

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники»

На правах рукописи



Чех Вадим Андреевич

**СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО
НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО КОМПЛЕКСА
С ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ ПО КАБЕЛЬ-ТРОСУ
НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Рулевский Виктор Михайлович,
доктор технических наук, доцент

Томск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ГЛУБОКОВОДНЫЕ АППАРАТЫ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ ПО КАБЕЛЬ-ТРОСУ	12
1.1 Анализ состояния подводных аппаратов и их потребителей электрической энергии	12
1.2 Технические требования к основным характеристикам и режимы работы систем электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса.....	16
1.3 Варианты исполнения систем электроснабжения телеуправляемых необитаемых подводных комплексов.....	21
Выводы по главе 1	32
ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПЕРЕДАЧЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО КАБЕЛЬ-ТРОСУ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ	33
2.1 Методы моделирования систем электроснабжения телеуправляемых необитаемых подводных комплексов.....	33
2.2 Аналитическое моделирование системы электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса.....	34
2.3 Имитационное моделирование системы электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса.....	52
Выводы по главе 2	62
ГЛАВА 3 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОНОМНОГО СПОСОБА НАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	63
3.1 Разработка и описание работы алгоритма управления системой электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса	63
3.2 Методы идентификации передаточной функции и влияние обратной связи в системе электроснабжения телеуправляемым необитаемым подводным комплексом с передачей энергии по кабель-тросу	66

3.3 Синтез регулятора напряжения системы управления системой электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса	72
Выводы по главе 3	92
ГЛАВА 4 ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	94
4.1 Разработка технической реализации системы электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе	94
4.2 Описание алгоритма работы системы электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе	110
4.3 Методика экспериментального исследования системы электроснабжения	121
4.4 Сопоставление результатов моделирования и экспериментального исследования	126
Выводы по главе 4	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	140
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ А Главное окно	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Окно ДИАГНОСТИКА	155
ПРИЛОЖЕНИЕ В Окно НАСТРОЙКА.....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Патент и свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	157
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акты внедрения результатов диссертационной работы	159

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Сегодня, согласно стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, на период до 2030 года перед промышленностью и научно-образовательным комплексом ставятся задачи, позволяющие получить значимые результаты для устойчивого положения России как на внутреннем, так и на внешнем рынке, а также обеспечения суверенитета и безопасности страны.

К одним из основных направлений развития можно отнести: переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии; обеспечение связанности территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики [1].

Дефицит и рост цен на полезные ископаемые, нефтехимические продукты и другие природные ресурсы вынуждают к освоению новых месторождений в шельфовых зонах. Исследование и разработка подобных объектов проводится при помощи подводных аппаратов, что способствует развитию глобального рынка телеуправляемых обитаемых подводных аппаратов (ТНПА).

ТНПА применяют различные государственные учреждения и частные корпорации для выполнения поисковых, инспекционных, ремонтных подводных работ, в которые входят осмотр и подъем объектов с большой глубины, получение данных окружающего пространства в режиме реального времени, наблюдение и изучение морской жизни. Рост числа задач способствует дальнейшему развитию рынка ТНПА.

Задача электроснабжения телеуправляемых обитаемых подводных комплексов (ТНПК) является достаточно сложной ввиду ограниченной

пропускной способности кабель-троса, связывающего аппарат с судном, при глубинах погружения до 8000 метров и передаваемой мощности более сотни киловатт.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам исследования, разработки и создания современных систем электроснабжения (СЭС) для подводных аппаратов посвящено множество работ как отечественных, так и зарубежных ведущих ученых, а именно: Бриллиантова А. Н., Филоженко А. Ю., Мишина В. Н., Рулевского В. М., Кувшинова Г. Е., Копылова В. В., Ковалёва А. Ю., Савченко А. А., Занина В. Ю., Sari K. P., Shek J. H., Mueller M. A., Lai R., Song-Mangue J., Harfman Todorovic M., Gupta R., Zhang D., Chi S., Garcés L. [2–26].

В настоящее время, вопросы, связанные с созданием современных СЭС ТНПК на постоянном токе мощностью до 100 кВт с передачей энергии на предельные глубины с учетом параметров кабель-троса, изучены недостаточно, являются актуальными и их решение имеет практическое значение для развития высокотехнологичного производства, обеспечения суверенитета и безопасности нашей страны.

В диссертационной работе поставлена и решена важная научно-техническая задача формирования и обеспечения стабилизированного напряжения для электропитания удаленной полезной нагрузки глубоководных аппаратов при различных режимах работы.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка и создание системы электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса с передачей энергии на постоянном токе, обеспечивающей высокие энергетические и массогабаритные показатели.

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

1. Исследование современного состояния глубоководных ТНПК, определение требований и режимов их работы.

2. Анализ и сопоставление вариантов построения СЭС ТНПК, а также предложение системы с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе.

3. Разработка схемы замещения и математическое моделирование СЭС ТНПК для исследования динамических и статических режимов работы.

4. Синтез системы управления СЭС ТНПК на постоянном токе на основе выходных напряжений и токов бортовой части системы.

5. Разработка технических решений и макетного образца СЭС ТНПК с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе.

Объектом исследования является система электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе.

Предмет исследования: математическое и имитационное моделирование, алгоритмы работы и управления СЭС, ее схемотехническая разработка с применением автономного инвертора напряжения.

Методы исследования. В работе применены классические методы математического и имитационного моделирования. Имитационное моделирование проводилось с применением программы Simulink пакета MatLab. Теоретические результаты подтверждены экспериментальными исследованиями, выполненными в лабораторных условиях с применением макетного образца, разработанного и изготовленного в НИИ АЭМ ТУСУР.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Достоверность полученных результатов и выводов диссертационной работы подтверждается корректно поставленными задачами; использованными методиками и принятыми допущениями; достоверным применением методов научного исследования, экспериментальными исследованиями на макетном образце. Все главы диссертационной работы взаимосвязаны, выводы и рекомендации являются результатом теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна работы

1. Предложена структура СЭС ТНПК с глубиной погружения до 8000 м, позволяющая за счет передачи энергии на постоянном токе по трехжильному кабель-тросу обеспечить стабилизацию напряжения на полезной нагрузке подводного комплекса в заданных пределах при высоких удельных и энергетических характеристиках.

2. Разработана математическая модель разомкнутой СЭС ТНПК с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе, позволяющая за счет модуля идентификации параметров системы осуществлять синтез ее передаточной функции.

3. Разработана имитационная модель СЭС ТНПК с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе, учитывающая несимметричную нагрузку подводной части при максимальном отклонении выходных напряжений не более 10% от установившегося значения, позволяющая исследовать динамические и статические режимы ее работы.

4. Предложена система управления СЭС ТНПК, позволяющая за счет учета изменения параметров трехжильного кабель-троса и полезной нагрузки обеспечить стабилизацию выходных напряжений подводного комплекса в заданных пределах.

Практическая значимость работы

1. Предложена новая структурная схема СЭС ТНПК, позволяющая за счет передачи энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе обеспечить высокие удельные характеристики системы.

2. Разработаны математические модели СЭС ТНПК с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе в пакете прикладных программ MatLab и Mathcad, позволяющие исследовать динамические и статические процессы в разомкнутой и замкнутой системах при различных режимах работы подводного комплекса.

3. Предложена методика расчета и выбора регулятора системы управления бортовой части СЭС ТНПК, учитывающая параметры трехжильного

кабель-троса и нагрузки и обеспечивающая стабилизацию выходных напряжений подводного комплекса при несимметричных режимах работы.

4. Разработан алгоритм программного обеспечения СЭС ТНПК с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе, позволяющий осуществить комплексную диагностику и контроль электрических параметров системы перед началом и в процессе работы, а также управление и передачу данных состояний основных элементов системы.

5. Разработан и внедрен опытный образец СЭС ТНПК мощностью более 50 кВт и глубиной погружения до 8000 метров.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Структура СЭС ТНПК, позволяющая за счет передачи энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе обеспечить требуемую стабилизацию напряжения на технологическом оборудовании подводного комплекса с улучшенными энергетическими и массогабаритными показателями.

2. Математические модели СЭС ТНПК с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе, учитывающие изменение параметров кабель-троса и нагрузки, позволяющие исследовать статические и динамические режимы работы данной системы.

3. Методика проектирования регулятора напряжения системы управления бортовой части СЭС ТНПА, учитывающая параметры трехжильного кабель-троса, обеспечивающая стабилизацию выходных напряжений подводного комплекса при различных режимах работы.

4. Программно-аппаратный комплекс СЭС ТНПК с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе, позволяющий за счет разработанных схмотехнических решений и алгоритмов, обеспечить исследование различных режимов ее работы.

Личный вклад автора. Научные результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. Автор непосредственно участвовал в разработке математических моделей системы электроснабжения ТНПК, предложил и разработал систему управления с

применением регулятора на основе перестраиваемых коэффициентов, учитывающую режимы несимметричной нагрузки. Представил программно-аппаратный комплекс СЭС ТНПК с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе. Принимал непосредственное участие в настройке и испытаниях макетного образца системы, а также осуществлял анализ данных испытаний с имитационным моделированием.

Реализация результатов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении одного из основных направлений научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ НИИ АЭМ ТУСУР (г. Томск) в виде технических предложений, создании опытных образцов систем электроснабжения телеуправляемых и буксируемых необитаемых подводных комплексов.

Научные положения диссертационной работы, а также результаты теоретических, экспериментальных исследований и практические разработки внедрены в АО «Тетис Про» (г. Москва). Это система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного комплекса для мобильного комплекса рабочего аппарата.

Основные принципы построения современных систем электроснабжения телеуправляемых необитаемых подводных комплексов с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном и переменном токе и математические и имитационные модели данных систем, учитывающие изменение параметров кабель-троса и нагрузки, используются в образовательном процессе «Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета» при подготовке студентов направления 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника». Методика проектирования регулятора напряжения системы управления бортовой части системы энергоснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса, учитывающая параметры трехжильного кабель-троса, а также основные принципы построения программно-аппаратных комплексов глубоководных буксируемых и телеуправляемых подводных аппаратов, используются в учебном процессе при подготовке

студентов по направлению 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника», профиль «Промышленная электроника».

Подтверждением промышленного использования результатов диссертационной работы является наличие акта 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, позволяющие проводить развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем (пункт 1); разработку, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизацию, а также разработку алгоритмов эффективного управления (пункт 4); разработку безопасной и эффективной эксплуатации (пункт 5).

Апробация результатов работы проведена в рамках следующих мероприятий:

1. Научно-техническая конференция молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», АО «НПЦ «Полюс», Томск, 2017.
2. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2018», Томск, 2018.
3. 29-я Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции», ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург.
4. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2019», Томск, 2019.
5. 14-й международный форум по стратегическим технологиям IFOST 2019, ТПУ, Томск, 2019.
6. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2020», Томск, 2020.

7. Международная научная конференция «FarEastCon-2020», ДВФУ, Владивосток, 2020.

Научные исследования выполнялись в рамках х/д на выполнение составной части опытно-конструкторских работ между НИИ АЭМ ТУСУР, АО «Южморгеология» и АО «Тетис Про» № 142/УМБК-Ф/10 «Система электропитания универсального многоканального буксируемого комплекса», № 142/ТНПК-Ф/10 «Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного комплекса» в период с 2014 г. по 2022 г.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 14 научных работах, 3 из которых в ведущих журналах, входящих в перечень ВАК, 4 статьи в изданиях Scopus и Web of Science, 1 патент РФ на изобретение. Получено 1 свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 110 наименований. Диссертация изложена на 161 страницах машинописного текста, содержит 82 рисунков, 17 таблиц, 5 приложения.

Благодарности. *Автор выражает искреннюю благодарность Рулевскому В.М., д-ру техн. наук, доценту, ректору ТУСУРа; коллективу НИИ АЭМ ТУСУР за оказанную помощь в решении задач, поставленных в диссертационной работе.*

ГЛАВА 1 ГЛУБОКОВОДНЫЕ АППАРАТЫ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ ПО КАБЕЛЬ-ТРОСУ

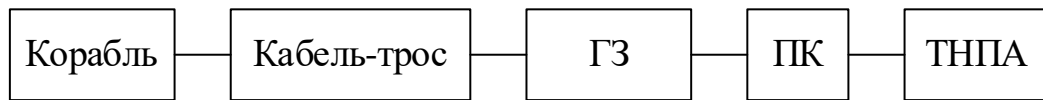
1.1 Анализ состояния подводных аппаратов и их потребителей электрической энергии

Под ТНПА подразумевается аппарат, оснащенный специальным оборудованием, погружаемый в воду и управляемый с поверхности пилотом или группой операторов (пилот, навигатор и др.). Подводное обследование с помощью ТНПА позволяет получить объективную визуальную информацию о состоянии подводных объектов в режиме реального времени с возможностью записи для последующего детального анализа.

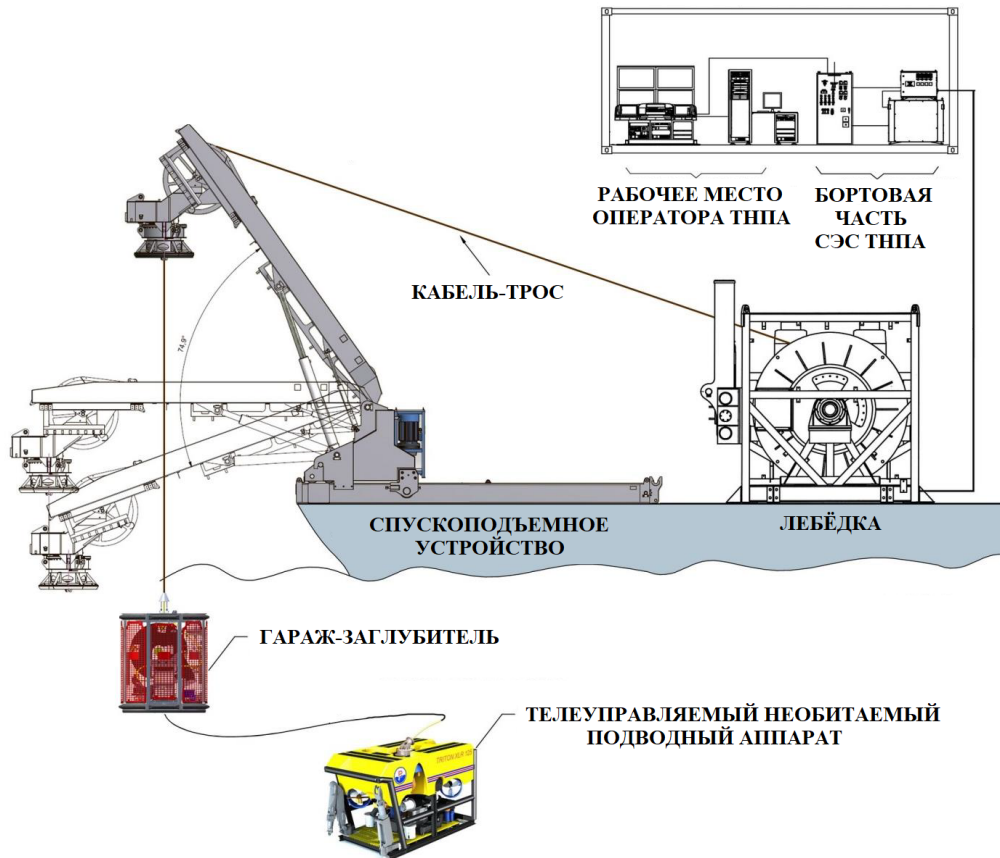
Структурная и функциональная схемы СЭС ТНПК представлены на рисунке 1.1. Устройством для спуска ТНПА на необходимую глубину является гараж-заглубитель (ГЗ). Для подключения электропитания ТНПА используется плавучий кабель (ПК) с нулевой плавучестью.

