей среды t_o задавалась по синусоидальному закону со средним значением в $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, отклонением в минус $9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поскольку точка отсчета соответствует ночному времени суток 0 часов, график синусоиды смещен на половину периода. График функции изменения температуры окружающей среды приводится на рисунке 3.7.

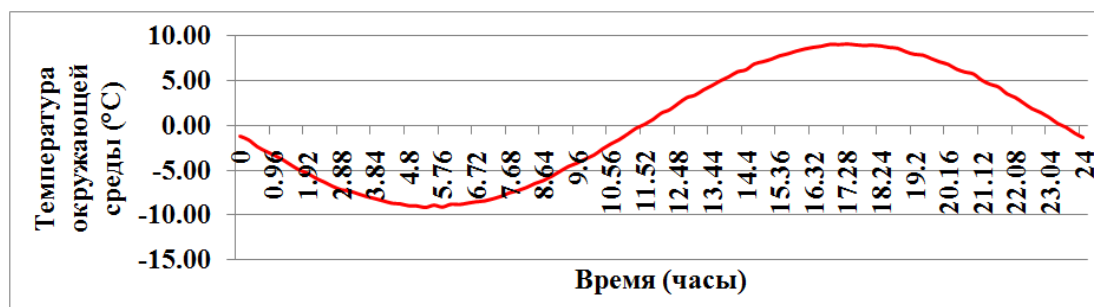


Рисунок 3.7 – Температура окружающей среды

Величина водопотребления Q_2 определяется усредненными данными предполагаемого суточного потребления воды, как показано на рисунке 3.8.

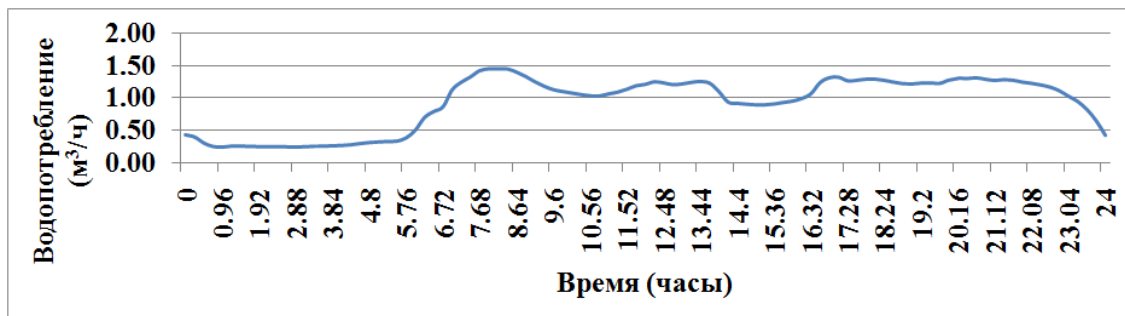


Рисунок 3.8 – График водопотребления

Процесс изменения уровня воды в резервуаре в данных условиях представлен на рисунке 3.9.

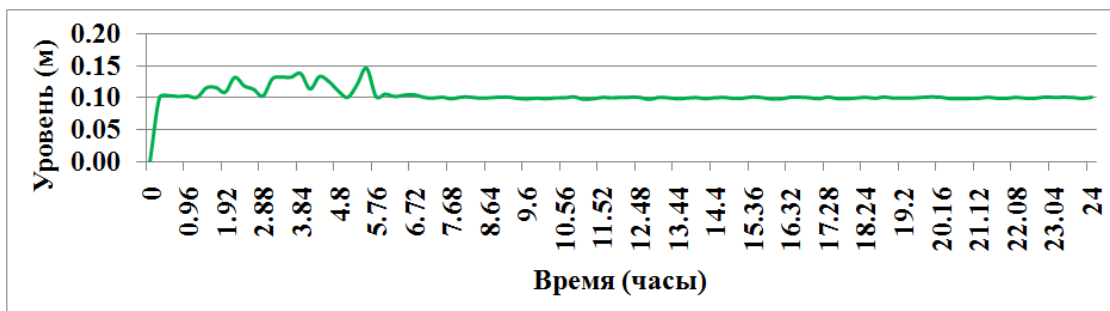


Рисунок 3.9 – Уровень воды в накапливающем резервуаре

На рисунке 3.10 приводится график изменения температуры воды в конце трубопровода.

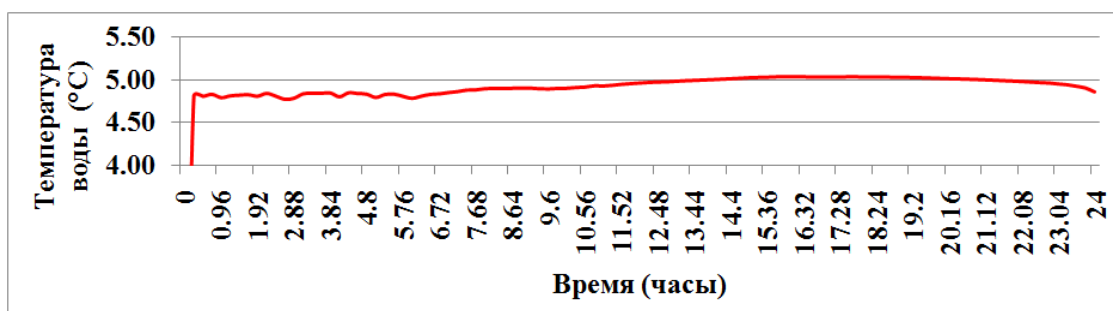


Рисунок 3.10 – Температура воды в конце трубопровода

Для поддержания технологических параметров в требуемых диапазонах системой управления производилось изменение подачи насоса, в соответствии с рисунком 3.11.

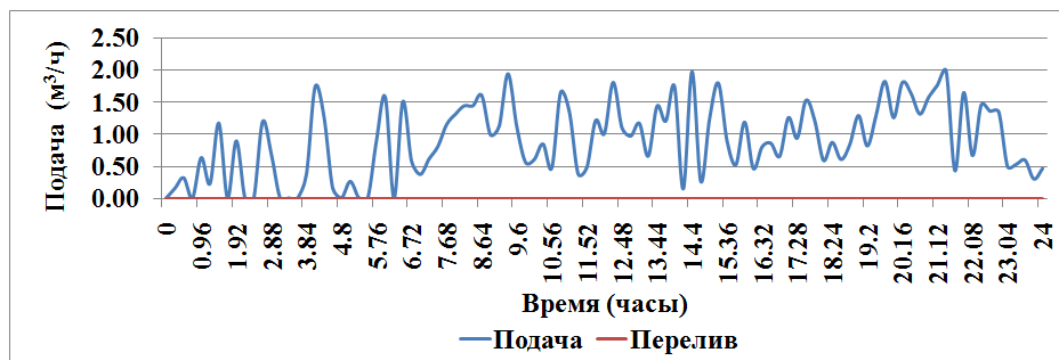


Рисунок 3.11 – Подача и перелив воды

Также на рисунке 3.11 приводится оценка перелива воды из резервуара в процессе управления. В данных условиях система позволила полностью избежать перелива воды из резервуара.

Для сравнительной оценки при текущих условиях было выполнено моделирование одноконтурной системы регулирования по уровню. Поскольку система не учитывала температуру воды в конце трубопровода, предполагалась, что в условиях отрицательных температур окружающей среды подача была максимальной. На рисунке 3.12 приводится график изменения подачи и перелива при использовании стандартной одноконтурной системы управления.

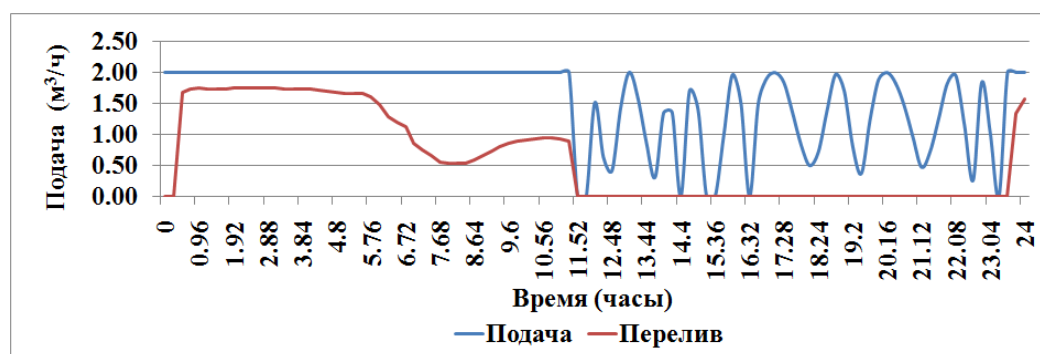


Рисунок 3.12 – Подача и перелив воды при стандартном управлении

В данном случае суммарный объем перелива за исследуемый период равен $17,3 \text{ м}^3$ при общем объеме перекачанной воды в $43,6 \text{ м}^3$, что составляет 39,7 %.

На рисунке 3.13 приводится график изменения подачи и перелива при использовании дискретной релейной системы управления, работающей в режиме включения и отключения электродвигателя насоса при достижении граничных значений уровня, определяемых как $Set_L \pm 0,08 \text{ м}$.

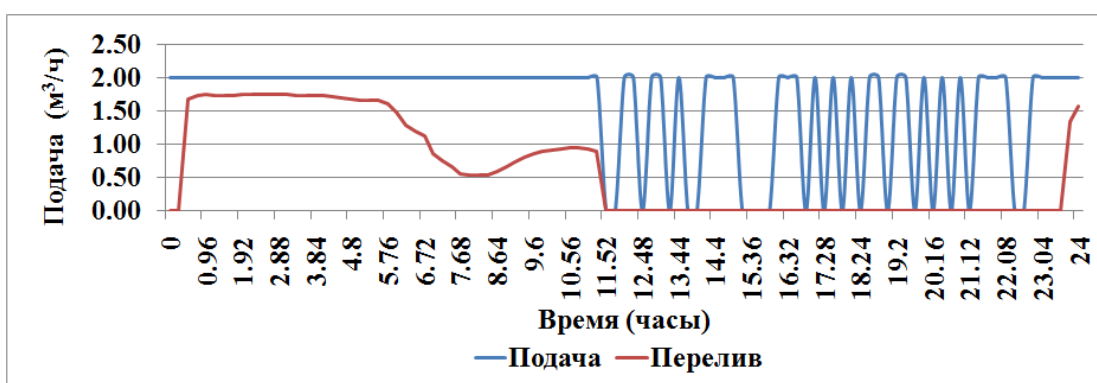


Рисунок 3.13 – Подача и перелив воды при релейном управлении

В данном случае суммарный объем перелива за исследуемый период равен $17,3 \text{ м}^3$ при общем объеме перекачанной воды в $44,3 \text{ м}^3$, что составляет 39,1 %.

Из зависимостей видно, что в ночные и утренние часы происходили колебания температуры воды в конце трубопровода, в связи с наиболее низкими температурами окружающей среды. В этот промежуток управляющие воздействия по уровню не учитывались, и как следствие происходило отклонение уровня воды в резервуаре, вплоть до возникновения перелива. На остальных участках уровень поддерживался на заданной величине.

Анализируя графики потребляемой электрической мощности, приведенные на рисунке 3.14, можно наблюдать значительное снижение среднего значения данного показателя для предлагаемой системы управления.

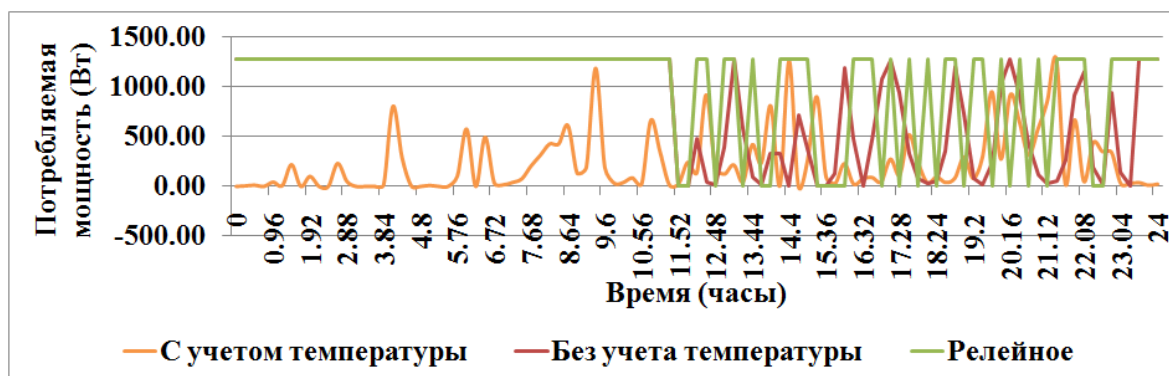


Рисунок 3.14 – Потребляемая электрическая мощность

Полученные результаты отражают средние показатели экономии потребляемой мощности за счет равномерного распределения положительных и отрицательных температур окружающей среды. Снижение скорректированной потребляемой мощности при реализации предложенного алгоритма управления, по сравнению с номинальным режимом работы системы, составило около 80 %. При реализации стандартного управления только по уровню, без учета температуры воды, в условиях отрицательных температур окружающей среды для защиты водовода от замерзания поддерживалась максимальная подача насоса. В данном случае экономия электроэнергии составляет 24 %. В дискретной системе этот показатель падает до 9 %. Таким образом, применение предложенного алгоритма управления, по сравнению со стандартными, в лабораторных условиях обеспечивает снижение потребляемой мощности на 56 %. В реальных условиях данная величина может значительно изменяться в зависимости от условий и режимов эксплуатации объекта водоснабжения.

3.3 Аппаратно-программная реализация системы управления

Для практической реализации предложенного способа ЭТК УПП должен быть снабжен частотным преобразователем, минимальным набором датчиков технологических параметров, а также устройством управления, осуществляющим

основные расчетные операции. Блочная схема ЭТК УПП, отвечающая указанным требованиям приводится на рисунке 3.15 [11].

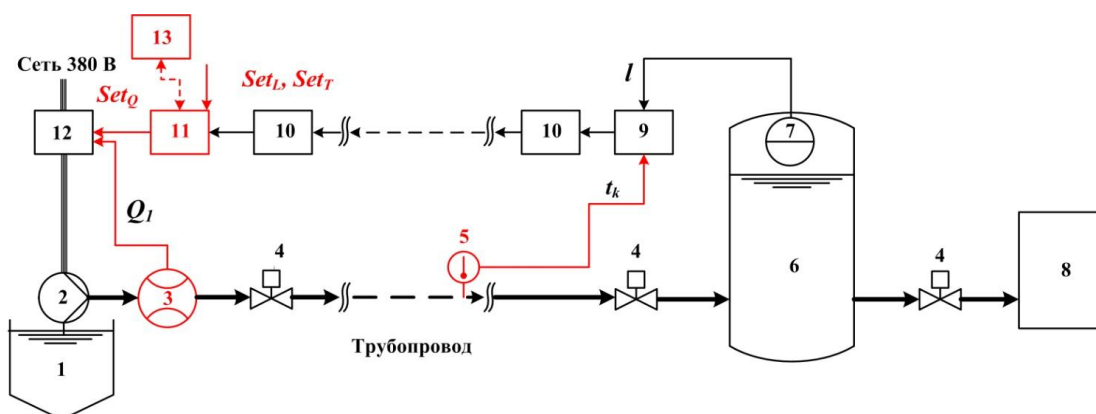


Рисунок 3.15 – Блочная схема ЭТК УПП с системой управления

Система состоит из основного насоса 2, перекачивающего воду из емкости-источника 1 в накапливающий резервуар 6. Для подключения к трубопроводной линии основного насоса служит распределительный узел с запорной арматурой 4. Уровень воды задается величиной водопотребления потребителем 8. Значение уровня воды измеряется соответствующим датчиком 7. Конечная температура воды измеряемой датчиком 5. Информация с датчиков поступает в устройство сбора данных 9. Измеренные значения передаются по проводному или беспроводному каналу при помощи устройств передачи данных 10 в устройство управления 11, которое осуществляет вычисление требуемой уставки подачи. Рассчитанное значение передается в частотный преобразователь 12, для дальнейшего поддержания за счет обратной связи от расходомера 3. Уставки уровня и температуры задаются оператором при инициализации системы.

Основным вычислительным узлом приведенной схемы является цифровое устройство управления [109, 110]. Устройство имеет удобный интерфейс ввода/вывода, состоящий из жидкокристаллического дисплея и кнопочной клавиатуры. Для упрощения организации человеко-машинного интерфейса с системой управления и осуществления диспетчеризации, устройство может

подключаться к автоматизированному рабочему месту (персональному компьютеру) 13, снабженному специализированным программным обеспечением.

