

На правах рукописи



РУЛЕВСКИЙ ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ
ГЛУБОКОВОДНЫХ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ
ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Научный консультант:

доктор технических наук,
профессор

Шурыгин Юрий Алексеевич

Официальные оппоненты:

Мызык Геннадий Сергеевича, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Пантелеев Василий Иванович, доктор технических наук, профессор, директор Политехнического института, заведующий кафедрой Электротехнические комплексы и системы Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Каракаев Александр Бахтыреевич, доктор технических наук, профессор, Заслуженный военный специалист РФ, профессор кафедры Основ судовой электроэнергетики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «26» декабря 2019 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, конференц-зал I корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20 и на сайте www.ntsru.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.173.04,
кандидат технических наук



Максим Александрович Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время экономические интересы многих индустриально развитых стран направлены на освоение ресурсов Мирового океана, а также на проведение широкого спектра геолого-разведочных, обзорно-поисковых и других видов работ. Выполнение таких работ на морском дне в пределах больших площадей с высокой качественной достоверностью вызывает необходимость использования подводных робототехнических средств. В наибольшей степени решению этой задачи отвечают телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) – робототехнические комплексы, оснащенные различной научно-исследовательской аппаратурой и специальным технологическим оборудованием.

Разработке ТНПА различного назначения посвящено значительное число научных исследований в организациях нашей страны, включая Научно-учебный комплекс «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Институт механики МГУ (г. Москва), АО «Южморгеология» (г. Геленджик), ЦКБ МТ «Рубин», ЦНИИ РТК (г. Санкт-Петербург), Институт проблем морских технологий ДВО РАН (г. Владивосток), ЦНИИ «Гидроприбор» и др. Работы по исследованию ТНПА и их составных элементов ведутся за рубежом известными фирмами: AC-CESS Co UK, Sub-Atlantic, Limited Saab Seaeye ltd. (Великобритания), Perry Slingsby Systems (США), ECA Hytec (Франция), Seamor Marine (Канада) и другими.

Применение ТНПА на больших глубинах предполагает установку на борту подводного аппарата устройств со значительным энергопотреблением, таких как манипуляторы, движители, мощные осветительные приборы, а также бортовые модули управления, фото- и видеокамеры, гидролокаторы, гидроакустические системы подводной навигации, альтиметры, эхолоты и т.п. Энерговооруженность этих аппаратов может достигать 60 кВт и более.

Выбор систем электропитания (СЭП) для ТНПА определяется требованиями, среди которых важную роль играют стабильность выходного напряжения, высокая энергетическая эффективность, величина передаваемой мощности и объем информации, которой обмениваются между собой подводный аппарат и судно-носитель. При решении задач обеспечения электроэнергией такого сложного технологического оборудования (полезной нагрузки) значительно возрастает роль проектирования энергоэффективных систем электропитания и оптимизации регуляторов силовых импульсных преобразователей, как основных элементов силового канала системы электропитания.

СЭП ТНПА является распределенной и состоит из двух частей: бортовой части (БЧ), расположенной на судно-носителе, и подводной части (ПЧ), расположенной на борту ТНПА. Связь между СЭП БЧ и ПЧ осуществляется по кабель-тросу длиной до 8000 метров.

Исследованию специальных СЭП на базе статических преобразователей посвящены работы отечественных и зарубежных ученых: М.Д. Агеева, Н.И. Виноградова, В.А. Герасимова, Т.А. Глазенко, М.Л. Гутмана, Г.С. Зиновьева, А.Б. Каракаева, А.В. Кобзева, А.И. Колпакова, Ю.В. Матвиенко, В.И. Мелешина, В.Н. Мишина, В.С. Моина, Г.С. Мыцыка, В.И. Пантелеева, Э.М. Ромаша, В.Е. Тонкаля, С.А. Хариотонова, R. Andersen, C. Craig, B. Howe, M. Islam, H. Kirkham, W. Marble, N. Mohan, P. Mixon, C. Schiffren, V. Vorperian и др.

При разработке систем электропитания, работающих на удаленную нагрузку, подключенную через кабель-трос и согласующие трансформаторы, возникают вопро-

сы теоретического и практического характера, которые изучены недостаточно, что значительно затрудняет создание высокоэффективных СЭП глубоководных аппаратов.

Имеются нерешенные проблемы, связанные со сложностью построения математических моделей нелинейных систем электропитания с импульсными преобразователями, с их использованием при реализации методов синтеза оптимальных регуляторов в реальном времени.

Решение указанных проблем возможно при развитии теории, создании алгоритмов, методов исследования, позволяющих с единых системных позиций выполнить анализ работы СЭП и проектирование всех ее элементов, включая силовые устройства преобразования и регулирования.

Исходя из вышеизложенного, следует отметить, что разработка энергоэффективных глубоководных ТНПА в значительной степени зависит от создания систем электропитания, обеспечиваемых стабильным напряжением на полезной нагрузке при минимальных массогабаритных показателях. Поэтому теоретические исследования таких систем и вопросы их проектирования актуальны и имеют большую практическую ценность.

В диссертационной работе поставлена и решена важная **научно-техническая проблема** обеспечения стабильного электропитания глубоководных аппаратов при высоких энергетических характеристиках СЭП в условиях изменяющихся параметров кабель-троса и режимов работы научно-исследовательского и технологического оборудования.

Объектами исследования являются системы электропитания глубоководных аппаратов с передачей энергии по кабель-тросу на переменном или постоянном токе.

Предмет исследования: математическое и алгоритмическое обеспечение, схемотехнические и технологические решения при разработке специальных систем электропитания с автономным инвертором напряжения.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является улучшение энергетических и массогабаритных характеристик систем электропитания глубоководных телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Анализ построения структур СЭП ТНПА, режимов их работы и определение требований к основным ее элементам.

2. Сравнительная оценка вариантов структур СЭП ТНПА и обоснование выбора величины напряжения и частоты переменного тока в кабель-тросе.

3. Математическое и имитационное моделирование динамических процессов в СЭП ТНПА и построение линеаризованных моделей для построения оптимальных регуляторов напряжения.

4. Синтез регуляторов напряжения СЭП ТНПА на основе модального метода и теории аналитического конструирования оптимальных регуляторов.

5. Разработка методики проектирования погружных трансформаторов подводной части СЭП ТНПА с учетом их тепловых режимов работы и компенсации реактивной энергии в системе.

6. Разработка схемотехнических решений СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном и постоянном токе и создание на их основе промышленных образцов.

Методы исследования. В качестве основных методов теоретического исследования использовались классические методы анализа электрических и магнитных цепей, современной теории автоматического регулирования и математического моделирования. Имитационные исследования проводились с применением программы Simulink пакета MatLab 7.0. Теоретические результаты подтверждались экспериментальными исследованиями, выполняемыми на стендовом оборудовании в лабораторных условиях и на опытно-промышленных образцах, разработанных и изготовленных в «НИИ АЭМ ТУСУР».

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в работе, определяется строгим обоснованием расчетных методик и принимаемых допущений, корректным использованием современных методов научных исследований, а также подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями на макетных и опытно-промышленных образцах. Все разделы диссертационной работы логически взаимосвязаны, а выводы и рекомендации органически вытекают из материалов теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна диссертационной работы – впервые получены теоретические результаты, суть которых состоит в следующем:

1. Предложены структуры систем электропитания глубоководных аппаратов, позволяющие за счет передачи энергии по кабель-тросу на переменном трехфазном напряжении повышенной частоты, обеспечить стабильное напряжение на нагрузке при высокой энергетической эффективности системы.

2. Разработана математическая нелинейная модель СЭП ТНПА переменного тока, учитывающая изменяемый характер параметров кабель-троса и компенсацию реактивной составляющей потребляемой мощности нагрузки глубоководного аппарата, позволяющая оценить качество работы системы.

3. Разработана имитационная модель СЭП ТНПА переменного тока, включающая модули формирования задающего сигнала с предмодуляцией третьей гармоники выходного напряжения трехфазного автономного инвертора напряжения и вычисления параметров кабель-троса при изменении глубины погружения подводного аппарата, позволяющая оценить качество работы системы с заданной точностью.

4. Предложена имитационная модель СЭП ТНПА постоянного тока, реализующая структуру силовой части с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу и включающая симметрирующее устройство, расположенное на глубоководном аппарате, позволяющее анализировать динамические процессы в основных элементах системы.

5. Разработаны структуры модального и оптимального регуляторов напряжения СЭП ТНПА, позволяющие компенсировать изменение параметров кабель-троса и полезной нагрузки и обеспечить стабильное напряжение на подводном аппарате.

6. Разработан метод проектирования СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе, позволяющий за счет учета собственной емкости кабель-троса обоснованно подойти к определению параметров напряжения в кабель-тросе при заданной передаваемой мощности.

7. Предложен метод проектирования погружных тороидальных трансформаторов СЭП ТНПА, позволяющий увеличить точность тепловых расчетов за счет введения экспериментально определенного эмпирического коэффициента для заданной конструкции трансформаторов.

Практическая значимость работы

1. Предложены новые схемные решения, позволяющие улучшить энергетические и массогабаритные показатели системы электропитания с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе.
2. Созданы программы в пакетах MatLab и Mathcad, реализующие математические и имитационные модели СЭП оптимальных регуляторов и позволяющие исследовать динамические процессы в разомкнутой и замкнутой системе при решении задач стабилизации напряжения на полезной нагрузке ТНПА.
3. Разработан алгоритм работы контроллера СЭП ТНПА, позволяющий осуществить управление, контроль и диагностику состояния всей системы с отображением информации на встроенном сенсорном мониторе для обеспечения безопасной и высокой энергетической эффективности работы подводного аппарата.
4. Предложена инженерная методика расчета погружного тороидального трансформатора системы электропитания, позволяющая обеспечить компенсацию реактивной мощности кабель-троса без дополнительных дросселей и требуемый тепловой режим в процессе его эксплуатации.
5. Разработаны и внедрены в промышленную эксплуатацию пять систем электропитания для телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов: «РТ-6000», «КМТС», «УМБК», «ТНПК» и «Магеллан-1» с глубиной погружения до 6000 метров и мощностью до 47 кВт.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Принципы построения структур силовой части СЭП ТНПА, позволяющие обеспечить стабильное электроснабжение технологического оборудования подводного аппарата с улучшенными энергетическими и массогабаритными показателями.
2. Нелинейные и линеаризованные математические модели СЭП ТНПА, учитывающие изменяемый характер параметров кабель-троса и компенсацию реактивной составляющей потребляемой мощности нагрузки, позволяющие исследовать номинальные и предельные режимы работы данных систем.
3. Методика аналитического синтеза оптимальных регуляторов напряжения СЭП ТНПА при изменении параметров кабель-троса и полезной нагрузки, позволяющая разработать алгоритмы управления автономным инвертором напряжения для обеспечения стабильного напряжения на нагрузке и ее высокой энергоэффективности.
4. Метод проектирования СЭП с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе, позволяющий за счет учета собственной емкости кабель-троса обоснованно подойти к выбору параметров напряжения в кабель-тросе при заданной передаваемой мощности.
5. Метод проектирования погружного трансформатора СЭП ТНПА, позволяющий обеспечить компенсацию реактивной мощности кабель-троса и увеличить точность тепловых расчетов за счет введения экспериментально определенного эмпирического коэффициента.
6. Программно-аппаратные решения промышленно выпускаемых СЭП ТНПА и экспериментальный комплекс, позволяющие за счет разработанных алгоритмов управления, контроля и диагностики исследовать основные режимы работы системы.

Личный вклад автора. Научные результаты, выносимые на защиту и составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. Работы [5, 9, 18, 19, 38, 40] выполнены автором единолично. В работах [1–4, 6–8, 10–17, 20–37], написанных в соавторстве, автору принадлежат от 70 до 80 % общего объема

представленного материала, а именно: в публикациях [1, 4, 11, 39, 40] разработаны и сформулированы основные принципы построения современных СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу; в публикациях [3, 8, 10, 13, 14, 16, 17, 20–22, 24, 38, 41] – математические модели систем электропитания с передачей энергии по кабель-тросу на переменном и постоянном токе, а также методы синтеза оптимальных регуляторов напряжения в СЭП; в публикациях [5, 9, 19, 23] – методики расчета параметров переменного напряжения и частоты в кабель-тросе с учетом собственной емкости кабеля и заданной передаваемой мощности, а также теплового режима работы погружных тороидальных трансформаторов СЭП ТНПА; в публикациях [2, 6, 7, 11, 12, 15, 18] – технические решения по реализации серийно выпускаемых систем электропитания подводных аппаратов мощностью до 47 кВт. Автор непосредственно участвовал в разработке математических моделей, алгоритмов управления программно-аппаратных средств, в проведении теоретических и экспериментальных исследований, в обработке количественных и качественных данных. Под его руководством и непосредственном участии создан унифицированный ряд СЭП ТНПА, которые внедрены в промышленность.

Реализация результатов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении одного из основных направлений научно-исследовательских работ «НИИ АЭМ ТУСУР» (г. Томск) в виде технических предложений по разработке систем электропитания глубоководных телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов «СЭП-30 ТПА», «СЭП УМБК», «СЭП КМТС», «СЭП ТНПК» и «СЭП Магеллан-1».

Научные положения диссертационной работы, а также результаты теоретических, экспериментальных исследований и практические разработки, внедрены в АО «Южморгеология» (г. Геленджик). Это система электропитания комплекса многофункциональных технических средств, универсального многоканального буксируемого комплекса, телеуправляемого необитаемого подводного комплекса и многофункционального необитаемого подводного комплекса. Методика расчета параметров напряжения переменного тока в начале кабель-троса, позволяющая обоснованно подойти к определению токовой нагрузки при заданной передаваемой мощности с учетом собственной емкости кабель-троса, и методика теплового расчета тороидального трехфазного трансформатора с масляной заливкой в герметичном баке используется в образовательном процессе «Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета» при подготовке студентов направления 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника». Методология аналитического синтеза оптимальных регуляторов напряжения для систем электропитания при изменении параметров кабельной линии и полезной нагрузки телеуправляемого подводного аппарата и программно-аппаратные технические решения промышленно выпускаемых систем электропитания телеуправляемых подводных аппаратов используются в учебном процессе при подготовке студентов специальности 220201.65 – Управление и информатика в технических системах и специальности 230104.65 – Системы автоматизированного проектирования.

Подтверждением промышленного использования результатов диссертационной работы является наличие шести актов о внедрении.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

В соответствии с формулой специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» в диссертации содержатся теоретические и экспериментальные исследования, позволившие развить общую теорию систем электропитания, изучить

системные свойства, выполнить математическое и имитационное моделирование компонентов электротехнического комплекса (пункт 1); выполнить структурный и параметрический синтез оптимальных регуляторов напряжения и реализовать алгоритмы эффективного управления автономным инвертором напряжения систем электропитания (пункт 3).

Апробация результатов работы

Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на Международной научно-практической конференции «САКС 2002», Красноярск, 2002; VIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность», Томск, 2002; X, XI и XII международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2004–2006; X International Scientific and Practical Conference of students, post – graduates and young scientists «Modern Techniques and Technology», Tomsk, 2004; Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск, 2004; VIII Всероссийской научной конференции с международным участием «Решетневские чтения», Красноярск, 2004; Научно-технической конференции молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», Томск, 2013; XXXII отраслевой научно-технической конференции молодых специалистов «Морское подводное оружие. Морские подводные роботы – вопросы проектирования, конструирования и технологий. МПО-МС-2013», Санкт-Петербург, 2013; 5-й, 6-й и 7-й Всероссийских научно-технических конференциях «Технические проблемы освоения Мирового океана ТПОМО-5», Владивосток, 2013, 2015 и 2017; Всероссийской научно-практической конференции «Морское подводное оружие. Перспективы развития», Санкт-Петербург, 2015; Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления», Ростов-на-Дону, 2016; 10-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2017), Геленджик, 2017; XVI Международной конференции имени А.Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование», Казань, 2017; XIII Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления», Владивосток, 2018; Международной конференции «Экстремальная робототехника», Санкт-Петербург, 2018.

Научные исследования выполнялись в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы»; х/д на выполнение составной части опытно-конструкторских работ между НИИ АЭМ ТУСУР и АО «Южморгеология» № 142/СЭП-30 ТПА/02 «Система электропитания телеуправляемого подводного аппарата», № 142/УМБК-Ф/10 «Система электропитания универсального многоканального буксируемого комплекса», № 142/ТНПК-Ф/10 «Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного комплекса», № 142/КМТС/11 «Система электропитания комплекса многофункциональных технических средств», № 142/ТНПК-М/12 «Разработка и изготовление системы электропитания для многофункционального телевизионного необитаемого подводного комплекса ТНПК «Магеллан-1» в период с 2002 по 2018 г.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 58 научных работах, в том числе 20 публикаций в изданиях, входящих в перечень ВАК для докторских диссертаций, 10 патентов РФ на изобретения и полезные модели, 5 статей в изданиях Scopus и Web of Science и 1 монография. Получены 2 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация включает введение, семь глав, заключение, список сокращений и список литературы из 265 наименований. Диссертация изложена на 352 страницах машинописного текста, содержит 148 рисунков, 28 таблиц, 12 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено состояние проблемы, обоснована актуальность, сформулированы цель и основные задачи исследовательской работы, изложена научная новизна полученных результатов и практическая значимость, определены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведена классификация необитаемых подводных аппаратов, в которой самостоятельное место занимают телеуправляемые необитаемые подводные аппараты, имеющие кабель-трос для энергообеспечения, передачи информационных и управляющих сигналов. Приводятся примеры ТНПА с глубиной погружения до 6000 м, для которых имеются жесткие требования к стабильности и качеству напряжения питания технологического оборудования подводного аппарата. Несмотря на ряд недостатков, обусловленных необходимостью использования кабель-троса, основными достоинствами ТНПА можно считать большую продолжительность их непрерывной работы, относительно низкую стоимость разработки и эксплуатации и достаточно высокую надежность, в том числе систем электропитания. Также следует отметить, что в течение длительного времени автор участвовал в качестве научного руководителя и непосредственного исполнителя в создании ряда структур СЭП ТНПА, оригинальность которых защищена патентами РФ. А современные достижения в области отечественной и зарубежной силовой электроники и информационных технологий являются предпосылками к дальнейшему развитию и совершенствованию СЭП ТНПА. Пройден определенный эволюционный путь, каждый из предложенных вариантов заслуживает внимание, некоторые из них были доведены до серийно выпускаемых промышленных образцов. Наибольшее внимание заслуживают структуры, представленные на рисунках 1–7.

На рисунке 1 представлен трансформаторный вариант СЭП ТНПА. Система электропитания содержит установленную на судне-носителе бортовую часть, включающую коммутатор сети K , вход которого соединен с судовой электрической сетью – основной или резервной, напряжением 380 В и частотой 50 Гц.