На данный момент времени без использования ТНПА невозможно представить себе развитие отрасли добычи нефти и газа в шельфовых зонах; проведение инспекционных работ в акваториях морей, океанов и на внутренних водах; осуществление спасательных и поисковых операции затонувших объектов, а также гидрографические и биологические исследования в глубинах мирового океана [2–24].

Основное предназначение ТНПА заключается в поддержке водолазных работ; поиске объектов на дне и в толще воды; проведении осмотровых работ, спасательных операций и разминирования объектов; острожке и извлечении крупных предметов со дна; работ по обслуживанию подводных объектов нефтегазового комплекса.



а



б

Рисунок 1.1 – Структурная (а) и функциональная (б) схемы СЭС ТНПК

Необитаемые подводные аппараты (НПА) классифицируют [27] по назначению, классу работы, способу питания, способу управления, массогабаритным характеристикам, мощности системы электропитания, способу перемещения в воде, типу движительно-рулевого комплекса.

По назначению НПА разделяют на поисковые, обследовательские, рабочие, океанологические или исследовательские и многоцелевые.

По способу питания известны ТНПА, автономные НПА (АНПА), полуавтономные НПА (ПНПА).

По способу управления возможно исполнение с дистанционным управлением оператором и автоматическим управлением.

По массе ТНПА подразделяются:

- на микро, с массой менее 5 кг;
- мини, с массой от 5 до 30 кг;
- легкие, с массой от 30 до 100 кг;
- средние, с массой от 100 до 2000 кг;
- тяжелые, с массой более 2000 кг.

По мощности системы электроснабжения различают:

- малые (до 10 кВт);
- легкие (до 30 кВт);
- средние (до 75 кВт);
- тяжелые (свыше 75 кВт).

По способу перемещения в воде существуют буксируемые,двигающиеся за судном-носителем по его траектории; самоходные, имеющие движительную установку; донные, перемещающиеся по грунту; дрейфующие, перемещающиеся в толще воды под влиянием течения.

По типу движительно-рулевого комплекса НПА делятся на активные (винтовые) и пассивные (рули).

По классу работы НПА (рисунок 1.2) подразделяются на малогабаритные, НПА легкого класса, рабочие НПА легкого класса, рабочие НПА тяжелого класса.

Малогабаритные НПА в основном выполняют задачи по обследованию подводных объектов. Благодаря своим малым размерам могут перевозиться в легковых автомобилях, использоваться в стесненных условиях, например внутри трубопроводов. Для эксплуатации аппарата достаточно одного человека.

НПА легкого класса предназначены для полномасштабных подводных исследований, так как могут нести на себе больше дополнительного оборудования, в отличие от малогабаритных НПА, для выполнения широкого спектра задач и поднимать предметы небольшого веса.

Рабочие НПА легкого класса – мощные рабочие аппараты с манипуляторным и инструментальным комплексами. Кроме задач поиска и обследования подводных объектов, аппараты способны выполнять и подводно-

технические работы на подводных объектах (платформы, трубопроводы). Типичными заданиями для этого класса являются поддержка бурения и легкого строительства, исследование труб и другая общая работа.

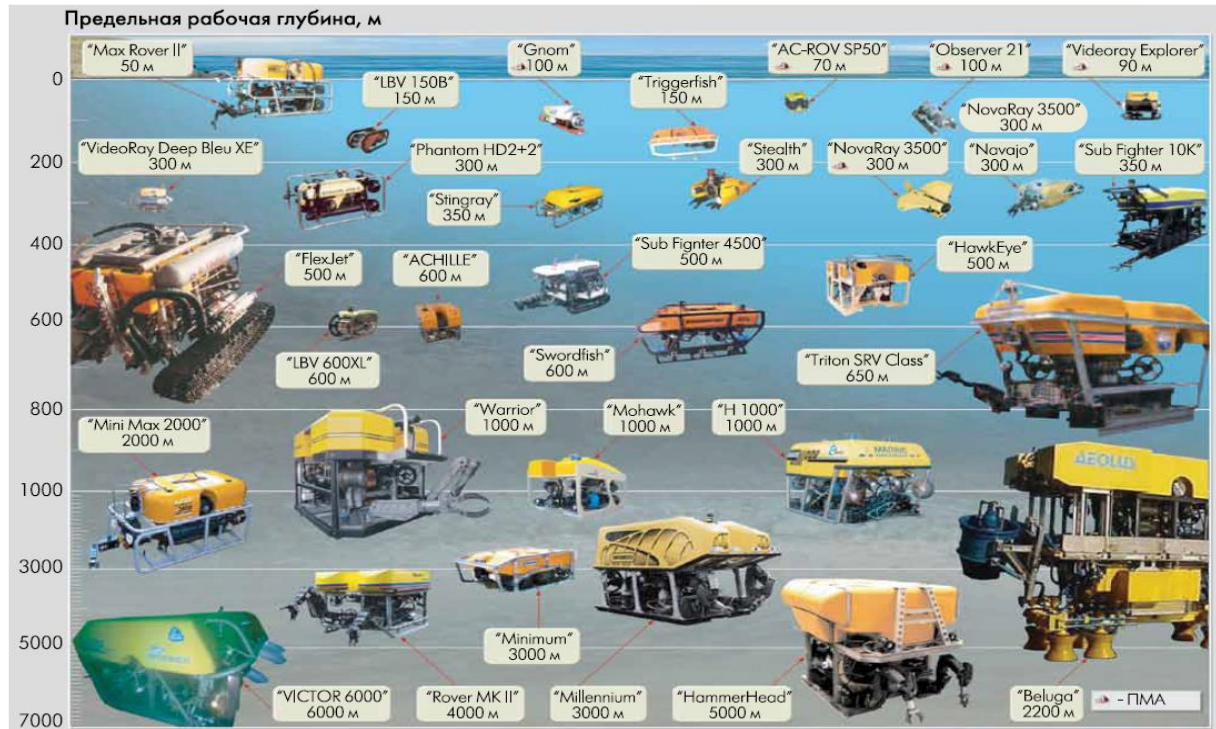


Рисунок 1.2 – Распределение ТНПА относительно глубины

Рабочие НПА тяжелого класса выполняют сложные подводные работы на сильных течениях в отличие от рабочих НПА легкого класса. Используются для глубоководных операций – подводные стыковочные операции на глубоководных установках, перевозка крупных грузов.

Основное оборудование, которое входит в ТНПА, – это движители, манипуляторы и осветительная аппаратура.

Для выполнения работ, в зависимости от поставленных задач, в состав навесного оборудования ТНПА включают:

- видеокамеры с повышенной светочувствительностью, HD-камеры (в том числе с функцией зуммирования);
- гидролокатор кругового обзора (ГКО);
- гидролокатор бокового обзора (ГБО);
- профилограф;

- многолучевой эхолот;
- гидроакустическую систему позиционирования;
- ультразвуковой толщиномер или дефектоскоп;
- датчик катодного потенциала;
- магнитометр;
- лазерную линейку;
- систему обнаружения утечек нефти;
- манипуляторы с различным числом степеней свободы;
- подводный электрический и гидравлический инструмент;
- инерциальную навигационную систему с доплер-лагом;
- специальное оборудование и датчики.

Для подключения и размещения на раме аппарата ТНПА оборудование оснащено интерфейсами, специальными боксами и подвесными контейнерами.

При необходимости все элементы комплекса ТНПА могут быть выполнены в мобильном исполнении, что позволяет доставлять и использовать их с различных судов-носителей в различных регионах России и мира [10–24].

1.2 Технические требования к основным характеристикам и режимы работы систем электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса

Для проведения работ ТНПА необходимо обеспечить электрической энергией. Система электроснабжения, формирующая электрическую энергию, опирается на общие и специальные требования источников вторичного электропитания (ИВЭП).

Общие требования к СЭС – это функциональные, эксплуатационные и конструктивно-технологические требования.

Функциональные требования источников питания включают характеристики и параметры выходного напряжения и тока при допустимых

внешних воздействиях. Среди функциональных требований можно выделить следующие:

- номинальное значение выходного питающего напряжения постоянного тока (переменного) и допуск на точность его установки;

- значение тока нагрузки по каждой выходной цепи питающего напряжения и характер его изменения в процессе работы;

- переменную составляющую (пульсация) выходного напряжения постоянного тока;

- суммарную нестабильность выходного напряжения при воздействии всех дестабилизирующих факторов;

- коэффициент полезного действия ИВЭП и потребляемую мощность от источника первичной энергии в различных режимах работы;

- защиту потребителя от превышения (понижения) выходного напряжения, допустимый уровень превышения питающего напряжения; защиту источника питания от превышения (понижения) первичного, входного напряжения и перегрузки или короткого замыкания в нагрузке, автоматическое восстановление работоспособности источника питания при снятии перегрузки или короткого замыкания в нагрузке;

- обеспечение заданных динамических параметров источника питания, режимы включения, когда выходные напряжения достигают заданного уровня и выключения;

- электромагнитную совместимость устройств источника питания;

- способ охлаждения устройств электропитания;

- конструктивные особенности, обусловленные конкретной областью применения, такие как частота преобразования, возможность синхронизации ее от внешнего задающего генератора или соседнего источника питания и так далее.

Эксплуатационные требования включают следующие параметры:

- надежность, обслуживаемость и ремонтпригодность источника питания.

В отдельных случаях ИВЭП являются необслуживаемыми и неремонтируемыми.

Одновременно среди эксплуатационных требований могут указываться требования к технологии утилизации;

- способы мониторинга и телеметрии параметров (выходных напряжений и других) и дистанционного управления источником питания, интерфейс и протоколы обмена с внешними устройствами;

- способы сигнализации о неисправности в источниках питания или индикации их типов;

- режим и длительность работы – непрерывный, импульсный или повторно-кратковременный;

- работоспособность в условиях воздействия механических факторов: вибрации, ускорения. Работоспособность в условиях воздействия климатических факторов: максимальной и минимальной температуры, давления, влаги;

- безопасность и простота обслуживания;

- эргономические требования удобства применения.

К ИВЭП предъявляется ряд конструктивно-технологических требований, основными из которых являются:

- достижение простоты, тиражируемости и низкой стоимости источника питания;

- требования по унификации и стандартизации, технологичности конструкции и преемственности конструктивных решений;

- масса и размеры устройств электропитания, которые должны быть минимальными [28, 29].

Также СЭС ТНПА должна соответствовать специальным требованиям.

1. Бортовая часть (БЧ) и подводная часть (ПЧ) СЭС ТНПК должны быть построены по модульному принципу.

2. В подводной части СЭС ТНПК должна обеспечить предельное отклонение напряжения питания $\pm 10\%$ и коэффициент пульсаций выходного напряжения не более $0,5\%$ от величины напряжения.

3. БЧ СЭС ТНПК должна обеспечивать подачу электроэнергии через соединительный кабель-трос с корабля-носителя на ТНПА и ГЗ с учетом падения напряжения в кабеле при изменении нагрузки.

4. БЧ должна питаться от бортовой сети трехфазного напряжения обеспечивающего судна с параметрами, указанными в [30] и приведенными в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Нормы качества электрической энергии на входах потребителей

Характеристика электроэнергии	Показатель качества электроэнергии	Норма качества электроэнергии	
Постоянный ток			
Отклонение напряжения	Установившееся отклонение, %	+5	
	Повторно-кратковременное переходное отклонение, %	+8 / -13	
	Кратковременное переходное отклонение, %	+13 / -25	
	Длительность переходного отклонения, с, не более	3	
Пульсация напряжения	Коэффициент пульсации, %	10	
	Действующее значение напряжения гармоника, %	5	3
	Диапазон частот, Гц	25-10 ³	10 ³ -10 ⁴
Импульсы напряжения	Амплитуда импульса, В	±1000	
	Длительность импульса, с	10 ⁻⁵	
Переменный ток частотой 50 и 400 Гц			
Отклонение напряжения	Установившееся отклонение, %	±5	
	Повторно-кратковременное переходное отклонение, %	+8 / -13	
	Кратковременное переходное отклонение, %	+13 / -25	
	Длительность переходного отклонения, с, не более	3	

Продолжение таблицы 1.1

Характеристика электроэнергии	Показатель качества электроэнергии	Норма качества электроэнергии		
Отклонение частоты	Установившееся отклонение, %	±4		
	Повторно-кратковременное переходное отклонение, %	+4 / -5		
	Кратковременное переходное отклонение, %	+4 / -7		
	Длительность переходного отклонения, с, не более	3		
Амплитудная модуляция напряжения	Действующее значение напряжения огибающей гармоники, %	2	2	1
	Диапазон частот, Гц	1-25	25-100	100-200
Модуляция частоты	Величина изменения частоты, Гц	2		
	Диапазон частот повторения, Гц	1-10 (80*)		
Искажение синусоидальности формы кривой напряжения	Коэффициент искажения синусоидальности, %	10		
	Действующее значение напряжения гармоники, %	8	5	
Искажение синусоидальности формы кривой напряжения	Диапазон частот, Гц	2f _н - 5·10 ³		5·10 ³ -10 ⁴
Импульсы напряжения	Амплитуда импульса, В	±1000		
	Длительность импульса, с	10 ⁻⁵		
Небаланс напряжения	Коэффициент небаланса, %	3		
	Величина угла сдвига фаз, град.	5		

1.3 Варианты исполнения систем электроснабжения телеуправляемых необитаемых подводных комплексов

По результатам проведённого патентного поиска и обзора литературы [3, 31–54] СЭС ТНПК разделяются в зависимости от передачи энергии на:

- СЭС ТНПК на переменном токе;
- СЭС ТНПК на постоянном токе.

СЭС ТНПК на переменном токе делятся на:

- СЭС с частотой передачи энергии 50/60 Гц по кабель-тросу;
- СЭС с частотой передачи энергии от 400 Гц и выше по кабель-тросу.

СЭС ТНПК на постоянном токе включают в себя:

- высоковольтные системы;
- модульные многоярусные высоковольтные системы.

СЭС переменного тока с частотой передачи 50/60 Гц, представленная на рисунке 1.3, содержит бортовую часть БЧ, кабель-трос КТ и подводную часть ПЧ. БЧ включает в себя повышающий трансформатор TV1, который подключен к судовой сети переменного тока 220/380 В с частотой 50/60 Гц, заградительный фильтр ЗФ1 и аппаратуру высокочастотной связи ВЧС1. ПЧ, в свою очередь, состоит из заградительного фильтра ЗФ2, аппаратуры высокочастотной связи ВЧС2, понижающего трансформатора TV2 и нагрузки Н.