Устройство управления выполняет следующие функции:

- получение данных со всех датчиков обратной связи напрямую, через преобразователи интерфейсов, либо через устройства сбора данных по интерфейсу RS-485;
- расчет требуемой величины подачи, с учетом уровня воды в резервуаре и температуры в трубопроводе;
- передача вычисленной подачи в частотный преобразователь;
- световое, звуковое и текстовое оповещение персонала при возникновении угрозы аварийной ситуации;
- ввод основных уставок алгоритма управления (требуемый уровень воды в резервуаре, допустимая температура в трубопроводе и т.д.).

Внешний вид прототипа разработанного устройства приводится на рисунке 3.16. Для повышения эксплуатационных характеристик устройства, оно размещается в специальном щитке вместе с преобразователями интерфейсов и элементами питания, как показано на рисунке.



Рисунок 3.16 – Устройство управления в щитовом исполнении

Устройство управления работает в соответствии с программным алгоритмом на С-подобном языке программирования, реализующим способ, описанный в подразделе 3.1. Блок схема данного алгоритма представлена на рисунке 3.17.

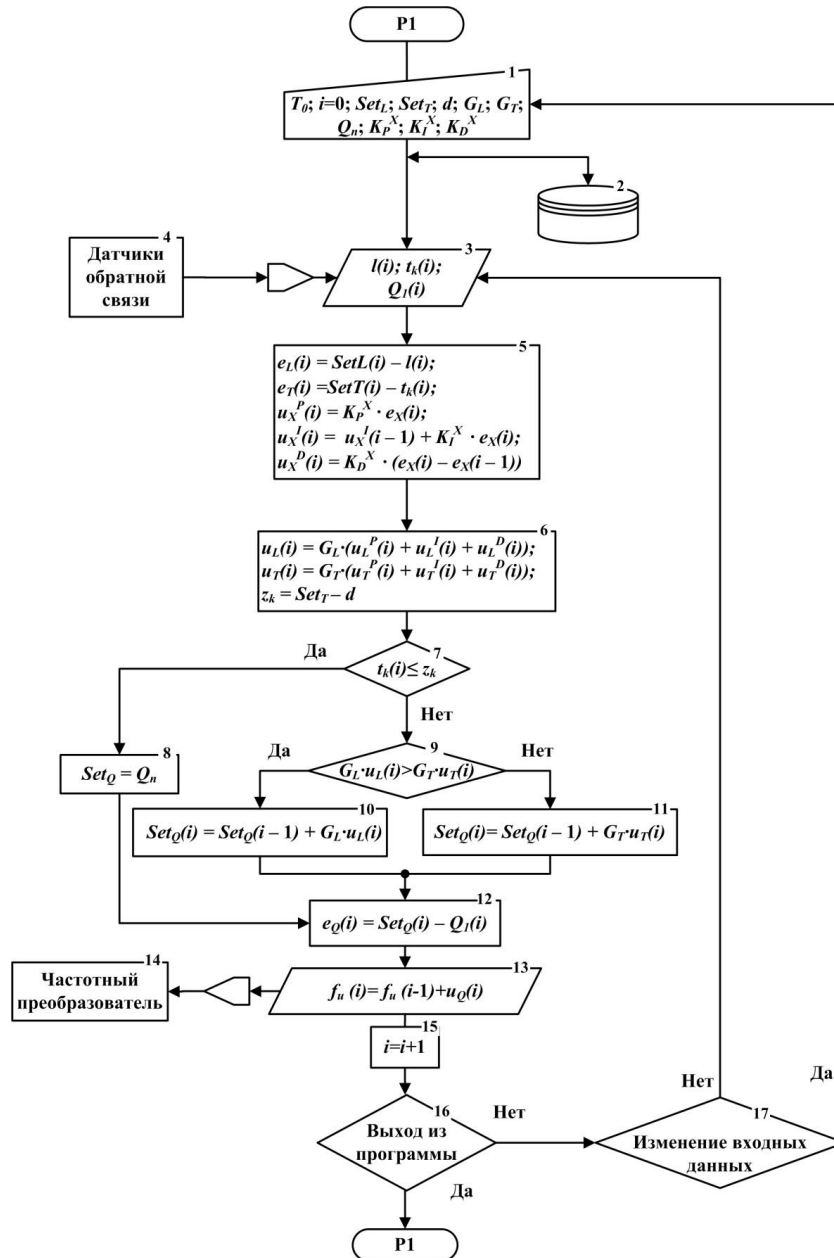


Рисунок 3.17 – Блок схема программного алгоритма устройства управления

В блоке 1 алгоритма вводятся основные данные, такие как: уставки алгоритма управления (Set_L , Set_T); номинальная подача (Q_n); продолжительность

такта квантования (T_0); максимально допустимое отклонение от уставки температуры (d); коэффициенты регуляторов (K_P^X , K_I^X , K_D^X); коэффициенты масштабирования управляющих сигналов (G_L , G_T). Введенная информация может быть сохранена в базу данных 2 или считана оттуда. В блоках 3 производится считывание данных с датчиков обратной связи 4 и их загрузка в соответствующие переменные $l(i)$, $t_k(i)$, $Q_1(i)$. Далее производится расчет управляющих сигналов.

3.4 Выводы

1. Разработан способ управления ЭТК УПП системы водоснабжения с накапливающим резервуаром, заключающийся 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 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.

2. Путем имитационного моделирования, выявлено, что при управлении ЭТК УПП с параметрами, заданными в таблице А.1, управляющий сигнал по температуре целесообразно вычислять, используя П регулятор ($K_P^T = 4,75$), по уровню - П регулятор ($K_P^L = 25$), по подаче - ПИ регулятор ($K_P^Q = 150,75$, $K_I^Q = 452,25$).

2. В лабораторных условиях способ позволяет снизить потребляемую мощность на 56 % по сравнению со стандартным однопараметрическим способом управления и обеспечить безаварийность в сложных природных условиях эксплуатации.

3. Разработана рекомендуемая структура системы управления ЭТК УПП, программируемое устройство управления и программный алгоритм, реализующие предложенный способ.

4 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

4.1 Оптимизация параметров электротехнического комплекса участка первого подъема

Задача оптимизации параметров ЭТК УПП заключается в определении наилучшей комбинации средств защиты от замерзания, обеспечивающих минимальные финансовые затраты. Для этого строится стоимостная функция общих приведенных затрат за год, которая затем подлежит минимизации с учетом накладываемых ограничений [82]. Общая стоимостная функция приведенных затрат оценивается при помощи выражения (4.1) [111]:

$$C = C_i \cdot E_n + O_i, \quad (4.1)$$

где C_i – капитальные вложения на реализацию технологии, руб;

E_n – нормативный коэффициент экономической эффективности, определяемый, как единица, деленная на нормативный срок окупаемости предлагаемой технологии, 1/год;

O_i – текущие эксплуатационные затраты, руб./год.

Как было определено в подразделе 1.4, наиболее перспективным, с точки зрения минимизации экономических затрат, способом защиты от замерзания эксплуатируемых УПП является принудительная циркуляция воды за счет регулирования подачи насоса. Наилучшая подача должна обеспечивать защиту трубопровода от замерзания при минимальной переработке насосов. Тем не менее, в некоторых случаях (крайне низкие температуры окружающей среды и небольшое водопотребление) данный способ может сопровождаться переработкой насосов и наличием дополнительных эксплуатационных затрат. Уменьшить величину неизбежной переработки можно за счет применения вспомогательных мер защиты от замерзания, таких как применение пассивной

теплоизоляции и предварительный электрический подогрев воды перед транспортировкой.

Таким образом, главными параметрами, задающими тепловой режим работы трубопровода, являются: подача (объемный расход); толщина и материал теплоизоляции; начальная температура воды.

Тогда целевая стоимостная функция будет оцениваться при помощи выражения (обычно оценка осуществляется за интервал времени в один год):

$$C = C_Q + C_T + C_I, \quad (4.2)$$

где C_Q – стоимость поддержания температуры объемным расходом за заданный интервал времени при условии возникновения переработки, руб./год;

C_T – стоимость предварительного подогрева воды, перекаченной за исследуемый период, руб./год;

C_I – стоимость использования пассивной теплоизоляции, руб./год.

Далее рассматриваются методики расчета стоимости каждого способа. Определить затраты на перелив воды возможно по формуле (4.3) [112]

$$C_Q = C_{QS} \cdot (E_Q \cdot K_Q + A_{FC}) + \sum_{i=1}^k \left(\frac{P_{pn}}{Q_n} \cdot C_r \cdot k_f + C_w \right) \cdot (Q_{1i} - Q_{2i}) \cdot \sigma_i, \quad (4.3)$$

где C_{QS} – капитальные затраты на установку элементов частотного управления насосами, вычисляемые по формуле (4.4), руб.;

E_Q – нормативный коэффициент экономической эффективности установки частотного преобразователя, обратный нормативному сроку его окупаемости, 1/год;

K_Q – коэффициент учета нормативного срока эксплуатации системы частотного управления, равный отношению максимального нормативного срока эксплуатации применяемых технологий, к сроку эксплуатации системы частотного управления (округляется до большего целого числа);

A_{FC} – коэффициент нормативных амортизационных отчислений, 1/год;

k – количество исследуемых отсчетов с разными параметрами объекта;

P_{pn} – потребляемая электродвигателя насоса мощность при номинальной подаче, рассчитываемая по формуле (2.5), 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;

Q_1 – текущая подача, требуемая для защиты от замерзания, м³/ч;

Q_2 – текущая подача, требуемый для обеспечения нужд конечного потребителя, м³/ч;

σ_i – количество часов с текущими параметрами объекта, ч/год.

$$C_{QS} = C_{FC} (1 + E_{FC} + M_{FC}), \quad (4.4)$$

где C_{FC} – стоимость системы частотного управления требуемой мощности, руб.;

E_{FC} – коэффициент определения расходов на дополнительные материалы;

M_{FC} – коэффициент определения стоимости монтажных и пуско-наладочных работ.

Принцип расчетов по формуле (4.3) предполагает разбиение исследуемого периода времени на интервалы, каждый из которого соответствует одному отсчету. При этом в рамках отсчета, принимается, что входные данные указываются за час. Интервал может соответствовать одному часу, но ввиду высокой сложности проведения почасовой оценки, интервал может быть увеличен, а значения исходных данных усреднены. Для этого результат расчета каждого отсчета умножаются на величину σ_i .

Входные величины Q_{1i} и Q_{2i} должны задаваться в виде массивов из k составляющих: Q_{2i} – на основании статистической информации о водопотреблении; Q_{1i} на основании оценки формулы (1.8).

Данный принцип распространяется и на последующие расчетные методики.

Также, следует отметить, что в расчет берется режим, когда резервуар наполнен, в противном случае экономические потери будут отсутствовать.

Иными словами, формула (4.3) позволяет оценить потери на перелив воды из резервуара.

Стоимость подогрева воды определяется по формуле (4.5) [9, 113].

$$C_T = C_{TS} \cdot (E_T \cdot K_T + A_{HE}) + C_r \cdot C_u \cdot \rho \cdot \frac{0,278 \cdot 10^{-6}}{\eta_k} \cdot \sum_{i=1}^k Q_{li} \cdot (t_{ni} - t_{bi}) \cdot \sigma_i, \quad (4.5)$$

где C_{TS} – капитальные затраты на установку нагревательных элементов, рассчитываемые по формуле (4.6), руб.;

E_T – нормативный коэффициент экономической эффективности нагревательных элементов, 1/год;

K_T – коэффициент учета нормативного срока эксплуатации системы водоподогрева;

A_{HE} – коэффициент нормативных амортизационных отчислений;

η_k – КПД нагревательных элементов;

t_b – температура воды до подогрева, °C;

C_u – удельная теплоемкость воды, Дж/кг·°C.

$$C_{TS} = C_{HE} (1 + E_{HE} + M_{HE}), \quad (4.6)$$

где C_{HE} – стоимость проточного водонагревателя требуемой мощности, руб.;

E_{HE} – коэффициент определения расходов на дополнительные материалы;

M_{HE} – коэффициент определения стоимости монтажных и пуско-наладочных работ.

Стоимость электрического водонагревателя определяется на основании максимальной требуемой мощности подогрева P_T , которую можно оценить как:

$$P_T = C_u \cdot \rho \cdot \frac{0,278 \cdot 10^{-6}}{\eta_k} \cdot Q_{lab} \cdot (t_{max} - t_b), \quad (4.7)$$

где Q_{lab} – минимально-допустимая подача в текущих условиях, м³/ч;

t_{max} – максимальная температура подогрева воды, определяется по формуле (1.8), °C.

Полученная мощность округляется в большую сторону до ближайшей типовой мощности доступных моделей проточных водонагревателей, и используется для определения соответствующей цены нагревателя.

По формуле (4.8) [69] можно посчитать стоимость теплоизоляции.

$$C_I = C_{IS} \cdot (E_I \cdot K_I + A_{CI}) \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot L \cdot (d_3^2 - d_2^2), \quad (4.8)$$

где C_{IS} – затраты на установку одного кубического метра пассивной теплоизоляции, определяемые выражением (4.9), руб./м³;

E_I – нормативный коэффициент экономической эффективности теплоизоляции, 1/год;

K_I – коэффициент учета нормативного срока эксплуатации теплоизоляции;

d_3 – внешний диаметр трубопровода со слоем изоляции, м.

d_2 – внешний диаметр трубопровода, м.

$$C_{IS} = C_{CI} (1 + E_{CI} + M_{CI} + G_{CI} + D_{CI}), \quad (4.9)$$

где C_{CI} – цена кубического метра изоляции, руб./м³;

E_{CI} – коэффициент определения расходов на дополнительные материалы;

M_{CI} – коэффициент определения стоимости монтажных работ;

G_{CI} – коэффициент увеличения стоимости на земляные работы;

D_{CI} – коэффициент увеличения стоимости на демонтаж старой изоляции.

Общая функция затрат C на применение рассматриваемых методов (4.10) подлежит минимизации.

$$\begin{aligned} C = & C_{QS} \cdot (E_Q \cdot K_Q + A_{FC}) + \sum_{i=1}^k \left(\frac{P_{pn}}{Q_n} \cdot C_r \cdot k_f + C_w \right) \cdot (Q_{1i} - Q_{2i}) \cdot \sigma_i + \\ & + C_{TS} \cdot (E_T \cdot K_T + A_{HE}) + C_r \cdot C_u \cdot \rho \cdot \frac{0,278 \cdot 10^{-6}}{\eta_k} \cdot \sum_{i=1}^k Q_{1i} \cdot (t_{ni} - t_{bi}) \cdot \sigma_i + \\ & + C_{IS} \cdot (E_I \cdot K_I + A_{CI}) \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot L \cdot (d_3^2 - d_2^2) \rightarrow \min \end{aligned} \quad (4.10)$$

В качестве оптимизируемых переменных выступают: величина перерасхода, величина предварительного нагрева воды, толщина, теплопроводность и стоимость теплоизоляции:

$$\begin{cases} x_1 = Q_1 - Q_2, \\ x_2 = t_n - t_b, \\ x_3 = \frac{(d_3 - d_2)}{2}, \\ x_4 = \lambda_u, \\ x_5 = C_{CI} \end{cases} \quad (4.11)$$

где λ_u – коэффициент теплопроводности слоя изоляции, Вт/м·°С.

При выполнении оптимизации важным этапом является определение ограничений, накладываемых на диапазон изменения оптимизируемых параметров. Первое основное ограничение основывается на формуле (1.8). Принимая конечную температуру за известную константу и изменив знак равенства на «меньше или равно», преобразуем формулу в ограничение оптимизационной модели. Второе ограничение необходимо при резко выраженной лабильности напорно-расходной характеристики насоса, которая проявляется невозможностью достижения определенной подачи без возникновения эффекта помпажа. В этом случае снижение подачи необходимо ограничивать значением Q_{lab} .

Для численной оптимизации функции необходимо привести задачу к вычислению значений за один отсчет, для этого в формуле (4.10) исключается суммирование, а величина капитальных затрат делится на количество отсчетов k . После преобразований, получаем оптимизационную модель, представленную системой (4.12).

$$\left\{ \begin{array}{l} C = a \cdot x_1 + b \cdot (x_1 + Q_2) \cdot x_2 + c \cdot x_5 \cdot (x_3^2 + d_2 \cdot x_3) + d \rightarrow \min, \\ t_k \leq t_o + \frac{q_t}{k_1 + k_{pr}} + \left(x_2 + m - \frac{q_t}{k_1 + k_{pr}} \right) \cdot e^{\frac{o}{(x_1 + Q_2) \cdot \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_{pr}} \right)}}, \\ Q_n \geq x_1 + Q_2 \geq Q_{lab}, \\ x_1, x_2 \geq 0, \\ x_2 + t_b \leq t_{\max}, \\ x_3 \in M_{x_3}; x_4 \in M_{x_4}; x_5 \in M_{x_5} \end{array} \right., \quad (4.12)$$

где $M_{x_3}, M_{x_4}, M_{x_5}$ – множества доступных значений соответствующих оптимизируемых переменных.