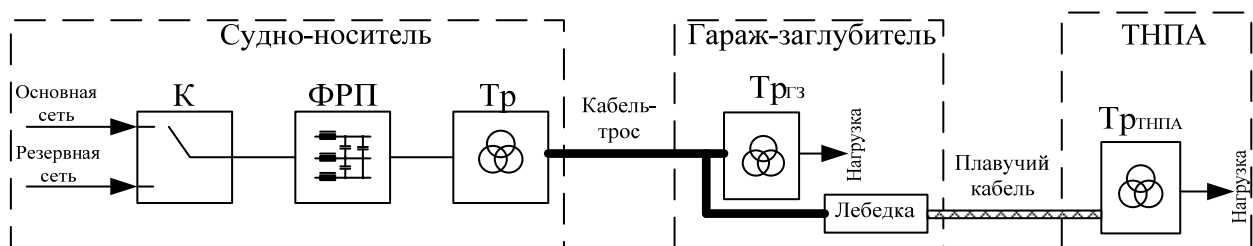


Рисунок 1 – Трансформаторный вариант системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (патент РФ № 119905): K – коммутатор; ФРП – фильтр радиопомех; Тр – повышающий трансформатор; ТрГЗ – понижающий трансформатор гаража-заглубителя; ТрТНПА – понижающий трансформатор телеуправляемого необитаемого подводного аппарата

Выход коммутатора K соединен с фильтром радиопомех ФРП и силовым повышающим трансформатором Тр, который повышает напряжение сети до линейного напряжения $U_{ЛЭФФ}$ в диапазоне от 1000 до 1500 В, что обусловлено необходимостью компенсировать падение напряжения на нагрузке при изменении параметров кабель-

троса и потребляемой мощности технологическим оборудованием подводного аппарата. Далее повышенное трехфазное напряжение по кабель-тросу поступает на первый подводный блок системы, установленный на гараже-заглубителе (ГЗ), и на второй подводный блок системы через плавучий кабель, установленный на ТНПА. Первый и второй подводные блоки системы содержат согласующие трансформаторы $Tr_{ГЗ}$ и $Tr_{ТНПА}$, обеспечивающие питание устройств гаража-заглубителя и подводного аппарата. Трансформаторный вариант СЭП ТНПА позволяет увеличить время работы за счет питания технологического оборудования от судовой сети судна-носителя. Реализация данной СЭП связана с использованием громоздких согласующих трансформаторов $Tr_{ГЗ}$ и $Tr_{ТНПА}$, габариты которых для промышленной частоты 50 Гц могут быть значительными. Нестабильность напряжения на токоприемниках ГЗ и ТНПА будет определяться колебаниями напряжения трехфазной сети переменного тока судна-носителя и падением напряжения в сопротивлении кабель-троса при изменениях тока нагрузки.

На рисунке 2 представлен другой вариант выполнения СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе.

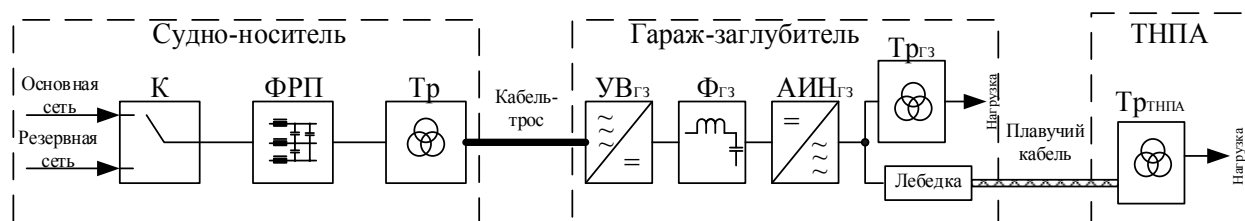


Рисунок 2 – Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу трехфазным напряжением частотой 50 Гц и трехфазным напряжением частотой 1000 Гц по плавучему кабелю (патент РФ № 119905):
 $УВ_{ГЗ}$ – управляемый выпрямитель гаража-заглубителя; $Ф_{ГЗ}$ – фильтр гаража-заглубителя;
 $АИН_{ГЗ}$ – автономный инвертор напряжения гаража-заглубителя

Достоинство такой структуры СЭП ТНПА заключается в том, что за счет повышения частоты питающего напряжения до 1000 Гц существенно снижаются массогабаритные параметры трансформаторов $Tr_{ГЗ}$ и $Tr_{ТНПА}$, в 2,5–3 раза по сравнению с трансформатором, работающим на промышленной частоте 50 Гц. В случае расположения трансформатора $Tr_{ТНПА}$ в прочном корпусе с масляным охлаждением обеспечивается дополнительное уменьшение габаритов трансформатора, а также разгрузка стенок прочного корпуса от давления воды, что позволяет уменьшить толщину стенок корпуса и, соответственно, уменьшить массу СЭП, устанавливаемой на ТНПА, еще в 1,3–1,5 раза.

Недостатками рассмотренной системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата являются невысокие массогабаритные характеристики гаража-заглубителя, а также усложнение системы электропитания ГЗ за счет двойного преобразования энергии, переменного напряжения в постоянное и постоянного в переменное повышенной частоты при помощи управляемого выпрямителя $УВ_{ГЗ}$ и автономного инвертора напряжения $АИН_{ГЗ}$. В СЭП ТНПА переменного тока с передачей энергии по кабель-тросу трехфазным напряжением $U_{ЛЭФФ}=1000–1500$ В частотой 50 Гц и постоянным напряжением по плавучему кабелю, представленной на рисунке 3, отсутствуют некоторые недостатки предыдущей схемы СЭП ТНПА.

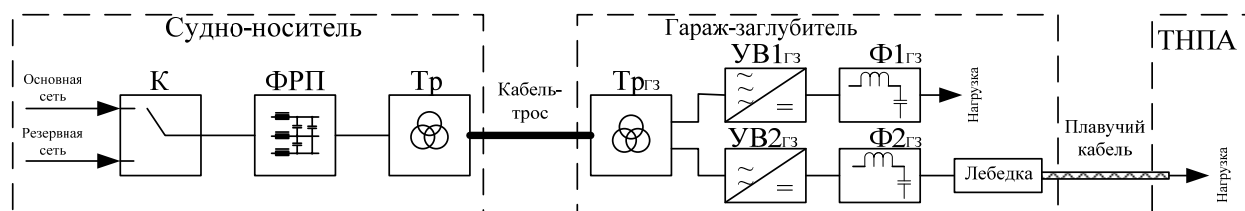


Рисунок 3 – Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу трехфазным напряжением $U_{\text{Лэфф}}=1000\text{--}1500\text{ В}$ частотой 50 Гц и постоянным напряжением по плавучему кабелю (патент РФ № 119905)

Основным достоинством данной схемы являются высокие массогабаритные показатели СЭП подводного аппарата за счет того, что по плавучему кабелю передается постоянное напряжение и отсутствует трансформатор, вследствие чего появляется возможность установки дополнительного технологического оборудования. К недостаткам следует отнести невысокие массогабаритные характеристики гаража-заглубителя, так как трансформатор $\text{Тр}_{\text{ГЗ}}$ работает на переменном напряжении частотой 50 Гц, а также применение управляемых выпрямителей $\text{УВ1}_{\text{ГЗ}}$ и $\text{УВ2}_{\text{ГЗ}}$ для обеспечения стабильного постоянного напряжения 300 В и 600 В на нагрузках гаража-заглубителя и ТНПА.

На рисунке 4 представлена СЭП ТНПА, которая наилучшим образом отвечает всем требованиям, предъявляемым к современным системам данного типа.

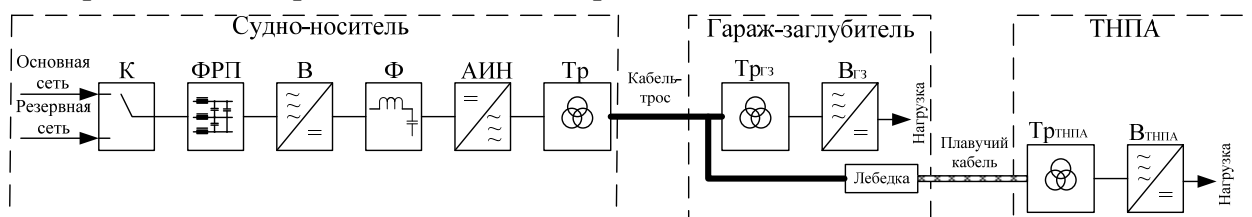


Рисунок 4 – Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу переменным напряжением повышенной частоты (патент РФ № 126217): В – выпрямитель; Ф – фильтр; АИН – автономный инвертор напряжения; Тр – повышающий трансформатор; В_{ГЗ} – выпрямитель гаража-заглубителя; В_{ТНПА} – выпрямитель телеуправляемого необитаемого подводного аппарата

Бортовая часть СЭП ТНПА содержит коммутатор сети К, вход которого соединен с судовой сетью. С коммутатора К напряжение поступает через фильтр радиопомех ФРП на выпрямитель В, затем через фильтр Ф на трехфазный автономный инвертор напряжения АИН, который повышает частоту питающего напряжения до 1000 Гц. Выход инвертора АИН соединен с первичными обмотками повышающего трехфазного трансформатора Тр, который в свою очередь повышает напряжение $U_{\text{Лэфф}}$ регулируемое в диапазоне от 1000 до 1500 В. Вторичные обмотки Тр соединены с кабель-тросом, связанным с первичными обмотками трансформатора Тр_{ГЗ} подводной части, установленной на гараже-заглубителе, и плавучим кабелем. Вторичные обмотки согласующего трансформатора Тр_{ГЗ} соединены с выпрямителем В_{ГЗ}, формирующим питающее напряжение для гаража-заглубителя. С выхода плавучего кабеля напряжение поступает на первичные обмотки согласующего трансформатора Тр_{ТНПА}, расположенного на телеуправляемом необитаемом подводном аппарате. Вторичные обмотки согласующего трансформатора Тр_{ТНПА} соединены с выпрямителем В_{ТНПА}, обеспечивающим питающее напряжение для подводного аппарата.

На рисунке 5 приведена система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с судна-носителя, которая позволяет улучшить массогабаритные показатели подводной части за счет передачи энергии по кабель-тросу постоян-

ным напряжением, а по плавучему кабелю переменным напряжением повышенной частоты.

Данная система содержит установленную на судне-носителе бортовую часть, включающую в себя коммутатор сети К, вход которого соединен с основной и резервной сетью, а выход – с фильтром радиопомех ФРП и силовым повышающим трансформатором Тр. Напряжение со вторичных обмоток трансформатора Тр поступает на выпрямитель В с фильтром Ф, в свою очередь выпрямленное напряжение порядка 1000 В по кабель-тросу поступает на автономный инвертор напряжения АИН_{ГЗ} первого подводного блока системы, установленного на гараже-заглубителе. Автономный инвертор напряжения АИН_{ГЗ} осуществляет преобразование постоянного напряжения в переменное повышенной частоты 1000 Гц. Выход АИН_{ГЗ} соединен с выпрямителем В_{ГЗ}, который формирует питающие напряжения (например, 300 В и 600 В) для гаража-заглубителя, а также с плавучим кабелем и согласующим трансформатором Тр_{ТНПА} второго подводного блока системы, расположенного на телеуправляемом необитаемом подводном аппарате.

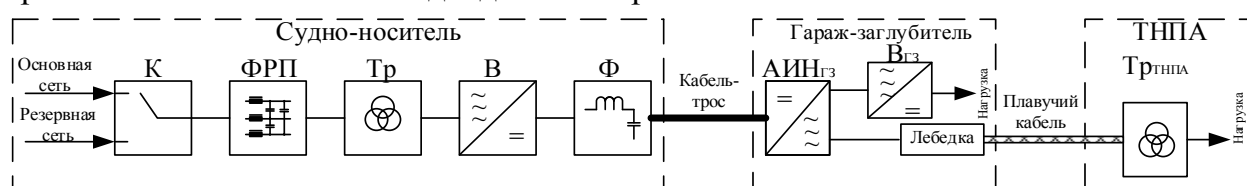


Рисунок 5 – Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу постоянным напряжением и трехфазным переменным напряжением частотой 1000 Гц по плавучему кабелю (патент РФ № 119905):

Тр – повышающий трансформатор; В – выпрямитель; Ф – фильтр; АИН_{ГЗ} – автономный инвертор напряжения гаража-заглубителя; В_{ГЗ} – выпрямитель гаража-заглубителя

За счет повышенной частоты существенно снижаются массогабаритные показатели трансформатора Тр_{ТНПА}, установленного на телеуправляемом необитаемом подводном аппарате, а вследствие передачи по кабель-тросу постоянного напряжения обеспечиваются более низкие потери мощности в кабель-тросе.

На рисунке 6 приведены два варианта систем электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу и плавучему кабелю постоянным напряжением.

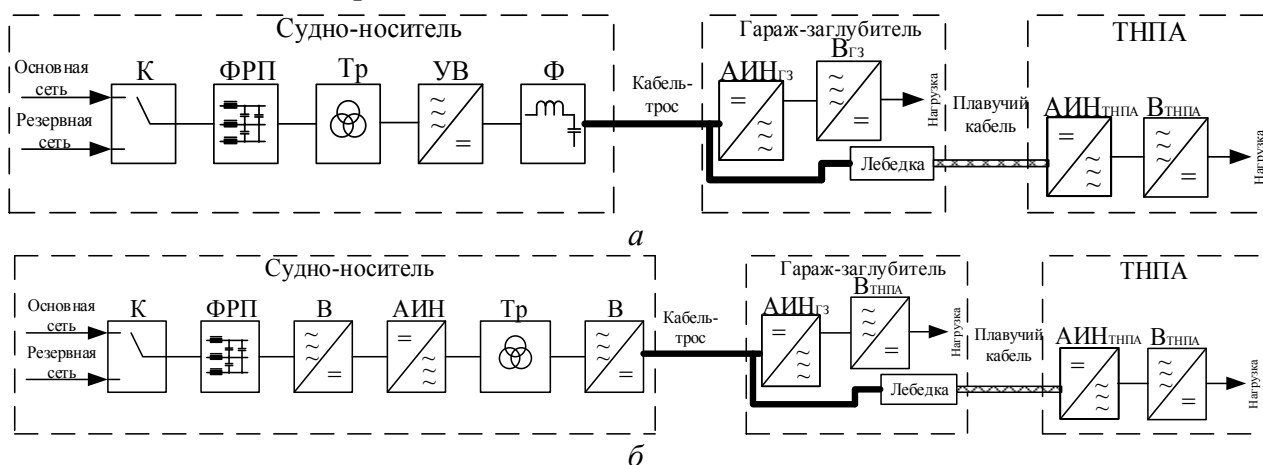


Рисунок 6 – Варианты систем электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу и плавучему кабелю постоянным напряжением (патент РФ № 119905): УВ – управляемый выпрямитель; Ф – фильтр; АИН_{ТНПА} – автономный инвертор напряжения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата; В_{ТНПА} – выпрямитель телеуправляемого необитаемого подводного аппарата

Недостатком СЭП, приведенной на рисунке 6,а, являются низкие массогабаритные показатели расположенной на судне-носителе части СЭП, обусловленные сглаживающим фильтром и наличием согласующего трансформатора Тр, типовая (габаритная) мощность которого на частоте питающей сети 50 Гц составляет 105–110 % от выходной мощности выпрямителя УВ.

На современном уровне развития преобразовательной техники и полупроводниковой элементной базы одним из основных путей увеличения удельной мощности при высоких массогабаритных показателях является преобразование напряжения и тока на повышенных частотах. На рисунке 6,б представлена СЭП ТНПА со звеном повышенной частоты, что обеспечивает хорошие массогабаритные показатели согласующего трансформатора Тр.

Еще одним примером выполнения СЭП ТНПА на постоянном токе является СЭП с нулевым проводом (рисунок 7).

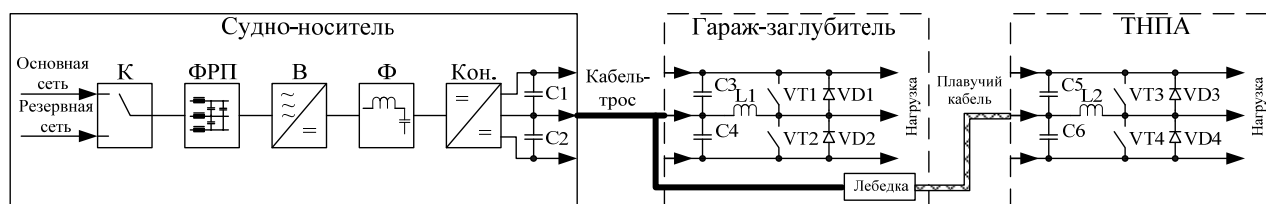


Рисунок 7 – Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с нулевым проводом (патент РФ № 158319)

СЭП ТНПА с нулевым проводом содержит установленную на судне-носителе бортовую часть, включающую в себя коммутатор сети К, вход которого соединен с судовой электрической сетью основной и резервной, а выход – с фильтром радиопомех ФРП и неуправляемым выпрямителем В. Напряжение постоянного тока с выхода выпрямителя В через фильтр Ф поступает на повышающий конвектор Кон. с нулевой точкой, который обеспечивает преобразование напряжения постоянного тока одной величины в напряжение постоянного тока другой величины, необходимой для передачи по кабель-тросу в подводную часть системы, а также его стабилизацию при изменении нагрузки. Таким образом, на выходе Кон. относительно нулевой точки формируются два регулируемых напряжения постоянного тока в диапазоне от 300 до 500 В. Данные напряжения по кабель-тросу поступают на входной фильтр С3 и С4 первого подводного блока системы, установленного на гараже-заглубителе, и входной фильтр С5 и С6 второго подводного блока системы, установленного на ТНПА. С выхода фильтров С3, С4 и С5, С6 напряжение через симметрирующие устройства VT1, VT2, VD1, VD2 ГЗ и VT3, VT4, VD3, VD4 ТНПА поступает в нагрузку. Симметрирующие устройства ГЗ и ТНПА обеспечивают симметричную загрузку каждой жилы кабель-троса в зависимости от мощности потребления нагрузок относительно нулевого провода.

Как было рассмотрено выше, электропитание ТНПА по кабель-тросу может осуществляться на переменном и постоянном токе. СЭП с передачей энергии на переменном токе повышенной частоты (более 50 Гц) в настоящее время обеспечивает требуемую стабилизацию напряжения на нагрузках ТНПА и отвечает основным требованиям по величине передаваемой мощности и массогабаритным показателям.

В первой главе также изложена постановка задачи синтеза оптимального регулятора напряжения СЭП для обеспечения заданного качества регулирования и стабилизации питающего напряжения на технологическом оборудовании подводного аппарата. В результате анализа экспериментальных данных о режимах функционирования оборудования ТНПА и оценки изменения напряжения на нагрузке установлено, что

силовую часть системы электропитания на участке от источника энергии до конденсатора выходного фильтра на гараже-заглубителе с определенной точностью можно представить линейной моделью с фиксированными значениями параметров на i -м интервале:

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + b_i u_i(t), \quad x(t = t_0) = x_0, \quad t_0 \neq 0, \quad (1)$$

где $\dot{x}(t)$ – n -мерный вектор переменных состояния объекта управления; A_i – $n \times n$ – матрица стационарных параметров системы электропитания; b_i – n -мерный вектор стационарных параметров управляющего воздействия; $u_i(t)$ – скалярное управляющее воздействие, которое представляет собой выходную переменную величину регулятора напряжения (в нашем случае это коэффициент модуляции АИН); t_0 – произвольный начальный момент времени; x_0 – n -мерный вектор начальных значений переменных состояния.

Без потери общности для синтеза оптимального регулятора можно рассмотреть вариант измерения полного вектора $x(t)$ переменных состояния, который имеет место на этапе математического моделирования достаточно адекватной модели системы электропитания. Оптимизируемый критерий качества регулируемых процессов в СЭП можно записать в виде гладкой квадратичной функции $J_i(x, u)$ из двух слагаемых:

$$J_i(x, u) = \int_{t_0}^{t_N} \left(x^T(t) Q x(t) + r_i u_i^2(t) \right) dt, \quad (2)$$

где $(*)^T$ – символ транспонирования; t_N – момент времени конечного состояния объекта; Q – положительно-полуопределенная матрица $n \times n$, компоненты которой являются штрафными коэффициентами для соответствующих переменных состояния $x(t)$; r_i – положительный коэффициент, значение которого отражает влияние скалярного управляющего воздействия $u_i(t)$ на условия экстремальности критерия качества и косвенным образом отражает требования по энергоэффективности управления.

Наиболее подходящей формой весовой (штрафной) матрицы Q при формировании требований к процессам многих объектов является диагональная форма. Такая форма матрицы Q не требует проверки необходимого условия ее положительной полуопределенности и значительно упрощает структуру критерия качества. Выбор значений компонентов матрицы Q и коэффициента r_i представляет собой достаточно сложную системную и вычислительную задачу, решение которой в диссертации не рассматривается и будет предметом дальнейших исследований.