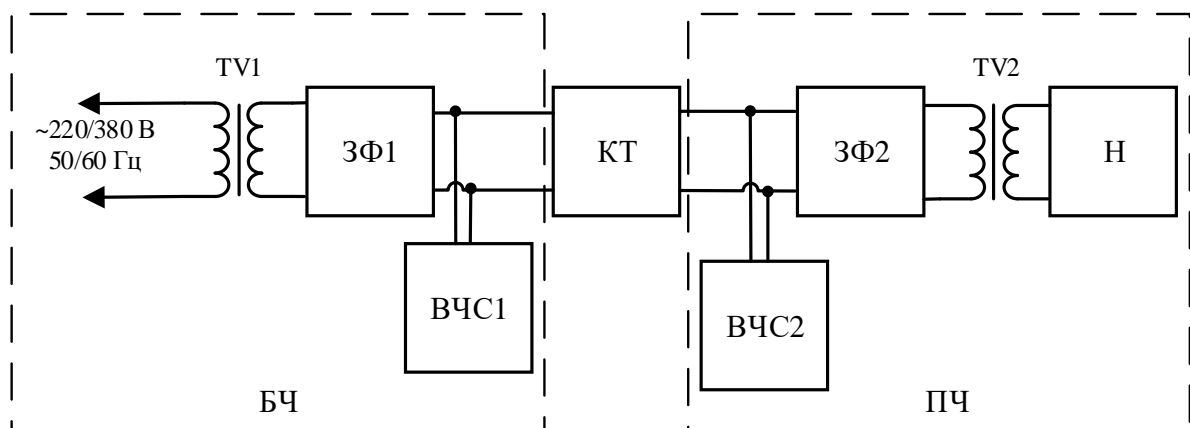


Рисунок 1.3 – СЭС ТНПК переменного тока с частотой передачи энергии 50/60 Гц по кабель-тросу

Нестабильность напряжения на нагрузке подводного комплекса будет определяться колебаниями напряжения сети переменного тока и падением напряжения в сопротивлении кабеля линии связи при изменениях тока нагрузки.

Достоинством данной схемы является простота реализации.

Недостатки – отсутствие гаража-заглубителя, что уменьшает манёвренность ПЧ; низкие массогабаритные показатели кабель-троса, БЧ и ПЧ, по причине наличия аппаратуры высокочастотной связи и заградительных фильтров и трансформаторов, работающих на частоте 50/60 Гц; передача энергии от БЧ к ПЧ на частоте питающего напряжения.

СЭС с частотой передачи энергии переменного тока от 400 Гц, изображенная на рисунке 1.4, включает БЧ, кабель-трос КТ и ПЧ. Для исключения недостатков СЭС с частотой передачи энергии переменного тока 50/60 Гц БЧ содержит неуправляемый выпрямитель В1, подключенный к судовой сети переменного тока 220/380 В с частотой 50/60 Гц, автономный инвертор АИ, повышающий трансформатор TV1, заградительный фильтр ЗФ1 и аппаратуру высокочастотной связи ВЧС1. ПЧ состоит из заградительного фильтра ЗФ2, аппаратуры высокочастотной связи ВЧС2, понижающего трансформатора TV2, неуправляемого выпрямителя В2 и нагрузки Н.

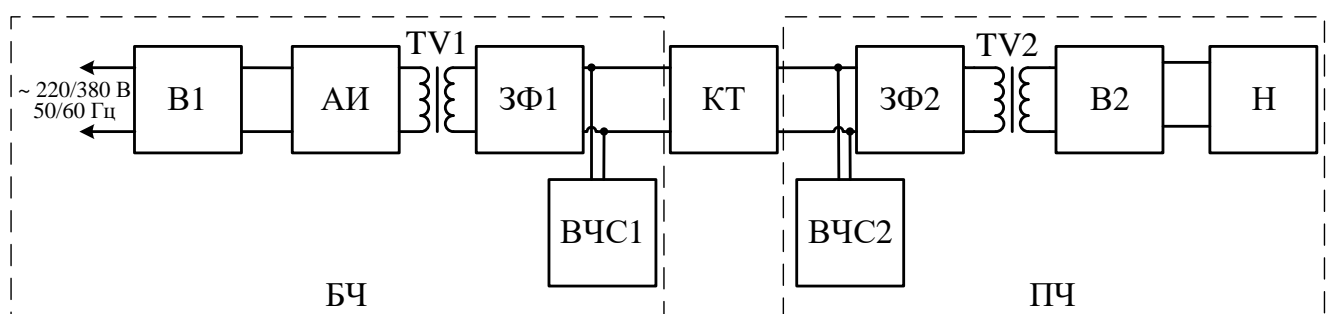


Рисунок 1.4 – СЭС ТНПК на переменном токе с частотой передачи энергии от 400 Гц и выше по кабель-тросу

Такое построение СЭС обеспечивает уменьшение габаритов кабель-троса, трансформаторов, заградительных фильтров, а также стабилизацию напряжения на нагрузке.

Недостатками являются отсутствие гаража-заглубителя и низкие массогабаритные показатели БЧ, КТ и ПЧ вследствие наличия аппаратуры высокочастотной связи, заградительных фильтров и трансформаторов.

С целью устранения недостатков предыдущих структур рассмотрена схема, представленная на рисунке 1.5.

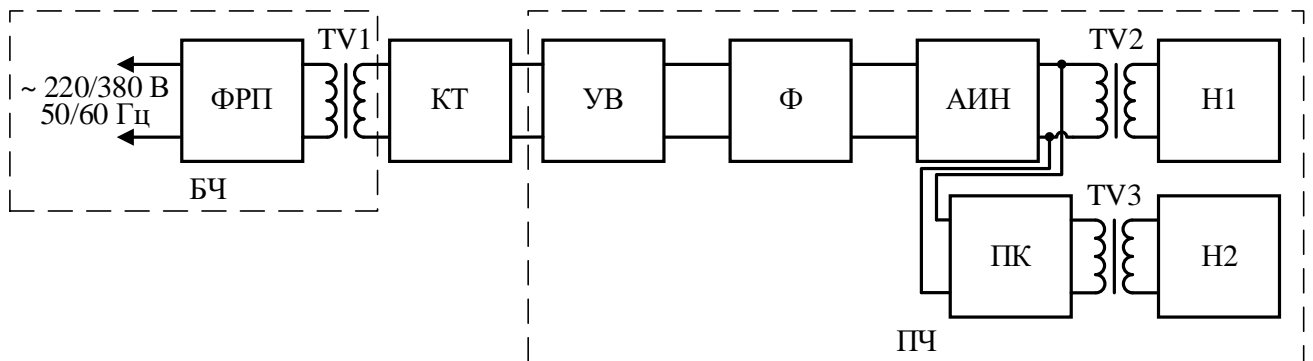


Рисунок 1.5 – СЭС ТНПК на переменном токе с передачей энергии по кабель-тросу напряжением $U=1000\div 1500$ В, частотой 50/60 Гц по кабель-тросу и 1000 Гц по плавучему кабелю

Данная структура содержит БЧ, кабель-трос КТ и ПЧ. БЧ включает в себя фильтр радиопомех ФРП и повышающий трансформатор TV1. ПЧ состоит из управляемого выпрямителя УВ, фильтра Ф, преобразователя постоянного напряжения в переменное повышенной частоты АИН, понижающих трансформаторов TV2, TV3, плавучего кабеля ПК и нагрузок Н1, Н2.

Достоинством данной СЭС перед предыдущей структурой является увеличение массогабаритных показателей ПЧ за счет повышения частоты питающего напряжения до 1000 Гц.

Недостатком является снижение надежности ПЧ по причине включения блока управляемых выпрямителей и присутствия двойного преобразования энергии.

В СЭС, представленной на рисунке 1.6, отсутствует часть недостатков, определённых в предыдущей структуре.

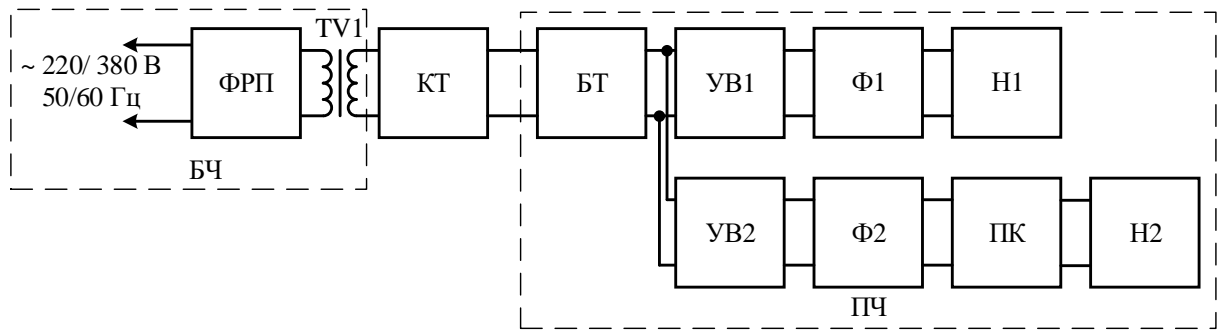


Рисунок 1.6 – СЭС ТНПК на переменном токе с передачей энергии по кабель-тросу переменным напряжением $U=1000\div 1500$ В, частотой 50/60 Гц и постоянным напряжением по плавучему кабелю

Данная СЭС содержит БЧ, которая состоит из фильтра радиопомех ФРП, подключенного к судовой сети переменного напряжения 220/380 В с частотой 50/60 Гц, и повышающего трансформатора TV1. БЧ соединена с кабель-тросом КТ, выход которого подключается к ПЧ. ПЧ, в свою очередь, состоит из блока трансформатора БТ, управляемых выпрямителей УВ1, УВ2, фильтров Ф1, Ф2, плавучего кабеля ПК и нагрузок Н1, Н2.

К достоинствам относят простоту и массогабаритные показатели ТНПА за счет того, что отсутствует трансформатор и по плавучему кабелю передается постоянное напряжение.

Недостатками являются низкие массогабаритные показатели ГЗ, так как блок трансформатора работает на переменном напряжении с частотой 50 Гц, а также применение управляемых выпрямителей с системой управления для обеспечения стабильного постоянного напряжения для нагрузок гаража-заглубителя и ТНПА.

СЭС переменного тока, представленная на рисунке 1.7, содержит БЧ, кабель-трос КТ и ПЧ. БЧ включает в себя фильтр радиопомех ФРП, подключенный к судовой сети 220/380 В с частотой 50/60 Гц, неуправляемый выпрямитель В1, фильтр Ф1, преобразователь постоянного напряжения в переменное повышенной частоты АИН1 и повышающего трансформатора TV1. ПЧ состоит из понижающих трансформаторов TV2, TV3, неуправляемых выпрямителей В2-В4, фильтров Ф2-Ф4, преобразователя постоянного

напряжения в переменное повышенной частоты АИН2, плавучего кабеля и нагрузки Н1–Н3.

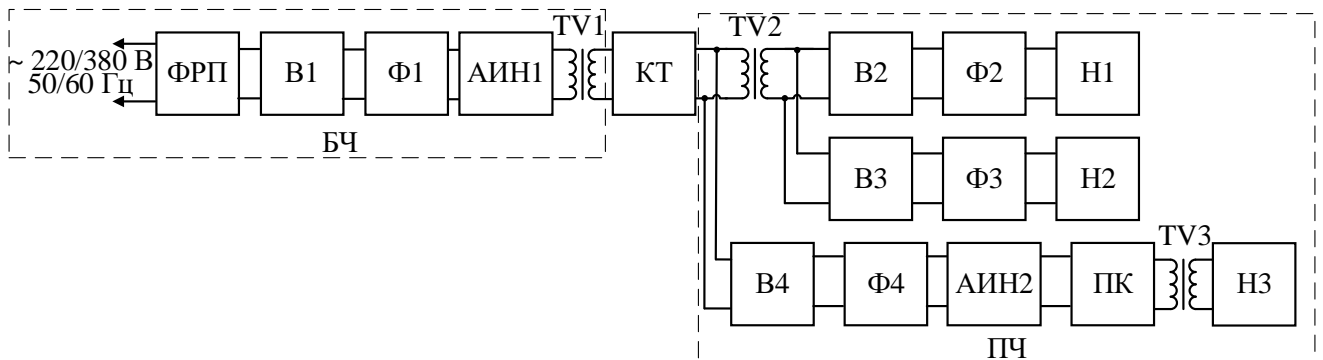


Рисунок 1.7 – СЭС ТНПК на переменном токе с передачей энергии по кабель-тросу переменным напряжением повышенной частоты

Достоинство данной СЭС заключается в двойном повышении частоты питающего напряжения, что позволяет передавать энергию от ГЗ к ТНПА с частотой до 10 кГц.

К недостаткам можно отнести усложнение подводной части, наличие преобразования напряжения и трансформаторов TV2 и TV3.

Недостатками представленных выше СЭС ТНПК на переменном токе являются генерирование реактивного тока в кабель-тросе и массогабаритные показатели ПЧ СЭС ТНПК.

Одно из преимуществ СЭС на постоянном токе – это кабель-трос. Кабели для передачи постоянного тока являются менее дорогими, надежно работающими при более высоком токе. Потери в кабеле меньше за счет отсутствия зарядных токов между главными проводниками и экранирующей оболочкой и резонанса между кабелем и оборудованием.

Одним из представителей СЭС на постоянном токе является высоковольтная система (рисунок 1.8).

Система позволяет улучшить массогабаритные показатели подводной части системы за счет передачи энергии по кабель-тросу постоянным напряжением, а по

плавучему кабелю – переменным повышенной частоты. СЭС состоит из БЧ, кабель-троса и ПЧ.

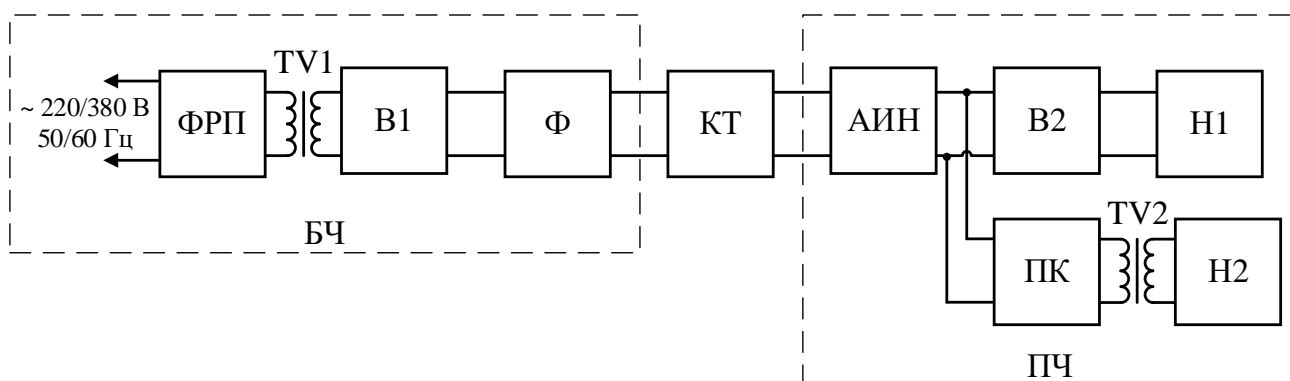


Рисунок 1.8 – СЭС ТНПК на постоянном токе с передачей энергии по кабель-тросу постоянным напряжением и переменным напряжением с частотой 1000 Гц по плавучему кабелю

Бортовая часть включает в себя фильтр радиопомех ФРП, подключенный к судовой сети переменного напряжения 220/380 В с частотой 50/60 Гц, повышающий трансформатор TV1, неуправляемый выпрямитель В1 и фильтр Ф. Подводная часть состоит из преобразователя постоянного напряжения в переменное повышенной частоты АИН, неуправляемого выпрямителя В2, плавающего кабеля ПК, понижающего трансформатора TV2 и нагрузок Н1, Н2.

Достоинствами системы являются передача энергии постоянного напряжения и преобразование постоянного напряжения в переменное повышенной частоты, что уменьшает массогабаритные показатели трансформатора TV2. Данная передача электрической энергии исключает реактивные потери в кабель-тросе.