Элементы M_{x_4} и M_{x_5} связаны взаимоднозначным соответствием. Толщина теплоизоляции также принимается дискретной, исходя из доступных рыночных вариантов.

Все постоянные коэффициенты модели: $a, b, c, d, o, f, h, l, m$ – рассчитываются по набору формул (4.13).

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \left(\frac{P_{pn}}{Q_n} \cdot C_r \cdot k_f + C_w \right) \cdot \sigma, \\ b = C_r \cdot C_u \cdot \rho \cdot \frac{0,278 \cdot 10^{-6}}{\eta_k} \cdot \sigma, \\ c = (1 + E_{CI} + M_{CI} + G_{CI} + D_{CI}) \cdot (E_I \cdot K_I + A_{CI}) \cdot \frac{1}{k} \cdot \pi \cdot L, \\ d = \frac{1}{k} \cdot (C_{QS} \cdot (E_Q \cdot K_Q + A_{FC}) + C_{TS} \cdot (E_T \cdot K_T + A_{HE})), \\ o = -\frac{L}{C_v}, \\ f = \frac{1775}{d_1^{0,8}}, \\ h = \frac{1}{2 \cdot \lambda_m} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}, \\ l = 0,32 \cdot \left(\frac{w}{(13,248 + 0,0827 \cdot t_o + 5 \cdot 10^{-5} \cdot t_o^2) \cdot 10^{-6}} \right)^{0,63} \cdot (0,0244 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot (-t_o)), \\ m = t_b - t_o \end{array} \right., \quad (4.13)$$

где λ_m – коэффициент теплопроводности стенки трубы, Вт/м·°С;

w – средняя скорость ветра, м/с;

Коэффициент теплопередачи к стенке трубы после подстановок рассчитывается по формуле:

$$k_1 = \pi \cdot f \cdot (x_1 + Q_2)^{0,8}. \quad (4.14)$$

Приведенный коэффициент теплопередачи после подстановок рассчитывается по формуле:

$$k_{pr} = \frac{\pi}{\frac{1}{l \cdot (2 \cdot x_3 + d_2)^{0,63}} + h + \frac{1}{2 \cdot x_4} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot x_3 + d_2}{d_2}\right)}. \quad (4.15)$$

Диссипативная теплота трения может рассчитываться различными способами для разных типов труб и скоростей движения воды. Преобразованный набор формул для вычисления диссипативной теплоты трения приводится в системе (4.16):

$$\left\{ \begin{array}{l} q_t = g \cdot \rho \cdot 0,014592 \cdot \left(1 + 0,21675 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{x_1 + Q_2} \right)^{0,3} \cdot \frac{(x_1 + Q_2)^3}{\pi^2 \cdot d_1^{5,3}}; \\ \text{при } x_1 < 0,3 \cdot \pi \cdot d_1^2 - Q_2; \text{ материал - металл,} \\ q_t = g \cdot \rho \cdot \frac{0,01712 \cdot (x_1 + Q_2)^3}{\pi^2 \cdot d_1^{5,3}}; \text{ при } x_1 \geq 0,3 \cdot \pi \cdot d_1^2 - Q_2; \text{ материал - металл,} \\ q_t = g \cdot \rho \cdot \frac{0,008012 \cdot (x_1 + Q_2)^{2,774}}{\pi^{1,774} \cdot d_1^{4,774}}; \text{ материал - пластик} \end{array} \right. \quad (4.16)$$

Оптимизацию целевой функции с набором нелинейных ограничений 4.12 целесообразно выполнять численными методами при помощи соответствующих программных средств. Поскольку несколько оптимизируемых переменных являются заранее известным набором дискретных значений, в процесс оптимизации возникает необходимость выполнения перебора возможных комбинаций входных значений. Оптимизируя параметры ЭТК УПП, следует

рассмотреть различные комбинации способов защиты от замерзания: обособленное поддержание избыточной подачи, подогрев или использование пассивной теплоизоляции. А также все возможные их парные комбинации и одновременное использование всех способов. Общая методика решения задачи оптимизации параметров ЭТК УПП для защиты трубопровода от замерзания по критерию минимальной стоимости представлена на рисунке 4.1 в виде алгоритмической блок-схемы.

В блоке 1 алгоритма производится ввод основных входных параметров, используемых в выражении (4.12). Часть параметров, которые могут изменяться на разных отсчетах вычислительной процедуры задаются в виде массивов обозначением «[]». $\xi[]$ – массив доступных типоразмеров теплоизоляционного материала, при этом массив может быть двумерных, если для разных типов материалов используются различные размерные ряды. Для обеспечения компактности в блоке не указываются второстепенные параметры, используемые в основном ограничении системы (4.12). Для удобства ввода параметров используется база данных 2.

В третьем блоке объявляются дополнительные переменные, используемые при расчете. Значения мощностей и капитальных затрат сразу вычисляются в данном блоке. Переменные C , x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 используются как выходные значения внутренних подпрограмм. Массивы $C[]$, $x_1[]$, $x_2[]$, $x_3[]$, $x_4[]$, $x_5[]$ – для накопления результатов различных вариантов расчета, с последующим выбором оптимального. y – индекс оптимального решения.

В блоке 4 производится инициализация первого варианта расчетов. Для исключения из текущего расчета определенного способа защиты от замерзания значения переменных инициализируются специальными значениями параметров.

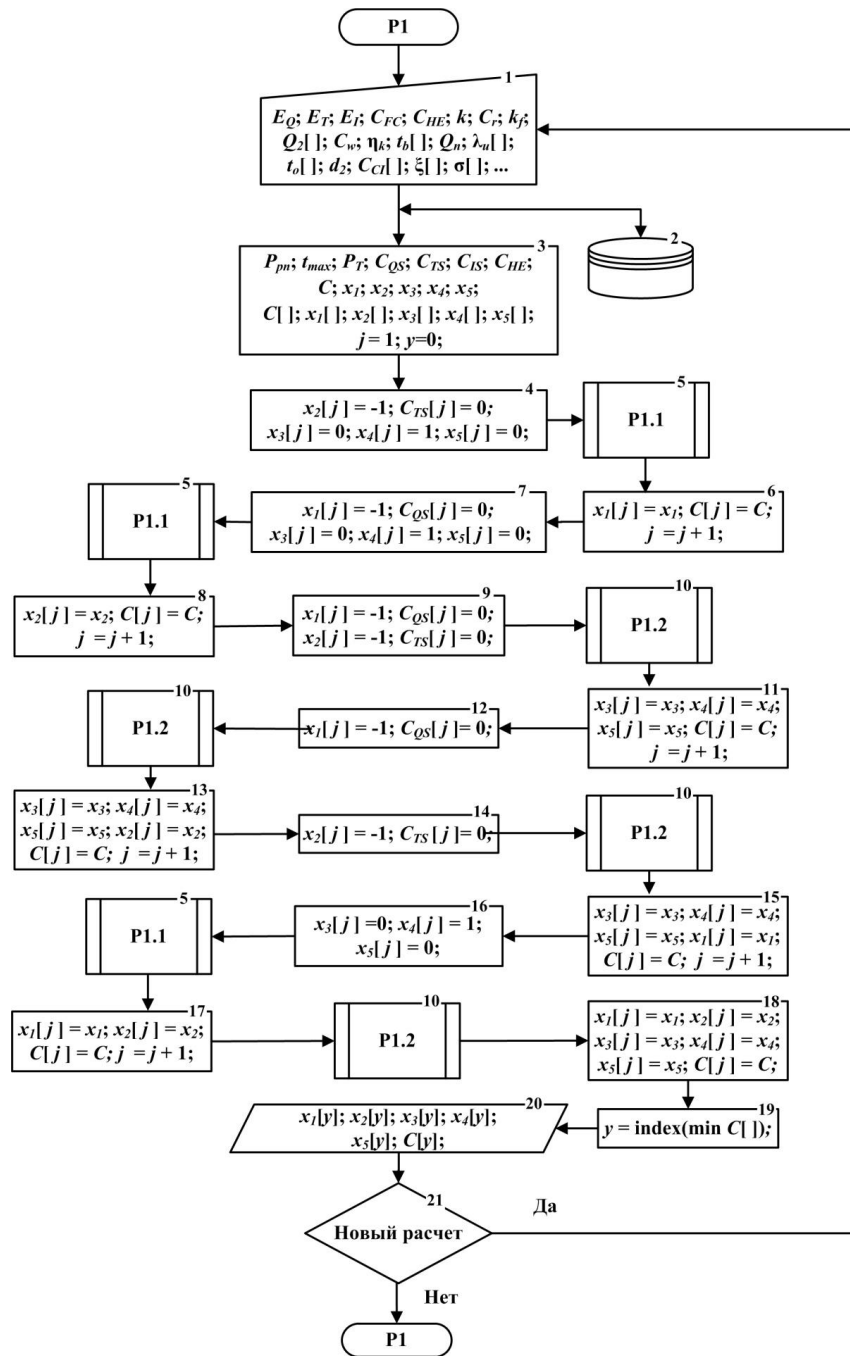


Рисунок 4.1 – Методика оптимизации параметров ЭТК УПП

В данном случае оценивается только поддержание температуры подачей с возможной переработкой, для этого предварительный подогрев исключается из расчета путем присвоения величине $x_2[j]$ значения минус 1. Для исключения пассивной теплоизоляции обнуляются значения толщины $x_3[j]$ и стоимости $x_5[j]$. Коэффициент теплопроводности $x_4[j]$, в силу особенностей расчетных методик

приравнивается к 1. Обнуляются и соответствующие капитальные затраты. Оставшиеся переменные, в нашем случае $x_1[j]$, обнуляются, что не указывается в этом и подобных блоках для экономии пространства схемы. Затем инициализированные переменные и требуемые параметры передаются в подпрограмму расчета оптимизационной модели Р.1 (блок 5). Блок - схема алгоритма данной подпрограммы приводится на рисунке 4.2.

В блоке 6 выходные значения оптимизационного алгоритма заносятся в соответствующие массивы и основной счетчик инкрементируется. Элементы не указанных массивов обнуляются. Блоки 7 и 8 по аналогии выполняют оптимизационный расчет предварительного подогрева без других способов. В блоке 9 происходит инициализация расчета обособленной пассивной теплоизоляции. В этом случае потребуется перебор возможных материалов и типоразмеров изоляции, для чего применяется дополнительная подпрограмма Р.2 (блок 10), блок-схема которой приводится на рисунке 4.3. В блоках 12 – 18 производится расчет комбинированных способов по аналогичным принципам.

Когда массив оптимизируемых параметров и значений стоимостной функции для всех комбинаций способов защиты заполнен, в блоке 19 производится нахождения индекса, соответствующего минимальному значению целевой функции. После чего в блоке 20 выводится наилучшее значение целевой функции и соответствующие ему значения оптимизируемых переменных.

На рисунке 4.2 в блоках 1 – 3 производится загрузка основных входных параметров и инициализация переменных. Переменные по превышению подачи и подогреву воды на каждом витке инициализируются заранее подобранными начальными значениями x_{1n} и x_{2in} , определяющими точку отсчета оптимизационного алгоритма.

В блоках 4 – 7 проверяются условия исключения из расчетов подачи и предварительного подогрева воды. Для этого в ограничения системы (4.12)

вводится условия строгого равенства нулю соответствующей оптимизируемой переменной.

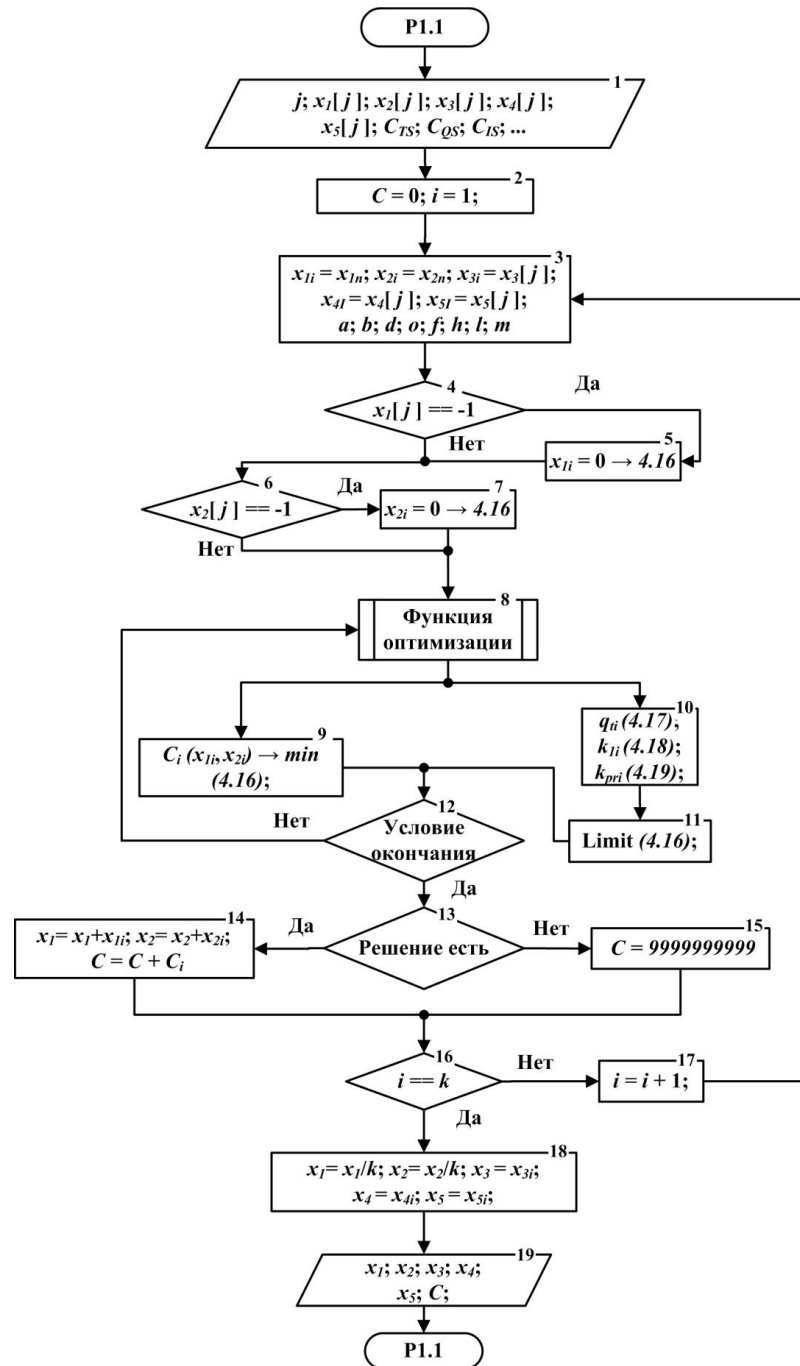


Рисунок 4.2 – Алгоритм выполнения оптимизации

Блоки 8 – 12 выполняют основной алгоритм численной многомерной условной оптимизации подходящим расчетным методом. В блоке 9 производится

анализ целевой функции, а в блоке 11 – системы ограничения, с предварительным расчетом промежуточных параметров зависящих от оптимизируемых переменных (блок 10). Обычно процедура численной оптимизации является итерационной с различными типами условия окончания процесса, которое реализуется в блоке 12.

Каждый виток алгоритма соответствует одному отсчету формулы (4.10). Если при расчете отсчета невозможно найти решение, удовлетворяющее ограничениям, в блоке 13 производится разветвление алгоритма. Если решение существует, в блоке 14 происходит накопление значения целевой функции и основных оптимизируемых переменных для дальнейшей оценки всего исследуемого периода. Если нет, в блоке 15 текущее значение целевой функции приравнивается к большому числу, значительно превосходящему диапазон возможных значений целевой функции, что позволяет исключить всю ветвь данного отсчета из дальнейших расчетов.

Алгоритм повторяется, пока не рассчитаны значения для всех отсчетов (блок 16) путем инкрементирования основного счетчика (блок 17).

В блоке 18 переменные по перерасходу и подогреву делятся на количество отсчетов для получения усредненной величины, а переменные, связанные с теплоизоляцией остаются в неизменном виде и выводятся из подпрограммы в блоке 19.

При переборе вариантов пассивной теплоизоляции в блоке 1 схемы 4.3 вводятся дополнительные счетчики, z и s_z для обращения к соответствующим массивам, а также основной счетчик u . Счетчики ограничены своими максимальными значениями z_m и s_{zm} .