Для оптимальных регуляторов, структура которых определяется законом линейной обратной связи по переменным состояния управляемого объекта вида (1), минимум функционала (2) будет обеспечиваться при условии

$$u_i(t) = -r_i^{-1} b_i^T P_i(t) x(t), \quad (3)$$

где $P_i(t)$ – матрица $n \times n$, компоненты которой определяются в результате решения дифференциального (алгебраического) уравнения Риккати¹ или уравнения Ляпунова² для режима функционирования СЭП.

¹ Солодовников В.В. Теория автоматического управления техническими системами: учеб. пособие / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Изд-во МГТУ, 1993. – 492 с.

В устойчивых системах стабилизации элементы матрицы $P_i(t)$ можно вычислить из линейного алгебраического уравнения:

$$P_i(\infty)A_i + A_i^T P_i(\infty) + Q = 0. \quad (4)$$

Тогда управляющее воздействие (3) на выходе оптимального регулятора можно записать в виде пропорциональной зависимости от переменных состояния $x(t)$:

$$u_i(t) = -k_i^T x(t), \quad (5)$$

где k_i^T – n -мерный вектор-строка коэффициентов передачи регулятора, значения которых определяются выражением:

$$k_i^T = r_i^{-1} b_i^T P_i(\infty). \quad (6)$$

Для построения оптимального регулятора напряжения СЭП, в котором используются только измеряемые переменные состояния $y(t)$, согласно уравнению $y(t) = Cx(t)$, где C – матрица $m \times n$ параметров датчиков, значения коэффициентов передачи характеризуются равенством:

$$k_i^T = r_i^{-1} b_i^T P_i(\infty) C. \quad (7)$$

Таким образом, задача синтеза оптимального регулятора напряжения для СЭП с априорно известными параметрами, фиксированными режимами работы и критерием качества вида (1), заключается в определении компонентов матрицы Риккати $P_i(\infty)$.

Во второй главе представлены математические и имитационные модели разомкнутых систем электропитания глубоководных аппаратов, учитывающие компенсацию емкостной составляющей реактивной мощности в кабель-тросе и импульсный характер работы транзисторных ключей АИН. Ввиду ограниченности объема автореферата далее приведем только модель наиболее сложной СЭП с передачей по кабель-тросу энергии переменного тока, схема замещения которой приведена на рисунках 8, 9.

Построение математических моделей для анализа режимов работы СЭП и последующего синтеза оптимальных регуляторов напряжения на нагрузке основано на общепринятых допущениях и условиях, приведенных в публикациях [8, 10].

Так, используя коммутационно-разрывные функции для описания работы АИН, математическую модель надводной части СЭП с передачей переменного тока представим следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{di_a(t)}{dt} &= \frac{1}{2} \frac{1}{L_a} K_{fa}(\xi_a) U_{CS}(t) + \frac{1}{L_a} U_0(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) - \frac{1}{L_a} U_{cA}(t); \\ \frac{dU_{cA}(t)}{dt} &= \frac{1}{C_a} (i_a(t) - i_{a1}(t)); \\ \frac{di_b(t)}{dt} &= \frac{1}{2} \frac{1}{L_a} K_{fb}(\xi_b) U_{CS}(t) + \frac{1}{L_a} U_0(t) - \frac{R_a}{L_a} i_b(t) - \frac{1}{L_a} U_{cB}(t); \\ \frac{dU_{cB}(t)}{dt} &= \frac{1}{C_a} (i_b(t) - i_{b1}(t)); \\ \frac{di_c(t)}{dt} &= \frac{1}{2} \frac{1}{L_a} K_{fc}(\xi_c) U_{CS}(t) + \frac{1}{L_a} U_0(t) - \frac{R_a}{L_a} i_c(t) - \frac{1}{L_a} U_{cC}(t); \end{aligned} \quad (8)$$

² Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д.П. Ким. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.

$$\frac{dU_{cC}(t)}{dt} = \frac{1}{C_a}(i_c(t) - i_{c1}(t)),$$

где $K_{fa}(\xi_a)$, $K_{fb}(\xi_b)$, $K_{fc}(\xi_c)$ – коммутационные функции фаз АИН; $U_0(t) = K_f(t)U_{CS}(t)$ – напряжение нулевой последовательности; $K_f(t)$ – общая коммутационная функция АИН для нулевой последовательности.

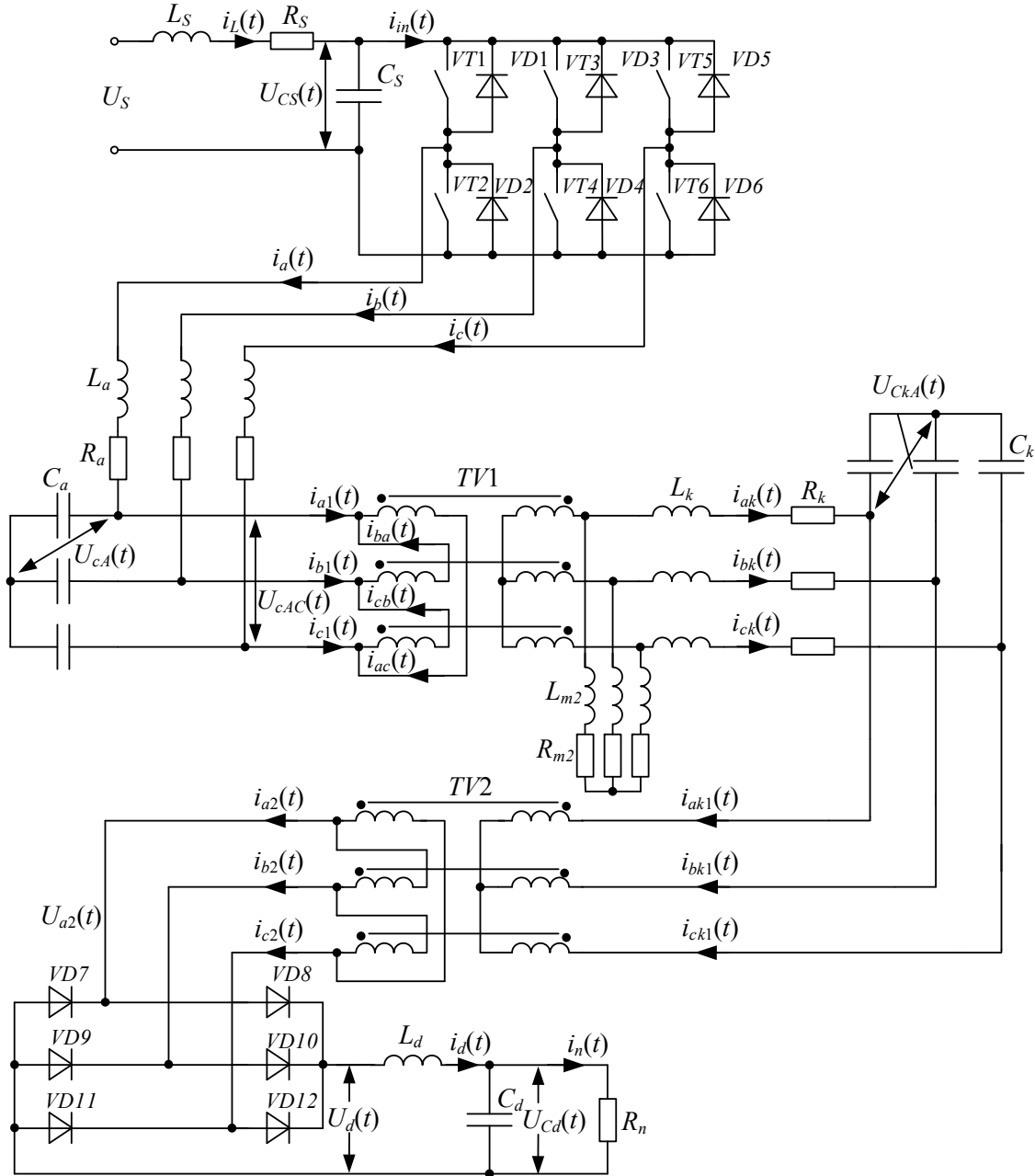


Рисунок 8 – Электрическая схема замещения силовой части СЭП ТНПА с передачей по кабель-тросу энергии переменного тока

Линейные напряжения выходного фильтра АИН определяются через разность соответствующих фазных напряжений:

$$U_{cAC}(t) = U_{cA}(t) - U_{cC}(t); \quad U_{cBA}(t) = U_{cB}(t) - U_{cA}(t); \quad U_{cCB}(t) = U_{cC}(t) - U_{cB}(t). \quad (9)$$

Входной фильтр АИН в пространстве переменных состояния описывается следующими уравнениями:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{1}{L_S}U_{CS}(t) - \frac{R_S}{L_S}i_L(t) + \frac{1}{L_S}U_S(t); \quad \frac{dU_{CS}(t)}{dt} = \frac{1}{C_S}(i_L(t) - i_{in}(t)), \quad (10)$$

при этом входной ток АИН $i_{in}(t)$ определяется по формуле:

$$i_{in}(t) = i_a(t)K_1(\xi_a) + i_b(t)K_3(\xi_b) + i_c(t)K_5(\xi_c), \quad (11)$$

где $K_1(\xi_a)$, $K_3(\xi_b)$, $K_5(\xi_c)$ – коммутационные функции верхних ключей АИН.

При описании подводной части СЭП трансформаторы представляются пропорциональным звеном с коэффициентами K_{p1} и K_{p2} . Для трансформатора $TV1$ учитывается индуктивность ветви намагничивания, приведенная ко вторичной обмотке L_{m2} , которая является индуктивностью, позволяющей компенсировать емкостной ток кабель-троса.

Дифференциальные уравнения для эквивалентной расчетной схемы записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{di'_{aLm1}(t)}{dt} &= \frac{U_{cAC}(t) - Ri'_{aLm1}(t)}{L_{m1}}; & \frac{di'_{ak}(t)}{dt} &= \frac{U_{cAC}(t) - R_k K_{p1}^2 i'_{ak}(t) - U'_{CkA}(t)}{L_k K_{p1}^2}; \\ \frac{dU'_{CkA}(t)}{dt} &= \frac{K_{p1}^2}{C_k} (i'_{ak}(t) - i'_{a2}(t)); & i'_{ac}(t) &= i'_{ak}(t) + i'_{aLm1}(t); \\ \frac{di'_{bLm1}(t)}{dt} &= \frac{U_{cBA}(t) - Ri'_{bLm1}(t)}{L_{m1}}; & \frac{di'_{bk}(t)}{dt} &= \frac{U_{cBA}(t) - R_k K_{p1}^2 i'_{bk}(t) - U'_{CkB}(t)}{L_k \cdot K_{p1}^2}; \\ \frac{dU'_{CkB}(t)}{dt} &= \frac{K_{p1}^2}{C_k} (i'_{bk}(t) - i'_{b2}(t)); & i'_{ba}(t) &= i'_{bk}(t) + i'_{bLm1}(t); & \frac{di'_{cLm1}(t)}{dt} &= \frac{U_{cCB}(t) - Ri'_{cLm1}(t)}{L_{m1}}; \\ \frac{di'_{ck}(t)}{dt} &= \frac{U_{cCB}(t) - R_k K_{p1}^2 i'_{ck}(t) - U'_{CkC}(t)}{L_k \cdot K_{p1}^2}; & \frac{dU'_{CkC}(t)}{dt} &= \frac{K_{p1}^2}{C_k} (i'_{ck}(t) - i'_{c2}(t)); \\ & & i'_{cb}(t) &= i'_{ck}(t) + i'_{cLm1}(t). \end{aligned} \quad (12)$$

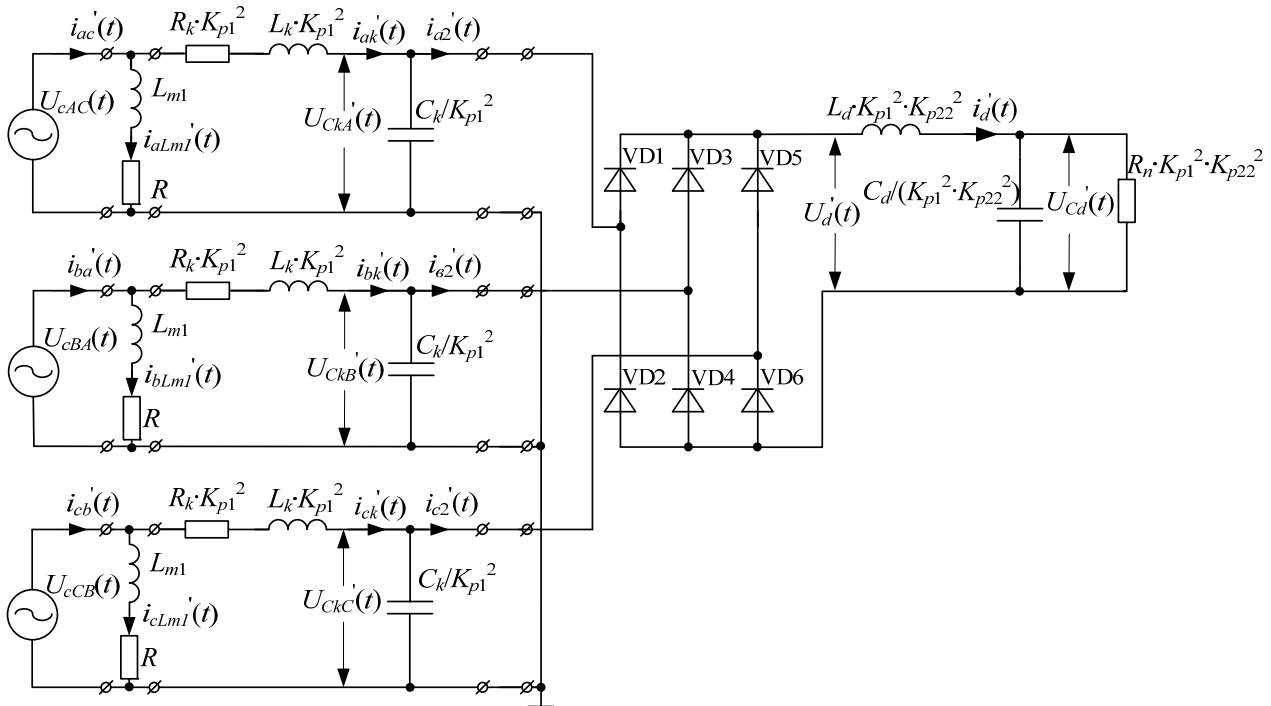


Рисунок 9 – Эквивалентная расчетная схема кабель-троса и подводной части системы электропитания

Трехфазный мостовой выпрямитель представлен функцией, в которой выпрямленное напряжение $U_d'(t)$ на интервалах, равных одной шестой части периода, определяется разностью фазных напряжений обмоток трансформатора $TV2$. Входные токи выпрямителя определяются по формулам:

$$i'_{a2}(t) = K_{fRa}(t)i'_d(t); \quad i'_{b2}(t) = K_{fRc}(t)i'_d(t); \quad i'_{c2}(t) = K_{fRc}(t)i'_d(t), \quad (13)$$

где $K_{fRa}(t), K_{fRb}(t), K_{fRc}(t)$ – коммутационные функции фаз мостового выпрямителя, вычисленные на каждом интервале периода напряжения.

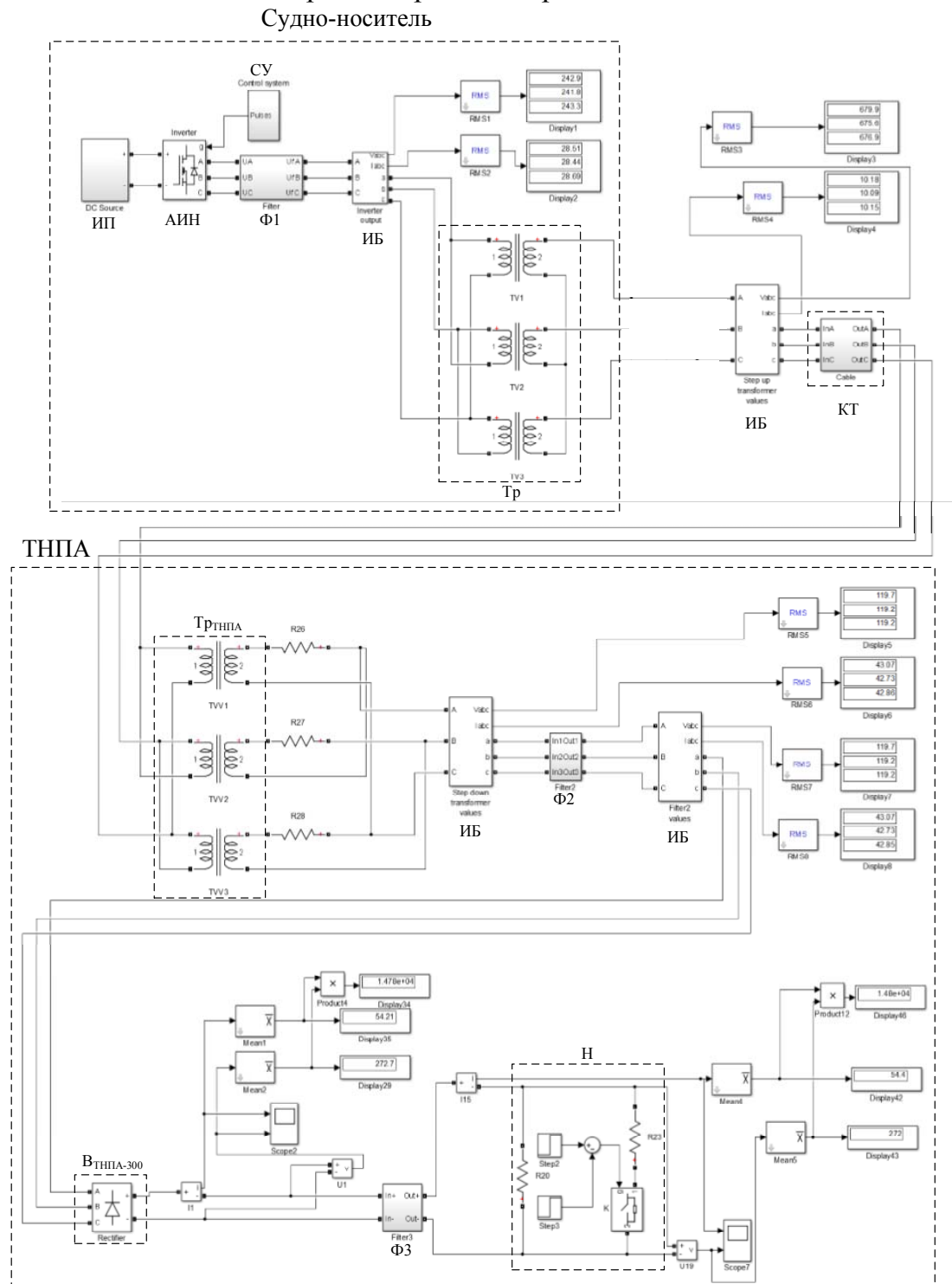


Рисунок 10 – Имитационная модель системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе в пакете MatLab 7.0 – Simulink

Дифференциальные уравнения выходной цепи выпрямителя для эквивалентной расчетной схемы можно записать в виде:

$$\frac{di'_d(t)}{dt} = \frac{U'_d(t) - U'_{Cd}(t)}{L_d K_{p1}^2 K_{p22}^2}; \quad \frac{dU'_{Cd}(t)}{dt} = \frac{K_{p1}^2 K_{p22}^2}{C_d} \left(i'_d(t) - \frac{U'_{Cd}(t)}{R_n K_{p1}^2 K_{p22}^2} \right). \quad (14)$$

Токи и напряжения исходной трехфазной схемы (см. рисунок 8) определяются по формулам:

$$\begin{aligned} i_{ac}(t) &= i'_{ac}(t); \quad i_{aLm}(t) = K_{p1} i'_{aLm1}(t); \quad i_{ak}(t) = K_{p1} i'_{ak}(t); \quad i_{ak1}(t) = K_{p1} i'_{a2}(t); \\ i_{a2}(t) &= K_{p22} i'_{ak1}(t); \quad U_{CkA}(t) = \frac{U'_{CkA}(t)}{K_{p1}}; \quad U_{a2}(t) = \frac{U'_{CkA}(t)}{K_{p1} K_{p22}}; \\ i_{a1}(t) &= i_{ac}(t) - i_{ba}(t); \quad i_{b1}(t) = i_{ba}(t) - i_{cb}(t); \quad i_{c1}(t) = i_{cb}(t) - i_{ac}(t); \\ U_d(t) &= \frac{U'_d(t)}{K_{p1} K_{p22}}; \quad U_{Cd}(t) = \frac{U'_{Cd}(t)}{K_{p1} K_{p22}}; \quad i_d(t) = K_{p1} K_{p22} i'_d(t); \quad i_n(t) = U_{Cd}(t) / R_n. \end{aligned} \quad (15)$$

На рисунке 10 представлена имитационная модель СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе в пакете MatLab 7.0 – Simulink.