Недостаток системы заключается в преобразовании постоянного напряжения в переменное повышенной частоты в ПЧ, что ухудшает надежность ПЧ СЭС ТНПК.

С целью улучшения массогабаритных показателей ТНПК представлена СЭС, изображенная на рисунке 1.9.

СЭС (см. рисунок 1.9) содержит БЧ, состоящую из повышающего трансформатора TV1, подключенного к судовой сети переменного напряжения 220/380 В с частотой 50/60 Гц, преобразователя переменного напряжения 50/60 Гц в постоянное АИН1; кабель-троса и ПЧ, включающей в себя преобразователь постоянного напряжения в переменное напряжение повышенной частоты АИН2, блок трансформаторов БТ, преобразователи частоты ЧП1–ЧП3 и нагрузки Н1–Н3.

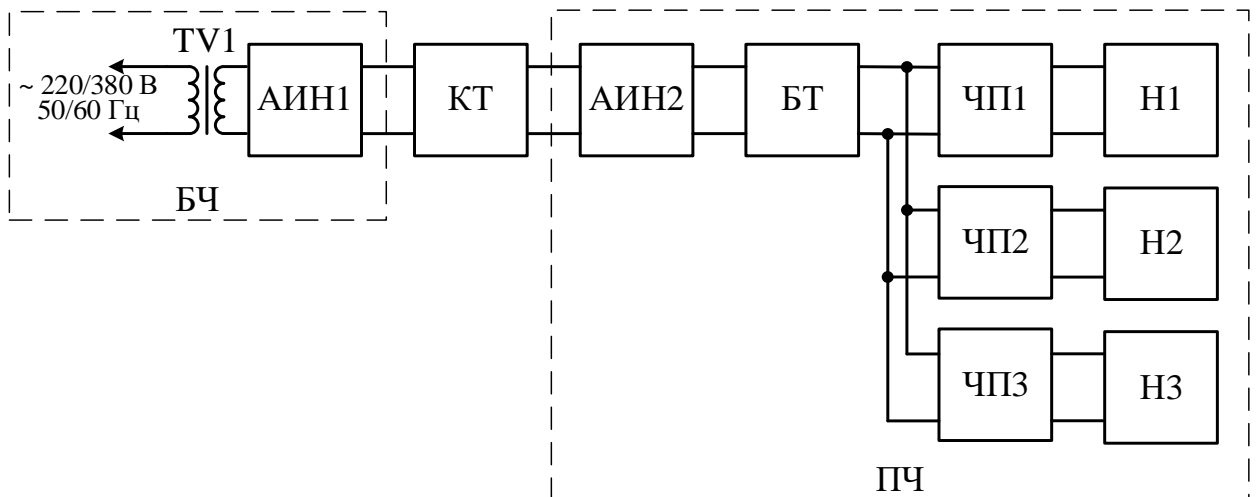


Рисунок 1.9 – СЭС ТНПК на постоянном токе с передачей энергии по кабель-тросу постоянным напряжением

Преимуществом данной схемы является простота исполнения, за исключением организации управления преобразователями.

К недостаткам относят наличие в ПЧ трансформаторного блока БТ, который увеличивает массогабаритные показатели ПЧ, и преобразователей напряжения, которые снижают надежность системы.

Чтобы устранить недостатки предыдущих схем, в последние годы активно разрабатываются модульные многоярусные СЭС постоянного тока [39–42] (рисунок 1.10).

Система, изображенная на рисунке 1.10, состоит из блока трансформатора БТ, подключенного к судовой сети переменного напряжения 220/380 В с частотой 50/60 Гц, преобразователей переменного напряжения 50/60 Гц в постоянное АИН1–АИН3, которые объединены в БЧ; кабель-троса; преобразователей

постоянного напряжения в переменное напряжение АИН4–АИН6 и нагрузки Н1–Н3, которые включены в ПЧ.

Преимуществами являются модульность системы, которая обеспечивает отказоустойчивость системы и способность работать в режиме повреждения. Архитектура также является высоко реконфигурируемой как по функциям, так и по количеству нагрузок во времени. Данная технология потенциально предоставляет возможность снижения стоимости и повышения надежности системы.

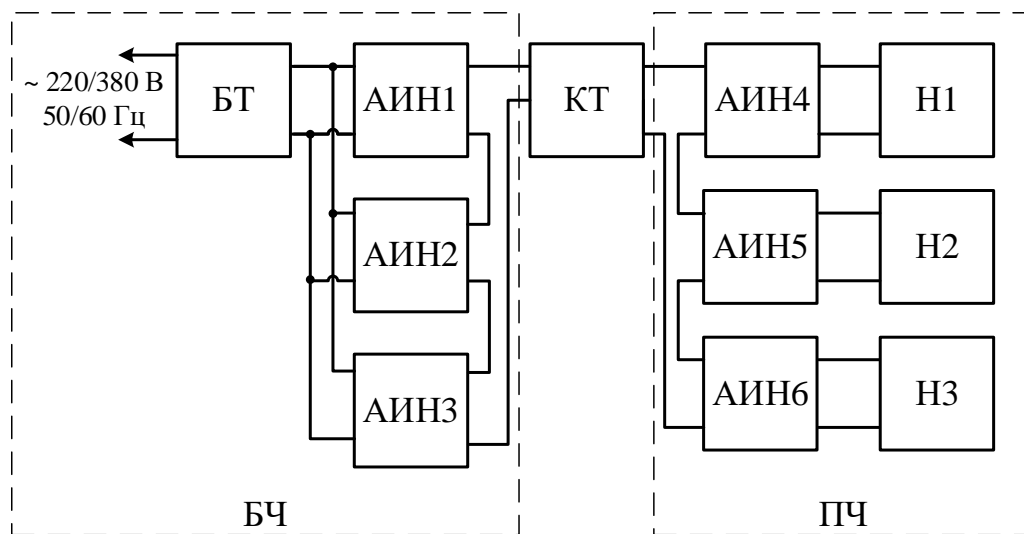


Рисунок 1.10 – СЭС ТНПК на постоянном токе модульно-многоярусного типа с передачей энергии по кабель-тросу

Недостатки: ограниченная область применения (использование данной системы для питания ПЧ ГЗ и ТНПА не целесообразно), наличие преобразования напряжения в ПЧ, сложность реализации управления преобразователей, трудоёмкое обслуживание вследствие модульности системы.

Принимая во внимание недостатки СЭС, изображённых на рисунках 1.8–1.10, предложена СЭС ТНПК на постоянном токе с передачей энергии по кабель-тросу и симметрирующим устройством (СУ) [50–54] (рисунок 1.11).

Данная СЭС включает в себя БЧ, кабель-трос и ПЧ. БЧ состоит из неуправляемых выпрямителей В1, В2, преобразователя постоянного напряжения в переменное напряжение повышенной частоты АИН, повышающего

трансформатора TV1, фильтра Ф. ПЧ содержит следующие узлы: симметрирующее устройство СУ, плавучий кабель ПК и нагрузки Н1–Н4.

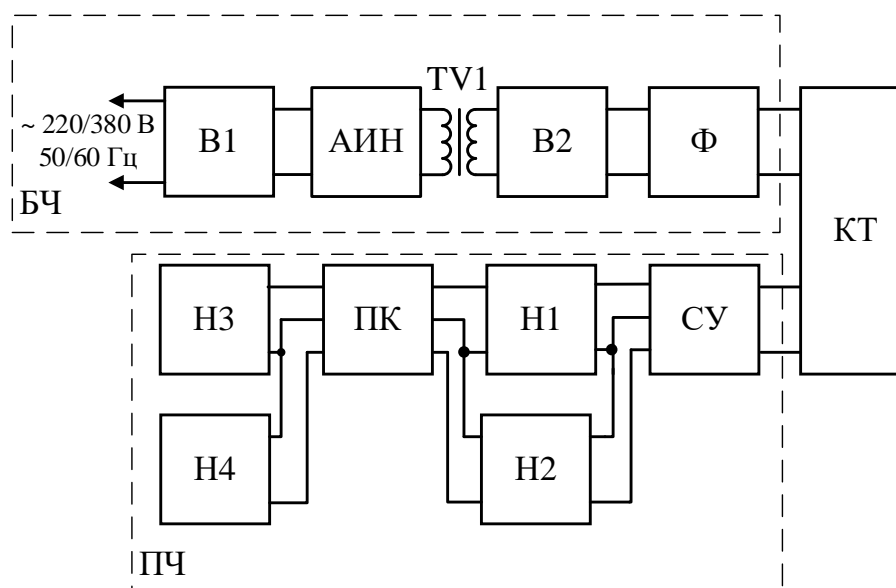


Рисунок 1.11 – СЭС ТНПК на постоянном токе с передачей энергии по кабель-тросу и симметрирующим устройством

Данная структура позволяет уменьшить массогабаритные показатели ПЧ вследствие отсутствия трансформатора и аппаратуры преобразования напряжения, а также обеспечить симметричную загрузку током жил плавучего кабеля благодаря наличию симметрирующего устройства.

К недостаткам относится наличие симметрирующего устройства и отсутствие 300-вольтовых каналов нагрузки в ПЧ. Симметрирующее устройство увеличивает габариты и снижает надежность ПЧ СЭС по причине наличия полупроводниковых элементов и их системы управления. В СЭС отсутствуют 300-вольтовые каналы нагрузки, что усложняет подключение некоторого оборудования ПЧ СЭС ТНПК.

Исключить недостатки позволяет СЭС ТНПК [55], представленная на рисунке 1.12.

Данная СЭС включает в себя БЧ, кабель-трос КТ и ПЧ. БЧ состоит из контактора К, неуправляемых выпрямителей В1–В3, преобразователей постоянного напряжения в переменное повышенной частоты АИН1 и АИН2,

повышающих трансформаторов TV1 и TV2, фильтров $\Phi 1$ и $\Phi 2$. ПЧ содержит следующие узлы: фильтры $\Phi 3$ – $\Phi 7$, преобразователи постоянного напряжения в переменное повышенной частоты АИН3 и АИН4, неуправляемые выпрямители В4–В7, плавучий кабель ПК и нагрузки Н1–Н4.

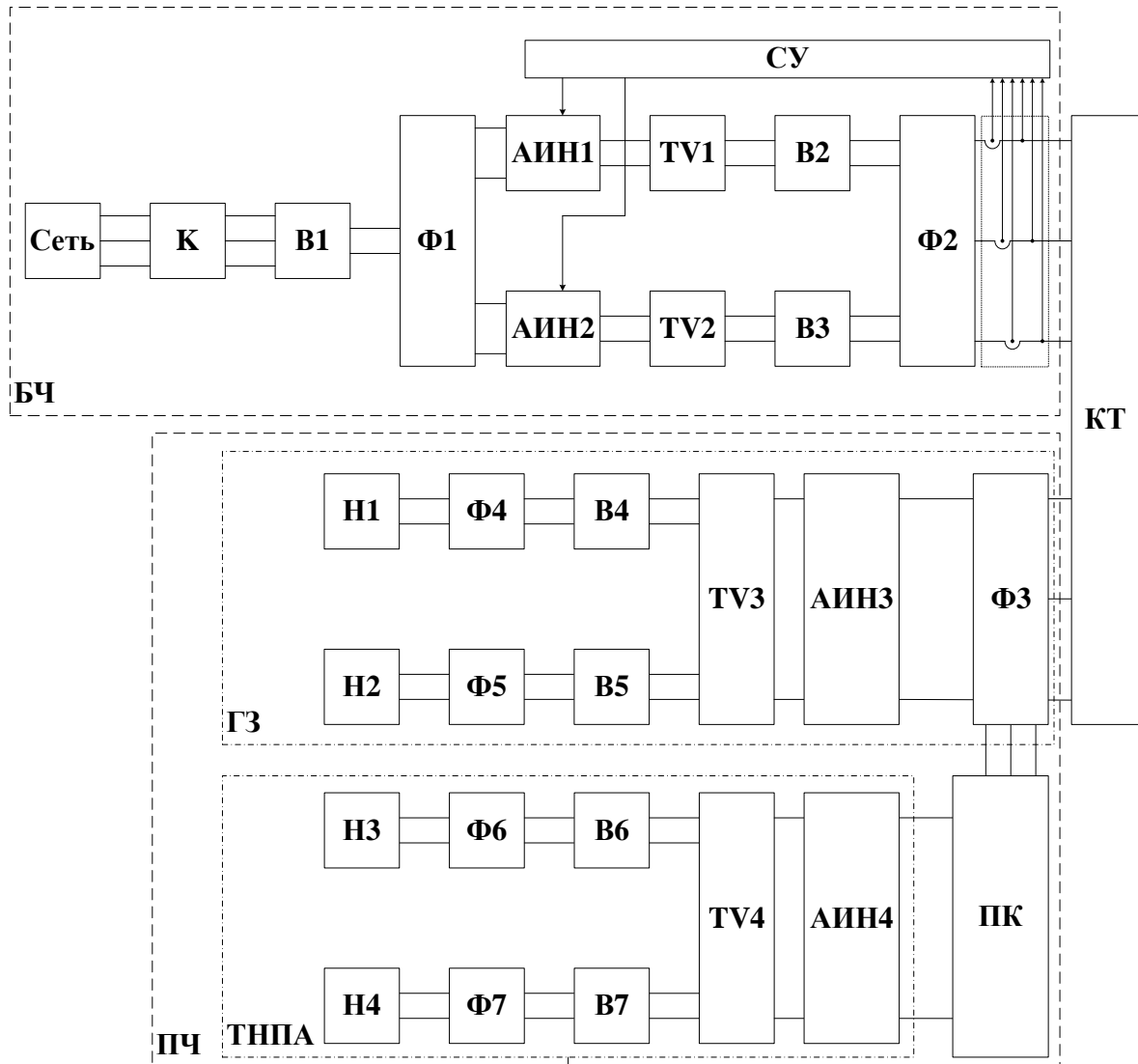


Рисунок 1.12 – СЭС ТНПК на постоянном токе с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу с гальваноразвязанными полезными нагрузками

Данная структура позволяет сформировать гальваническую развязку каналов нагрузки, снизить потери на передачу энергии по кабель-тросу и обеспечить работу при несимметричной нагрузке. Гальваническая развязка и снижение потери на передачу энергии достигается за счет наличия в ПЧ СЭС

ТНПК преобразователей напряжения АИН3 и АИН4. Работа при несимметрии достигается при помощи двух преобразователей напряжения АИН1 и АИН2 и трехжильного кабель-троса.

Недостатками структуры являются наличие преобразователей напряжения АИН3 и АИН4 и их система управления, неуправляемые выпрямители В4–В7, которые снижают надежность ПЧ СЭС ТНПК.

Учитывая представленные выше системы (см. рисунки 1.3–1.12), предложена СЭС ТНПК на постоянном токе с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу (рисунок 1.13).