Блоки 3, 9 и 10 реализуют первый цикл перебора значений типов и стоимостей теплоизоляции. Блоки 4, 7 и 8 – цикл перебора толщины теплоизоляции. В блоке 5 вызывается функция оптимизации, результаты выполнения которой заносятся в соответствующие массивы в блоке 6, в котором также производится инкрементирование основного счетчика.

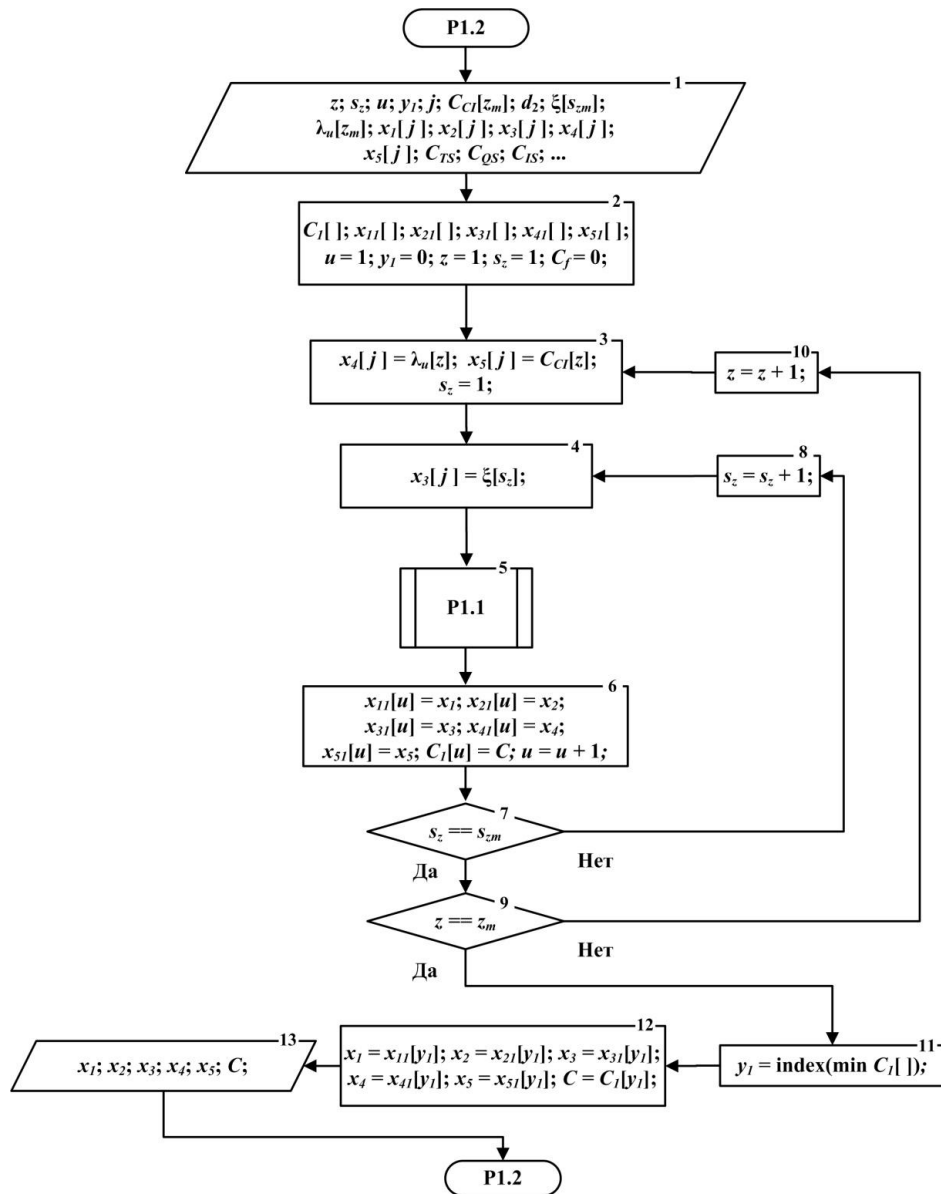


Рисунок 4.3 – Алгоритм перебора параметров теплоизоляции

В блоке 11 определяется индекс оптимального набора значений переменных и функции, которые затем загружаются в выходные переменные в блоке 12 и выводятся в блоке 13.

Следует отметить, что использование усредненных входных параметров может привести к тому, что при их критических значениях оптимизированный способ и его параметры не обеспечат защиту трубопровода от замерзания. Под критическими значениями параметров принимаются: абсолютный минимум температуры воды в скважине, абсолютный минимум температуры наружного

воздуха, минимальное водопотребление. Для того чтобы учесть подобную ситуацию в расчетах, возможно в качестве средних значений параметров за один отсчет взять минимальные. В этом случае, если обеспечить требуемую температуру будет невозможно, вся соответствующая ветвь оптимизационного расчета будет исключена блоками 13 и 15 схемы 4.2.

4.2 Оценка экономического эффекта от внедрения системы управления

Основным показателем рентабельности любой внедряемой инновационной технологии является её срок окупаемости. Расчетный срок окупаемости можно вычислить, используя выражение [111]:

$$T_Q = \frac{C_{QS}}{E_Q}. \quad (4.17)$$

Для систем частотного регулирования производительности насосов нормативный срок окупаемости не должен превышать 10 – 15 лет, но на практике экономически целесообразным является период до 4 лет [32].

Капитальные затраты оцениваются по формуле (4.4), поскольку основные элементы системы управления относятся к электротехническому оборудованию, все коэффициенты формулы будут одинаковыми, соответственно достаточно будет определить суммарную стоимость всех элементов совместно с частотным преобразователем, скорректированную общими коэффициентами.

Годовая экономическая эффективность внедряемой системы относительно существующей конфигурации объекта в общем случае определяется как суммарная величина увеличения годовой прибыли минус неизбежные дополнительные издержки.

В случае внедрения разрабатываемой системы управления производительностью ЭТК УПП в качестве прибыли выступает прогнозируемая величина сэкономленных ресурсов C_E , а в качестве издержек - затраты на

переработку насоса для защиты трубопровода от замерзания при низких температурах окружающей среды – O_E и амортизация:

$$E_Q = C_E - O_E - C_{QS} \cdot A_{FC} . \quad (4.18)$$

Экономия ресурсов может быть определена по следующей формуле [17, 114], как компенсация экономических затрат, связанных с неоптимизированными режимами работы ЭТК УПП, функционирующего без предлагаемой системы управления:

$$C_E = C_a + C_e + C_r + C_p, \quad (4.19)$$

где C_a – усредненные затраты, связанные с переливом излишков артезианских водных ресурсов, руб./год;

C_e – усредненные затраты на оплату электроэнергии при переработке насосов, руб./год;

C_r – затраты на устранение внезапных аварийных ситуаций, связанных с преждевременным износом насосов и поломками других элементов системы водоснабжения за текущий год, руб./год;

C_p – заработная плата потенциально сокращаемому персоналу за текущий год, руб./год.

Затраты C_r носят случайный характер и зависят от характера аварийной ситуации. Достоверно данные затраты могут оцениваться только путем статистического анализа аварийных ситуаций на объектах водоснабжения [17]. Приблизительно величина данных затрат может быть определена как 3,8 % от капитальных вложений для технологического оборудования насосной станции [33]. Частотное регулирование позволяет снизить затраты на текущий ремонт насосного оборудования до 20 % [36], что справедливо и для трубопроводной системы, с учетом защиты от замерзания. Таким образом исключаются избыточные затраты на преждевременный износ оборудования и ремонт в размере 1,5 % от капитальных вложений.

Затраты C_a на оплату излишков водных ресурсов можно оценить на основании формулы (4.20) следующим образом:

$$C_a = C_w \cdot \sum_{i=1}^k (Q_{ni} - Q_{2i}) \cdot \sigma_i, \quad (4.20)$$

где Q_{ni} – подача, обеспечиваемая насосом в номинальном режиме работы, или задаваемая стандартной системой управления, м³/ч.

Аналогичным образом оцениваются и затраты на электроэнергию при переработке насоса C_e :

$$C_e = \frac{P_{pn}}{Q_n} \cdot C_r \cdot k_f \cdot \sum_{i=1}^k (Q_{ni} - Q_{2i}) \cdot \sigma_i. \quad (4.21)$$

Расчет затрат на защиту трубопровода от замерзания базируется на выражении (4.3):

$$O_E = \left(\frac{P_{pn}}{Q_n} \cdot C_r \cdot k_f + C_w \right) \cdot \sum_{i=1}^k (Q_{zi} - Q_{2i}) \cdot \sigma_i, \quad (4.22)$$

где Q_{zi} – подача, обеспечивающая защиту трубопровода от замерзания, определяемая при помощи методики оптимизации, м³/ч.

Таким образом, экономическая эффективность внедрения системы рассчитывается как:

$$E_Q = \left(\frac{P_{pn}}{Q_n} \cdot C_r \cdot k_f + C_w \right) \cdot \sum_{i=1}^k (Q_{ni} - Q_{zi}) \cdot \sigma_i + C_{PS} \cdot 0,015 \cdot E_P + C_p - C_{QS} \cdot A_{FC}, \quad (4.23)$$

где C_{PS} – капитальные затраты на установку технологического оборудования насосной станции;

E_P – нормативный коэффициент экономической эффективности технологического оборудования насосной станции, 1/год;

Величины C_{PS} и E_P отдельно вычисляются для гидравлического и электротехнического оборудования при помощи выражений, подобных (4.4), и затем суммируются.

Сокращение затрат на заработную плату дежурного персонала может быть исключено из расчета при некоторых особенностях функционирования объекта, исключающих возможность отсутствия оператора.

Методика рекомендуется к применению для предварительной оценки результатов внедрения системы управления на уже эксплуатируемый объект. В случае проектирования и строительства нового объекта методика требует определенной корректировки для возможности сравнительного анализа нескольких вариантов реализации системы.

Методика оптимизации параметров ЭТК УПП для защиты трубопровода от замерзания по критерию минимальной стоимости (описание в подразделе 4.1) была реализована в виде скриптов программного пакета MatLab. Для выполнения многомерной условной нелинейной оптимизации системы (4.12) (блоки 8 – 12 на рисунке 4.2) была использована стандартная подпрограмма (функция) *fmincon* данного пакета. Программный код скрипта реализации расчета оптимизационной модели (4.12), учитывающий все три способа защиты от замерзания приводится в приложении Б.

Скрипт позволяет выполнить оптимизацию параметров ЭТК УПП по среднегодовой стоимости за один этап расчета, включая полный перебор теплоизоляции. Полученные данные могут быть представлены в табличном виде или графически для выбора наиболее подходящего способа защиты. Также возможно выгрузка оптимальных значений параметров и функции за один месяц.

При выполнении работы появилась необходимость в предварительной оценке тепловых параметров трубопроводной линии. Для упрощения выполнения практических расчетов было создано компьютерное приложение [115, 116] позволяющее, оценивать технико-экономические параметры автоматизируемого объекта и выполнять их частичную оптимизацию.

Окно интерфейса ввода данных приложения приводится на рисунке 4.4.

Параметры трубопровода:

Длина трубопровода: 1500,00 м

Материал трубы: Выбрать

Коэффициент теплопроводности трубы: 0,000 Вт/(м·°C)

Расчетный внутренний диаметр трубы: 0,250 м

Внутренний диаметр трубы: 0,250 м

Наружный диаметр трубы: 0,300 м

Тип теплоизоляции: нет

Диаметр трубы с теплоизоляцией: 0,000 м

Коэффициент теплопроводности изоляции: 0,000 Вт/(м·°C)

Параметры среды:

Средняя скорость ветра: 0,00 м/с

Температура воды в начале трубопровода: 10,00 °C [Диапазон] [Задать]

Температура окружающей среды: -10,00 °C [Диапазон] [Задать]

Объемный расход воды: 0,005000 м³/с [Диапазон] [Задать]

Параметры для оптимизационного решения:

Минимальная конечная температура воды: 2,00 °C

Температура воды после нагрева греющим элементом: 20,00 °C

Другие затраты на подогрев воды с помощью нагревательных элементов в начале трубопровода за период расчета затрат: 0,00 руб.

Температура окружающей среды для начала работы греющего кабеля: -5,00 °C

Температура воды в начале трубопровода для начала работы греющего кабеля: 5,00 °C

Температура воды после нагрева греющим кабелем: 15,00 °C

Срок окупаемости: 12 месяцев

Исходные данные к экономическому расчету:

Стоимость одного кВт электричества: 4,20 руб.

Ширина теплоизоляции: 1,00 м

Стоимость 1 кубометра теплоизоляции: 3500,00 руб.

Стоимость 1 метра греющего кабеля: 1000,00 руб.

Потребление греющего кабеля кВт в час: 5,00 кВт/ч

Производительность насоса на максимуме: 300,00 м³/ч

Общее среднее потребление воды: 50,00 м³/ч

Потребление нагревательного элемента кВт в час: 5,00 кВт/ч

Потребление электроэнергии насосом на максимальной мощности: 160,00 кВт/ч

Коэффициент спроса насосных агрегатов: 0,80

Период расчета затрат: 7 месяцев

Срок износа нагревательных элементов: 96 месяцев

Срок износа теплоизоляции: 36 месяцев

Срок износа греющего кабеля: 36 месяцев

Капитальные затраты на установку пассивной теплоизоляции: 10000,00 руб.

Капитальные затраты на установку нагревательных элементов: 5000,00 руб.

Капитальные затраты на установку греющего кабеля: 15000,00 руб.

КПД нагревательного элемента: 80,00

КПД греющего кабеля: 70,00

Рисунок 4.4 – Интерфейс ввода данных

Для удобства визуального восприятия входные параметры сгруппированы в четыре блока: параметры трубопровода, параметры окружающей среды, параметры экономического расчета и параметры оптимизации. Определенные данные могут задаваться в виде диапазона путем указания соответствующего флажка и нажатия кнопки «Задать». Для задания диапазона открывается вспомогательное окно. Подобная организация интерфейса ввода позволяет упростить работу с большим объемом входных данных, одновременно обеспечивая контроль всех параметров, что является практическим преимуществом разработанного приложения.

Доступ к расчетным функциям осуществляется путем выбора соответствующей вкладки основного рабочего поля интерфейса приложения.

Первой базовой функцией приложения является расчет температуры воды в конечной части трубопровода. В данном режиме программа осуществляет расчет конечной температуры при различных значениях входных данных при помощи

двух вычислительных методик: методики, предложенной Л.Д. Тереховым (формула (1.8)), и классического уравнения теплового баланса [117].

Уравнение теплового баланса может применяться в оптимизационных задачах, когда конечная температура воды задается в виде константы, для увеличения скорости выполнения расчетов. На следующей вкладке «Расчет стоимости защиты трубопровода от замерзания» выполняется расчет затрат на различные способы защиты трубопровода от замерзания обособлено. Вкладка «Оптимизация», позволяет получить оптимальные параметры защиты трубопровода от замерзания, с учетом заданной конечной минимальной температуры воды в трубопроводе. Расчёт оптимизируемых параметров производится по упрощенному итерационному алгоритму. На текущем этапе разработки приложение не позволяет выполнить оптимизацию по двум способам защиты одновременно, а также задействовать все ограничения оптимизационной модели. Разработанное приложение позволяет автоматизировать процесс технико-экономической оценки параметров ЭТК УПП системы водоснабжения.

4.4 Автоматизация электротехнического комплекса участка первого подъема пгт. Новоорловск Забайкальского края

Система водоснабжения пгт. Новоорловск Агинского района Забайкальского края была спроектирована для обеспечения питьевой и технической водой благоустроенных районов и садовых участков вышеуказанного населенного пункта, а также Новоорловского горно-обогатительного комбината. В настоящее время комбинат работает нестабильно, и проектная мощность водозабора является избыточной.

До 2018 года обслуживающей организацией системы водоснабжения являлось ООО «Гарант», в настоящее время таковой является АО «Забайкальская топливно-энергетическая компания (ЗабТЭК)».

УПП системы водоснабжения пгт. Новоорловск расположен в долине реки Ага. Артезианские скважины расположены в непосредственной близости к пойме реки. Вода перекачивается по водоводу в промежуточный накапливающий резервуар на насосной станции второго подъема.

Расстояние по прямой от скважин до накапливающего резервуара составляет порядка 7600 м, от станции второго подъема до потребителя - порядка 5800 метров в соответствии с топографическим спутниковым снимком 4.5.