Модель СЭП ТНПА состоит из: блока источника питания (ИП) постоянного тока, включающего в себя бортовую трехфазную сеть; трехфазного выпрямителя с LC-фильтром; блока трехфазного автономного инвертора напряжения (АИН); блока фильтра АИН (Ф1); блока системы управления (СУ) инвертором; блока трехфазного повышающего трансформатора (Тр); блока кабель-троса (КТ); блока понижающего трансформатора (Тр_{ТНПА}); блока входного фильтра выпрямителя (Ф2); блока выпрямителя (В_{ТНПА-600}); блока выходного фильтра выпрямителя (Ф3); блока нагрузки (Н); измерительных блоков выходного тока и напряжения (i_d и U_{Cd}).

В результате имитационного моделирования СЭП ТНПА получена зависимость выходного напряжения $U_{Cd}(t)$ при включении на холостом ходу (рисунок 11) и на номинальную нагрузку (рисунок 12).

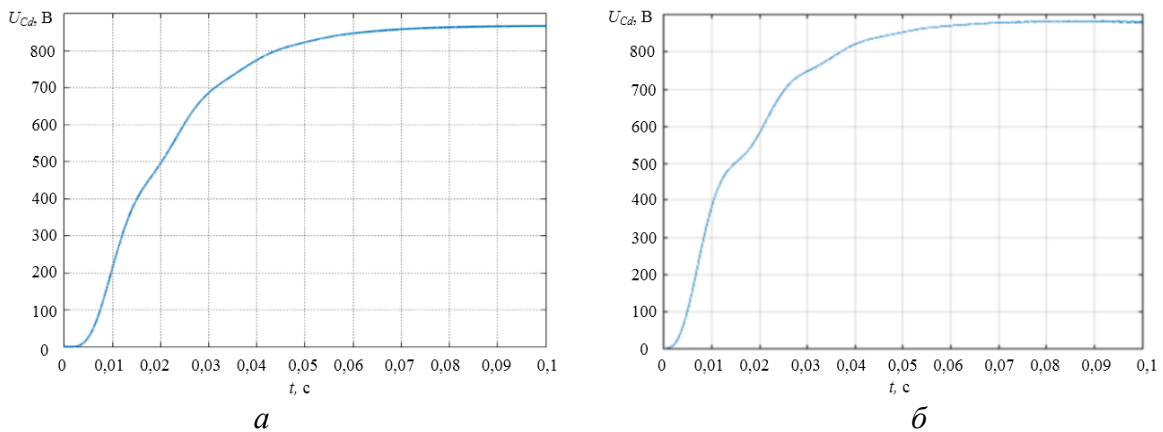


Рисунок 11 – Зависимость выходного напряжения $U_{Cd}(t)$ СЭП ТНПА на переменном токе при пуске на холостой ход: а – имитационная модель; б – математическая модель

Результаты, полученные при расчетах на математических и имитационных моделях, практически совпадают с погрешностью, не превышающей 5%. В процессе исследований обнаружено, что установившиеся значения выходного напряжения в моделях разомкнутой СЭП ТНПА значительно отличаются от требуемого номинального значения по условиям эксплуатации подводного аппарата, что обуславливает обязательное введение регуляторов и построение замкнутой системы для проведения экспериментальных исследований на опытных образцах.

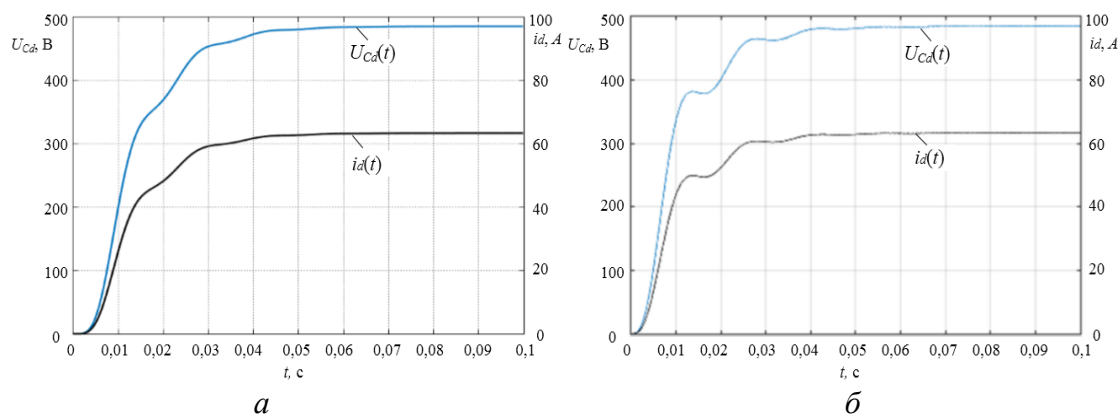


Рисунок 12 – Зависимость выходного напряжения $U_{Cd}(t)$ СЭП ТНПА на переменном токе при пуске на номинальную нагрузку: a – имитационная модель; b – математическая модель

В третьей главе представлены методы синтеза оптимальных регуляторов напряжения на нагрузке СЭП с фиксированными значениями параметрических возмущений в зависимости от режимов работы полезной нагрузки ТНПА. Предложенные методы обеспечивают построение не только модального, но и оптимального регулятора в форме пропорциональной отрицательной обратной связи по выходу СЭП на основе линеаризованной модели с интервальными значениями параметров кабель-троса и нагрузки. Используя математическое описание предварительно определенной структуры оптимального регулятора напряжения на нагрузке, например ПИ-регулятора, с учетом интервала i режима работы, запишем модифицированную модель объекта управления и квадратичный критерий качества в расширенном пространстве переменных состояния $z(t) = [x(t), u_i(t)]$:

$$\dot{z}(t) = \tilde{A}_i z(t) + \tilde{b}_i v_i(t), \quad z(t = t_0) = z_0, \quad t_0 \neq 0; \quad (16)$$

$$J_i(z, v) = \int_{t_0}^{t_N} \left(z^T(t) \tilde{Q} z(t) + \tilde{r}_{i2} v_i^2(t) \right) dt, \quad (17)$$

где $v_i(t) = \dot{u}_i(t)$; \tilde{A}_i , \tilde{b}_i , \tilde{Q} – блочные матрицы соответствующей размерности; \tilde{r}_{i2} – скалярная величина, характеризующая вклад в критерий качества производной управляющего воздействия $\dot{u}_i(t)$ на каждом i -м интервале режима работы СЭП. Математическое обоснование возможности такого расширения исходного пространства переменных состояния для линейных систем имеется в литературе³.

После выполнения процедуры оптимизации функционала (17) и использования решения $\tilde{P}_i(t)$, например дифференциального уравнения Риккати в расширенном пространстве переменных состояния $z(t)$, управляющее воздействие $v_i(t)$ в СЭП с модифицированной моделью будет определяться уравнением:

$$v_i(t) = -r_{i2}^{-1} \tilde{b}_i^T \tilde{P}_i(t) z(t). \quad (18)$$

Возвращаясь в исходное пространство переменных состояния объекта управления, данное уравнение запишем в виде:

$$\dot{u}_i(t) = -k_{ix}^T(t) x(t) - k_{iu}(t) u(t), \quad (19)$$

где $k_{ix}^T(t)$, $k_{iu}(t)$ – соответственно вектор-строка и скалярная величина, характеризующие параметры ранее определенного ПИ-регулятора, построенного для модифицированной модели объекта управления.

³ Солодовников В.В. Теория автоматического управления техническими системами.

Для практической реализации оптимального регулятора синтезированный закон $u_i(t)$ управляющего воздействия целесообразно записать в явном аналитическом виде (на основе достаточно точных данных о параметрах элементов СЭП):

$$u_i(t) = (b_i^T b_i)^{-1} b_i^T [\dot{x}(t) - A_i x(t)]. \quad (20)$$

Так как для рассматриваемой модели системы электропитания выполняются условия существования множителя $(b_i^T b_i)^{-1}$, то будем иметь равенство:

$$\dot{u}_i(t) = -k_{i1}^T(t) \dot{x}(t) - k_{i2}^T(t) x(t), \quad u_i(t=t_0) = u_{i0}, \quad (21)$$

где $k_{i1}^T(t) = k_{iu}(t)(b_i^T b_i)^{-1} b_i^T$, $k_{i2}^T(t) = k_{ix}(t) - k_{iu}(t)(b_i^T b_i)^{-1} b_i^T A_i$ – соответственно вектор-строки значений параметров преобразованного оптимального регулятора для модифицированной модели объекта.

В случае использования алгебраических уравнений Риккати или Ляпунова коэффициенты передачи регулятора $k_{i1}^T(t)$, $k_{i2}^T(t)$ принимают стационарные значения $k_{i1}^T(t \rightarrow \infty) = k_{i1}^T$, $k_{i2}^T(t \rightarrow \infty) = k_{i2}^T$ и с учетом соответствующих начальных условий u_{i0} и x_0 решение уравнения (21) можно записать в аналитическом виде:

$$u_i(t) = - \int_{t_0}^{t_N} (k_{i1}^T \dot{x}(t) + k_{i2}^T x(t)) dt = - \left[u_{i0} + k_{i1}^T x(t) - k_{i1}^T x_0 + \int_{t_0}^{t_N} k_{i2}^T(\tau) x(\tau) d\tau \right]. \quad (22)$$

При нулевых начальных условиях $u_{i0} = 0$ и $x_0 = 0$ (или в установившемся режиме работы СЭП) выражение (22) отражает ПИ-закон регулирования, записанный для полностью измеряемых переменных состояния (что возможно на математической модели):

$$u_i(t) = - \left[k_{i1}^T x(t) + k_{i2}^T \int_{t_0}^{t_N} x(\tau) d\tau \right]. \quad (23)$$

В рамках принятой процедуры аналитического синтеза оптимальных регуляторов используется описание многомерной модели системы электропитания с кабелем в виде линеаризованных математических моделей пониженного порядка. Алгоритм создания упрощенной линеаризованной модели СЭП состоит из следующих этапов:

1. Формируются исходные данные о параметрах СЭП, режимах ее функционирования, обоснованных допущениях и ограничениях.
2. Составляются математическая и имитационная модели сложного объекта для аналитического описания процессов и моделирования в программных средах MatLab или Mathcad.
3. Выполняется исследование исходной многомерной нелинейной математической модели и сравнение результатов исследования с экспериментальными данными.
4. Исходная математическая модель СЭП (или ее составных частей) аппроксимируется передаточными функциями на интервалах стационарности параметров для режимов холостого хода и номинальной нагрузки.
5. Формируется упрощенная модель СЭП в виде системы дифференциальных уравнений пониженного порядка и оценивается точность аппроксимации исходной модели.
6. Модель объекта записывается в виде векторно-матричного уравнения с учетом интервального характера изменения компонентов матриц параметров.

В работе исследовано несколько методов определения передаточной функции (ПФ) по переходной характеристике, полученной в результате имитационного моделирования. Рассматриваются такие графические методы, как метод номограмм и метод Шварца, а также метод наименьших квадратов и метод площадей.

Общим недостатком графических методов является зависимость точности аппроксимации от качества построения номограмм, а также сложность их автоматизации.

Достаточно точным методом аппроксимации переходных характеристик устойчивых систем является метод наименьших квадратов, суть которого заключается в определении вида функции $f(t)$, максимально отражающей характер расположения экспериментальных точек на гладкой кривой. Уравнение переходной характеристики записывается в виде: $h_{au}(t) = f(t)$, где $f(t)$ – некоторая аналитическая зависимость, использующая, например, сумму экспоненциальных функций.

Для оценки точности аппроксимации используется минимум квадратичной невязки:

$$J(a_i) = \sum_{j=1}^n (h_u(t_j) - h_{au}(t_j))^2 = \sum_{j=1}^n \left(h_u(t_j) - \left(a_1 e^{-a_2 t_j} + a_3 e^{-a_4 t_j} + \dots + a_{n-1} e^{-a_n t_j} \right) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (24)$$

где $h_u(t_j)$ – значение переходной характеристики в j -й момент времени; $h_{au}(t_j)$ – расчетное значение в тот же момент времени.

Коэффициенты переходной характеристики (24) находятся в результате решения алгебраической системы уравнений, в основе которых лежит задача определения экстремума по каждому неизвестному коэффициенту a_i :

$$\frac{\partial J(a_i)}{\partial a_i} = 0, \quad i = 1, \dots, m. \quad (25)$$

Как показали расчеты, наиболее приемлемым вариантом является аппроксимация переходной характеристики передаточной функцией, представляющей собой соединение двух апериодических звеньев первого порядка, при этом погрешность стабилизации не превышает 5 %. Недостатками метода являются сложность выбора наиболее приемлемой переходной характеристики и подбор начальных условий, что не всегда является очевидным. Кроме того, изменение вида переходной характеристики усложняет алгоритм и процесс автоматизированного расчета.

В результате анализа графических и аналитических методов показано, что для исследуемой системы наиболее эффективным вариантом построения аппроксимирующей передаточной функции является метод площадей, который предполагает наличие модели в виде линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами. С учетом монотонности переходного процесса напряжения на нагрузке разомкнутой СЭП предлагается использовать передаточную функцию апериодического звена второго порядка:

$$W(s) = \frac{k}{1 + a_1 s + a_2 s^2}, \quad (26)$$

где коэффициент передачи k находится из графика $h_u(t)$ экспериментальной переходной характеристики (рис. 13), а значения коэффициентов a_1, a_2 определяются по следующему алгоритму:

1. Ось времени экспериментальной характеристики разбивается на m равных промежутков Δt , на каждом из которых нелинейная часть характеристики заменяется линейным отрезком.

2. Вычисляется вспомогательная величина:

$$F_1 = \Delta t \left(\sum_{i=0}^m \left(1 - \frac{h(i)}{h_{уст}} \right) - 0,5 \right), \quad (27)$$

где $h(i)$ – значение характеристики в конце каждого i -го промежутка времени; $h_{уст}$ – установившееся значение.

3. Вычисляются величины:

$$F_2 = F_1 \Delta t \left(\sum_{i=0}^m \left(1 - \frac{h(i)}{h_{уст}} \right) (1 - \lambda(i)) - 0,5 \right), \quad (28)$$

где $\lambda(i) = \frac{i\Delta t}{F_1}$ – интервал времени, пересчитанный в другом масштабе.

4. Определяются коэффициенты передаточной функции:

$$a_1 = F_1; \quad a_2 = F_2. \quad (29)$$

Для количественных данных разработанной СЭП ТНПА мощностью 47 кВт получена передаточная функция:

$$W(s) = \frac{0,923}{8,7 \cdot 10^{-7} s^2 + 9,36 \cdot 10^{-3} s + 1} \quad (30)$$

с погрешностью аппроксимации не более 5 % (рисунок 13).

При стационарных режимах работы СЭП, когда параметры кабель-троса и нагрузки изменяются незначительно, для синтеза оптимального регулятора целесообразно использовать классический модальный метод с назначением желаемой передаточной функции замкнутой системы. В рассматриваемых системах электропитания основными требованиями к регулируемому напряжению на нагрузке являются следующие:

- длительность переходного процесса $t_p = 20$ мс;
- отклонение напряжения на нагрузке от установившегося значения не более $\Delta = 10$ %;
- величина перерегулирования σ не более 20 %.

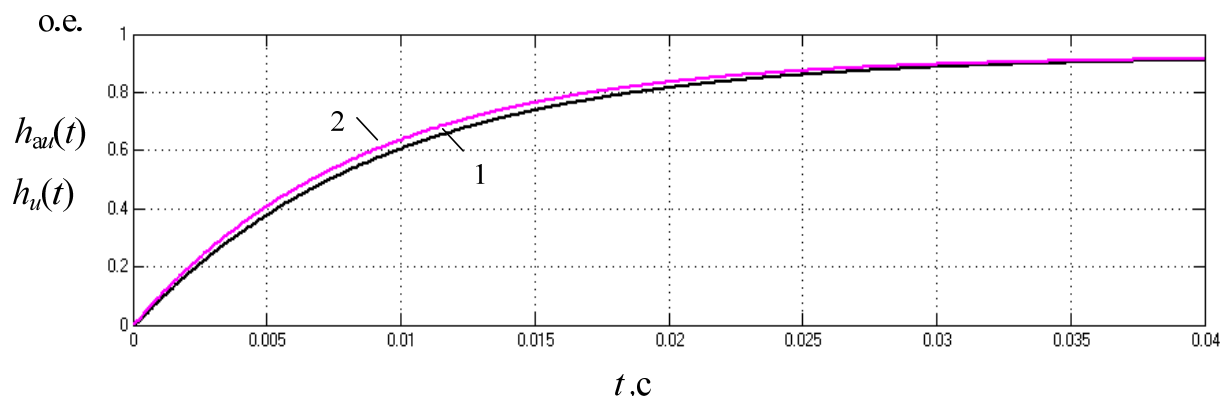


Рисунок 13 – Экспериментальная $h_u(t)$ (кривая 1) и переходная $h_{au}(t)$ (кривая 2) характеристики, полученные в результате аппроксимации методом площадей для СЭП 47 кВт

При выборе характеристического полинома рассматривались следующие типы передаточных функций: с одинаковыми полюсами; с одинаковой вещественной частью; с полиномами Баттерворта. Все эти передаточные функции не имеют нулей, их числители являются константами, что позволяет обеспечить простоту реализации синтезируемого регулятора. Коэффициенты полиномов пересчитывались при варьировании времени регулирования для выбора оптимального переходного процесса.

Проведенные исследования показали, что для дальнейшего синтеза регулятора наиболее приемлемыми являются передаточные функции с одинаковыми полюсами, представленные характеристическим полиномом второго порядка с временем регулирования 0,02 с, а также полином Баттерворта второго порядка при частоте среза 250 рад/с.

Для выбранных характеристических полиномов желаемой передаточной функции проведена проверка физической осуществимости синтезируемого регулятора и составлена передаточная функция регулятора, обеспечивающего желаемое расположение корней характеристического уравнения замкнутой системы:

$$W_p(s) = \frac{R^-(s) M(s)}{P^-(s) N(s)s^r}, \quad (31)$$

где $P^-(s)$, $R^-(s)$ – полиномы ПФ объекта с левыми нулями; $P^+(s)$, $R^+(s)$ – полиномы ПФ объекта с правыми и нейтральными нулями; r – порядок относительно возмущения, определяющий порядок астатизма синтезируемой системы; $M(s)$, $N(s)$ – неопределенные полиномы, коэффициенты которых находятся из полиномиального уравнения:

$$P^+(s)M(s) + R^+(s)N(s)s^r = G(s), \quad (32)$$

где $G(s)$ – знаменатель желаемой передаточной функции.