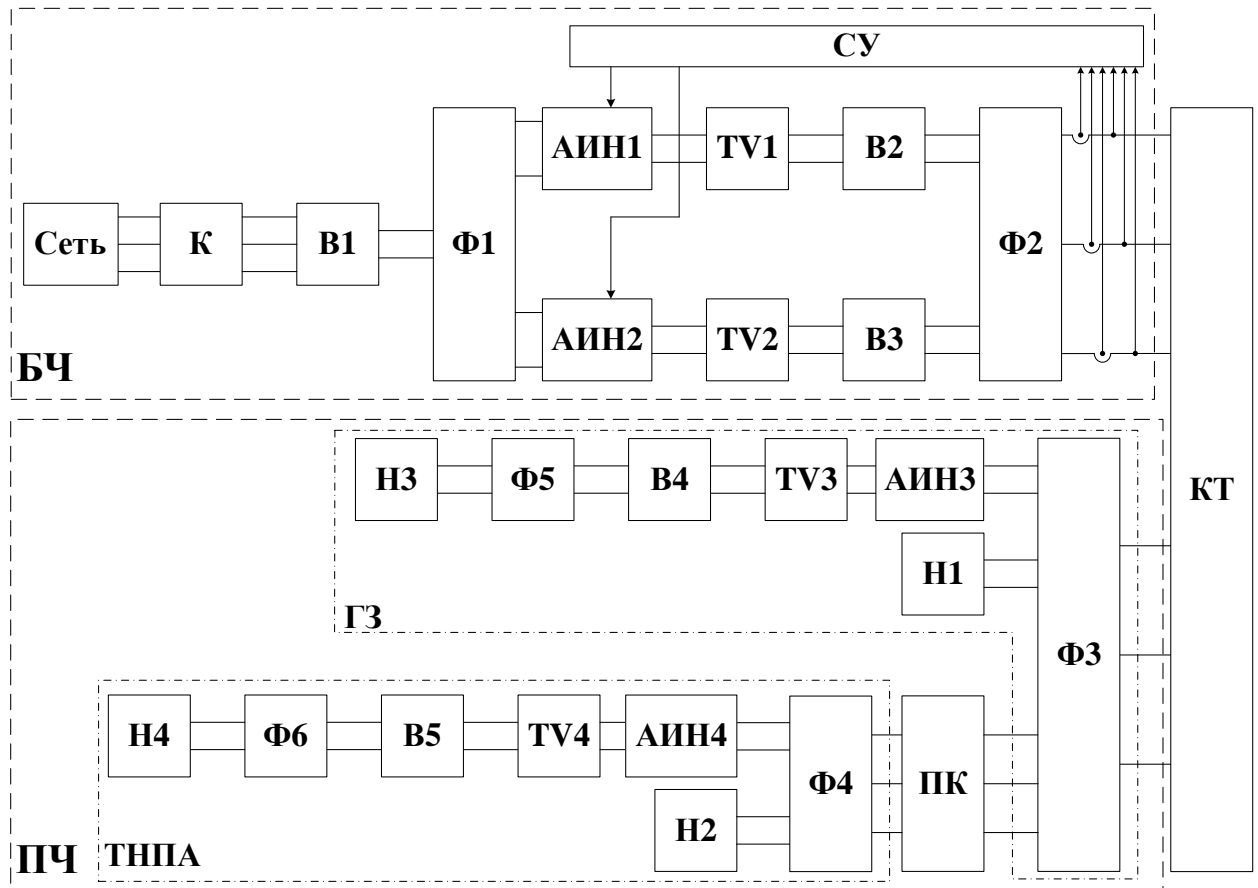


Рисунок 1.13 – СЭС ТНПК на постоянном токе с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу

Данная СЭС включает в себя БЧ, кабель-трос КТ и ПЧ. БЧ состоит из контактора К, неуправляемых выпрямителей В1–В3, преобразователей постоянного напряжения в переменное повышенной частоты АИН1 и АИН2,

повышающих трансформаторов TV1 и TV2, фильтров Ф1 и Ф2. ПЧ содержит следующие узлы: фильтры Ф3–Ф6, преобразователи постоянного напряжения в переменное повышенной частоты АИН3 и АИН4, неуправляемые выпрямители В4 и В5, плавучий кабель ПК и нагрузки Н1–Н4.

Структура СЭС ТНПК позволяет исключить двойное преобразование напряжения 600 В полезной нагрузки, сформировать гальваноразвязанное напряжение 300 В полезной нагрузки, обеспечить работу СЭС в режиме несимметричной нагрузки ПЧ.

Выводы по главе 1

1. На основе проведенного анализа существующих подводных аппаратов различного класса и их систем электроснабжения разработана и представлена общая классификация данных систем по ключевым параметрам, доказано, что в настоящее время для выполнения работ на предельных глубинах мирового океана целесообразно использовать телеуправляемый необитаемый подводный комплекс с передачей энергии на постоянном токе.

2. Предложенная функциональная схема системы электроснабжения телеуправляемого подводного комплекса с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе обеспечивает стабилизацию напряжения на нагрузках ТНПК и отвечает основным требованиям при высоких удельных характеристиках.

ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПЕРЕДАЧЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО КАБЕЛЬ-ТРОСУ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

2.1 Методы моделирования систем электроснабжения телеуправляемых необитаемых подводных комплексов

Для предварительного исследования параметров представленной системы электроснабжения на постоянном токе в статическом и динамическом режимах требуется произвести моделирование. Моделирование позволяет производить первичный анализ и оптимизацию различных компонентов системы.

Одним из основных видов моделирования, используемого при исследовании систем электроснабжения, является математическое моделирование. Математическое моделирование подразумевает создание связей реального объекта с некоторым математическим объектом и дальнейшее его исследование. Вид математической модели зависит от природы реального объекта и задач исследования объекта с требуемой достоверностью и точностью решений. Математическое моделирование различает два основных вида: аналитическое и имитационное [56–65].

Для аналитического моделирования характерна запись состояний в виде функциональных соотношений или логических условий, позволяющая получить решение в явном виде на основе общеизвестных математических правил. В основном для решения аналитических моделей на данный момент используются такие системы компьютерной математики, как Maple, Mathematica, Mathcad.

Имитационное моделирование дает возможность по исходным данным получить сведения о состоянии процесса в определенные моменты времени, оценить характеристики системы. Имитационное моделирование позволяет

производить исследование системы, внешних возмущений, алгоритмов работы системы при изменении внутренних и внешних возмущений. Одни из основных представителей имитационного моделирования являются среды моделирования MatLab, VisSim, Scilab [57-64].

При исследовании системы применяется метод решения дифференциальных уравнений и имитационное моделирование в среде MatLab Simulink.

2.2 Аналитическое моделирование системы электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса

Аналитическое моделирование системы электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе [66, 67] проводилось по схеме замещения, представленной на рисунке 2.1.

Функциональным ядром СЭС является трехфазный трехуровневый инвертор напряжения.

Модель инвертора основана на уравнениях коммутационных функций:

$$\begin{aligned}
 K_{fa1}(\xi_{a1}) &= f(\xi_{a1}); K_{fa2}(\xi_{a2}) = f(\xi_{a2}); \\
 K_{fa3}(\xi_{a3}) &= f(\xi_{a3}); K_{fa4}(\xi_{a4}) = f(\xi_{a4}); \\
 K_{fb1}(\xi_{b1}) &= f(\xi_{b1}); K_{fb2}(\xi_{b2}) = f(\xi_{b2}); \\
 K_{fb3}(\xi_{a3}) &= f(\xi_{b3}); K_{fb4}(\xi_{b4}) = f(\xi_{b4}); \\
 K_{fc1}(\xi_{c1}) &= f(\xi_{c1}); K_{fc2}(\xi_{c2}) = f(\xi_{c2}); \\
 K_{fc3}(\xi_{c3}) &= f(\xi_{c3}); K_{fc4}(\xi_{c4}) = f(\xi_{c4}),
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

где $\xi_{a1}(t)$, $\xi_{a2}(t)$, $\xi_{a3}(t)$, $\xi_{a4}(t)$, $\xi_{b1}(t)$, $\xi_{b2}(t)$, $\xi_{b3}(t)$, $\xi_{b4}(t)$, $\xi_{c1}(t)$, $\xi_{c2}(t)$, $\xi_{c3}(t)$, $\xi_{c4}(t)$ – разностные функции; $f(x)$ – функция, определяющая знак аргумента:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x \geq 0 \\ 0 & \text{при } x < 0 \end{cases} \tag{2.2}$$

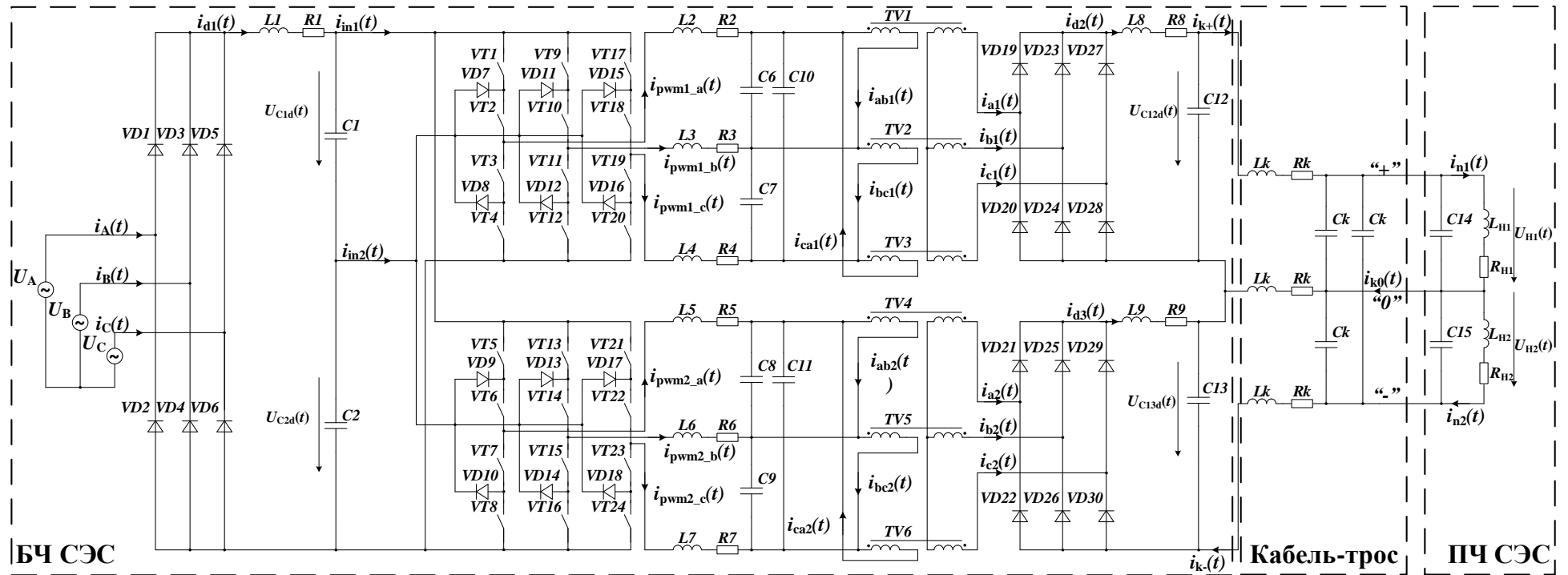


Рисунок 2.1 – Схема замещения силовой части системы электроснабжения телеуправляемого подводного комплекса с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе

Управление реализовано с применением широтно-импульсной модуляции.

Разностные функции определяются согласно следующим функциям:

$$\begin{aligned}
 \xi_{a1}(t) &= K_{ma}(t) - U_{p+}(t); \quad \xi_{a3}(t) = \overline{\xi_{a1}(t)}; \\
 \xi_{a2}(t) &= K_{ma}(t) - U_{p-}(t); \quad \xi_{a4}(t) = \overline{\xi_{a2}(t)}; \\
 \xi_{b1}(t) &= K_{mb}(t) - U_{p+}(t); \quad \xi_{b3}(t) = \overline{\xi_{b1}(t)}; \\
 \xi_{b2}(t) &= K_{mb}(t) - U_{p-}(t); \quad \xi_{b4}(t) = \overline{\xi_{b2}(t)}; \\
 \xi_{c1}(t) &= K_{mc}(t) - U_{p+}(t); \quad \xi_{c3}(t) = \overline{\xi_{c1}(t)}; \\
 \xi_{c2}(t) &= K_{mc}(t) - U_{p-}(t); \quad \xi_{c4}(t) = \overline{\xi_{c2}(t)},
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

где $K_{ma}(t)$, $K_{mb}(t)$, $K_{mc}(t)$, – функции коэффициентов модуляции;
 $U_{p+}(t)$, $U_{p-}(t)$ – функции пилообразного опорного напряжения.

Пилообразные напряжения $U_{p+}(t)$, $U_{p-}(t)$ аналитически описываются следующим выражением:

$$\begin{aligned}
 U_{p+}(t) &= \left| 1 - 2 \cdot \left(\frac{t}{t_{\text{ШИМ}}} - \left\lfloor \frac{t}{t_{\text{ШИМ}}} \right\rfloor \right) \right|; \\
 U_{p-}(t) &= \left| 1 - 2 \cdot \left(\frac{t}{t_{\text{ШИМ}}} - \left\lfloor \frac{t}{t_{\text{ШИМ}}} \right\rfloor \right) \right| - 1,
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

где $\left\lfloor \frac{t}{t_{\text{ШИМ}}} \right\rfloor$ – операция округления вещественного числа до ближайшего целого в меньшую сторону.

Функции коэффициентов модуляции вычисляются по формулам

$$\begin{aligned}
 K_{ma}(t) &= y_z(t) \sin(\omega t); \\
 K_{mb}(t) &= y_z(t) \sin(\omega t + 2\pi / 3); \\
 K_{mc}(t) &= y_z(t) \sin(\omega t + 4\pi / 3),
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

где $y_z(t)$ – функция задания выходного напряжения инвертора.

$$K_a = \begin{cases} 0 & \text{при } K_{fa1} = K_{fa2} = 0 \ \& \ K_{fa3} = K_{fa4} = 1 \\ 1 & \text{при } K_{fa1} = K_{fa4} = 0 \ \& \ K_{fa2} = K_{fa3} = 1; \\ 2 & \text{при } K_{fa1} = K_{fa2} = 1 \ \& \ K_{fa3} = K_{fa4} = 0; \end{cases} \tag{2.6}$$

$$K_b = \begin{cases} 0 & \text{при } K_{fb1} = K_{fb2} = 0 \text{ \& } K_{fb3} = K_{fb4} = 1 \\ 1 & \text{при } K_{fb1} = K_{fb4} = 0 \text{ \& } K_{fb2} = K_{fb3} = 1 ; \\ 2 & \text{при } K_{fb1} = K_{fb2} = 1 \text{ \& } K_{fb3} = K_{fb4} = 0 ; \end{cases} \quad (2.7)$$

$$K_c = \begin{cases} 0 & \text{при } K_{fc1} = K_{fc2} = 0 \text{ \& } K_{fc3} = K_{fc4} = 1 \\ 1 & \text{при } K_{fc1} = K_{fc4} = 0 \text{ \& } K_{fc2} = K_{fc3} = 1 ; \\ 2 & \text{при } K_{fc1} = K_{fc2} = 1 \text{ \& } K_{fc3} = K_{fc4} = 0, \end{cases} \quad (2.8)$$

где K_a , K_b , K_c – функция состояния стойки инвертора.

Для визуализации функции состояния стойки инвертора приведен рисунок 2.2.