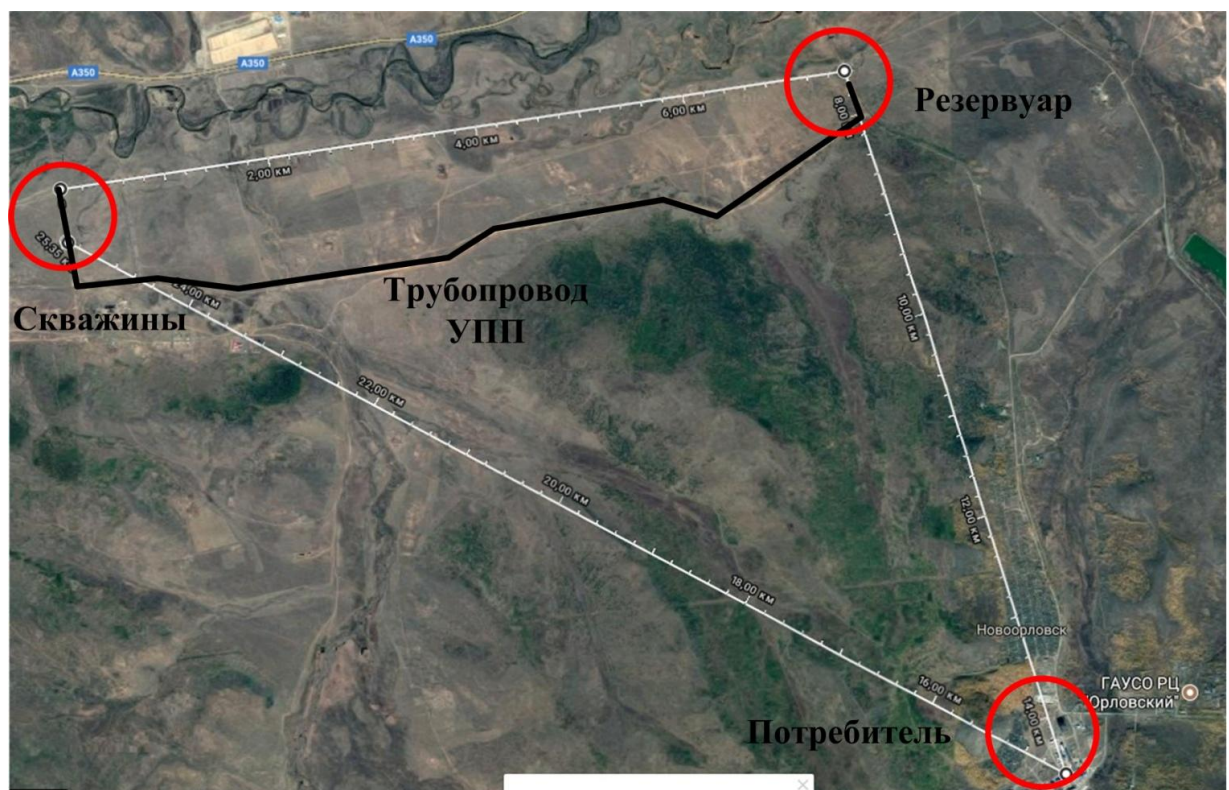


Рисунок 4.5 – Спутниковый снимок системы водоснабжения пгт. Новоорловск

Трубопровод проложен на максимально возможном удалении от поймы реки под сопкой. В соответствии со снимком, длина трубопровода от рабочей скважины составляет около 10 км. Трубопровод проложен наземным методом в небольшом углублении под земляной обвалкой смешанной с керамзитовым песком толщиной около 1 м, выступающей в качестве механической и тепловой

защитной изоляции. Также трубопровод покрыт защитным антикоррозийным битумно-полимерным покрытием.

УПП содержит две скважины, обозначенные номерами 9 и 10. Расстояние между скважинами составляет порядка 800 м. 10-я скважина является основной и подлежит автоматизации. 9-я скважина резервная и не эксплуатируется в нормальном режиме работы объекта. Скважина 10 состоит из двух функционирующих водозаборных стволов с погружными насосами, находящимися на расстоянии около 20 м друг от друга. В нормальном режиме функционирования один ствол является рабочим, а второй резервным. Для защиты от неблагоприятных климатических условий над каждым стволом построено технологическое помещение.

Трубопроводы различных скважин и стволов соединяются трубами с диаметром условного прохода 150 мм в подземном распределительном узле, внешний вид которого приводится на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 – Распределительный узел

Распределительный узел обеспечивает ручное переключение между действующими источниками воды. На скважине присутствует постоянный дежурный персонал, обеспечивающий ручное управление насосами и запорной арматурой.

Водозаборный участок соединяется с насосной станцией второго подъема сдвоенной трубопроводной линией. Одна линия является постоянно рабочей, а вторая резервной. На насосной станции второго подъема вода аккумулируется в спаренном накапливающем резервуаре, присыпанном грунтом, как показано на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Накапливающий резервуар

Высота над уровнем моря площадок скважин и накапливающего резервуара составляют 672 м и 669 м, в соответствии с данными Google Earth. Приемное отверстие накапливающего резервуара возвышается над поверхностью земли примерно на 3 м. Глубина погружения насоса в скважину составляет порядка 50 м. Таким образом, общая разница уровней между приемным патрубком насоса и приемным отверстием резервуара, и, соответственно, статическая составляющая напора системы, будет определяться только высотой размещения насоса в скважине, которая составляет 50 м.

Какие либо устройства автоматического регулирования производительности электроприводов насосов первого подъема в данной системе отсутствовали. Имелись некоторые устаревшие телеметрические элементы, такие как точечный двухпозиционный электронный сигнализатор уровня. Предполагалось, что при получении светового сигнала крайних значений уровня, персонал станции

второго подъема должен был выполнить дросселирование задвижки на входе в накапливающий резервуар либо сообщить дежурному первого подъема о необходимости отключения/включения насоса. Система оказалась ненадежной, в первую очередь из-за значительного влияния человеческого фактора, и практически не эксплуатировалась. В период эксплуатации объекта в условиях отрицательных температур окружающей среды персонал также настаивал на поддержании максимальной производительности насоса для предотвращения замерзания трубопровода, с исключением каких либо регулировочных действий.

Таким образом, на данном объекте не выполнялось какое либо управление производительностью ЭТК УПП, что влекло за собой практически постоянную переработку насоса. При этом избыток воды сливался на поверхность земли через спускное отверстие резервуара и стекал в реку.

Для снижения неоправданных эксплуатационных затрат была поставлена задача разработки способа и системы регулирования производительности ЭТК УПП данного объекта. В процессе постановки задачи автоматизации объекта была разработана структурная схема системы управления [118], представленная на рисунке 4.8.

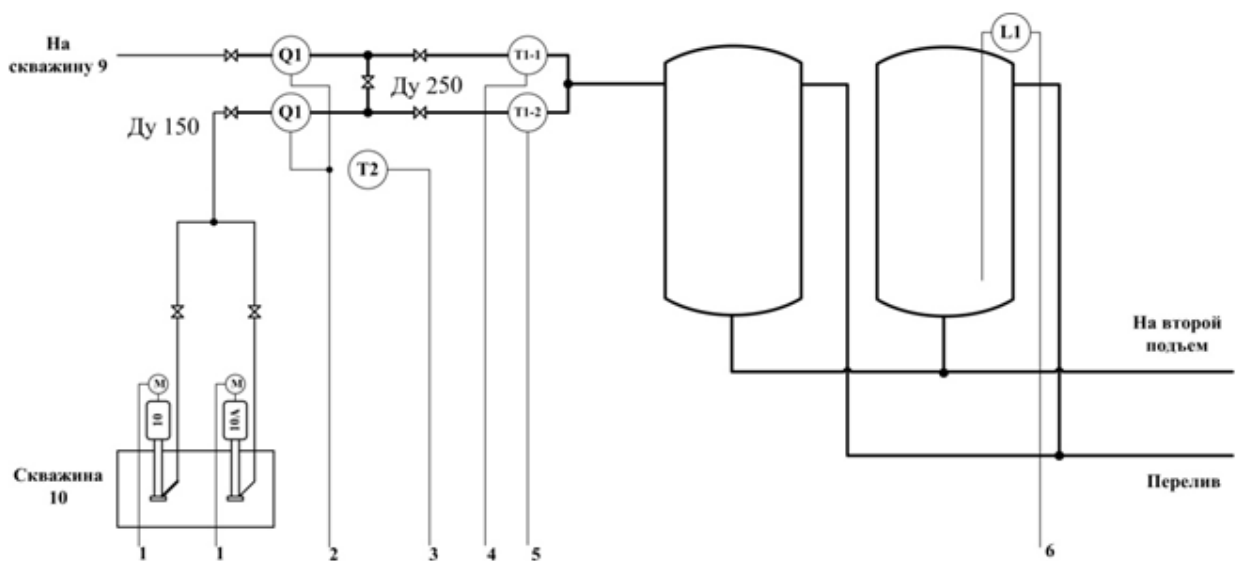


Рисунок 4.8 – Схема системы управления

Выполнялась автоматизация 10-й скважины. На скважине расположено два насоса (основной, маркируемый как 10, резервный – 10А) ЭЦВ10-65/100. Номинальная мощность насосов – 32 кВт каждый. Скважина снабжается одним преобразователем частоты требуемой мощности, а также коммутационным оборудованием, позволяющим подключать любой насос к частотному преобразователю, либо напрямую к электрической сети.

Для контроля подачи и объемного расхода рекомендуется снабжать расходомерами Q1 трубопроводные линии от каждой скважины, что позволит вести корректный технический учет перекачиваемой воды в случае одновременной эксплуатации обеих скважин. Также рекомендуется установка двух врезных датчиков температуры воды Т1-1 и Т1-2, что позволит контролировать температуру в конечной части обеих линий трубопровода, при заполнении водой резервной. Для минимизации установочных затрат допускается использование только одного расходомера и датчика температуры воды на основной скважине и трубопроводной линии.

Для контроля динамического уровня воды в накапливающем резервуаре используется бесконтактный уровнемер L1, основанный на ультразвуковом или ином принципе измерения. С целью мониторинга и контроля параметров окружающей среды применяется датчик температуры наружного воздуха Т2.

Данная схема в полной мере соответствует структуре предлагаемой системы управления ЭТК УПП, представленной на рисунке 3.15. Система была смоделирована и настроена, в разработанной имитационной модели, а затем внедрена на объект, что подтверждается актом внедрения №225 от 23.10.2017.

Также был выполнен оптимизационный расчет для обоснования наилучших способов и параметров защиты трубопровода от замерзания и оценка экономического эффекта от внедрения системы.

В таблице А.2 приложения А приводится список параметров УПП автоматизируемого объекта, используемых при моделировании и технических расчетах [2, 32, 119 – 122].

Величина номинальной подачи определяется графически, как точка пересечения напорно-расходных характеристик насоса и трубопроводной системы, графики которых приводятся на рисунке 4.9.

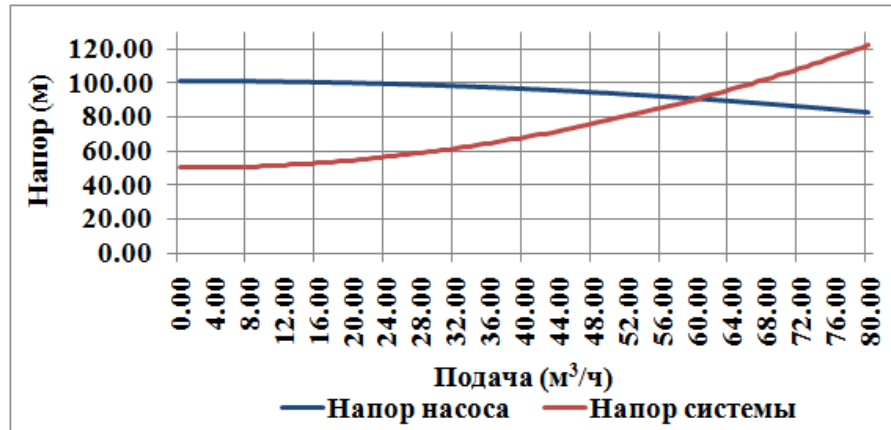


Рисунок 4.9 – Рабочая точка системы при номинальных параметрах

В итоге рабочая точка соответствует подаче в $60,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напору в $90,6 \text{ м}$.

Величина LR определяется как сумма всех коэффициентов местных сопротивлений. Рассматриваемая трубопроводная система содержит 4 вентильных задвижки ($7 \cdot 4 = 28$), 2 расширения ($0,5 \cdot 2 = 1$), 8 изгибов 90° ($0,6 \cdot 8 = 4,8$), 6 изгибов 45° ($0,3 \cdot 6 = 2,4$), 2 тройника ($1,5 \cdot 2 = 3$) [33, 123]. Таким образом, общий коэффициент местных сопротивлений равен $39,2$.

Значение мощности, потребляемое при номинальной подаче, определяется по формуле (2.5) как:

$$P_{pn} = \frac{9810 \cdot 0,0168 \cdot 90,6}{0,85 \cdot 0,7} = 25095 \text{ Вт}.$$

В таблице А.3 приложения А приводятся величины почасового водопотребления, усредненные по месяцам, и соответствующий уровень избыточного количества перекачиваемой воды без реализации управления производительностью.

Для оценки средней годовой величины перелива, данные из последней колонки таблицы А.3 умножаются на число 730 (количество часов в месяц) и

затем суммируются. Данным способом было получено значение $126\,728\text{ м}^3$, при общем количестве перекачанной воды на номинальной производительности ($60,5\text{ м}^3/\text{ч}$) в объеме $529\,980\text{ м}^3$. Что позволяет сделать вывод о наличии переработки ЭТК УПП данного объекта водоснабжения в 23,9%.

В таблице А.4 приложения А приводятся значения среднемесячной температуры окружающей, характерные для региона эксплуатации рассматриваемого объекта [124, 125]. Абсолютный температурный минимум в рассматриваемом районе составляет минус $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [126].

При выполнении оптимизационных расчетов данные из таблиц А.3 и А.4 используются для каждого часа соответствующего месяца. При этом в качестве температуры за один исследуемый час в январе принимается абсолютный минимум, а в качестве водопотребления - минимально возможный. Поскольку данные условия является критическими и редкими для системы водоснабжения, конечная температура в конце трубопровода для них должна быть только положительной, без учета уставки, и поэтому принимается равной $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для реализации предложенного способа частотного управления производительностью ЭТК УПП системы водоснабжения пгт. Новоорловск, с учетом характерных особенностей объекта, применялось оборудование, суммарная стоимость которого составила 508 400 рублей. Данная величина определяет технико-экономические характеристики внедрения системы частотного управления производительностью ЭТК УПП в таблице А.2.

Коэффициент K_Q определяется как отношение наибольшего нормативного срока эксплуатации всех применяемых технологий защиты трубопровода от замерзания, к сроку эксплуатации рассматриваемой технологии. Нормативный срок эксплуатации системы частотного управления составляет 12 лет [32], проточного водонагревателя – 5 лет [127], пассивной теплоизоляции – примерно 20 лет [128]. Таким образом, коэффициент K_Q после округления до большего целого равен 2. Данный коэффициент для водонагревателя составляет 4, а для теплоизоляции 1.

Для оценки капитальных затрат на систему предварительного подогрева воды необходимо оценить максимальную электрическую мощность нагревателя. Для этого используется формула (4.7).

$$P_T = 4210 \cdot 1000 \cdot \frac{0,278 \cdot 10^{-6}}{0,99} \cdot 10 \cdot (18,5 - 4,5) = 165,5 \text{ кВт} .$$

Максимальная температура в начальной части трубопровода при наихудших параметрах окружающей среды и минимально возможной подаче рассчитана по формуле (1.8) и принята равной 18,5 °С.

Соответственно, в качестве проточного нагревателя было выбрано устройство АВП-Нп 175 кВт [127] стоимостью 654 400 руб. Техно-экономические параметры установки водонагревателя приводятся в таблице А.2 приложения А.

Затраты на установку теплоизоляции рассчитываются по формуле (4.8) отдельно для каждого типа материала. В рамках текущего расчета рассматривается два наиболее распространенных типа изоляции: маты из минеральной ваты (МВ) и скорлупа из пенополиуретана (ППУ). Параметры разных типов изоляции сгруппированы в таблице А.5 приложения А [129, 130].

Первая строка таблицы содержит параметры уже существующей на рассматриваемом трубопроводе теплоизоляции. Её параметры необходимо учитывать в расчетах, но на целевую функцию она влияние не окажет. Для этого параметр стоимости приравнивается к нулю.