Для определенных ранее передаточных функций разомкнутой СЭП синтезированы регуляторы, в основу которых положены передаточные функции с одинаковыми полюсами и функции, построенные на полиномах Баттерворта. Работа полученных регуляторов проверялась на имитационной модели системы электропитания. Как показали эксперименты, приемлемое качество переходного процесса обеспечивает регулятор, построенный на полиноме Баттерворта при частоте среза 250 рад/с. В результате проведенных исследований установлено, что один регулятор не позволяет отработать весь диапазон изменения нагрузки и обеспечить требуемое качество стабилизации напряжения.

В работе предложено использовать регулятор с перенастраиваемыми параметрами в соответствии с нагрузочными режимами работы СЭП. Для СЭП мощностью 47 кВт осуществлен синтез двух регуляторов, при этом первый регулятор работает в режиме пониженных нагрузок при изменении сопротивления от $10R_{\text{нном}}$ до $3R_{\text{нном}}$, второй обеспечивает стабилизацию напряжения при изменении R_n от $2,9R_{\text{нном}}$ до $0,95R_{\text{нном}}$.

На рисунке 14 представлена кривая напряжения на нагрузке, стабилизация которого осуществляется регулятором с переменными параметрами, синтезированным на основании полиномов Баттерворта с частотой среза 250 рад/с для СЭП мощностью 47 кВт.

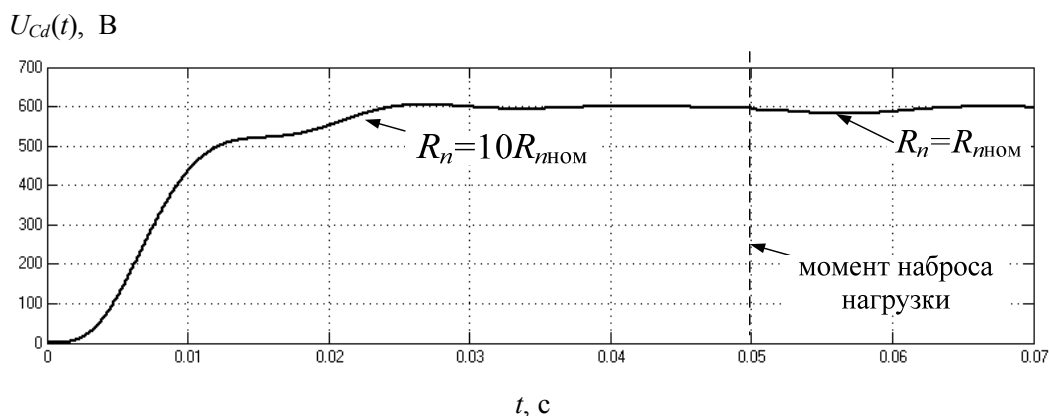


Рисунок 14 – Напряжение на нагрузке при действии регулятора с изменяющимися параметрами при изменении нагрузки от холостого хода до номинального значения (СЭП 47 кВт)

При моделировании принималось, что включение системы электропитания происходит в режиме, близком к холостому ходу, $R_n = 10R_{нном}$, при этом регулятор, настроенный на данный режим, стабилизирует напряжение в соответствии с заданными требованиями. Затем в момент времени $t = 50$ мс нагрузка увеличивается до номинального значения, параметры регулятора изменяются и начинается новый процесс стабилизации. Для данного режима величина перерегулирования составляет меньше 10 %, а через 20 мс после подключения номинальной нагрузки точность стабилизации составляет 98 %. Так, первый регулятор, настроенный на режим пониженных нагрузок, позволяет стабилизировать напряжение при изменении нагрузки от $10R_{нном}$ до $3R_{нном}$ с погрешностью от 1 до 10 %. Второй регулятор, настроенный на режим номинальных нагрузок, сопротивление которых меняется от $2,9R_{нном}$ до $0,95R_{нном}$, обеспечивает заданные требования к стабилизации напряжения, при этом погрешность через 10 мс после начала переключения не превышает 10 %.

Более эффективная стабилизация выходных переменных объекта управления по сравнению с модальным регулятором обеспечивается классическим ПИД-регулятором или его модификацией. Так для структуры СЭП с ПИ-регулятором в форме отрицательной обратной связи (рисунок 15) можно записать модифицированную модель замкнутой системы с регулированием выходного напряжения $U_{Cd}(t)$.

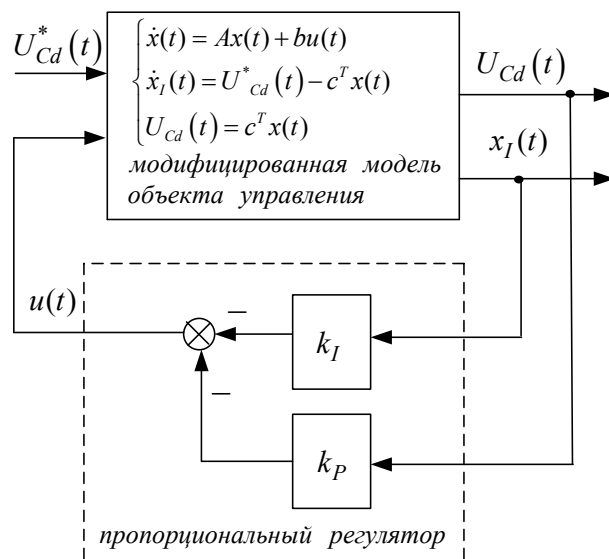


Рисунок 15 – Структурная схема СЭП с модифицированной моделью и ПИ-регулятором

Рассматривая СЭП мощностью 47 кВт при ее работе в режиме, близком к холостому ходу ($R_n = 10R_{нном}$), и коэффициенте модуляции АИН $k_m = 0,7$, можно записать ее передаточную функцию:

$$W(s) = \frac{1,69}{1,1 \cdot 10^{-5} s^2 + 1,57 \cdot 10^{-2} s + 1}. \quad (33)$$

По данной передаточной функции записывается система дифференциальных уравнений в форме Коши и определяются матрицы A и b параметров линеаризованной модели объекта управления:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0,9 \cdot 10^5 & -1427 \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1,53 \cdot 10^5 \end{bmatrix}. \quad (34)$$

Для нахождения коэффициентов передачи k^T оптимального регулятора используется уравнение Риккати:

$$Pbr^{-1}b^T P - PA - A^T P - Q = 0, \quad (35)$$

где $Q = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 \\ 0 & q_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00072 & 0 \\ 0 & 0,00015 \end{bmatrix}$ – матрица штрафных коэффициентов; $r = 0,001$ –

штрафной коэффициент, при увеличении которого динамика системы становится менее форсированной и переходные процессы затягиваются.

При выборе коэффициентов штрафа учитывалось, что с увеличением коэффициента q_{11} усиливается эффект действия пропорциональной составляющей оптимального регулятора, а с увеличением q_{22} – интегральной составляющей.

Коэффициенты регулятора найдены из выражения $k^T = r^{-1}b^T P$ и для заданных коэффициентов штрафа соответствуют $k_1 = 0,44$, $k_2 = 0,36$. Включение в структурную схему СЭП оптимального регулятора с рассчитанными коэффициентами позволяет стабилизировать напряжение на нагрузке, сопротивление которой меняется от $R_n = 10R_{нном}$ до $R_n = 3,4R_{нном}$, при отклонении напряжения $U_{Cd}(t)$ от номинального за период времени $t_p = 20$ мс от начала переходного процесса в пределах от 0 до 10 % соответственно. При дальнейшем снижении нагрузки погрешность стабилизации увеличивается, что является недопустимым. Для построения регулятора, обеспечивающего требуемое качество напряжения при номинальном режиме работы СЭП, была определена передаточная функция разомкнутого объекта (номинальная нагрузка и коэффициент модуляции АИН, равный 0,7):

$$W(p) = \frac{0,923}{8,7 \cdot 10^{-7} s^2 + 0,0093s + 1}. \quad (36)$$

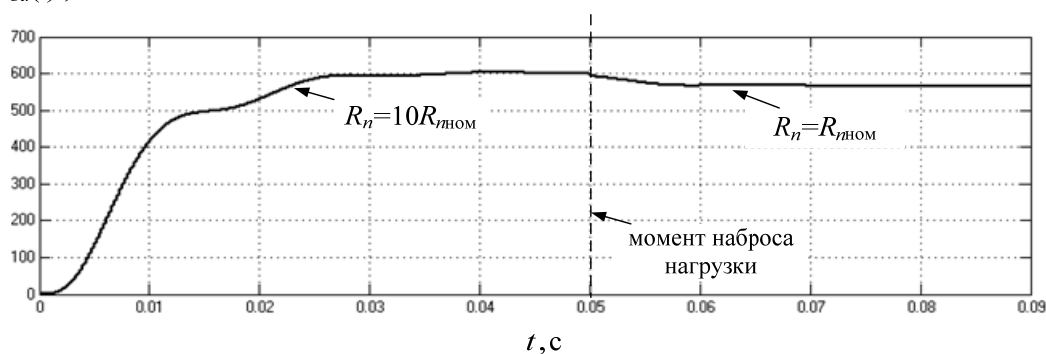
При синтезе регулятора с выбранной передаточной функцией и коэффициентами штрафа $q_{11} = 0,000095$, $q_{22} = 0,0001$, $r = 0,001$ рассчитаны коэффициенты $k_{12} = 0,048$, $k_{22} = 0,04$. Синтез регулятора с полученными коэффициентами позволяет стабилизировать напряжение при изменении сопротивления нагрузки в пределах от $R_n = 1,4R_{нном}$ до $R_n = 0,95R_{нном}$ при отклонении напряжения $U_{Cd}(t)$ от номинального от 9 до 9,3 % соответственно. Для стабилизации напряжения при изменении нагрузки в пределах от $R_n = 3,3R_{нном}$ до $R_n = 1,5R_{нном}$ необходимо введение третьего регулятора с параметрами $k_{13} = 0,285$, $k_{33} = 0,09$.

Таким образом, для стабилизации напряжения во всем диапазоне изменения нагрузки необходимо использовать три оптимальных регулятора, каждый из которых будет работать в своем диапазоне регулирования.

На рисунке 16,*а* представлены результаты работы комбинированного оптимального регулятора при включении системы в режиме холостого хода (регулятор, настроенный на режим малых нагрузок) и последующем подключении номинальной нагрузки (регулятор, настроенный на номинальный режим). Рисунок 16,*б* иллюстрирует работу комбинированного регулятора при подключении нагрузки с сопротивлением $R_n = 2R_{нном}$, при этом стабилизация напряжения осуществляется регулятором с параметрами $k_{13} = 0,285$, $k_{33} = 0,09$. В обоих случаях подключение нагрузки происходило в момент времени 50 мс и погрешность стабилизации составляла менее 10 % от заданного напряжения, соответствующего значению 600 В.

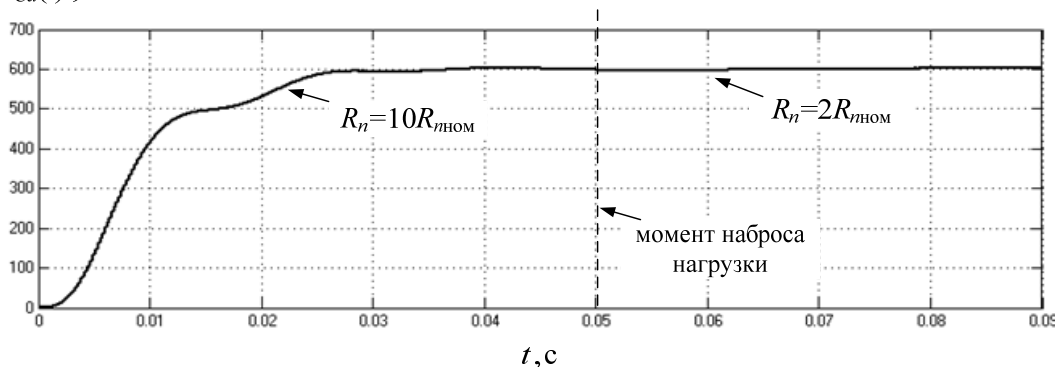
На рисунке 17 представлена схема комбинированного оптимального регулятора, позволяющего стабилизировать напряжение на нагрузке СЭП при непосредственном снятии данных с RLC -фильтра (Ф2), расположенного после автономного инвертора напряжения. Напряжение U_{ϕ} , снимаемое с фильтра Ф2, выпрямляется выпрямителем В2 и сглаживается фильтром Ф4, емкость которого составляет 20 мкФ. Коэффициенты регуляторов были скорректированы и составляли: $k_1 = 0,58$, $k_2 = 0,36$, $k_{12} = 0,05$, $k_{22} = 0,005$, $k_{13} = 0,33$, $k_{33} = 0,15$.

$U_{cd}(t)$, В



а

$U_{cd}(t)$, В



б

Рисунок 16 – Напряжение на нагрузке при действии комбинированного оптимального регулятора: *а* – изменение R_n от $10R_{нном}$ до $R_{нном}$; *б* – изменение R_n от $10R_{нном}$ до $2R_{нном}$

При проведении исследований принималось, что математическая модель системы электропитания является линейной, следовательно, в установившихся режимах работы напряжение на нагрузке и выпрямленное напряжение с фильтра Ф4 связаны линейным соотношением. Экспериментальным путем был определен коэффициент

линейной связи $k_u=42$, который использовался при синтезе оптимального регулятора для пересчета изменения напряжения на нагрузке по измеренному выпрямленному напряжению фильтра $\Phi 4$ (см. рисунок 17).

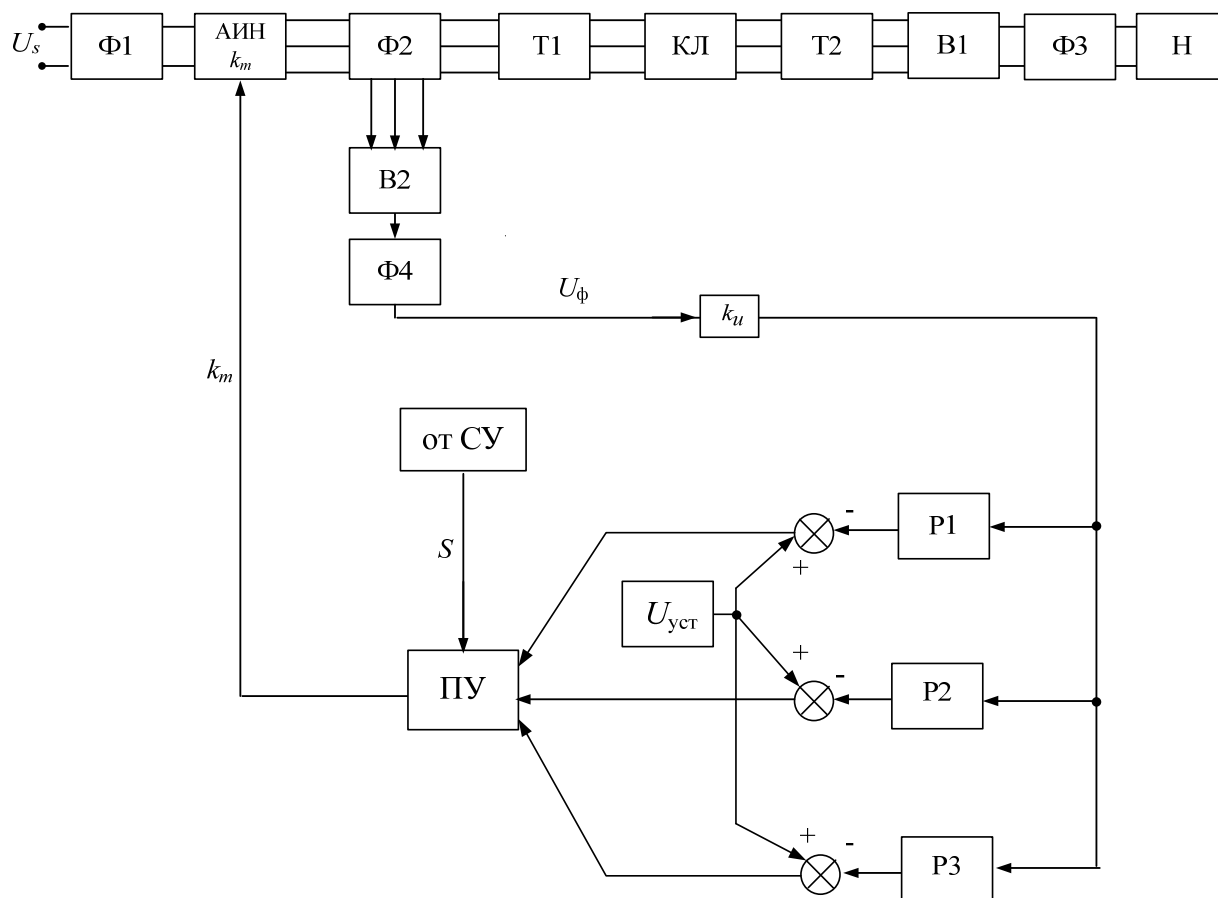


Рисунок 17 – Схема комбинированного оптимального регулятора при снятии данных с фильтра АИН

Первый регулятор P1 с коэффициентами $k_1 = 0,58$, $k_2 = 0,36$ настроен на стабилизацию напряжения в режиме, близком к холостому ходу, а также обрабатывает режим малых нагрузок. Данный регулятор работает во время запуска системы, позволяя быстро и эффективно стабилизировать напряжение на нагрузке, а также при изменении нагрузки от $R_n = 10R_{нном}$ до $R_n = 3,5R_{нном}$. В рабочих режимах системы функционируют регуляторы P2 и P3, при этом регулятор P2 с параметрами $k_{12} = 0,05$, $k_{22} = 0,005$ настроен на стабилизацию напряжения при изменении сопротивления нагрузки от $R_n = 0,95R_{нном}$ до $R_n = 1,4R_{нном}$ (нагрузки, близкие к номинальной), а регулятор P3 обрабатывает режимы пониженных нагрузок от $R_n = 1,5R_{нном}$ до $R_n = 3,4R_{нном}$. Переключение регуляторов производится в соответствии с сигналом S, поступающим от системы управления (СУ).

На рисунке 18 представлены кривые напряжения на нагрузке при действии предложенного комбинированного регулятора. Система электропитания запускается в режиме холостого хода, а затем при выходе на установившийся режим работы в момент времени 50 мс подключается нагрузка с сопротивлением $R_n = 1,2R_{нном}$. При этом СУ производит переключение регуляторов: действующий регулятор P1 отключается и в работу включается регулятор P2, настроенный на режим нагрузок, близких к номинальной. В момент времени $t=80$ мс происходит уменьшение нагрузки системы

до $R_n = 1,8R_{нном}$, при этом СУ выдает сигнал на отключение действующего регулятора Р2 и в работу включается регулятор Р3, настроенный на режим малых нагрузок. Во всех режимах работы погрешность стабилизации не превышает 7 %.