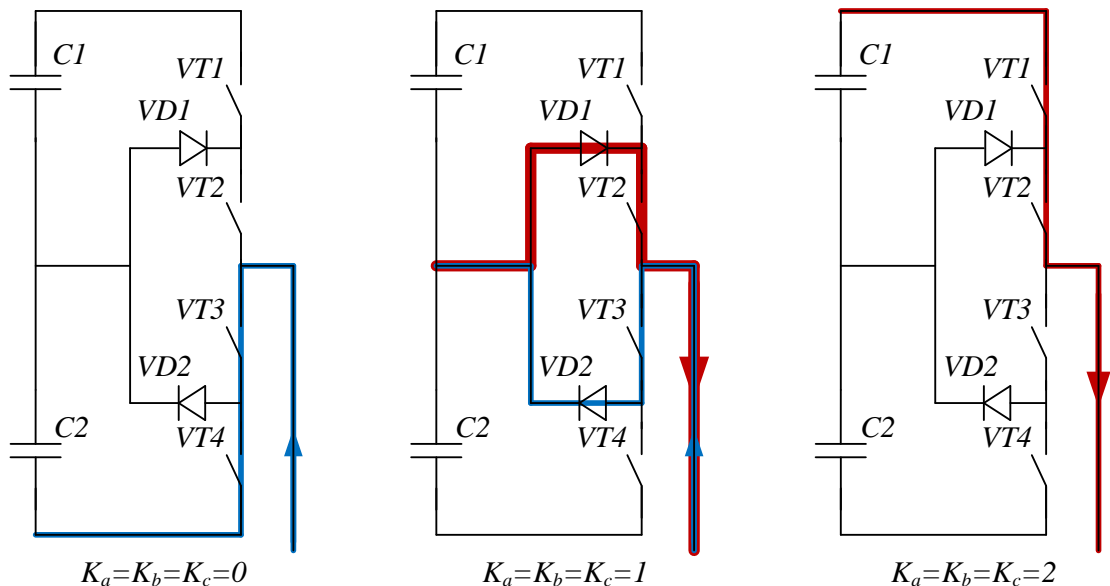


Рисунок 2.2 – Визуализации функции состояния стойки инвертора

Трехфазный мостовой выпрямитель представлен функцией, где выпрямленное напряжение $U_{d1}(t)$ на интервалах, равных одной шестой части периода, определяется разностью фазных напряжений входной трехфазной сети. При этом на каждой одной шестой части периода ток протекает через два диода разных фаз моста. Определяют ток коммутационные функции фаз моста $K_{fiA}(t)$, $K_{fiB}(t)$, $K_{fiC}(t)$. В таблице 2.1 приведены выпрямленное напряжение $U_{d1}(t)$ и коммутационные функции фаз моста $K_{fiA}(t)$, $K_{fiB}(t)$, $K_{fiC}(t)$.

Входные токи выпрямителя определены по формулам

$$\begin{aligned} i_A(t) &= K_{fiA}(t)i_{d1}(t); \\ i_B(t) &= K_{fiB}(t)i_{d1}(t); \\ i_C(t) &= K_{fiC}(t)i_{d1}(t). \end{aligned} \quad (2.9)$$

Таблица 2.1 – Параметры выходного напряжения и коммутационных функций сетевого трехфазного мостового выпрямителя

Условие	$U_{d1}(t)$	$K_{fiA}(t)$	$K_{fiB}(t)$	$K_{fiC}(t)$
$U_A(t) > U_B(t)$ $U_A(t) \geq U_C(t)$ $U_B(t) < U_C(t)$	$U_A(t) - U_B(t)$	1	-1	0
$U_A(t) > U_C(t)$ $U_A(t) \geq U_B(t)$ $U_C(t) < U_B(t)$	$U_A(t) - U_C(t)$	1	0	-1
$U_B(t) > U_C(t)$ $U_B(t) \geq U_A(t)$ $U_C(t) < U_A(t)$	$U_B(t) - U_C(t)$	0	1	-1
$U_B(t) > U_A(t)$ $U_B(t) \geq U_C(t)$ $U_A(t) < U_C(t)$	$U_B(t) - U_A(t)$	-1	1	0
$U_C(t) > U_B(t)$ $U_C(t) \geq U_A(t)$ $U_B(t) < U_A(t)$	$U_C(t) - U_B(t)$	0	-1	1
$U_C(t) > U_A(t)$ $U_C(t) \geq U_B(t)$ $U_A(t) < U_B(t)$	$U_C(t) - U_A(t)$	-1	0	1

Дифференциальные уравнения входного фильтра однофазного автономного инвертора в пространстве переменных состояния имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{di_{d1}(t)}{dt} &= \frac{1}{L_1} (U_{d1}(t) - R_1 i_{d1}(t) - (U_{C1d}(t) + U_{C2d}(t))); \\ \frac{dU_{C1d}(t)}{dt} &= \frac{1}{C_1} (i_{d1}(t) - i_{in}(t)); \\ \frac{dU_{C2d}(t)}{dt} &= \frac{1}{C_2} (i_{d1}(t) - i_{in}(t)); \\ i_{in}(t) &= i_{in1}(t) + i_{in2}(t). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Далее опишем верхний тракт преобразования, начиная от трехфазного трёхуровневого инвертора напряжения и до силового фильтра перед кабель-тросом. При этом описание нижнего тракта будет аналогичным, за исключением нумерации соответствующих переменных.

Входной ток инвертора $i_{in1}(t)$ и выходные напряжения $U_{ab1}(t)$, $U_{bc1}(t)$, $U_{ca1}(t)$ верхнего тракта преобразования рассчитываются через коммутационные функции. Параметры сведены в таблицы 2.2, 2.3.

Таблица 2.2 – Входные токи и коммутационные функции трехфазного трёхуровневого инвертора напряжения

$U_{in}(t) = U_{c1}(t) + U_{c2}(t) = U_{d1}(t)$			
$i_{in1}(t)$	K_a	K_b	K_c
$i_{ab1}(t) + i_{c6}(t) - i_{bc1}(t) - i_{c7}(t)$	2	0	2
$i_{ab1}(t) + i_{c6}(t) + i_{ca1}(t) + i_{c10}(t)$	2	0	0
$i_{ab1}(t) + i_{c6}(t) + i_{bc1}(t) + i_{c7}(t)$	2	2	0
$i_{bc1}(t) + i_{c7}(t) - i_{ab1}(t) - i_{c10}(t)$	0	2	0
$-i_{ca1}(t) - i_{c10}(t) - i_{ab1}(t) - i_{c6}(t)$	0	2	2
$-i_{ca1}(t) - i_{c10}(t) - i_{bc1}(t) - i_{c7}(t)$	0	0	2
$U_{in}(t) = U_{c1}(t) = U_{c2}(t) = \frac{U_{d1}(t)}{2}$			
$i_{in1}(t)$	K_a	K_b	K_c
$i_{ab1}(t) + i_{c6}(t) - i_{bc1}(t) - i_{c7}(t)$	2	1	1
	1	0	0
$i_{ab1}(t) + i_{c6}(t) + i_{ca1}(t) + i_{c10}(t)$	2	2	1
	1	1	0
$i_{ab1}(t) + i_{c6}(t) + i_{bc1}(t) + i_{c7}(t)$	1	2	1
	0	1	0
$i_{bc1}(t) + i_{c7}(t) - i_{ab1}(t) - i_{c10}(t)$	1	2	2
	0	1	1
$-i_{ca1}(t) - i_{c10}(t) - i_{ab1}(t) - i_{c6}(t)$	1	1	2
	0	0	1
$-i_{ca1}(t) - i_{c10}(t) - i_{bc1}(t) - i_{c7}(t)$	2	1	2
	1	0	1

Продолжение таблицы 2.2

$U_{in1}(t) = U_{c1}(t) + U_{c2}(t) = U_{d1}(t); \quad U_{in2}(t) = U_{c1}(t) = U_{c2}(t) = \frac{U_{d1}(t)}{2}$			
$i_{in1}(t)$	K_a	K_b	K_c
$(i_{ab1}(t) + i_{c6}(t))_{U_{in2}} + (i_{ca1}(t) + i_{c10}(t))_{U_{in1}}$	2	1	0
$(i_{bc1}(t) + i_{c7}(t))_{U_{in1}} - (i_{ab1}(t) + i_{c6}(t))_{U_{in2}}$	1	2	0
$(i_{bc1}(t) + i_{c7}(t))_{U_{in2}} - (i_{ab1}(t) + i_{c6}(t))_{U_{in1}}$	0	2	1
$-(i_{ca1}(t) + i_{c10}(t))_{U_{in1}} - (i_{bc1}(t) + i_{c7}(t))_{U_{in2}}$	0	1	2
$-(i_{ca1}(t) + i_{c10}(t))_{U_{in2}} - (i_{bc1}(t) + i_{c7}(t))_{U_{in1}}$	1	0	2
$(i_{ab1}(t) + i_{c6}(t))_{U_{in1}} + (i_{ca1}(t) + i_{c10}(t))_{U_{in2}}$	2	0	1

Таблица 2.3 – Выходные напряжения повышающих трансформаторов

$U_{in1}(t) = U_{c1}(t) + U_{c2}(t) = U_{d1}(t); \quad U_{in2}(t) = U_{c1}(t) = U_{c2}(t) = \frac{U_{d1}(t)}{2}$							
$U_{out1}(t)$	K_a	K_b	K_c	$U_{out1}(t)$	K_a	K_b	K_c
$U_{ab1}(t) = U_{in1}(t)$	2	0	2	$-U_{ab1}(t) = U_{in1}(t)$	0	2	0
$-U_{L2}(t) - U_{L3}(t)$	2	0	1	$-U_{L2}(t) - U_{L3}(t)$	0	2	1
$-U_{R2}(t) - U_{R3}(t)$	2	0	0	$-U_{R2}(t) - U_{R3}(t)$	0	2	2
$U_{ab1}(t) = U_{in2}(t)$	1	0	2	$-U_{ab1}(t) = U_{in2}(t)$	1	2	0
	2	1	2		1	2	1
	1	0	1		0	1	0
	2	1	1		1	2	2
	1	0	0		0	1	1
2	1	0	0	0	1	2	
$U_{bc1}(t) = U_{in1}(t)$	2	2	0	$-U_{bc1}(t) = U_{in1}(t)$	0	0	2
$-U_{L3}(t) - U_{L4}(t)$	1	2	0	$-U_{L3}(t) - U_{L4}(t)$	1	0	2
$-U_{R3}(t) - U_{R4}(t)$	0	2	0	$-U_{R3}(t) - U_{R4}(t)$	2	0	2
$U_{bc1}(t) = U_{in2}(t)$	2	1	0	$-U_{bc1}(t) = U_{in2}(t)$	0	1	2
	2	1	1		1	1	2
	1	0	0		0	0	1
	1	2	1		2	1	2
	0	1	0		1	0	0
0	2	1	1	2	0	1	

Продолжение таблицы 2.3

$U_{out1}(t)$	K_a	K_b	K_c	$U_{out1}(t)$	K_a	K_b	K_c	
$U_{ca1}(t) = U_{in1}(t)$	0	2	2	$-U_{ca1}(t) = U_{in1}(t)$	2	0	0	
$-U_{L4}(t) - U_{L2}(t)$	0	1	2	$-U_{L4}(t) - U_{L2}(t)$	2	1	0	
$-U_{R4}(t) - U_{R2}(t)$	0	0	2	$-U_{R4}(t) - U_{R2}(t)$	2	2	0	
$U_{ca1}(t) = U_{in2}(t)$	0	2	1	$-U_{ca1}(t) = U_{in2}(t)$	2	0	1	
	1	2	2		2	1	1	
	0	1	1		1	0	0	
	$-U_{L4}(t) - U_{L2}(t)$	1	1		2	2	2	1
	$-U_{R4}(t) - U_{R2}(t)$	0	0		1	1	1	0
	1	0	2		1	2	0	

Поскольку обмотки трансформаторов $TV1$, $TV2$, $TV3$ соединены по схеме «треугольник – звезда», коэффициент трансформации равен

$$K_{TV1} = K_{TV2} = K_{TV3} = \sqrt{3} K_{tr}, \quad (2.11)$$

где K_{tr} – коэффициент трансформации силового повышающего трансформатора.

Дифференциальные уравнения по повышенной стороне трансформаторов принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} i_{a1}(t) &= \frac{i_{ab1}(t)}{K_{TV1}}; \quad U_{a1}(t) = U_{ab1}(t) \cdot K_{TV1}; \\ i_{b1}(t) &= \frac{i_{bc1}(t)}{K_{TV2}}; \quad U_{b1}(t) = U_{bc1}(t) \cdot K_{TV2}; \\ i_{c1}(t) &= \frac{i_{ca1}(t)}{K_{TV3}}; \quad U_{c1}(t) = U_{ca1}(t) \cdot K_{TV3}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Аналитическая модель рассматриваемой системы записывается при допущении, что трансформаторы являются идеальными с коэффициентом преобразования K_{tr} . При этом индуктивности рассеяния, активные сопротивления обмоток трансформатора и параметры ветви намагничивания не учитываются.

Трехфазный мостовой выпрямитель представлен функцией, где выпрямленное напряжение $U_{d2}(t)$ на интервалах, равных одной шестой части периода, определяется разностью фазных напряжений обмоток трансформаторов

$TV1, TV2, TV3$. При этом на каждой одной шестой части периода ток двух диодов разных фаз определяется коммутационными функциями фаз моста $K_{fia1}(t)$, $K_{fib1}(t)$, $K_{fic1}(t)$. В таблице 2.4 приведены выпрямленное напряжение $U_{d2}(t)$ и коммутационные функции фаз моста $K_{fia1}(t)$, $K_{fib1}(t)$, $K_{fic1}(t)$.

Таблица 2.4 – Выпрямленное напряжение и коммутационные функции трехфазного мостового выпрямителя БЧ

Условие	$U_{d2}(t)$	$K_{fia1}(t)$	$K_{fib1}(t)$	$K_{fic1}(t)$
$U_{a1}(t) > U_{b1}(t)$ $U_{a1}(t) \geq U_{c1}(t)$ $U_{b1}(t) < U_{c1}(t)$	$U_{a1}(t) - U_{b1}(t)$	1	-1	0
$U_{a1}(t) > U_{c1}(t)$ $U_{a1}(t) \geq U_{b1}(t)$ $U_{c1}(t) < U_{b1}(t)$	$U_{a1}(t) - U_{c1}(t)$	1	0	-1
$U_{b1}(t) > U_{c1}(t)$ $U_{b1}(t) \geq U_{a1}(t)$ $U_{c1}(t) < U_{a1}(t)$	$U_{b1}(t) - U_{c1}(t)$	0	1	-1
$U_{b1}(t) > U_{a1}(t)$ $U_{b1}(t) \geq U_{c1}(t)$ $U_{a1}(t) < U_{c1}(t)$	$U_{b1}(t) - U_{a1}(t)$	-1	1	0
$U_{c1}(t) > U_{b1}(t)$ $U_{c1}(t) \geq U_{a1}(t)$ $U_{b1}(t) < U_{a1}(t)$	$U_{c1}(t) - U_{b1}(t)$	0	-1	1
$U_{c1}(t) > U_{a1}(t)$ $U_{c1}(t) \geq U_{b1}(t)$ $U_{a1}(t) < U_{b1}(t)$	$U_{c1}(t) - U_{a1}(t)$	-1	0	1

Входные токи выпрямителя определены по формулам

$$\begin{aligned}
 i_{a1}(t) &= K_{fia1}(t)i_{d2}(t); \\
 i_{b1}(t) &= K_{fib1}(t)i_{d2}(t); \\
 i_{c1}(t) &= K_{fic1}(t)i_{d2}(t).
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Дифференциальные уравнения выходной цепи выпрямителя записаны следующим образом:

$$\frac{di_{d2}(t)}{dt} = \frac{U_{d2}(t) - U_{c12}(t) - R_8 \cdot i_{d2}(t)}{L_8};$$

$$\frac{dU_{c12}(t)}{dt} = \frac{1}{C_{12}}(i_{d2}(t) - i_{k+}(t)).$$
(2.14)

Аналогичным образом описываем нижний тракт преобразования (таблицы 2.5, 2.6).