Величина $C_{PS} \cdot E_P$ для оценки капитальных затрат на строительство насосной станции вычисляется следующим образом в соответствии с данными из таблицы А.2:

$$\begin{aligned} C_{PS} \cdot E_P &= C_{pu} \cdot E_{pu} + C_{pi} \cdot E_{pi} + C_{el} \cdot E_{el} = \\ &= 332\,500 \cdot 0,2 + 131\,872\,000 \cdot 0,05 + 56\,500 \cdot 0,2 = 6\,671\,400 \text{ руб./год.} \end{aligned}$$

При оптимизации параметров ЭТК УПП функционирующей системы водоснабжения пгт. Новоорловск Забайкальского в качестве водопотребления и температуры окружающей среды были взяты почасовые значения, усредненные за

месяц (таблицы А.3 и А.4). Каждый отсчет расчета соответствовал одному часу, таким образом, параметр $\sigma_i = 1$, а $k = 8760$. Результаты расчетов приводятся в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты оптимизационного расчета

№	Способ	x_1 , м ³ /ч	x_2 , °C	x_3 , м	x_4 , Вт/м·°C	x_5 , руб.	C , руб./год
1	Подача б/и	10,84512	0,417355	0	1	0	нет решения
2	Подача ст/и	3,132228	0	1	0,133	0	395728,044
3	Температура б/и	0,229082	13,95055	0	1	0	нет решения
4	Температура ст/и	0	0,123317	1	0,133	0	1110944,029
5	Подача и температура б/и	10,84519	13,007406	0	1	0	нет решения
6	Подача и температура ст/и	3,132193	0	1	0,133	0	1283095,733
7	Изоляция	0,006929	0,05703	0,12	0,04	16100	нет решения
8	Подача и изоляция	3,1921	0	0,12	0,04	16100	14631382,21
9	Температура и изоляция	0	0,339659	0,08	0,04	16100	10032536,55
10	Все параметры	8,129601	0,505945	0,04	0,04	16100	6553842,997

Обозначение б/и в таблице означает оптимизацию без изоляции, ст/и - оптимизацию со стандартной изоляцией, уже установленной на исследуемом объекте. При анализе полученных данных, определено, что в заданных условиях наиболее экономичным методом защиты трубопровода от замерзания является поддержание некоторой подачи воды при существующей теплоизоляции в виде присыпки из изоляционной смеси. При этом, средняя величина перелива воды, и соответственно, переработки насоса составляет 3,1 м³/ч.

На рисунке 4.10 рассматриваются средние значения перелива воды и затраты на реализацию данного оптимального способа защиты от замерзания по месяцам.

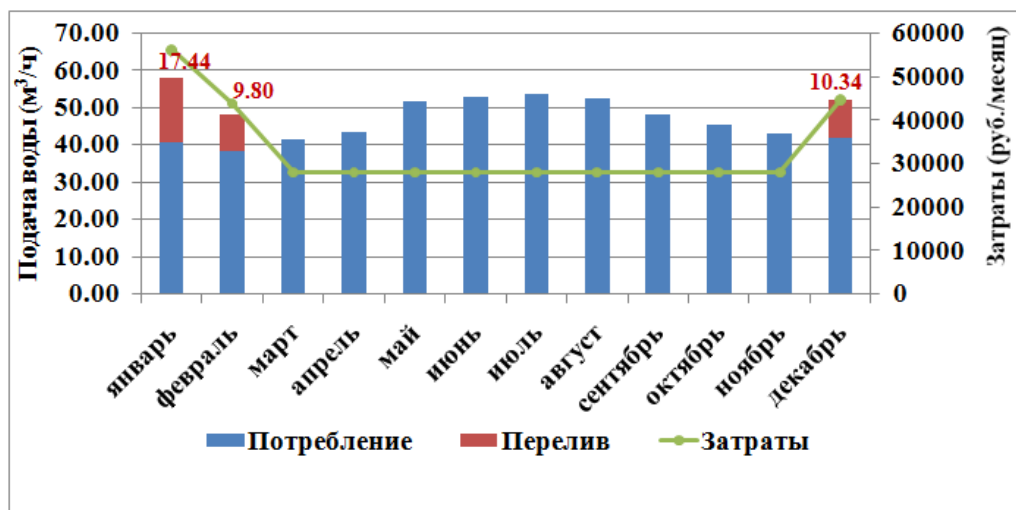


Рисунок 4.10 – Значения перелива и стоимостной функции по месяцам

Очевидно, что наибольшие средние значения перелива соответствуют трем зимним месяцам с низкими отрицательными температурами окружающего воздуха и наименьшим водопотреблением. Величина максимального перелива равна 17,4 м³/ч. Данная величина также учитывает вероятность возникновения критических условий с температурой равной абсолютному минимуму при минимально возможном водопотреблении. Общая величина среднегодового перелива составляет 27 438,3 м³/год. Максимальные затраты на переработку насосов составляют 56 126,4 рубля в месяц с учетом капитальных вложений, при чистых эксплуатационных затратах в 28 215,6 рублей в месяц, что является приемлемой платой за безаварийность процесса водоснабжения. Следует отметить, что средний перелив будет отсутствовать в теплое и переходное время года, что значительно повышает экономическую рентабельность предложенного оптимального способа защиты трубопровода от замерзания. Если рассматривать в качестве объема перекачанной воды данные о водопотреблении из таблицы А.3

плюс величина оптимального перелива ($403252 + 27438,3 = 430690,3 \text{ м}^3/\text{год}$), то суммарная средняя относительная величина слива воды для защиты трубопровода от замерзания составляет 6,4 %, что является допустимым значением [9].

Оценивая потери на перелив без использования системы управления и при её применении, сделаны выводы, что в зимние месяцы экономия ресурсов составляет от 12 до 55 %, весной, летом и осенью экономия водных ресурсов составляет 100 %. В случае, если объект уже был снабжен системой управления, не учитывающей температуру окружающей среды, из оценки убираются месяцы с мая по сентябрь, поскольку для них не характерны отрицательные температуры окружающей среды.

Средняя величина отклонения подачи от номинальной величины за год составляет 18,7 %, что в целом является благоприятным условием для реализации частотного регулирования электроприводов насосов, поскольку в этом случае отрицательное влияние на асинхронный электродвигатель и механическую часть насоса будет незначительным [2, 18]. Тем не менее, если выполнять анализ по отдельным месяцам, то значение отклонения может превышать 30 %, что уже является не рекомендуемой величиной, поэтому в дальнейшем целесообразно рассмотреть варианты реализации комбинированного управления с несколькими насосами различной мощности или управляемыми задвижками.

При внедрении предлагаемой системы управления уровень экономии ресурсов и техническая эффективность определяется как разница между объемом переработки до внедрения системы и после него. Используя данные из таблицы А.3 и рисунков 4,10 получаем величину экономии водных ресурсов в размере:

$$126728 - 27438,3 = 99289,7 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Если рассматривать общий объем перекачиваемой воды до внедрения системы в размере $529\,980 \text{ м}^3/\text{год}$, то после внедрения системы управления величина неоправданных затрат ресурсов составит 5,2 % к исходным 23,9 %, что позволяет утверждать о повышении технической эффективности объекта на 18,7 %. По результатам внедрения на автоматизируемый объект, годовая

экономия воды составила около 85 563 м³/год, что ниже расчетной величины на 13,8 %. При этом уровень повышения технической эффективности упал до 16,1 %, то есть на 2,6 %. Учитывая усредненный характер расчетов, данное отклонение является ожидаемым. Для повышения точности расчетов следует уменьшать интервал усреднения входных данных.

Для оценки рентабельности оптимального способа защиты трубопровода от замерзания, реализуемого в предлагаемой системе управления, был выполнен расчет годовой экономической эффективности по формуле (4.23):

$$E_Q = \left(\frac{25,095}{60,5} \cdot 4,4 \cdot 1,03 + 0,336 \right) \cdot 136,01 \cdot 730 + 6671400 \cdot 0,015 + 720000 - \\ - 574492 \cdot 0,083 = 2,21584 \cdot 99287,3 + 100071 + 720000 - 47682,836 = \\ = 992392,93 \text{ руб./год.}$$

Поскольку в данном случае в расчете используются среднемесячные значения параметров подачи, то коэффициенты $\sigma_i = 730$ и $k = 12$.

Расчетный срок окупаемости внедряемой системы составляет:

$$T_Q = \frac{574492 \text{ руб.}}{992392,93 \text{ руб./год}} = 0,6 \text{ года.}$$

Принимая во внимание возможную необходимость сохранения дежурного персонала на участке первого подъема, данные значения необходимо скорректировать путем исключения величины среднегодовой заработной платы. После этого величина годовой экономической эффективности составила 272392,93 руб./год, а срок окупаемости – 2,1 лет.

В случае, когда на участке первого подъема уже установлена система автоматического регулирования производительности ЭТК УПП, не учитывающая температуру воды в конце трубопровода, следует выполнять расчет, предполагая, что эффективность систем в теплое время года будет совпадать, а при наличии отрицательных температурах воздуха исходная система будет обеспечивать максимальную производительность. В качестве интервала времени с наличием

отрицательных температур окружающей среды (смотреть А.4) приняты месяцы с октября по апрель. Тогда экономия водных ресурсов составит:

$$94973 - 27438,3 = 67534,7 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Если рассматривать общий объем перекачиваемой воды до внедрения системы в размере $498\,225 \text{ м}^3/\text{год}$, то после внедрения предлагаемой системы управления величина неоправданных затрат ресурсов составит 5,5 % к исходным 19.1 %, что позволяет утверждать о повышении технической эффективности объекта на 13.6 %. Экономическая эффективность составит 202 028,9 руб./год, а срок окупаемости 2,8 лет.

По результатам расчетов, применение предложенной в данной работе системы управления производительностью ЭТК УПП в пгт. Новоорловск Забайкальского края, обеспечивает снижение неоправданных затрат водных и энергетических ресурсов на 18,7 %. Экономическая эффективность применения системы составляет 272 392,9 руб./год (без учета экономии затрат на сокращение персонала), при себестоимости системы в 574 492 руб. (включая частотный преобразователь). Срок окупаемости системы составляет примерно 2 года, что является хорошим показателем, превосходящим нормативные значения. Таким образом, полученные результаты близки к реальным показателям эксплуатации рассматриваемого объекта водоснабжения (при текущих условиях расчета относительная погрешность определения уровня снижения переработки ЭТК УПП равна 13,8 %), что подтверждает возможность дальнейшего применения разработанных средств для оценки снижения эксплуатационных затрат при обеспечении безаварийной работы водоподъемных участков в сложных природных условиях.

4.5 Выводы

1. Разработана методика для оптимизации параметров ЭТК УПП для защиты трубопроводной линии от замерзания по критерию минимальной стоимости. Результатом применения методики являются величина превышения подачи насоса над водопотреблением, разница температур при предварительном подогреве воды, наилучшие толщина и материал теплоизоляции, обеспечивающие минимальные суммарные финансовые затраты при поддержании заданной температуры воды.

2. Разработана методика оценки экономической эффективности применения системы управления производительностью ЭТК УПП, осуществляющей поддержание подачи, минимизирующей перелив и обеспечивающей защиту трубопровода от замерзания. Методика позволяет оценить экономическую выгоду от использования предлагаемой системы, а также срок её окупаемости, путем расчета величины снижения финансовых затрат по сравнению с эксплуатацией ЭТК УПП без системы управления, либо с установленной стандартной системой управления, не учитывающей тепловые параметры трубопровода.

3. Разработаны программные скрипты Matlab для выполнения расчетов по оптимизации параметров ЭТК УПП. Создано автономное программное приложение для расчета тепловых параметров трубопроводной линии по двум методикам, а также оптимизации параметров ЭТК УПП для защиты трубопровода от замерзания.

4. Выполнен анализ и выявлены основные параметры эксплуатации УПП пгт. Новоорловск Забайкальского края. На объекте отсутствовали средства автоматизации, что приводило к ежегодной переработке в объеме $126\,728\text{ м}^3$ (23,9 % от общей производительности). Предлагаемая система управления ЭТК УПП была адаптирована и внедрена на данный объект.

5. Выполнена оптимизация параметров ЭТК УПП пгт. Новоорловск. Наиболее рентабельным способом является поддержание подачи,

обеспечивающей заданную температуру воды в конце трубопровода, при условии наличия на объекте текущей теплоизоляции на основе комбинированной присыпки и перелива воды со среднегодовым объемом $3,13 \text{ м}^3/\text{ч}$, что составляет 6,4 % от общего объема перекачанной воды и является допустимым показателем. Было определено, что применение предложенного способа управления ЭТК УПП позволяет повысить уровень ресурсосбережения на 18,7 %, что в денежном эквиваленте составляет 272 392,9 руб./год. Срок окупаемости системы составил 2 года. Было выявлено, что на определенных временных интервалах условия эксплуатации объекта приводят к значительному снижению производительности насосов (более 30 %), что делает целесообразным применение комбинированных методов регулирования.

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 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. Была разработана структура системы управления электротехническим комплексом участка первого подъема, программируемое устройство управления и программный алгоритм, реализующие предложенный способ.

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

5. Результаты диссертационного исследования были внедрены на УПП системы водоснабжения пгт. Новоорловск Агинского района Забайкальского края, что позволило снизить потери водных и электроэнергетических ресурсов и повысить экономическую эффективность данного объекта водоснабжения на 18,7 % (272 392,9 руб./год) при обеспечении достаточного уровня его безаварийности.

Внедрение разработанной системы управления на предприятиях Забайкальского края и других регионов Российской Федерации позволит значительно снизить неоправданные экономические расходы и повысить уровень безаварийности участков первого подъема систем водоснабжения с накапливающим резервуаром в сложных природных условиях эксплуатации.

Дальнейшими направлениями развития работы являются:

1. Модификация системы управления для одновременного регулирования производительности насоса и предварительного водонагревателя для обеспечения оптимального соотношения подачи и начальной температуры транспортируемой

воды. Для повышения уровня безаварийности целесообразно учитывать в алгоритме управления уровень и температуру воды в скважине.

2. Разработка блока динамического расчета уставок управляющего алгоритма на основании статистических данных о сезонных и суточных колебаниях температуры окружающей среды и водопотребления.

3. Разработка и интеграция в систему управления методик диагностики технического состояния электрических и механических узлов насосов, для оценки их ресурса.

4. Уточнение методик тепловых расчетов, путем учета теплоаккумулирующих свойств трубопровода и теплоизоляции, а также времени замерзания воды. Реализация возможности расчетов тепловых параметров для трубопроводов подземной прокладки.

5. Расширение функциональных возможностей методики оптимизации параметров ЭТК УПП путем рассмотрения дополнительных способов водоподогрева, таких как: греющий кабель, накопительный электронагреватель, газовый нагреватель, твердотопливный котел и тепловые спутники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pöyhönen, S. Variable-speed-drive-based sensorless estimation of pump system reservoir fluid level / S. Pöyhönen, A. Simola, J. Ahola // 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe), Lyon, France, 2020. – P. 1-10, doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215786.
2. Фисенко, В.Н. Энергосбережение при эксплуатации скважинных водозаборов подземных вод / В.Н. Фисенко // Водоснабжение и санитарная техника. – 2016. – № 11. – С. 22-23.
3. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухопроводных установках / Б.С. Лезнов. – Москва: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
4. Основные характеристики российской электроэнергетики [Электронный ресурс]. / Министерство энергетики Российской Федерации. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/532> (дата обращения: 17.11.2021). – Режим доступа: Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации (Минэнерго России).
5. Лезнов, Б.С. Экономия электроэнергии в насосных установках / Б.С. Лезнов. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
6. Число объектов хозяйственного централизованного водоснабжения [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/37335> (дата обращения: 12.02.2021). – Режим доступа: Официальный сайт единой межведомственной информационно-статистической системы.
7. Гинзбург, А.В. Повышение эффективности работы систем водоснабжения и водоотведения в сложных природных условиях: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.04/ Гинзбург Александр Владимирович. – Москва, 2005. – 211 с.
8. Терехов, Л.Д. Технологические основы энергосбережения при подаче воды по водоводам на севере: дисс. ... доктора. техн. наук: 05.23.04/ Терехов Лев Дмитриевич. – Хабаровск, 1999. – 275 с.

9. Терехов, Л.Д. Водоснабжение и водоотведение в северных климатических условиях: учебное пособие /Л.Д. Терехов, О.В. Акимов, Ю.М. Акимова. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 124 с.: ил.

10. Горюнов, А.Н. Исследование эффективности применения регулируемого электропривода насосных агрегатов первого подъема: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Горюнов Александр Николаевич. – Чебоксары, 2013. – 139 с.

11. **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.

12. МДК 3-02.2001. Правила технической эксплуатации систем и сооружений коммунального водоснабжения и канализации. – Москва, 2000. – 93 с.

13. Методические рекомендации по определению потребности в электрической энергии на технологические нужды в сфере водоснабжения, водоотведения и очистки сточных вод. – Москва: Центр Муниципальной Экономики и права, 2007. – 16 с.: ил.

14. СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. – Москва: Минстрой России, 2015. – 132 с.

15. Утечки и неучтенный расход воды (тысяч кубических метров, объем показателя за год) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/34034> (дата обращения 30 июня 2021).

16. Водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество за 2019 год. – СПб.: ООО «Победа», 2020. – 153 с.

17. **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.

18. Лиходеев, А.Д. Повышение энергоэффективности и эксплуатационной надёжности электропривода в системах водоснабжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Лиходеев Андрей Дмитриевич. – Петропавловск-Камчатский: НГТУ, 2016. – 163 с.

19. На ликвидацию аварии в поселке Золотореченск Забайкальского края задействованы 91 человек и 20 единиц техники [Электронный ресурс]. Чита. – URL: <https://75.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/novosti/3721707#group=group-1&photo=0> (дата обращения: 12.02.2021).

20. **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.

21. Тепло и воду отключили в посёлке Золотореченск из-за поломки насоса [Электронный ресурс]. – Чита: Чита.ру. – URL: <https://www.chita.ru/news/57782/> (дата обращения: 12.02.2021).

22. 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.

23. **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.

24. Пат. 2615021 С1 Российская Федерация, МПК G01R31/00. Способ диагностики изоляции обмоток статора асинхронного электродвигателя / Р.В.

Горбунов, И.Ф. Суворов, К.С. Сережин, **Г.А. Палкин**; патентообладатель: Заб. гос. ун-т. – Заявка №2015152388 от 07.12.2015; опубл. 03.04.2017, Бюл. №10. – 9 с.: ил.

25. Протяженность водопроводных сетей [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/33953#>.

26. Число аварий в системе водопровода [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/34186> (дата обращения: 12.02.2021).

27. Daigle, L. Effectiveness of rigid insulation for thermal protection of buried water pipes in rock trenches / L. Daigle, J.Q. Zhao // National Research Council Canada. Canadian CSCE 1999 Annual Conference – 1 st Cold Regions Specialty Conference, 1999, P. 389-398.

28. Работники ЗабТЭК отогрели 380 метров перемерзшего водовода в Балее [Электронный ресурс]. – Чита: Чита.ру. – URL: https://www.chita.ru/news/155974/?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop (дата обращения: 12.02.2021).

29. На водоводе в селе Верх-Усугли Тунгокоченского района произошло повреждение [Электронный ресурс]. – Чита: Чита.ру. – URL: <https://gtrkchita.ru/news/?id=37131> (дата обращения: 12.02.2021).

30. **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.

31. Бородацкий, Е. Автоматизация насосной станции с применением частотно-регулируемого электропривода / Е. Бородацкий, В. Копырин // Силовая электроника, 2006. – № 2 (8), – С. 20-23.

32. Лезнов, Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б.С. Лезнов. – Москва: Машиностроение, 2013. – 176 с.

33. Карелин, В.Я. Насосы и насосные станции: учебник для вузов / В.Я. Карелин, А.В. Минаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 320 с: ил.
34. Фащенко, В.Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: учебное пособие / В.Н. Фащенко. – М.: Издательство «Горная книга», 2011. – 260. с.: ил.
35. Ibraev, K.A. Energy saving in electric drives and control of these processes in the sphere of housing and communal services / K.A. Ibraev, E.K. Sarsembieva // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, 2017. – P. 1-3, doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998492.
36. Попкович, Г.С. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения: учебник для вузов / Г.С. Попкович, М.А. Гордеев. – М.: Высш. шк., 1986. – 392 с.: ил.
37. Макаров, А.М. Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока: учеб. пособие / А.М. Макаров, А.С. Сергеев, Е.Г. Крылов, Ю.П. Сердобинцев. – Волгоград: ВолгГТУ, 2016. – 192 с.
38. Горюнов, А.Н. Регулируемый электропривод насосных агрегатов первого подъема станций водоподготовки / А.Н. Горюнов, Г.Б. Онищенко // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2012. – № 6. – С. 131-134.
39. Lan He, Lepeng Song. The pump house constant pressure fuzzy self-tuning PID control system simulation, 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering, Wuhan, 2011. – P. 5525-5527, doi: 10.1109/ICEICE.2011.5777320.
40. Есилевский, В.С. Управление агрегатами насосных станций с помощью регулятора на базе нейронной сети с нечеткой логикой / В.С. Есилевский, В.Н. Кузнецов, В.П. Панов // Вестник Воронежского Государственного Технического Университета. – Воронеж, Воронежский государственный технический университет. – 2012. – Т.8. – № 9, – С. 12-16.

41. Ormsbee, L.E. Optimal control of water supply pumping systems / L.E. Ormsbee, K.E. Lansey // *Journal of Water Resources Planning and Management*. V. 120. 1994/3. – P. 237-252.
42. Zheng, G. Energy Optimization Study of Rural Deep Well Two-Stage Water Supply Pumping Station / G. Zheng, Q. Huang // in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, no. 4, P. 1308-1316, July 2016, doi: 10.1109/TCST.2015.2498140.
43. Zhuan, X. Development of Efficient Model Predictive Control Strategy for Cost–Optimal Operation of a Water Pumping Station / X. Zhuan, X. Xia // in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 4. – P. 1449-1454, July 2013, doi: 10.1109/TCST.2012.2205253.
44. Wanjiru, E.M. Model predictive control strategy of energy-water management in urban households / E.M. Wanjiru, L. Zhang, X. Xia // *Applied Energy*. V. 179. 2016. – P. 821-831. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.050.
45. Abirami, S. Performance comparison of different controllers for a level process / S. Abirami, Z. hussain, S. Muthu, A. Kumar // *Int. Journal of Engineering Research and Applications* 4 (3), 2014. – P. 341-344.
46. Наумовская, А.А. сравнение PID-управления и MPC-управления при регулировании расхода нефти на выходе трехфазного сепаратора / А.А. Наумовская // *Сборник трудов XV Международной научно–практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 2018. – С. 282-283.*
47. Cirak, B. Comparision of MPC and PID controls of Sirnak water supply network system / B. Cirak // *IJSRST*. – № 2 (1), 2015.
48. Преобразователи частоты для насосов. Управление частотой вращения при помощи гидромукты. [Электронный ресурс]. – URL: <http://elektroprivodprom.ru/внедряем-частотники/27-гидромукты-для-управления-частотой-вращения.html> (дата обращения 26.08.2021).
49. Костинский, С.С. Обзор и результаты исследований гармонического

состава тока, потребляемого преобразователями частоты малой мощности, а также способов и устройств для снижения их негативного влияния на системы электроснабжения / С.С. Костинский // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2020. – № 22(2). – С. 27-42. – URL: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-27-42>.

50. Sperlich, A. Ernst M. Energy Efficient Operation of Variable Speed Submersible Pumps A. Sperlich, D. Pfeiffer, J. Burgschweiger, E. Campbell, M. Beck, R. Gnirss, M. Ernst // Simulation of a Ground Water Well Field, Water. – 2018. – vol. 10, no. 9. – 1255 p.

51. Гумерова, Р.Х. Моделирование потребления электроэнергии приводами насосов при дроссельном и частотном регулировании производительности / Р.Х. Гумерова, В.А. Черняховский // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – Казань: Издательство Казанского государственного энергетического университета. – 2017. – Т. 19. – № 3-4. – С. 96-106. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-3-4-96-106>.

52. Мустафин, Э.Н. Применение регулируемых асинхронных двигателей в жилищно-коммунальном хозяйстве. В поиске компромиссного решения. Бюллетень строительной техники / Э.Н. Мустафин. – Москва: Бст., 2018. – № 3(1003). – С. 51-53.

53. Sapaev, K. Research energy and resource saving operating modes of the pump unit / K. Sapaev, S. Umarov, I. Abdullabekov // E3S Web of Conf., 216, 01150, 2020. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601150>.

54. Иванова, В.Р. Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах / В.Р. Иванова, И.Н. Киселев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2019. – № 21(5). – С. 59-70.

55. Ferreira, F.J.T.E. Ecoanalysis of Variable-Speed Drives for Flow Regulation in Pumping Systems / F.J.T.E. Ferreira, J.A.C. Fong, A.T. de Almeida // in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 6. – P. 2117-2125, June 2011, doi:

10.1109/TIE.2010.2057232.

56. Jahmeerbacus, M.I. Flow rate regulation of a variable speed driven pumping system using fuzzy logic / M.I. Jahmeerbacus // 2015 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), Sharjah, 2015. – P. 1-6, doi: 10.1109/EPECS.2015.7368520.

57. Дадабаев, Ш.Т. Математическая модель оросительной насосной станции первого подъема / Ш.Т. Дадабаев // Вестник Оренбургского государственного университета. – Оренбург. – 2015. – № 3, март. – С. 239-242.

58. Бологов, А.А. Разработка регулируемого электропривода по системе Преобразователь частоты – асинхронный двигатель / А.А. Бологов // Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии». – Томск: Изд-во ТПУ. – 2016. – Т. 1. – С. 227-228.

59. Kukishev D. Energy saving in the scalar control system of an asynchronous electric drive / D. Kukishev, V. Meshcheryakov, A.Boikov, A.Evseev, et al // X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), Novocherkassk, 2018, P. 30-31. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571784.

60. Polyakov, V. To issue of designing scalar closed-loop controllers for frequency controlled induction motor drives / V. Polyakov, D. Shcherbakov // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED), Ekaterinburg. – 2018. – P. 1-4, doi: 10.1109/ACED.2018.8341708.

61. СНиП 2.04.02-84*. Водоснабжение Наружные сети и сооружения./ Раздел 7 – Насосные станции – М.: ФГУП ЦПП, 2006. – 128 с.

62. Kan, E. The change in the efficiency factor of the pumping unit with a frequency converter / E. Kan, N. Ikramov, M. Mukhammadiev // E3S Web Conf., 97. – 2019. 05010 DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199705010>.

63. ГОСТ Р МЭК/ТС 60034-17-2009. Машины электрические вращающиеся. Часть 17 – Руководство по применению асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при питании от преобразователей: утвержден и

введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 декабря 2009 г. № 640-ст: дата введения 2011-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2011.

64. ГОСТ Р МЭК/ТС 60034-1-2014 Машины электрические вращающиеся. Часть 1 – Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 мая 2015 г. № 402-ст.: дата введения 2016-03-01. – Москва: Стандартинформ, 2015.

65. Kolesnikov, E.B. Automated System Ensuring Uninterrupted Water Supply for Small Settlements/ E.B. Kolesnikov, D.M. Shprekher, S.B. Malkov // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia. – 2019. – P. 13-17, doi: 10.1109/URALCON.2019.8877676.

66. Hruntovich, N.V. Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower / N. . Hruntovich, A.A. Kapanski, D. Baczynski, G.V. Vagapov, O.V. Fedorov // E3S Web Conf. – P. 124, 05060. – 2019, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405060>.

67. Tamminen, J. Variable speed drive–based pressure optimization of a pumping system comprising individual branch flow control elements / J. Tamminen, T. Ahonen, A. Kosonen, J. Ahola, J. Tolvanen // 16th European Conference on Power Electronics and Applications, P. 1-11 (Lappeenranta, 2014) DOI: 10.1109/EPE.2014.6910988.

68. Карев, Д.С. Математическое моделирование тепловых сетей закрытых систем централизованного теплоснабжения / Д.С. Карев, В.М. Мельников // Вестник МГСУ. – 2011. – № 7. – С. 444-451.

69. Моисеев, Б.В. Методы теплового расчета трубопроводов различного назначения: монография / Б.В. Моисеев [и др.]; под ред. Б.В. Моисеева. – Тюмень: ТИУ, 2016. – 183 с.

70. Самарин, О.Д. Оценка скорости для предотвращения замораживания воды при движении в теплопроводах. Энергосбережение и водоподготовка. – Иркутск. Иркутский ГУА, 2015. – № 4 (96). – С. 31-34.

71. Фаттахов, И.Г. Определение границ незамерзания подводящих водоводов нагнетательных скважин с применением прикладного программирования / И.Г. Фаттахов, Р.Р. Кадыров // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2012. – № 10. – С. 39-43.

72. Батухтин, А.Г. Оптимизация отпуска теплоты от ТЭЦ на основе математического моделирования с учетом функционирования различных типов потребителей: дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / Батухтин Андрей Геннадьевич. – Улан-Удэ, 2005. – 124 с.

73. Zhao J.Q. Thermal performance of trench backfills used for frost protection of water service lines / J.Q. Zhao, B.B. Rajani, L. Daigle // Canadian Geotechnical Journal. Ottawa: Canadian Science Publishing, 2001. – Vol. 38. – №. 1. – P. 161-174.

74. Sepehr, K. Frost protection of buried PVC water mains in western Canada / K. Sepehr, L.E. Goodrich // Canadian Geotechnical Journal. Ottawa: Canadian Science Publishing, 1994. – Vol. 31. – №. 4. – P. 491-501.

75. Майны, Ш.Б. Методика определения минимальной глубины заложения начального участка канализационных трубопроводов в суровых климатических условиях / Ш.Б. Майны, Л.Д. Терехов, Н.П. Заборщикова // Вестник гражданских инженеров. – Научно-технический рецензируемый журнал. СПб: СПбГАСУ, 2016. – № 3 (56). – С. 116-122.

76. Майны, Ш.Б. Проблемы бесканальной прокладки трубопроводов в горных регионах (на примере республики Тыва) / Ш.Б. Майны // Естественные и технические науки. – Москва: Издательство «Спутник +», 2014. – № 7(75). – С. 114-118.

77. Reeve, H.E. A study of the thermal field surrounding buried district heating pipes: thesis M.A.Sc / H.E. Reeve H.E. – Ottawa, 1997.

78. Акимов, О.В. Оптимизация тепловых режимов водоводов п. Новый Ургал // Вестник Иркутского государственного технического университета. – Иркутск, 2010. – № 2(42). – С. 155-162.

79. Петров, В.М. Назначение параметров, предотвращающих перемерзание

воды в трубах. Молодые исследователи – регионам / В.М. Петров: материалы Международной научной конференции: в 3 т. / М-во науки и высш. образ. РФ, Правительство Вологодской области [и др.]; [гл. ред. А.А. Кочкин]. – Вологда: ВоГУ, 2019. – Т. 1. – 624 с.: ил.

80. Терехов, Л.Д. Назначение оптимальной толщины теплоизоляции водовода / Л.Д. Терехов, О.В. Акимов, Ю.М. Акимова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – Иркутск, 2009. – № 3 (39). – С. 180-183.

81. Кузнецов, Г.В. Анализ тепловых потерь теплотрубопроводов в условиях взаимодействия с влажным воздухом / Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – № 2(58). – С. 37-39.

82. 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.

83. Китаев, Д.Н. Экспериментальные исследования охлаждения жидкости в трубопроводах при отсутствии движения / Д.Н. Китаев, О.И. Котляров, А.И. Монахов // Молодой ученый. – Казань: ООО «Издательство Молодой ученый», 2017. – № 21 (155). – С. 131-133.

84. 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.

85. Gevorkov, L. Simulation Study of a Centrifugal Pumping Plant's Power Consumption at Throttling and Speed Control /L/ Gevorkov, A. Rassõlkin, A. Kallaste, T. Vaimann // 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – Riga, 2017. – P. 1-5,

doi: 10.1109/RTUCON.2017.8124823.

86. Прокопов, А.А. Математические модели электроприводных систем насосных агрегатов и станций. / А.А. Прокопов, Р.А. Кахоров, В.А. Новиков, М.П. Белов // ИЗВЕСТИЯ СПБГЭТУ ЛЭТИ. – 2017. – № 10. – С. 44-54.

87. Simola, A. Emulating pump system static head using PID-controlled flow-regulating valve /A. Simola, S. Pöyhönen , J. Ahola // 2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe), 2019. – P.1-8, doi: 10.23919/EPE.2019.8915571.

88. Щербаков, Д.А. Квазиоптимальная по минимуму потерь система скалярного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода / Д.А. Щербаков, В.Н. Поляков // Труды третьей научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2018. – С. 242-245.

89. Gevorkov, L. Simulink based model for flow control of a centrifugal pumping system L. Gevorkov, A. Rassõlkin, A. Kallaste, T. Vaimann // 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED). – Moscow, 2018. – P. 1-4, doi: 10.1109/IWED.2018.8321399.

90. Кепа, U. Use of the Hydraulic Model for the Operational Analysis of the Water Supply Network: A Case Study, Water, 2021. – vol. 13. – № 3. – 326 p.

91. **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.

92. MathWorks Help Center: Asynchronous Machine. – URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html>.

93. Пантель, О.В. Методика расчета параметров асинхронного двигателя для моделирования режимов его работы в среде Matlab / О.В. Пантель / Simulink,

Academy, 2015. – № 2(2). – С. 7-11.

94. Кравчик, А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболевская. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

95. Шевелев, Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб / Ф.А. Шевелев, А.Ф. Шевелев. – Москва: Стройиздат, 1984. – 177 с.