$U_{cd}(t)$, В

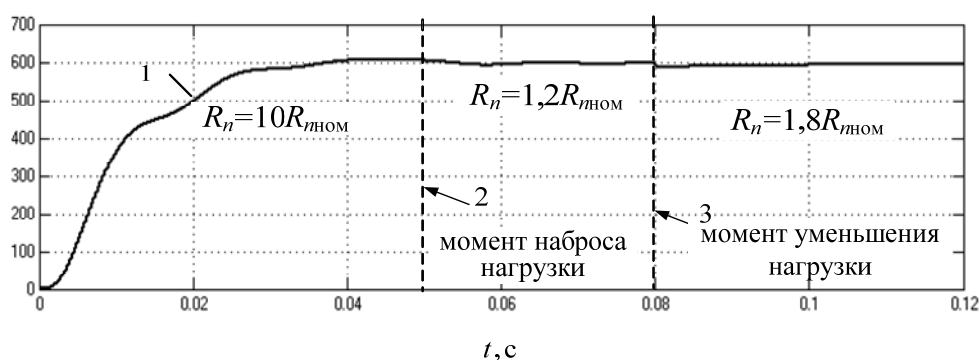


Рисунок 18 – Напряжение на нагрузке при действии комбинированного оптимального регулятора в системе мощностью 47 кВт и снятии данных с фильтра АИН: 1 – режим пуска; 2 – работа регулятора, настроенного на режим номинальных нагрузок, $R_n = 1,2R_{нном}$; 3 – работа регулятора, настроенного на режим пониженных нагрузок, $R_n = 1,8R_{нном}$

Таким образом, комбинированный оптимальный регулятор позволяет стабилизировать напряжение на нагрузке в заданных пределах при возможности измерения данных только в промежуточных точках схемы. Это обусловлено допущением о линейности рассматриваемой системы. При более точном описании необходимо учитывать нелинейность системы электропитания, обусловленную, в частности, влиянием гистерезиса в трансформаторах. При этом коэффициенты пересчета, связывающие текущие значения напряжения, снимаемого с фильтра АИН, и напряжения на нагрузке, будут выражаться нелинейными зависимостями.

Четвертая глава посвящена выявлению особенностей конструкции кабель-троса, обоснованию выбора величины напряжения и частоты при передаче энергии по кабель-тросу на переменном токе, а также определению токовой нагрузки жил при заданной передаваемой мощности с учетом собственной емкости кабель-троса.

Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе и надводный корабль (судно-носитель), как было отмечено ранее, соединены друг с другом трехфазным кабель-тросом (см. рисунок 8), содержащим, по крайней мере, три токопроводящих жилы для передачи на ТНПА трехфазного питающего напряжения. Источником питающего напряжения обычно является управляемый автономный инвертор напряжения, вырабатывающий трехфазное напряжение повышенной частоты. Конструктивно кабель-трос изготовлен в виде двухслойной намотки в противоположных направлениях вокруг кабеля стальных проволок, выполняющих для проводников кабеля роль экранирующей оплетки. Этот экран служит одновременно и броней кабель-троса, он электрически соединен с корпусом корабля и корпусом ТНПА. Силовые жилы кабель-троса имеют относительно друг друга и относительно брони паразитную емкость, которая является дополнительной нагрузкой емкостного характера для инвертора. В рабочем режиме вследствие обжатия кабеля броней и гидростатическим давлением происходит увеличение этих паразитных емкостей.

Для минимизации токовой нагрузки и определения оптимального напряжения в кабель-тросе проанализирована работа реального кабель-троса, имеющего паразитные емкости токопроводящих жил между собой и относительно броневой оплетки.

При анализе считали трехфазную систему питающих напряжений и кабель-трос симметричными, а нагрузку равномерной по фазам. При условии симметрии питания кабель-троса и нагрузки достаточно исследовать формирование тока в одной фазе кабеля, так как во всех трех фазах процесс формирования тока происходит аналогично.

Схема СЭП ТНПА с однозвенной схемой замещения кабель-троса приведена на рисунке 19. На рисунке 20 показана векторная диаграмма напряжений и токов для схемы, представленной на рисунке 19.

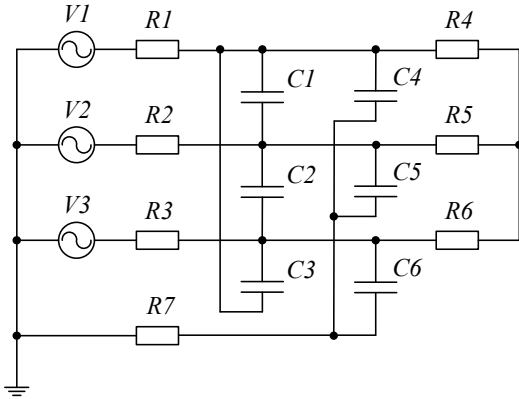


Рисунок 19 – Однозвенная схема замещения кабель-троса

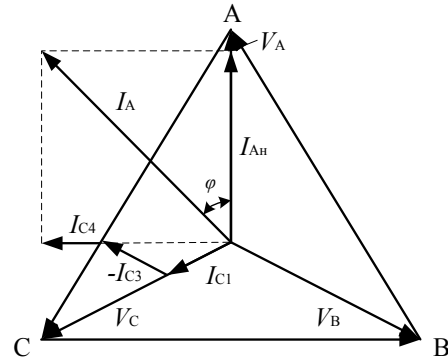


Рисунок 20 – Векторная диаграмма напряжений и токов однозвенной схемы замещения кабель-троса

Емкостной ток $I_{Aемк}$ фазы A равен векторной сумме трех токов, протекающих через паразитные емкости $C1, C3, C4$:

$$I_{Aемк} = I_{C1} + (-I_{C3}) + I_{C4}. \quad (37)$$

Полный ток I_A , потребляемый кабель-тросом по фазе A , определяется векторной суммой тока нагрузки I_{AH} и емкостного тока $I_{Aемк}$:

$$I_A = I_{AH} + jI_{Aемк}. \quad (38)$$

После преобразования выражения (38) через реактивные сопротивления получаем выражение для фазного тока I_A :

$$I_A = \frac{P_H}{V_\phi} + j4 \frac{V_\phi}{X_\phi}. \quad (39)$$

Выражение (39) позволяет построить семейство характеристик $I_A = f(V_\phi)$ для ряда значений P_H . Модуль фазного тока I_A , равный длине вектора I_A (см. рисунок 20), определяется выражением:

$$|I_A| = \sqrt{\left(\frac{P_H}{V_\phi}\right)^2 + \left(4 \frac{V_\phi}{X_\phi}\right)^2}. \quad (40)$$

В подкоренном выражении (40) первое слагаемое обратно пропорционально напряжению V_ϕ , второе слагаемое прямо пропорционально ему. Сумма этих слагаемых имеет минимум при $V_\phi = V_{\phi.эфф}$:

$$V_{\phi.эфф} = \sqrt{P_H X_\phi / 4}. \quad (41)$$

При мощности на фазе 20 кВт и $X_\phi = 191,2$ Ом согласно формуле (41) $V_{\phi.эфф} = 978$ В. Подставив выражение (41) в (40), получим формулу для расчета мини-

мальной величины фазного тока $I_{A\min}$, который потребляется по кабель-тросу при эффективном фазном напряжении $V_{\phi.\text{эфф}}$ и передаваемой мощности P_H :

$$I_{A\min} = \sqrt{8P_H/X_\phi}. \quad (42)$$

При вышеуказанных параметрах (P_H , X_ϕ) согласно равенству (42) ток $I_{A\min} = 28,9$ А.

Режим работы кабель-троса при $V_{\phi.\text{эфф}}$ является эффективным, так как обеспечивает минимальный ток в жилах кабель-троса. Полную мощность S , потребляемую каждой фазой кабель-троса в этом режиме, можно определить как:

$$S = V_{\phi.\text{эфф}} I_{A\min} = 2P_H. \quad (43)$$

Из выражения (43) следует, что при работе кабель-троса в эффективном режиме потребляемая им полная мощность S численно равна удвоенной мощности нагрузки.

Используя выражение (40), можно построить вольт-амперную характеристику (ВАХ) $I_A = f(P_H, V_\phi)$ для ряда значений мощности P_H . На рисунке 21 представлена ВАХ для мощности нагрузки на одну фазу $P_H = 20$ кВт.

Построенная ВАХ показывает, что при фазном напряжении 978 В потребляемый кабель-тросом ток при передаваемой мощности 20 кВт на фазу имеет наименьшее значение. Поэтому данный режим передачи электроэнергии можно считать эффективным.

Наиболее важным и значимым параметром для СЭП глубоководных ТНПА является массогабаритный показатель ее подводной части (ПЧ). Уменьшение массы и габаритов ПЧ СЭП позволяет расположить большее количество аппаратуры на ее борту. Увеличение частоты напряжения ведет к уменьшению массы и габаритов ПЧ СЭП по экспоненциальному закону. Габариты СЭП ТНПА в основном определяют намоточные элементы (входной трехфазный понижающий трансформатор составляет до 80 % от общих габаритов и массы ПЧ СЭП) и с увеличением частоты массогабаритные показатели трансформаторов и дросселей существенно улучшаются.

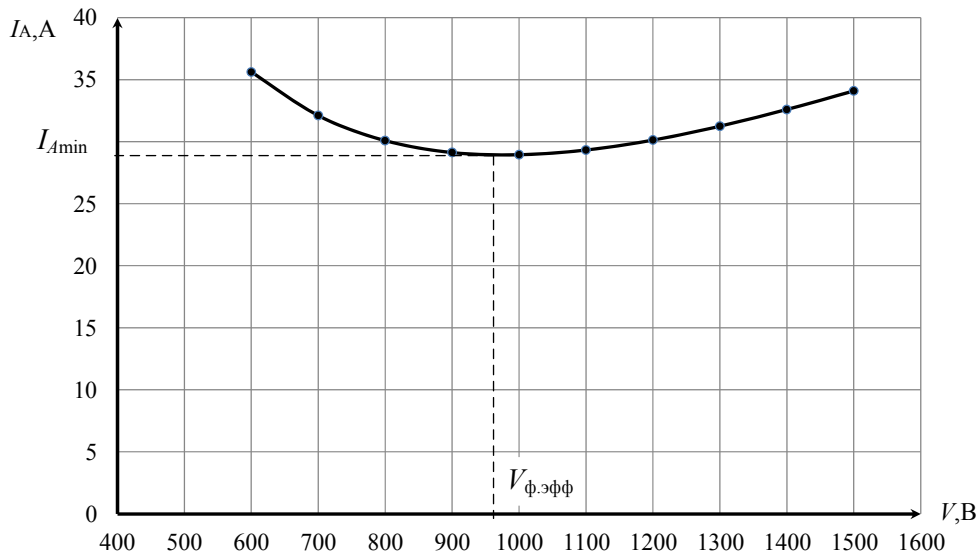


Рисунок 21 – Вольт-амперная характеристика кабель-троса

Однако необходимо учитывать частоту модуляции автономного инвертора напряжения, расположенного в БЧ СЭП. Увеличение частоты модуляции f_{sw} уменьшает индуктивность дросселей, но при низких значениях индуктивности

автономный инвертор напряжения начинает работать в режиме прерывистых токов, что, конечно, недопустимо. Большая величина индуктивности приводит к необоснованному увеличению массогабаритных показателей, но она необходима для обеспечения приемлемых пульсаций тока и для того, чтобы осуществлять контроль выходного тока АИН. В случае СЭП ТНПА отправной точкой является малая масса и габариты дросселя LC -фильтра и повышающего трансформатора, который будет находиться в БЧ СЭП. Поэтому следует использовать высокую частоту модуляции. В итоге существует некое приемлемое значение частоты напряжения в зависимости от структуры СЭП ТНПА, при котором динамические потери, величина индуктивности дросселя, масса и габариты трансформаторов и кабель-троса находятся в балансе. Для структуры СЭП ТНПА с кабель-тросом длиной до 6000 м, представленной на рисунке 4, приемлемой величиной частоты напряжения в кабель-тросе является 1000 Гц при частоте ШИМ АИН 48 кГц.

Увеличение удельной мощности подводной части и повышение ее надежности при передаче энергии на переменном токе повышенной частоты возможно и за счет минимизации дополнительных потерь в кабель-тросе, обусловленных емкостным током.

Традиционные средства компенсации и регулирования реактивной мощности в электрических сетях – это синхронные компенсаторы (СК) и статические тиристорные компенсаторы (СТК). Очевидно, что использование таких устройств в СЭП ТНПА невозможно из-за габаритов, а также дополнительных потерь. Вместе с тем возможно применение компенсирующих индукторов, устанавливаемых на концах кабель-троса (рисунок 22). Но подобные решения приводят к увеличению веса и габаритов систем электропитания телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов. Впрочем, существует иной подход, позволяющий без введения дополнительных внешних компенсирующих устройств (индукторов и т.п.) достичь увеличения передаваемой мощности по кабель-тросу с сохранением ограничений по габаритам и массе системы.

В качестве компенсирующих дросселей можно использовать трансформаторы бортовой и подводной частей системы электропитания, для чего сердечники трансформаторов необходимо изготавливать из аморфных магнитомягких сплавов, магнитные проницаемости которых μ_1 и μ_2 соответственно выбираются из условия

$$Q_{\mu 1 \text{Тр}} \approx Q_{\mu 2 \text{ТрТНПА}} \approx 0,5 Q_{\text{К}}, \quad (44)$$

где $Q_{\mu 1 \text{Тр}}$ – реактивная мощность трансформатора бортовой части системы, ВАр;
 $Q_{\mu 2 \text{ТрТНПА}}$ – реактивная мощность трансформатора подводной части системы, ВАр;
 $Q_{\text{К}}$ – реактивная мощность в кабель-тросе, обусловленная емкостным током, ВАр.

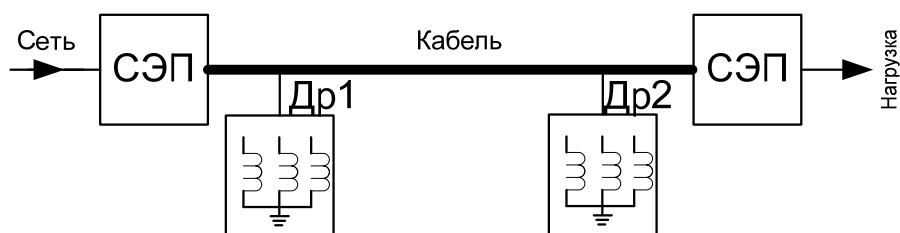


Рисунок 22 – Система передачи энергии по длинному кабелю с внешними индукторами

Такое совмещение компенсирующих индуктивностей и трансформаторов позволяет почти в два раза снизить суммарные массогабаритные характеристики устройства по сравнению с использованием отдельных индукторов, добавленных в систему, в которой трансформаторы являются необходимыми элементами, несмотря

на то что приходится несколько увеличить сечение провода обмоток. Поскольку в рассматриваемых системах подводная часть разделена на гараж-заглубитель и подводный аппарат, а также мощность подводного аппарата существенно превышает мощность заглубителя, целесообразно всю компенсирующую индуктивность подводной части системы сосредоточить в трансформаторе заглубителя.

При суммарной мощности нагрузок гаража-заглубителя и подводного модуля до 60 кВт и сечении жил кабеля не менее $6,0 \text{ мм}^2$ увеличение частоты в большей степени ограничивает не перегрузка кабель-троса по току, а возрастание реактивной мощности, «потребляемой» емкостью кабель-троса, что ведет к росту потерь в нем и, следовательно, к увеличению мощности бортовой части системы электропитания, кроме того, увеличивается мощность компенсации, «нейтрализующая» реактивную мощность кабель-троса.

Таким образом, компенсация реактивной мощности кабель-троса позволяет «разгрузить» по реактивной мощности трехфазный автономный инвертор напряжения, преобразующий выпрямленное напряжение судовой сети в трехфазное напряжение переменного тока повышенной частоты, т.е. не увеличивать полную мощность автономного инвертора напряжения.

Пятая глава посвящена проектированию конструкции погружного трехфазного трансформатора (ПТр_{ТНПА}) для электротехнического комплекса системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата, а также методики теплового расчета при охлаждении в различных средах с целью обеспечения нормального теплового режима в процессе эксплуатации и компенсации реактивной мощности кабель-троса.

На рисунке 23 представлен эскиз погружного трехфазного трансформатора СЭП ТНПА мощностью 30 кВт. ПТр_{ТНПА} состоит из трех однофазных тороидальных трансформаторов, соединенных в трехфазную систему по схеме «звезда-звезда», помещенных в цилиндрический металлический герметичный бак, заполненный маслом «Пента-ТРМС-110». Для выводов используется герморазъем, а бак имеет мембрану от повышения давления за счет объемного расширения теплоносителя.

Для разработанной конструкции ПТр_{ТНПА} с масляной заливкой составлена тепловая схема замещения (рисунок 24), на основании которой проведен анализ и расчет тепловых режимов работы ПТр_{ТНПА}.

Из анализа полной эквивалентной тепловой схемы ПТр_{ТНПА} определены основные этапы методики теплового расчета тороидального трехфазного трансформатора ТНПА с масляным заполнением:

- определение среднеповерхностной температуры корпуса герметичного бака в зависимости от условий охлаждения;
- расчет среднеповерхностной температуры тепловой модели ПТр_{ТНПА} и средней температуры масла в прослойках;
- корректировка ЭТС ПТр_{ТНПА}, расчет тепловых сопротивлений;
- уточнение средних температур масла и среднеповерхностных температур однофазных трансформаторов;
- расчет геометрических параметров эквивалентного однофазного трансформатора;
- определение максимальных температур обмоток и среднеповерхностных температур сердечников однофазных трансформаторов;
- оценка полученных результатов теплового расчета.

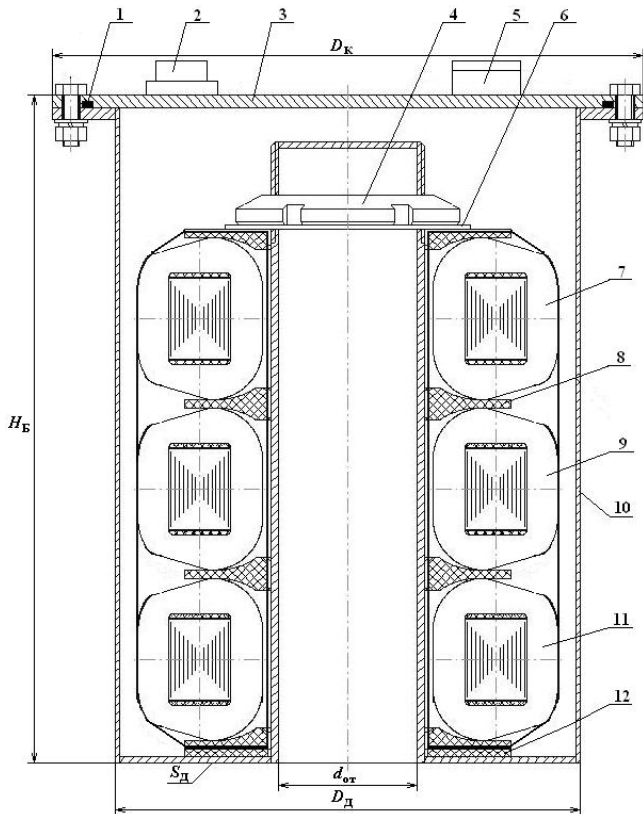


Рисунок 23 – Эскиз погружного трансформатора ТПА:

1 – резиновая прокладка; 2 – герморазъем; 3 – крышка; 4 – гайка; 5 – мембрана; 6 – шайба; 7, 9, 11 – трансформаторы Tr_1, Tr_2, Tr_3 ; 8, 12 – стеклотекстолитовая шайба; 10 – бак

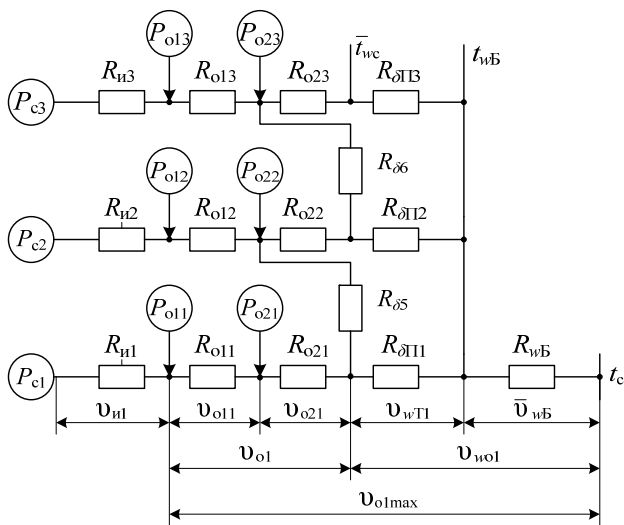


Рисунок 24 – Тепловая схема замещения

ПТр_{ТПА}: D_k – диаметр крышки бака; D_d – диаметр дна бака; $d_{от}$ – диаметр отверстия бака; H_B – высота бака; S_d – площадь дна бака; $R_{и1}, R_{и2}, R_{и3}$ – тепловые сопротивления изоляции магнитопроводов; $R_{о1i}, R_{о2i}$ – тепловое сопротивление первичной и вторичной обмоток i -го трансформатора; $R_{вБ}$ – тепловое сопротивление системы бак – окружающая среда; $R_{дП}$ – тепловое сопротивление жидкостных прослоек

По разработанной методике теплового расчета были рассчитаны перегревы бака, нагретой зоны тепловой модели и первичной обмотки на границе с магнитопроводом.