Таблица 2.5 – Входные токи и коммутационные функции трехфазного трёхуровневого инвертора напряжения

$U_{in}(t) = U_{c1}(t) + U_{c2}(t) = U_{d1}(t)$			
$i_{in2}(t)$	K_a	K_b	K_c
$i_{ab2}(t) + i_{c8}(t) - i_{bc2}(t) - i_{c9}(t)$	2	0	2
$i_{ab2}(t) + i_{c8}(t) + i_{ca2}(t) + i_{c11}(t)$	2	0	0
$i_{ab2}(t) + i_{c8}(t) + i_{bc2}(t) + i_{c9}(t)$	2	2	0
$i_{bc2}(t) + i_{c9}(t) - i_{ab2}(t) - i_{c11}(t)$	0	2	0
$-i_{ca2}(t) - i_{c11}(t) - i_{ab2}(t) - i_{c8}(t)$	0	2	2
$-i_{ca2}(t) - i_{c11}(t) - i_{bc2}(t) - i_{c9}(t)$	0	0	2
$i_{ab2}(t) + i_{c8}(t) - i_{bc2}(t) - i_{c9}(t)$	2	1	1
	1	0	0
$i_{ab2}(t) + i_{c8}(t) + i_{ca2}(t) + i_{c11}(t)$	2	2	1
	1	1	0
$i_{ab2}(t) + i_{c8}(t) + i_{bc2}(t) + i_{c9}(t)$	1	2	1
	0	1	0
$i_{bc2}(t) + i_{c9}(t) - i_{ab2}(t) - i_{c11}(t)$	1	2	2
	0	1	1
$-i_{ca2}(t) - i_{c11}(t) - i_{ab2}(t) - i_{c8}(t)$	1	1	2
	0	0	1
$-i_{ca2}(t) - i_{c11}(t) - i_{bc2}(t) - i_{c9}(t)$	2	1	2
	1	0	1
$U_{in1}(t) = U_{c1}(t) + U_{c2}(t) = U_{d1}(t); \quad U_{in2}(t) = U_{c1}(t) = U_{c2}(t) = \frac{U_{d1}(t)}{2}$			
$i_{in2}(t)$	K_a	K_b	K_c
$(i_{ab2}(t) + i_{c8}(t))_{U_{in2}} + (i_{ca2}(t) + i_{c11}(t))_{U_{in1}}$	2	1	0
$(i_{bc2}(t) + i_{c9}(t))_{U_{in1}} - (i_{ab2}(t) + i_{c8}(t))_{U_{in2}}$	1	2	0
$(i_{bc2}(t) + i_{c9}(t))_{U_{in2}} - (i_{ab2}(t) + i_{c8}(t))_{U_{in1}}$	0	2	1
$-(i_{ca2}(t) + i_{c11}(t))_{U_{in1}} - (i_{bc2}(t) + i_{c9}(t))_{U_{in2}}$	0	1	2

Продолжение таблицы 2.5

$U_{in1}(t) = U_{c1}(t) + U_{c2}(t) = U_{d1}(t); \quad U_{in2}(t) = U_{c1}(t) = U_{c2}(t) = \frac{U_{d1}(t)}{2}$			
$i_{in2}(t)$	K_a	K_b	K_c
$-(i_{ca2}(t) + i_{c11}(t))_{U_{in2}} - (i_{bc2}(t) + i_{c9}(t))_{U_{in1}}$	1	0	2
$(i_{ab2}(t) + i_{c8}(t))_{U_{in1}} + (i_{ca2}(t) + i_{c11}(t))_{U_{in2}}$	2	0	1

Таблица 2.6 – Выходные напряжения повышающих трансформаторов

$U_{in1}(t) = U_{c1}(t) + U_{c2}(t) = U_{d1}(t); \quad U_{in2}(t) = U_{c1}(t) = U_{c2}(t) = \frac{U_{d1}(t)}{2}$							
$U_{out2}(t)$	K_a	K_b	K_c	$U_{out2}(t)$	K_a	K_b	K_c
$U_{ab2}(t) = U_{in1}(t)$	2	0	2	$-U_{ab2}(t) = U_{in1}(t)$	0	2	0
$-U_{L5}(t) - U_{L6}(t)$	2	0	1	$-U_{L5}(t) - U_{L6}(t)$	0	2	1
$-U_{R5}(t) - U_{R6}(t)$	2	0	0	$-U_{R5}(t) - U_{R6}(t)$	0	2	2
$U_{ab2}(t) = U_{in2}(t)$	1	0	2	$-U_{ab2}(t) = U_{in2}(t)$	1	2	0
	2	1	2		1	2	1
	1	0	1		0	1	0
	2	1	1		1	2	2
	1	0	0		0	1	1
$-U_{L5}(t) - U_{L6}(t)$	2	1	1	$-U_{L5}(t) - U_{L6}(t)$	0	1	2
$-U_{R5}(t) - U_{R6}(t)$	1	0	0	$-U_{R5}(t) - U_{R6}(t)$	0	1	1
	2	1	0		0	1	2
$U_{bc2}(t) = U_{in1}(t)$	2	2	0	$-U_{bc2}(t) = U_{in1}(t)$	0	0	2
	1	2	0		1	0	2
	0	2	0		2	0	2
$-U_{L6}(t) - U_{L7}(t)$	1	2	0	$-U_{L6}(t) - U_{L7}(t)$	1	0	2
$-U_{R6}(t) - U_{R7}(t)$	0	2	0	$-U_{R6}(t) - U_{R7}(t)$	2	0	2
$U_{bc2}(t) = U_{in2}(t)$	2	1	0	$-U_{bc2}(t) = U_{in2}(t)$	0	1	2
	2	1	1		1	1	2
	1	0	0		0	0	1
	1	2	1		2	1	2
	0	1	0		1	0	0
$-U_{L6}(t) - U_{L7}(t)$	0	2	1	$-U_{L6}(t) - U_{L7}(t)$	2	0	1
$-U_{R6}(t) - U_{R7}(t)$	0	2	1	$-U_{R6}(t) - U_{R7}(t)$	2	0	1
$U_{ca2}(t) = U_{in1}(t)$	0	2	2	$-U_{ca2}(t) = U_{in1}(t)$	2	0	0
	0	1	2		2	1	0
	0	0	2		2	2	0
$-U_{L7}(t) - U_{L5}(t)$	0	1	2	$-U_{L7}(t) - U_{L5}(t)$	2	1	0
$-U_{R7}(t) - U_{R5}(t)$	0	0	2	$-U_{R7}(t) - U_{R5}(t)$	2	2	0
$U_{ca2}(t) = U_{in2}(t)$	0	2	1	$-U_{ca2}(t) = U_{in2}(t)$	2	0	1
	1	2	2		2	1	1
	0	1	1		1	0	0
	1	1	2		2	2	1
	0	0	1		1	1	0
$-U_{L7}(t) - U_{L5}(t)$	0	1	1	$-U_{L7}(t) - U_{L5}(t)$	1	0	0
$-U_{R7}(t) - U_{R5}(t)$	0	0	1	$-U_{R7}(t) - U_{R5}(t)$	1	1	0
	1	0	2		1	2	0

Поскольку обмотки трансформаторов $TV4$, $TV5$, $TV6$ соединены по схеме «треугольник – звезда», коэффициент трансформации можно представить как

$$K_{TV4} = K_{TV5} = K_{TV6} = \sqrt{3} K_{tr}, \quad (2.15)$$

где K_{tr} – коэффициент трансформации силового повышающего трансформатора.

Математическая модель рассматриваемой системы записывается при допущении, что трансформаторы являются идеальными с коэффициентом преобразования K_{tr} . При этом индуктивности рассеяния, активные сопротивления обмоток трансформатора и параметры ветви намагничивания не учитываются.

Дифференциальные уравнения по повышенной стороне трансформаторов принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} i_{a2}(t) &= \frac{i_{ab2}(t)}{K_{TV4}}; \quad U_{a2}(t) = U_{ab2}(t) \cdot K_{TV4}; \\ i_{b2}(t) &= \frac{i_{bc2}(t)}{K_{TV5}}; \quad U_{b2}(t) = U_{bc2}(t) \cdot K_{TV5}; \\ i_{c2}(t) &= \frac{i_{ca2}(t)}{K_{TV6}}; \quad U_{c2}(t) = U_{ca2}(t) \cdot K_{TV6}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Трехфазный мостовой выпрямитель представлен функцией, где выпрямленное напряжение $U_{d3}(t)$ на интервалах, равных одной шестой части периода, определяется разностью фазных напряжений обмоток трансформаторов $TV4$, $TV5$, $TV6$. При этом на каждой одной шестой части периода ток двух диодов разных фаз определяется коммутационными функциями фаз моста $K_{fia2}(t)$, $K_{fib2}(t)$, $K_{fic2}(t)$. В таблице 2.7 приведены выпрямленное напряжение $U_{d3}(t)$ и коммутационные функции фаз моста $K_{fia2}(t)$, $K_{fib2}(t)$, $K_{fic2}(t)$.

Входные токи выпрямителя определены по формулам

$$i_{a2}(t) = K_{fia2}(t)i_{d3}(t); \quad i_{b2}(t) = K_{fib2}(t)i_{d3}(t); \quad i_{c1}(t) = K_{fic1}(t)i_{d2}(t). \quad (2.17)$$

Таблица 2.7 – Выпрямленное напряжение и коммутационные функции трехфазного мостового выпрямителя БЧ

Условие	$U_{d3}(t)$	$K_{fia2}(t)$	$K_{fib2}(t)$	$K_{fic2}(t)$
$U_{a2}(t) > U_{b2}(t)$ $U_{a2}(t) \geq U_{c2}(t)$ $U_{b2}(t) < U_{c2}(t)$	$U_{a2}(t) - U_{b2}(t)$	1	-1	0
$U_{a2}(t) > U_{c2}(t)$ $U_{a2}(t) \geq U_{b2}(t)$ $U_{c2}(t) < U_{b2}(t)$	$U_{a2}(t) - U_{c2}(t)$	1	0	-1
$U_{b2}(t) > U_{c2}(t)$ $U_{b2}(t) \geq U_{a2}(t)$ $U_{c2}(t) < U_{a2}(t)$	$U_{b2}(t) - U_{c2}(t)$	0	1	-1
$U_{b2}(t) > U_{a2}(t)$ $U_{b2}(t) \geq U_{c2}(t)$ $U_{a2}(t) < U_{c2}(t)$	$U_{b2}(t) - U_{a2}(t)$	-1	1	0
$U_{c2}(t) > U_{b2}(t)$ $U_{c2}(t) \geq U_{a2}(t)$ $U_{b2}(t) < U_{a2}(t)$	$U_{c2}(t) - U_{b2}(t)$	0	-1	1
$U_{c2}(t) > U_{a2}(t)$ $U_{c2}(t) \geq U_{b2}(t)$ $U_{a2}(t) < U_{b2}(t)$	$U_{c2}(t) - U_{a2}(t)$	-1	0	1

Дифференциальные уравнения выходной цепи выпрямителя записаны следующим образом:

$$\frac{di_{d3}(t)}{dt} = \frac{U_{d3}(t) - U_{c13}(t) - R_9 \cdot i_{d3}(t)}{L_9}; \quad (2.18)$$

$$\frac{dU_{c13}(t)}{dt} = \frac{1}{C_{13}}(i_{d3}(t) - i_{k-}(t)).$$

Токи кабель-троса определяются согласно уравнениям:

$$\frac{di_{k+}(t)}{dt} = \frac{U_{c12}(t) - U_{c14}(t) - R_k \cdot i_{k+}(t) - R_k \cdot i_{k0}(t)}{\frac{5}{2}L_k} +$$

$$+ \frac{U_{c13}(t) - U_{c15}(t) - R_k \cdot i_{k-}(t) + R_k \cdot i_{k0}(t)}{\frac{5}{2}L_k}; \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{k-}(t)}{dt} = & \frac{U_{c13}(t) - U_{c15}(t) - R_k \cdot i_{k-}(t) + R_k \cdot i_{k0}(t)}{\frac{5}{2}L_k} + \\ & + \frac{U_{c12}(t) - U_{c14}(t) - R_k \cdot i_{k-}(t) - R_k \cdot i_{k0}(t)}{\frac{5}{2}L_k}; \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$i_{k0}(t) = i_{k+}(t) - i_{k-}(t).$$

Выходные напряжения и токи подводной части СЭС описаны следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \frac{di_{n1}(t)}{dt} &= \frac{U_{c14} - R_{n1} \cdot i_{n1}(t)}{L_{n1}}, \\ \frac{dU_{c14}(t)}{dt} &= \frac{1}{C_{14} + C_k} (i_{k+}(t) - i_{n1}(t)); \\ \frac{di_{n21}(t)}{dt} &= \frac{U_{c15} - R_{n2} \cdot i_{n2}(t)}{L_{n2}}, \\ \frac{dU_{c15}(t)}{dt} &= \frac{1}{C_{15} + C_k} (i_{k-}(t) - i_{n2}(t)). \end{aligned} \quad (2.21)$$

Для проведения моделирования предварительно получены параметры системы на основе работ [66, 67, 70–89], в которых представлены основные расчеты СЭС ТНПК с передачей энергии на постоянном токе. Параметры СЭС ТНПК сведены в таблицу 2.8.

Таблица 2.8 – Электрические параметры компонентов СЭС ТНПК

Название параметра	Обозначение	Значение
Индуктивность входного фильтра БЧ	L1	12 мГн
Емкость входного фильтра АИН	C1, C2	3000 мкФ
Индуктивность выходного фильтра АИН	L2-L7	0,7 мкГн
Емкость выходного фильтра АИН	C6-C11	1 мкФ
Частота преобразования	f	50 кГц
Несущая частота ШИМ	F _{рwm}	500 кГц
Коэффициент трансформации трансформатора	K _{tr}	2,4375
Индуктивность выходного фильтра БЧ	L8, L9	1,1 мкГн

Продолжение таблицы 2.8

Название параметра	Обозначение	Значение
Емкость выходного фильтра БЧ	C12, C13	60 мкФ
Сопротивление жилы кабель-троса	Rk	11,667 Ом
Индуктивность жилы кабель-троса	Lk	8,546 мГн
Межжильная емкость кабель-троса	Ck	1,2 мкФ
Емкость жила-броня кабель-троса	Ckg	1 мкФ
Емкость входного фильтра ПЧ	C14, C15	200 мкФ
Эквивалентное сопротивление нагрузки	Rn	12 Ом
Эквивалентная индуктивность нагрузки	Ln	50 мГн

Результаты моделирования СЭС ТНПК (рисунки 2.3–2.5) показывают, что зависимость выходного напряжения при номинальном и холостом режиме работы имеет апериодический характер, в случае 50 % несимметричной загрузки каналов ТНПК на одном из них возникает перерегулирование. Из полученных зависимостей видно, что в режиме холостого хода установившееся значение выходного напряжения составляет 1620 В, а время переходного процесса не превышает 59 мс; в номинальном режиме установившееся значение выходного напряжения составило 895 В с временем переходного процесса не более 25 мс. В случае 50 % несимметрии мощности полезной нагрузки СЭС ТНПК установившееся значение выходного напряжения первой нагрузки составило 815 В, а выходное напряжение второй нагрузки 1298 В. При этом в выходном напряжении первого канала наблюдается перерегулирование, не превышающее 8 %. Время переходного процесса для первой нагрузки составило 51,1 мс, в то время как для второй нагрузки – 55,6 мс.