96. **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

97. **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>.

98. **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.

99. **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.НИИЦ Вестник науки, 2019 – 334 с.

100. **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.

101. 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.

102. **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.

103. Шероховатость полиэтиленовых труб. Расчет гидравлических потерь давления в трубопроводе из пластмасс [Электронный ресурс]. – URL: <https://polyplastic.ua/news/news-111.html/> (дата обращения 30.05.2020).

104. Характеристики насоса K50-32-125 [Электронный ресурс]. – URL: https://vmz-nasos.ru/k50_32_125-teh.html/ (дата обращения 30.05.2020).

105. Электродвигатель АИР80А2, 5А80МА2 и А80А2 (1.5 кВт) [Электронный ресурс]. – URL: <http://tech-privod.com/index.pl?act=PRODUCT&id=1275/> (дата обращения 30.05.2021).

106. **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.

107. **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.

108. Цавнин, А.В. Исследование способов настройки ПИД-регулятора для Объектов с транспортным запаздыванием на примере системы автоматического регулирования уровня / А.В. Цавнин, В.В. Курганов // Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии». –

Томск: Изд-во ТПУ, 2016 – Т. 1 – С. 205-206.

109. **Палкин, Г.А.** Разработка микропроцессорного устройства управления скважинными насосами систем водоснабжения / Г.А. Палкин, Д.А. Ломов, 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.

110. **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.

111. Кангро, М.В. Методы оценки инвестиционных проектов: учебное пособие / М.В. Кангро. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 131 с.

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

113. Расчет нагрева воды электричеством [Электронный ресурс]. – URL: <https://elektrik-ufa.ru/raznoe/raschet-nagreva-vody-elektrichestvom> (дата обращения: 18.04.2020).

114. **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 конференция: [в 3 ч.] / Забайкальский государственный университет. – Чита: ЗабГУ, 2020. – Ч. 1. – С. 85-90.

115. **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.

116. 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.

117. Цветков, Ф.Ф. Задачник по тепломассообмену / Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов, В.И. Величко. – 2-е изд., исправ. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 196 с., ил.

118. **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>.

119. Полная таблица теплопроводности различных строительных материалов. Теплоизоляция в строительстве. [Электронный ресурс]. – URL: <https://termoizol.com/polnaya-tablitsa-teploprovodnosti-razlitchnh-stroitelynh-materialov.html> (дата обращения 30.12.2021).

120. Ветра в Забайкальском крае. Energy Wind [Электронный ресурс]. – URL: <http://energywind.ru/recomendacii/karta-rossii/sibir/zabajkalskij-kraj> (дата обращения 30.12.2021).

121. Водный налог [Электронный ресурс]. / Федеральная налоговая служба Российской Федерации. – URL: <https://www.nalog.gov.ru/rn75/taxation/taxes/watertax/> (дата обращения: 17.11.2021). – Режим доступа: Официальный сайт Федеральной налоговой службы Российской Федерации (ФНС России).

122. Технические характеристики насосов ЭЦВ 10 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.livnasos.ru/catalog/nasosy_ecv/ecv_10/ (дата обращения

30.12.2021).

123. Коэффициент местного сопротивления. ТЭМ-сервис [Электронный ресурс]. – URL: https://tem-sv.ru/base_knowledge/articles/teplotechnika/koefisient_mestnogo_soprotivlenia.html (дата обращения 30.12.2021).

124. Климат в Агинском ежемесячно [Электронный ресурс]. – URL: <https://goodmeteo.ru/pogoda-aginskoe-aginskiy-zabaykalskiy/god/> (дата обращения 30.05.2021).

125. Погода и климат в Агинском (Забайкальский край, Россия) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/30859.htm> (дата обращения 30.05.2021).

126. Климат в Забайкальском крае [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nbcrs.org/regions/zabaykalskiy-kрай/klimat> (Дата запроса 30.05.2021).

127. Проточные промышленные водонагреватели «Невский» АВП-Нп 175 кВт. Невский - производство энергооборудования [Электронный ресурс]. – URL: <https://nvsk.net/katalog/vodosnabzhenie/vodonagrevateli-protochnye/vodonagrevatel-protochnyy-avp-np-175-kvt/> (дата обращения 30.12.2021).

128. Техничко-экономический анализ возможности применения различных типов тепловой изоляции российского производства для трубопроводов тепловых сетей предприятия [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=1850&p=1 (дата обращения 30.12.2021).

129. Прайс-лист на скорлупы и отводы из ППУ. Amaro [Электронный ресурс]. – URL: <https://amaro.ru/nashi-tseny/price-list-skorlupy-ppu.html> (дата обращения 30.12.2021).

130. Маты минераловатные. ХОТPIPE теплоизоляция [Электронный ресурс]. – URL: <https://xotpipe.ru/product-category/maty-mineralovatnye/> (дата обращения 30.12.2021).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Табличные данные (обязательное)

Таблица А.1 – Параметры лабораторного стенда

№	Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
1.	Внутренний диаметр трубы	d_1	0,022	м
2.	Внешний диаметр трубы, диаметр с теплоизоляцией	$d_2 = d_3$	0,032	м
3.	Коэффициент теплопроводности стенки трубы (полипропилен)	λ_m	0,190	Вт/м°С
4.	Общая длина трубы	L_{main}	45	м
5.	Длина охлаждаемого участка трубы	L	22,5	м
6.	Средняя скорость ветра	w	0,1	м/с
7.	Основное управляющее воздействие на регулирующий орган	f_u	15 - 50	Гц
8.	Статический напор системы	H_c	3	м
9.	Шероховатость трубопровода	Δ	0,000005	м
10.	Температура в начальной части трубопровода	t_n	5	°С
11.	Минимальная температура окружающей среды	t_o	- 9	°С
12.	Площадь дна резервуара	s	0.4	м ²
13.	Высота резервуара	h	1	м
Насос К50-32-125				
14.	Фиктивный напор насоса	H_f	22,34	м
15.	Фиктивное гидравлическое сопротивление насоса	S_f	0,015	с ² /м ⁵
16.	Номинальная частота вращения	n_n	2900	об/мин
17.	Коэффициент полезного действия насоса	η	55	%

Продолжение таблицы А.1

№	Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
18.	Максимальная подача насоса при номинальной питающей частоте	Q_{max}	12,5	м ³ /ч
19.	Коэффициент коррекции мощности по подаче с учетом коэффициента полезного действия электродвигателя и частотного преобразователя	k_Q	4,52	-
20	Коэффициент коррекции мощности по подаче без учета коэффициента полезного действия электропривода	k_{Q1}	3,37	-
Электродвигатель 80МА2				
21.	Мощность электродвигателя	P_n	1500	Вт
22.	Активное сопротивление обмоток статора электродвигателя	R_s	5,34	Ом
23.	Индуктивность рассеяния статорных обмоток электродвигателя	L_{is}	0,01	Гн
24.	Приведенное активное сопротивление роторных обмоток электродвигателя	R'_r	3,11	Ом
25.	Индуктивность рассеяния роторных обмоток электродвигателя	L'_{ir}	0,02	Гн
26.	Взаимная индуктивность цепи намагничивания в номинальном режиме	L_m	0,5	Гн
27.	Количество пар полюсов	p	1	шт.
28.	Момент инерции электродвигателя	J_e	0,0017	кг·м ²
29.	Коэффициент полезного действия электродвигателя	η_p	78,5	%
30.	Коэффициент вязкого трения электродвигателя и нагрузки	F	0,006	Н·м·с
31.	Номинальное скольжение	S_n	5	%
32.	Коэффициент мощности	$\cos\varphi$	0,85	-
33.	Коэффициент полезного действия ЧП	η_f	95	%

Таблица А.2 –Параметры УПП пгт. Новоорловск

№	Параметр	Значение	№	Параметр	Значение
Общие параметры			38	H_f (м)	101,5
1	L (м)	10 000	39	S_f (ч ² /м ⁵)	0,0029
2	C_v (Дж/м ³ ·°C)	4 210 000	40	n_n (об/мин)	2880
3	C_u (Дж/кг·°C)	4 210	41	η (%)	70
4	ρ (кг/м ³)	1 000	42	Q_{max} (м ³ /ч)	65
5	d_1 (м)	0,25	43	Q_n (м ³ /ч)/(м ³ /с)	60,5 / 0,0168
6	d_2 (м)	0,273	44	H_n (м)	90,6
7	λ_m (Вт/м·°C)	45	45	Q_{lab} (м ³ /ч)	10
8	w (м/с)	2,7	Электродвигатель ПЭДВ 10-33		
9	H_c (м)	50	46	P_n (Вт)	33 000 ($I_n = 68$ А)
10	Δ (м)	0,8	47	p (шт.)	1
11	v (м ² ·с)	0,000001674	48	S_n (%)	4
12	C_r (руб./кВт·ч)	4,4	49	$\cos\varphi$	0,85
13	C_w (руб./м ³)	0,336	50	η_p (%)	85
14	t_{max} (°C)	18,5	51	P_{pn} (Вт)	25 095
15	t_k (°C)	3	Технико-экономические параметры системы частотного		
16	d_3 (м)	2,273	52	k_f	1,03
17	λ_u (Вт/м·°C)	0,133	53	η_f (%)	95
18	t_b (°C)	4,5	54	C_{QS} (руб.)	574492
19	s (м ²)	75	55	E_Q (1/год)	0,25
20	h (м)	4	56	K_Q	2
21	LR	39,2	57	A_{FC}	0,083
22	C_p (руб./год)	720 000	58	C_{FC} (руб.)	508 400
Параметры капитальных затрат для строительства трубопровода			59	E_{FC}	0,1
23	C_{pi} (руб.)	131872000	60	M_{FC}	0,03
24	E_{pi} (1/год)	0,05	Технико-экономические параметры системы предварительного водоподогрева		
25	C_{Ppi} (руб.)	50720000	61	η_k (%)	99
26	E_{Ppi}	0,4	62	C_{TS} (руб.)	739 472
27	M_{Ppi}	2,2	63	E_T (1/год)	0,25

Продолжение таблицы А.2

№	Параметр	Значение	№	Параметр	Значение
Параметры капитальных затрат на установку насоса			64	K_T	4
28	C_{pu} (руб.)	332 500	65	A_{HE}	0,2
29	E_{pu} (1/год)	0,2	66	C_{HE} (руб.)	654 400
30	C_{Ppu} (руб.)	250 000	67	E_{HE}	0,08
31	E_{Ppu}	0,3	68	M_{HE}	0,05
32	M_{Ppu}	0,03	Технико-экономические параметры пассивной теплоизоляции		
Параметры капитальных затрат на установку электрооборудования			69	E_I (1/год)	0,125
33	C_{el} (руб.)	56 500	70	K_I	1
34	E_{el} (1/год)	0,2	71	A_{CI}	0,03
35	C_{Pel} (руб.)	50 000	72	E_{CI}	0,5
36	E_{Pel}	0,1	73	M_{CI}	0,2
37	M_{Pel}	0,03	74	G_{CI}	0,15
Насос ЭЦВ10-65/100			75	D_{CI}	2

Таблица А.3 – Средние параметры водопотребления

Месяц	Водопотребление, м ³ /ч		Среднее водопотребление, м ³ /ч	Перелив воды, м ³ /ч
	День	Ночь		
1.	2.	3.	4.	5.
Январь	45,5	30,5	40,5	20
Февраль	43	29	38,3	22,2
Март	46	32	41,3	19,2
Апрель	48	34	43,3	17,2
Май	54,5	46	51,7	8,8
Июнь	55	49	53	7,5
Июль	55,5	50,5	53,8	6,7
Август	54,5	48,5	52,5	8
Сентябрь	51	42	48	12,5
Октябрь	48	39,5	45,2	15,3
Ноябрь	47	35	43	17,5
Декабрь	46	33,5	41,8	18,7

Таблица А.4 – Средние значения температуры окружающей среды

Месяц	Температура, °С		Средняя температура, °С
	День	Ночь	
Январь	-15,9	-25,4	-22,14
Февраль	-13,2	-22,8	-17,76
Март	-1,6	-11,6	-7,48
Апрель	8,2	-2,2	2,8
Май	12,4	3,1	10,25
Июнь	23,3	13,8	16,8
Июль	21,9	11,1	19,33
Август	20,8	11,6	16,69
Сентябрь	13,6	4,5	9,6
Октябрь	6,3	-2,4	- 0,6
Ноябрь	- 4,3	-11,3	-12,77
Декабрь	-13,8	-19,9	-19,56

Таблица А.5 – Параметры применяемой теплоизоляции

Тип изоляции	Коэффициент теплопроводности, λ_u (Вт/м·°С)	Толщина изоляции (м)	Диаметр трубы с изоляцией, d_3 (м)	Цена, C_{CI} (руб. / м ³)	Затраты на установку, C_{IS} (руб. / м ³)
Присыпка из комбинированного грунта	0,133	1	2,73	0	0
Скорлупа ППУ	0,03	0,04	0,353	25 421	97 870,85
		0,05	0,373		
		0,07	0,413		
		0,09	0,453		
Маты из минеральной ваты	0,04	0,025	0,323	16 100	61 985
		0,04	0,353		
		0,05	0,373		
		0,06	0,393		
		0,08	0,433		
		0,1	0,473		
		0,12	0,513		

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Программный скрипт MatLab для оптимизации параметров участка первого подъема (обязательное)

```
%Основной алгоритм оптимизации по всем параметрам
a=((Pn*Cr*kf)/Qnh+Cw)*Sig;
b=(Sig*0.000000278*Cr*Cu*Ro)/nk;
c=(Ei*Ki+Aci)*EMGDci*(L*pi)/k;
o=-L/Cv;
f=1755/(d1^0.8);
h=log(d2/d1)/(2*lm);
Opt=[];
Cqs = 574492;
Cts=739472;
Aeq=[0,0; 0,0];
beq=[0, 0];
monthopt=[];
for z = 2:length(Insm)
    x3=Insm(1,z);
    x4=Insm(2,z);
    x5=Insm(3,z);
    C=0;
    x1=0;
    x2=0;
    C1=0;
    x11=0;
    x21=0;
    j=0;
    for i=1:k
        to=tom(i);
        Q2=Q2m(i);
        if (i==1) tk=0.5; else tk=tk1; end;
        d=(Cqs*(Eq*Kq+Afc)+Cts*(Et*Kt+Ahe))/k;
        l=0.32*((w/((13.248+0.0827*to+0.00005*to*to)*0.000001))^0.63)
        *(0.0244-0.00008*to);
        m=tb-to;
        x0=[0,0];
        Am=[-1,0; 0,-1];
        bm=[0,0];
        lb=[Qlabh-Q2, 0];
        ub=[Qnh-Q2, tmax-tb];
        [x,y,exitflag] =
        fmincon(@func,x0,Am,bm,Aeq,beq,lb,ub,@Limit);
```

```

if (exitflag<=0) y=999999999999; end;
x1=x1+x(1);
x2=x2+x(2);
C=C+y;
x11=x11+x(1);
x21=x21+x(2);
C1=C1+y;
j=j+1;
if (j==730)
    j=0;
    tmp=[x11/730, x21/730, x3, x4, x5, C1];
    monthopt=[monthopt; tmp];
    C1=0;
    x11=0;
    x21=0;
end;
clc;
end;
tmp=[x1/k, x2/k, x3, x4, x5, C];
Opt=[Opt; tmp];
tmp=[0, 0, 0, 0, 0, 0];
monthopt=[monthopt; tmp];
end;

%Целевая минимизируемая функция
function f = func(x) %Целевая минимизируемая функция
global a b c d Q2 d2 x3 x5;
f=x(1)*a+x(2)*(x(1)+Q2)*b + c*x5*((x3^2)+d2*x3)+d;
end

%Функция нелинейных ограничений
function [c1,ceq1] = Limit(x)
global Q2 Ro d2 x3 x4 o tk to f h l m d1 lm;
Qs=(x(1)+Q2)/3600;
if(lm==45)
    if(x(1)<(1080*pi*(d1^2)-Q2))
        qt=0.1430016*Ro*((1+0.21675*pi*(d1^2)/Qs)^0.3)
        *(Qs^3)/((pi^2)*(d1^5.3));
    else
        qt=0.167776*Ro*(Qs^3)/((pi^2)*(d1^5.3));
    end;
else
    qt=0.0785176*Ro*(Qs^2.774)/((pi^1.774)*(d1^4.774));
end;
k1=pi*f*(Qs^0.8);
kpr=pi/(1/(1*((2*x3+d2)^0.63))+h+log((2*x3+d2)/d2)/(2*x4));
c1=tk-to-qt/(k1+kpr)-(x(2)+m-
qt/(k1+kpr))*exp(o/(Qs*((1/k1)+(1/kpr))));
ceq1=[];
end

```