Далее было проведено сравнение результатов расчета и эксперимента и определена величина относительной погрешности методики для основных узлов ПТр_{ТПА} (таблица 1). Индексы в графе P_{Ti}/P_H означают номер эксперимента при выставленной нагрузке.

По результатам расчета относительной погрешности (количество расчетных точек $N=123$) видно, что расхождение расчетных и экспериментальных данных лежит в пределах 14 %, а для подавляющего числа точек (86 %) относительная погрешность не превышает 10 %. Это позволяет рекомендовать данную методику для практического использования.

Таблица 1 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных при охлаждении ПТ_{ТНПА} водой

P_{Ti}/P_n	P_{Ti} , Вт	$t_{вс}$, °С	\bar{U}_{wBr} , °С	$\bar{U}_{wBэ}$, °С	$\delta_{wBэ}$, %	$\bar{U}_{wMр}$, °С	$\bar{U}_{wMэ}$, °С	$\delta_{wMэ}$, %	U_{Opmax} , °С	$U_{Oэmax}$, °С	$\delta_{Oэ}$, %
XX ₁	156	21	2,6	2,5	0,28	24,5	22,5	5,66	40,1	35,3	13,59
XX ₂	156	15,3	2,7	4,1	-3,8	24,6	26,4	-7,86	40,3	36,9	8,94
0,2 ₁	168,02	17,0	2,6	2,6	0	25,8	27,2	-3,08	43,2	45,5	-4,83
0,2 ₂	167,96	14,3	2,9	3,5	-1,28	24,9	29,4	-7,05	44	46,8	-5,98
0,4 ₁	199,04	15	3,2	4,7	-2,7	30,2	34,5	-7,73	51,6	55,6	-7,19
0,4 ₂	204,67	14,2	3,4	3,8	-0,75	31,7	32,7	-1,87	53,6	53,3	0,56
0,6 ₁	270,43	17	3,8	3,5	0,44	42,4	42,3	-0,15	71,5	68,8	3,92
0,6 ₂	270,43	14,7	3,7	4,2	0,74	42,3	43,1	-1,18	71,4	67,7	5,46
0,8	369,9	16,8	4,9	6,3	-1,88	52,5	55,3	-3,3	92,2	84,6	8,98
1,0	507,13	19	5,8	7,2	-1,5	68,1	65,7	3,34	112,7	107,7	4,64

P_{Ti} – текущие значения мощности рассеяния трансформатора; P_n – мощность рассеяния в номинальном режиме; \bar{U}_{wBr} , $\bar{U}_{wBэ}$, $\bar{U}_{wMр}$, $\bar{U}_{wMэ}$, U_{Op} , $U_{Oэ}$ – расчетные и экспериментальные перегревы бака, нагретой зоны тепловой модели и первичной обмотки на границе с магнитопроводом соответственно.

В шестой главе представлены варианты систем электропитания глубоководного телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном и постоянном токе, реализованных по модульному принципу, которые позволяют обеспечить необходимую мощность от 10 до 47 кВт путем подключения унифицированных модулей, а также заданные удельные характеристики части СЭП, расположенной на борту подводного аппарата.

Функциональная схема СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе повышенной частоты представлена на рисунке 25. Бортовая часть СЭП ТНПА состоит из шкафа питания (ШП), блока преобразователя (БП), блока коммутации (БК), пульта дистанционного управления (ПДУ). Подводная часть СЭП ТНПА состоит из СЭП гаража-заглубителя (СЭП ГЗ) и системы, располагающейся непосредственно на борту ТНПА (СЭП ТНПА).

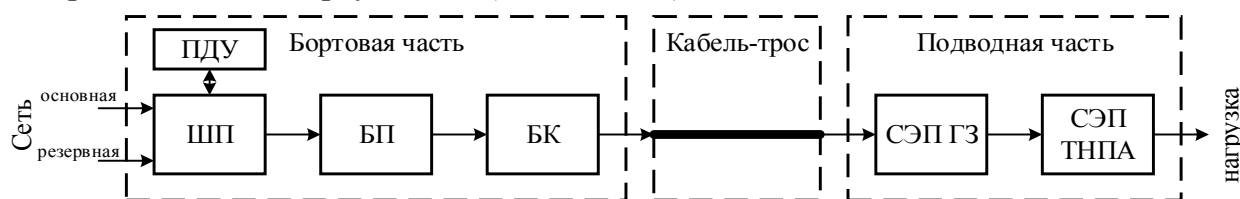


Рисунок 25 – Функциональная схема СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе

Энергоснабжение СЭП ТНПА осуществляется от основной или резервной бортовой сети трехфазного напряжения 380 В частотой 50 Гц. БЧ СЭП обеспечивает на выходе трехфазное напряжение частотой 1000 Гц для подачи в кабель-трос с линейным напряжением, не превышающим 1500 В при максимальной нагрузке в ПЧ, равной 47 кВт; стабилизацию напряжения на входе ПЧ в пределах $\pm 5\%$ от номинального напряжения с учетом падения напряжения на кабель-тросе при максимальной нагрузке; регулировку системы компенсации потерь в кабель-тросе при изменении сопротивления токопроводящей жилы в пределах от 2,0 до 19,2 Ом; управление и информационный обмен в режиме дистанционного управления (ДУ) от пульта дистан-

ционного управления; контроль выходного напряжения и сопротивления изоляции с индикацией и протоколированием данных.

Техническая реализация СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе концептуально аналогична представленной ранее СЭП ТНПА на переменном токе и разделена на две основные части: бортовую и подводную.

Функциональная схема СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе представлена на рисунке 26. БЧ СЭП состоит из шкафа питания (ШП), блока преобразователя (БП), пульта дистанционного управления (ПДУ).

Энергоснабжение СЭП ТНПА осуществляется от основной или резервной бортовой сети трехфазного напряжения 380 В частотой 50 Гц. БЧ СЭП обеспечивает на выходе напряжение постоянного тока для подачи в кабель-трос, не превышающее 2100 В при максимальной нагрузке в ПЧ, равной 47 кВт, и стабилизацию напряжения на входе в ПЧ в пределах $\pm 5\%$ от номинального значения; регулировку системы компенсации потерь в кабель-тросе при изменении длины и, соответственно, сопротивления токопроводящей жилы в пределах от 2,0 до 23,3 Ом; управление и информационный обмен в режиме дистанционного управления от пульта дистанционного управления; контроль выходного напряжения и сопротивления изоляции с индикацией и протоколированием данных.

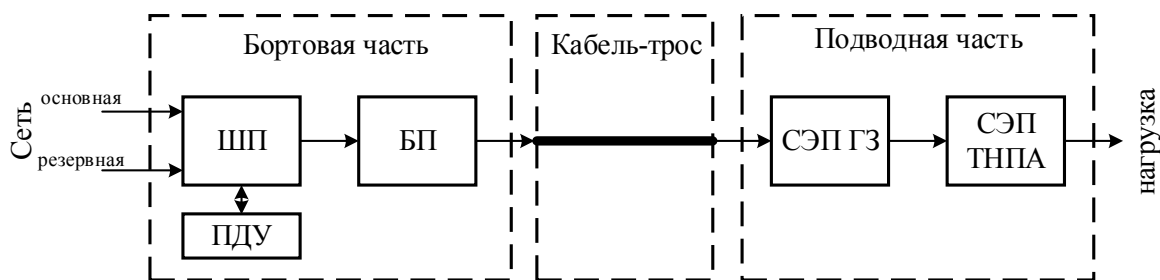


Рисунок 26 – Функциональная схема СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе

Таким образом, в предложенных системах электропитания телеуправляемого подводного аппарата используется принцип дублирования и автоматического перехода с основной сети питания на резервную, осуществляется диагностика основных электрических параметров (перенапряжение, короткое замыкание, контроль заземления, аварийное срабатывание контакторов и т.д.) с протоколированием и выводом данных на экран монитора, реализован автономный и дистанционный режим работы. Отличительной чертой СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе является то, что за счет сосредоточения компенсирующих индуктивностей в трансформаторах бортовой части и подводной части удалось улучшить удельные характеристики в 1,5–2 раза по сравнению с использованием отдельных индукторов и трансформаторов, а расположение системы стабилизации напряжения в бортовой части позволило обеспечить удельные характеристики системы электропитания, расположенной непосредственно на борту подводного аппарата, не менее 2,5 Вт/кг, что сопоставимо с мировыми показателями.

Седьмая глава посвящена экспериментальным исследованиям системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе.

Важным этапом при проектировании СЭП ТНПА являются экспериментальные исследования, для которых был разработан макетный образец системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата мощностью 47 кВт, позволяющий сни-

мать характеристики выходных электрических параметров при изменении нагрузки от холостого хода до номинального значения.

СЭП, как отмечалось ранее, предназначена для энергообеспечения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата по кабелю длиной до 6000 м, а также для преобразования и распределения энергии внутри подводного аппарата и гаража-заглубителя по шинам питания 300 В и 600 В постоянного тока.

Функциональная схема экспериментальной установки СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе для исследования выходных электрических параметров приведена на рисунке 27, а фотография установки представлена на рисунке 28.



Рисунок 27 – Функциональная схема экспериментальной установки для исследования выходных электрических параметров СЭП ТНПА

Все исследования с целью упрощения экспериментальной установки проводились только по шине питания подводного аппарата напряжением 600 В и мощностью 47 кВт. Это также обусловлено тем, что остальные выходные шины питания, расположенные в гараже-заглубителе и подводном аппарате, погружены пренебрежительно мало и их мощность составляет менее 10 % от номинальной суммарной мощности. Таким образом, они не влияют на качество и достоверность полученных результатов.

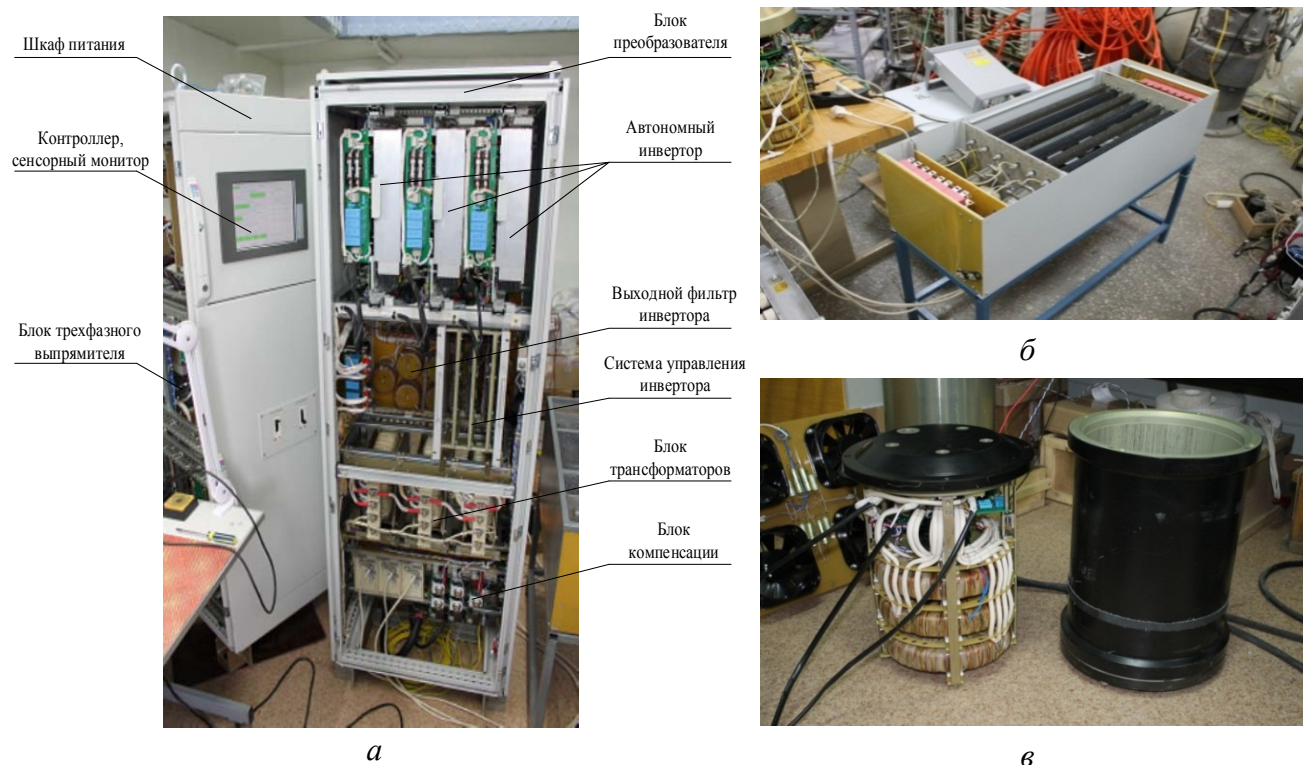


Рисунок 28 – Экспериментальная установка для исследования СЭП ТНПА с передачей энергии на переменном токе: *а* – бортовая часть СЭП ТНПА; *б* – имитатор кабель-троса; *в* – подводная часть СЭП ТНПА

Силовая часть экспериментальной установки (см. рисунок 28) состоит из бортовой части СЭП ТНПА, имитатора кабель-троса с изменяемой длиной 300 м и 6000 м, подводной части СЭП ТНПА, амперметра A (марка Ц4311, класс точности 0,5 на постоянном токе), вольтметра V (марка Agilent HP34401A, погрешность 0,0015 %), переменной нагрузки $R_{\text{нvar}}$ и осциллографа (марка LeCroy J322A) с датчиком тока D (марка PİNТЕК PA-622, погрешность 3 %).

Бортовая часть СЭП ТНПА обеспечивает преобразование напряжения трехфазной сети 380 В 50 Гц в трехфазное регулируемое напряжение от 1000 до 1500 В частотой 1000 Гц. Полученное напряжение поступает в имитатор кабель-троса и с выхода кабель-троса подается в подводную часть СЭП ТНПА. К выходным клеммам 600 В подводной части СЭП ТНПА подключена переменная нагрузка $R_{\text{нvar}}$, при помощи которой меняется мощность нагрузки от номинального значения до холостого хода. Приборами A и V осуществляется измерение и контроль выходных параметров экспериментальной установки: тока и напряжения. Осциллограф предназначен для записи выходных параметров тока и напряжения при пуске, сбросе и набросе нагрузки от холостого хода до номинального значения.

В результате экспериментальных исследований макетного образца СЭП ТНПА при длине кабель-троса 6000 м получен ряд зависимостей изменения выходного напряжения на нагрузке $U_{\text{н}}(t)$ при пуске на холостом ходу и на номинальную нагрузку, при набросе нагрузки $I_{\text{н}} = 78$ А и сбросе, а также внешняя характеристика СЭП ТНПА.

На рисунке 29 представлены зависимости напряжения на нагрузке СЭП ТНПА от времени при пуске на холостом ходу.

По виду характеристик определяли перерегулирование, число колебаний и время переходного процесса (таблица 2).

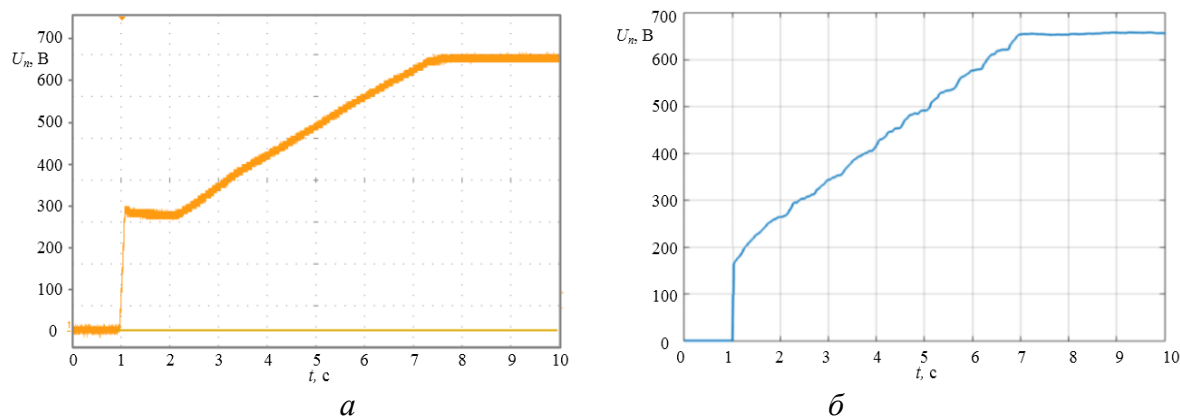


Рисунок 29 – Зависимости выходного напряжения СЭП ТНПА при пуске на холостом ходу: a – экспериментальная установка; b – имитационная модель

Таблица 2 – Параметры выходного напряжения СЭП ТНПА при пуске на холостом ходу

Параметр	σ , %	n	$t_{\text{пп}}$, с
Экспериментальная установка	1,62	1	6,5
Имитационная модель	1,87	1	6,8

На рисунке 30 представлены зависимости напряжения на нагрузке СЭП ТНПА от времени при пуске на номинальную нагрузку, а в таблице 3 приведены его параметры.

На рисунке 31 представлена зависимость напряжения на нагрузке СЭП ТНПА при набросе тока нагрузки от нуля до номинального значения, а в таблице 4 приведены его параметры.

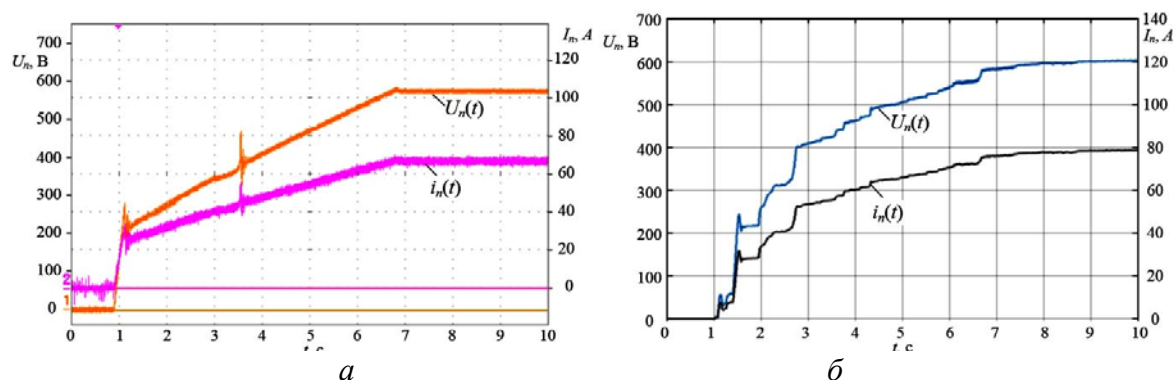


Рисунок 30 – Зависимости выходного напряжения СЭП ТПА при пуске на номинальную нагрузку: *а* – экспериментальная установка; *б* – имитационная модель

Таблица 3 – Параметры выходного напряжения СЭП ТПА при пуске на номинальную нагрузку

Параметр	$\sigma, \%$	n	$t_{\text{пп}}, \text{с}$
Экспериментальная установка	1,2	1	5,8
Имитационная модель	1,1	1	6,5

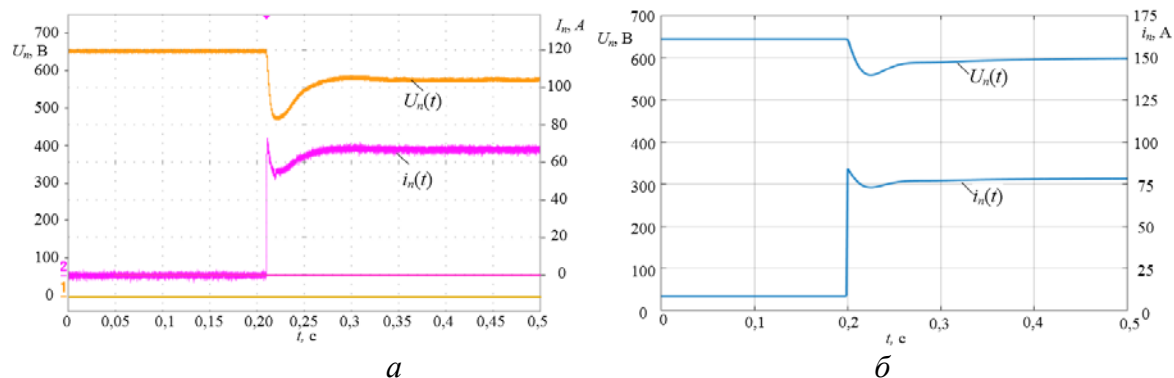


Рисунок 31 – Осциллограмма $U_n = f(t)$ при набросе тока нагрузки: *а* – экспериментальная установка; *б* – имитационная модель

Таблица 4 – Параметры выходного напряжения СЭП ТПА при набросе тока нагрузки

Параметр	$\sigma, \%$	n	$t_{\text{пп}}, \text{с}$
Экспериментальная установка	13,7	1	0,15
Имитационная модель	7,8	1	0,18

На рисунке 32 представлена зависимость напряжения на нагрузке СЭП ТПА при сбросе тока нагрузки от номинального значения до нуля, а в таблице 5 приведены его параметры.

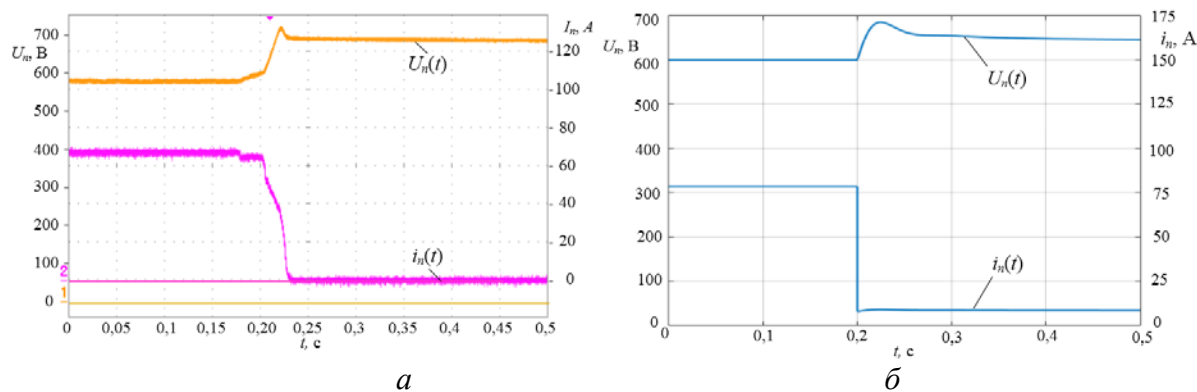


Рисунок 32 – Осциллограмма $U_n = f(t)$ при сбросе тока нагрузки: *а* – экспериментальная установка; *б* – имитационная модель

Таблица 5 – Параметры выходного напряжения СЭП ТНПА при сбросе тока нагрузки

Параметр	$\sigma, \%$	n	$t_{\text{пн}}, \text{с}$
Экспериментальная установка	7,1	1	0,08
Имитационная модель	7,8	1	0,07

На рисунке 33 представлена внешняя характеристика разработанного макетного образца СЭП ТНПА и имитационной модели. По виду внешней характеристики макетного образца (рисунок 33,а) можно заключить, что она обладает достаточной жесткостью во всем диапазоне нагрузок: от холостого хода до номинального значения $\Delta U_{\text{н}} = 12,1 \%$.

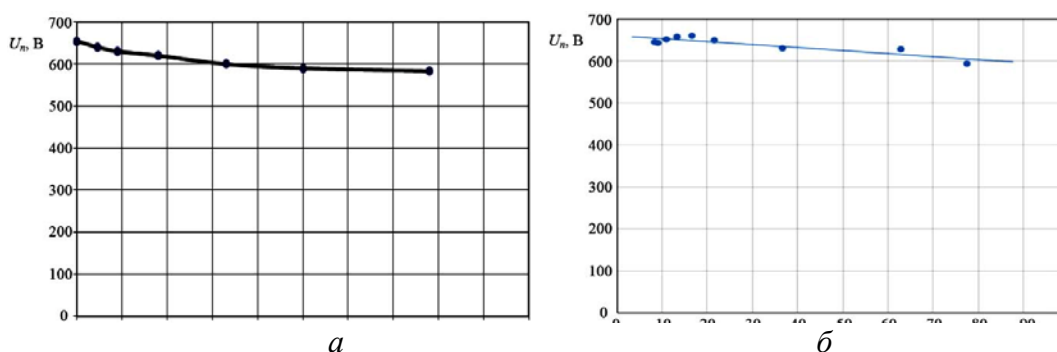


Рисунок 33 – Внешняя характеристика макетного образца СЭП ТНПА:

a – экспериментальная установка; *б* – имитационная модель

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтверждают адекватность имитационной модели замкнутой СЭП ТНПА и ее практическую применимость, так как расхождение между расчетными и измеренными параметрами выходного напряжения на нагрузке находится в пределах 13,7 %.

На рисунке 34 представлен отечественный глубоководный телеуправляемый необитаемый подводный аппарат, в состав которого входит система электропитания, разработанная по результатам диссертационной работы и изготовленная в НИИ АЭМ ТУСУР.



Рисунок 34 – Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат

В заключении изложены основные научные результаты диссертационного исследования, отражающие решение проблемы.

В приложениях приведены диаграммы, поясняющие алгоритмы управления ключей АИН, скриншоты интерфейсов управления и контроля СЭП ТНПА, акты о внедрении результатов научно-исследовательской работы на предприятиях, в учебном процессе ТУСУРа и Национального исследовательского Томского политехнического университета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработаны принципы и подходы к проектированию, оптимизации и технической реализации системы электропитания со звеном повышенной частоты и передачей энергии по кабель-тросу для подводной части телеуправляемого необитаемого подводного аппарата. Выполненные научные исследования представлены следующими новыми результатами:

1. Предложенная структура СЭП ТНПА со звеном повышенной частоты и передачей энергии по кабель-тросу (до 8000 м) на переменном токе позволяет обеспечить требуемое качество напряжения на подводном аппарате, высокие энергоэффективность и массогабаритные показатели системы.

2. Разработанные математические модели СЭП ТНПА позволяют исследовать с достаточной точностью статические и динамические процессы в системе с учетом реактивной составляющей тока кабель-троса при передаче энергии на переменном токе.

3. Синтезированные оптимальные регуляторы позволяют обеспечить требуемое качество напряжения в СЭП при изменении параметров кабель-троса и электрической нагрузки технологического оборудования ТНПА. Определены наиболее эффективные варианты структур оптимальных регуляторов при измерении напряжения на выходе бортовой части СЭП, позволяющие обеспечить стабильное напряжение на подводном аппарате.

4. Разработана методика и получены математические соотношения СЭП ТНПА, которые дают возможность обоснованно подойти к выбору величины напряжения и частоты при передаче энергии по кабель-тросу на переменном токе с учетом его собственной емкости.

5. Теоретически и экспериментально обосновано, что совмещение функций компенсирующих индуктивностей с функциями силовых трансформаторов (с учетом их индуктивностей рассеяния) обеспечивает улучшение массогабаритных показателей подводных частей систем электропитания телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов в 1,5–2 раза по сравнению с применением отдельных компенсирующих дросселей.

6. Предложена и экспериментально проверена методика теплового расчета погружных тороидальных трансформаторов (охлаждающая среда морская вода) с масляной заливкой. Погрешность между расчетными и измеренными значениями температурами не превышает 14 %.

7. Экспериментальные исследования на опытном образце СЭП ТНПА мощностью 47 кВт подтвердили правильность принятых допущений при разработке имитационной модели системы, расхождение результатов теоретических и экспериментальных данных не превышает 13,7 %.

8. За счет размещения системы управления и стабилизации в бортовой части СЭП ТНПА получены удельные характеристики системы электропитания подводной части не менее 2,5 кВт/кг, что сопоставимо с мировыми показателями.

9. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также предложенные технические решения построения СЭП ТНПА по модульному принципу, позволяют повысить качество проектирования и эффективность таких систем, обеспечить необходимую мощность от 10 до 60 кВт путем соединения унифицированных модулей и сократить затраты на проведение опытно-конструкторских работ и натуральных испытаний.

10. Разработанные и изготовленные в НИИ АЭМ ТУСУР промышленные образцы: СЭП УМБК; СЭП КМТС; СЭП ТНПК; СЭП Магеллан-1, внедрены и эксплуатируются на научно-исследовательских и специальных морских судах Российской Федерации.

Научные публикации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Рулевский В.М. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов / В.М. Рулевский, Ю.Н. Дементьев, О.В. Бубнов // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307, № 5. – С. 120–123.

2. Рулевский В.М. Массогабаритные характеристики системы электропитания в функции от рабочей глубины телеуправляемого подводного аппарата / В.М. Рулевский, Ю.Н. Дементьев, О.В. Бубнов // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 1. – С. 163–167.

3. Разработка и моделирование подводных технических средств с передачей энергии по кабель-тросу / В.Н. Мишин, В.М. Рулевский, А.В. Федоров, И.В. Целебровский, Ю.А. Шурыгин, Т.Н. Зайченко // Открытое образование. – 2011. – № 2–2. – С. 328–331.

4. Мишин В.Н. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов переменного тока мощностью свыше 10 кВт / В.Н. Мишин, В.М. Рулевский, А.Г. Юдинцев // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322, № 4. – С. 107–110.

5. Рулевский В.М. Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного комплекса с компенсацией реактивной мощности / В.М. Рулевский // Научный журнал «Морские интеллектуальные технологии». Санкт-Петербург. – 2014. – № 2 (24). – С. 14–17.

6. Мишин В.Н. Система электропитания универсального многоканального телеуправляемого необитаемого буксируемого комплекса / В.Н. Мишин, В.М. Рулевский, А.А. Тарасенко // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 5. – С. 8–10.

7. Юдинцев А.Г. Система управления трёхфазным автономным инвертором с векторной широтно-импульсной модуляцией / А.Г. Юдинцев, В.М. Рулевский // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 5–1. – С. 168–173.

8. Рулевский В.М. Математическое моделирование системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе в пакете Matlab/Simulink / В.М. Рулевский, Д.Ю. Ляпунов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – С. 210.

9. Рулевский В.М. Особенности тепловых режимов работы погружных трансформаторов систем электропитания телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов / В.М. Рулевский // Тепловые процессы в технике. – 2015. – № 1. – С. 43–48.

10. Математическая модель системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе / А.А. Правикова, В.М. Рулевский, Д.Ю. Ляпунов, В.Г. Букреев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 131–135.

11. Рулевский В.М. НИИ автоматики и электромеханики – в области создания систем электропитания телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов / В.М. Рулевский, В.А. Пчельников, Ю.А. Шурыгин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 31–34.

12. Система электропитания глубоководного аппарата с высоковольтной передачей энергии постоянного тока по кабель-тросу / В.М. Рулевский, В.А. Чех, В.Г. Букреев, Р.В. Мещеряков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 1 (195). – С. 155–167.

13. Рулевский В.М. Синтез субоптимального регулятора напряжения в системе электропитания глубоководного аппарата / В.М. Рулевский, В.Г. Букреев, Е.Б. Шандарова // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 3 (40). – С. 47–54.

14. Букреев В.Г. Многомерная модель системы электропитания погружного технологического оборудования / В.Г. Букреев, Е.Б. Шандарова, В.М. Рулевский // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 4. – С. 119–131.

15. Рулевский В.М. Управление трехфазным автономным инвертором напряжения с предмодуляцией третьей гармоники в системе электропитания глубоководного аппарата / В.М. Рулевский, А.Г. Юдинцев, В.А. Чех // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2018. – Т. 10, № 5. – С. 1075–1086.

16. Рулевский В.М. Аппроксимация нелинейной математической модели системы электропитания глубоководного аппарата / В.М. Рулевский, В.Г. Букреев, Е.Б. Шандарова // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 85–92.

17. Рулевский В.М. Оптимизация регулятора напряжения в системе электропитания глубоководных аппаратов / В.М. Рулевский, В.Г. Букреев, Е.Б. Шандарова, В.А. Чех // Робототехника и техническая кибернетика. – Т. 7. - №1. – Санкт-Петербург : ЦНИИ РТК. – 2019. – С. 71–79.

18. Рулевский В.М. Техническая реализация и алгоритмическое обеспечение системы электропитания удаленного потребителя энергии / В.М. Рулевский // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 128–134.

19. Рулевский В.М. Методика определения оптимального напряжения и частоты переменного тока в трехфазном кабель-тросе системы электропитания подводного аппарата / В.М. Рулевский // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 121–127.

Статьи в изданиях, входящих в международные базы Scopus и Web of Science

20. Rulevskiy V.M. Autonomous inverters' PWM methods for remotely controlled unmanned underwater vehicles / V.M. Rulevskiy, A.A. Pravikova, D.Yu. Lyapunov (Article number 7911641) // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): proceedings, South Ural State University Chelyabinsk, May 19–20, 2016. – Челябинск: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016.

21. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-rope (Article number 012098) / V.M. Rulevskiy, V.G. Bukreev, E.O. Kuleshova, E.B. Shandarova, S.M. Shandarov, Yu.Z. Vasilyeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS): proceedings, Tomsk, October 27–29, 2017. – Томск: Institute of Physics Publishing, 2017. – Vol. 177(1).

22. Mathematical model for the power supply system of an autonomous object with an AC power transmission over a cable rope (Article number 012073) / V.M. Rulevskiy, V.G. Bukreev, E.B. Shandarova, E.O. Kuleshova, S.M. Shandarov, Yu.Z. Vasilyeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS): proceedings, Tomsk, October 27–29, 2017. – Томск: Institute of Physics Publishing, 2017. – Vol. 177(1).

23. Voltage stabilizer in power supply of underwater vehicle (Article number 022018) / V.M. Rulevskiy, V.A. Chekh, Y.A. Shurygin, A.A. Pravikova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS): proceedings, Tomsk, December 4– 6. – Томск: Institute of Physics Publishing, 2018. – Vol. 327(2).

24. Bukreev V.G. Power supply system model of remote processing equipment / V.G. Bukreev, E.B. Shandarova, V.M. Rulevskiy // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2018. – Vol. 329(4). – P. 119–131.

Монографии

25. Особенности тепловых режимов работы погружных трансформаторов систем электропитания телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов: моногр. / В.М. Рулевский, В.Н. Мишин, И.В. Целебровский, Ю.А. Шурыгин. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2015. – 76 с.

Патенты на изобретения и полезные модели РФ

26. Система электроснабжения телеуправляемого подводного аппарата с судна-носителя : пат. 46611 Рос. Федерация от 10.07.2005 / Мишин В.Н., Бубнов О.В., Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н.

27. Устройство для электроснабжения подводного аппарата с судна-носителя с компенсацией реактивной мощности в кабель-тросе : пат. 87581 Рос. Федерация от 28.10.2008 / Мишин В.Н., Рулевский В.М., Пчельников В.А., Бубнов О.В.

28. Устройство для управления трехфазным автономным инвертором с помощью векторной ШИМ : пат. 117747 Рос. Федерация от 27.06.2012 / Мишин В.Н., Пчельников В.А., Рулевский В.М., Юдинцев А.Г., Иванов В.Л.

29. Система электроснабжения подводного телеуправляемого аппарата с судна-носителя (варианты) : пат. 119905 Рос. Федерация от 27.08.2012 / Мишин В.Н., Пчельников В.А., Рулевский В.М., Юдинцев А.Г.

30. Система электроснабжения подводного телеуправляемого аппарата с судна-носителя с компенсацией реактивной мощности в кабель-тросе (варианты) : пат. 122530 Рос. Федерация от 27.11.2012 / Мишин В.Н., Пчельников В.А., Рулевский В.М., Юдинцев А.Г.

31. Преобразователь напряжения с защитой от перегрузки : пат. 126220 Рос. Федерация от 20.03.2013 / Мишин В.Н., Пчельников В.А., Рулевский В.М., Юдинцев А.Г., Кремзуков Ю.А.

32. Система электроснабжения подводного телеуправляемого аппарата : пат. 126217 Рос. Федерация от 20.03.2013 / Мишин В.Н., Пчельников В.А., Рулевский В.М., Юдинцев А.Г., Цебенко Н.Н.

33. Устройство для электроснабжения подводного аппарата с борта судна-носителя : пат. 156356 Рос. Федерация от 10.11.2015 / Мишин В.Н., Пчельников В.А., Рулевский В.М., Юдинцев А.Г.

34. Устройство для электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с борта судна-носителя на постоянном токе : пат. 158319 Рос. Федерация от 27.12.2015 / Мишин В.Н., Рулевский В.М., Пчельников В.А., Юдинцев А.Г., Безрученко А.А.

35. Устройство передачи мощности постоянного тока к телеуправляемому необитаемому подводному аппарату : пат. 163748 Рос. Федерация от 30.11.2015 / Мишин В.Н., Рулевский В.М., Юдинцев А.Г., Бурцев В.Е.

Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ

36. Программа управления автономным инвертором напряжения на базе широтно-импульсной модуляции с предмодуляцией третьей гармоникой: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016615977 Российской Федерации / В.М. Рулевский, Д.Ю. Ляпунов, А.А. Правикова. Дата регистрации 02.06.2016.

37. Программа моделирования системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017618323 Российской Федерации / В.М. Рулевский, Д.Ю. Ляпунов, А.А. Правикова, В.Г. Букреев, Ю.А. Шурыгин. Дата регистрации 28.07.2017.

Статьи в сборниках и трудах конференций

38. Рулевский В.М. Методы стабилизации напряжения тиристорных выпрямителей с высокоомной линией сети переменного тока / В.М. Рулевский // VIII Всероссийская научная конференция с международным участием «Решетневские чтения». Красноярск. – 2004. – С.68–69.

39. Рулевский В.М. Системы электропитания телеуправляемых подводных робототехнических комплексов / В.М. Рулевский, А.Г. Юдинцев, И.В. Целебровский, С.С. Баталов // Тезисы докладов всероссийской научно-практической конференции «Морское подводное оружие. Перспективы развития». СПб: ФГУП «Крыловский государственный научный центр». – 2015. – С.78-82.

40. Рулевский В.М. Система энергоснабжения телеуправляемого подводного робототехнического комплекса / В.М. Рулевский // Тезисы докладов Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления»; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета. – 2016. – С. 15–22.

41. Рулевский В.М., Букреев В.Г., Правикова А.А. Особенности проектирования и моделирования систем электропитания глубоководных робототехнических аппаратов / В.М. Рулевский, В.Г. Букреев, А.А. Правикова // 10-я Всероссийская мультиконференция по проблемам управления. – Геленджик. – 2017. – С. 207–209.

Отпечатано в типографии
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники.
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. Тел.8 (3822) 53-30-18.
Подписано в печать 26.09.2019 г. Формат 60x84/16. Печ. л. 2,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 374.