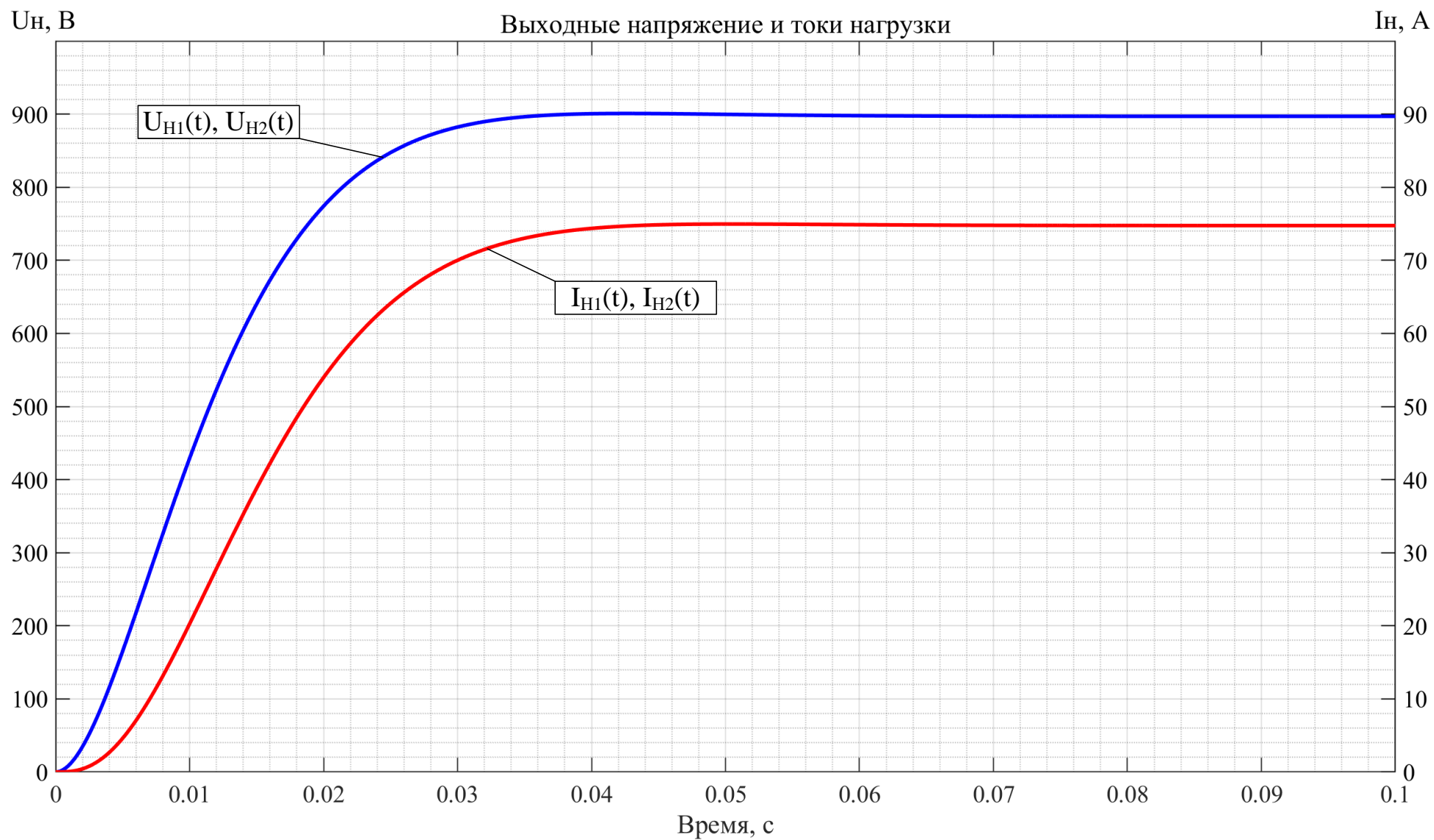


Рисунок 2.3 – Зависимости выходных напряжений и токов нагрузки ТНПК в номинальном режиме при коэффициенте модуляции (K_m) равном 1

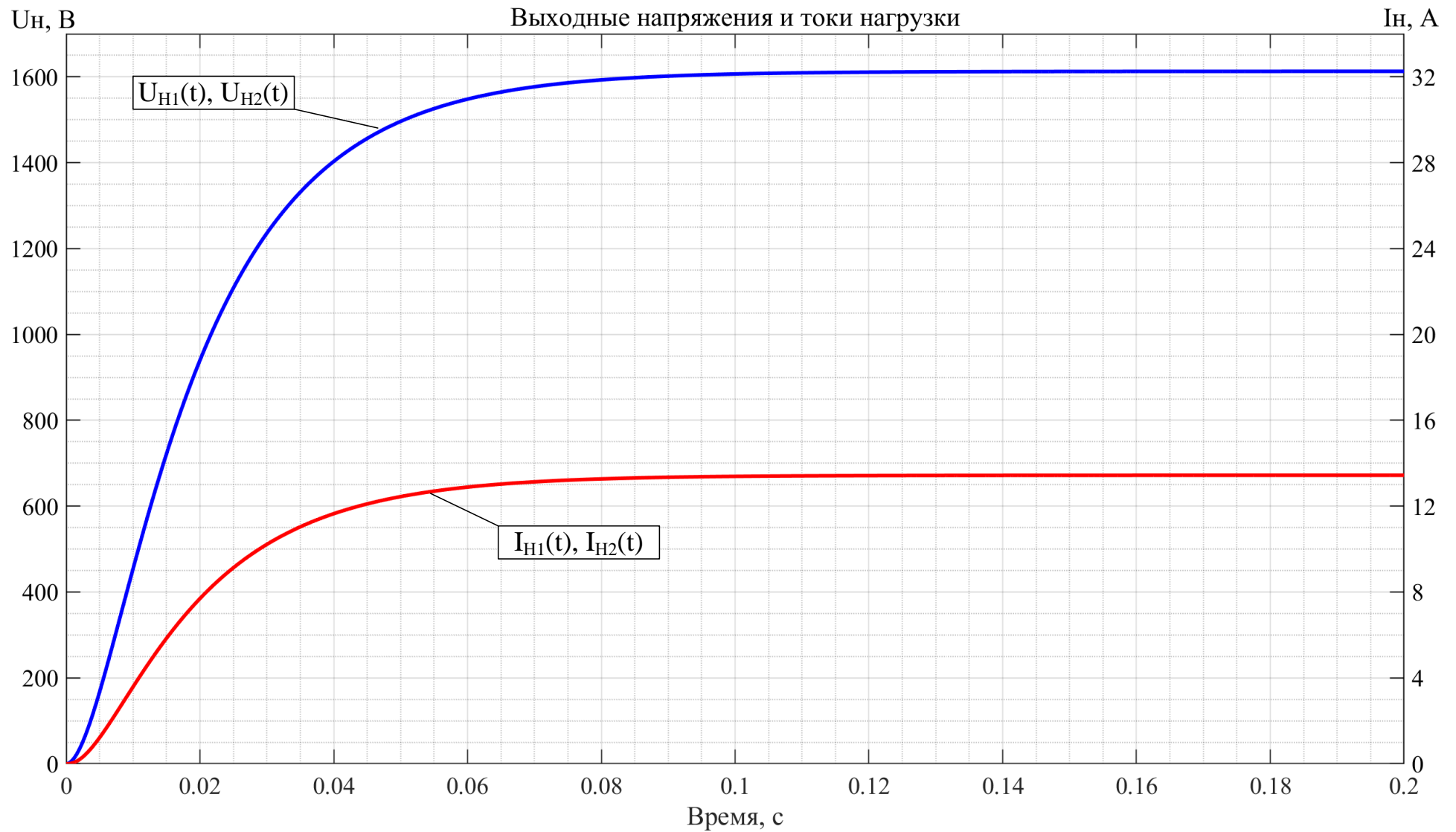


Рисунок 2.3 – Зависимости выходных напряжений и токов нагрузки ТНПК
в номинальном режиме при коэффициенте модуляции (K_m) равном 1

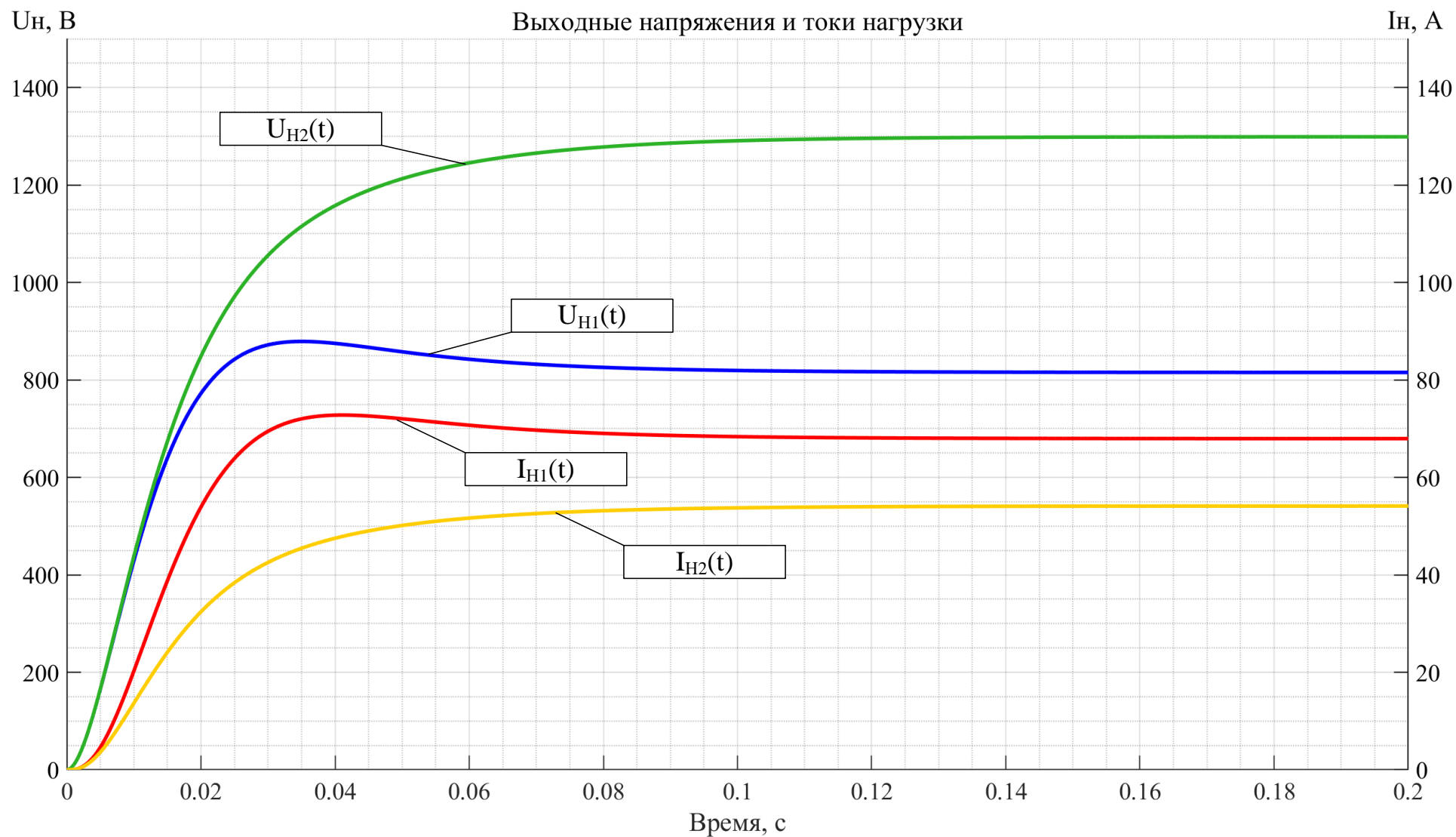


Рисунок 2.5 – Зависимости выходных напряжений и токов нагрузки ТНПК при несимметричной загрузке и $КМ = 1$

2.3 Имитационное моделирование системы электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса

Имитационная модель системы электроснабжения ТНПК с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе разрабатывалась в среде моделирования MatLab 2020b – Simulink на основе электрической принципиальной схемы, представленной на рисунке 2.1.

MatLab/Simulink – среда динамического междисциплинарного моделирования сложных технических систем и основной инструмент для модельно-ориентированного проектирования. Его основным интерфейсом является графический инструмент для построения диаграмм и настраиваемый набор библиотек блоков. Он предлагает тесную интеграцию с остальной средой MatLab и может либо использовать MatLab, либо создавать сценарии из него. Simulink широко используется в автоматическом управлении и цифровой обработке сигналов для многодоменного моделирования и проектирования на основе моделей.

Simulink предназначен для моделирования и симуляций на системном уровне, что позволяет проводить всестороннее исследование разрабатываемой системы в единой среде проектирования. Моделирование и симуляции позволяют провести проверку поведения системы в критических условиях или аварийных сценариях. Тем самым происходит снижение затрат на дорогостоящие физические прототипы. Проверка системы осуществляется с помощью полунатурного моделирования и быстрого прототипирования [57].

Программный пакет MatLab/Simulink интерпретирует модель как систему дифференциальных уравнений и решает ее численными методами с учетом всех нелинейностей, заложенных в схеме. Для моделирования в диссертационной работе использовался метод решения дифференциальных уравнений ode1, представляющий собой метод Эйлера.

На рисунках 2.6–2.12 представлена имитационная модель СЭС с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе, полученная в пакете MatLab 2020b – Simulink.

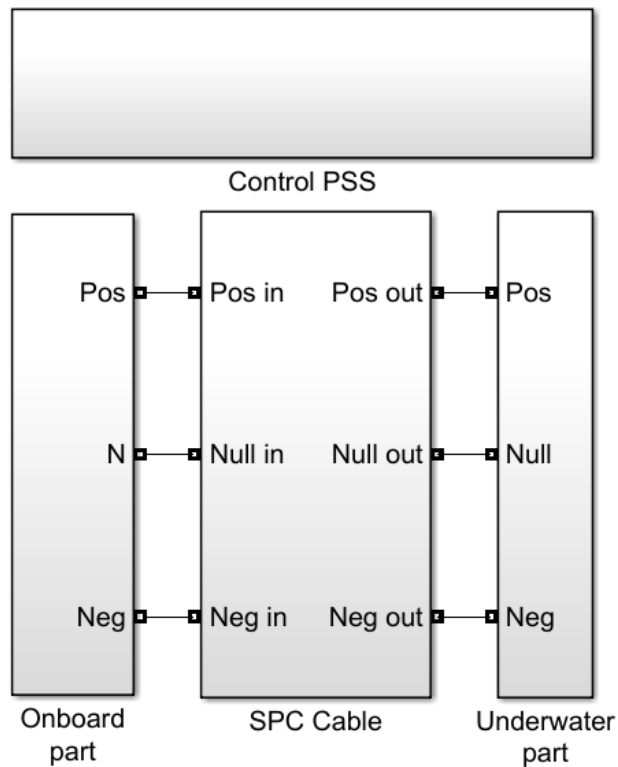


Рисунок 2.6 – Имитационная модель СЭС с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе

Модель СЭС ТНПК (см. рисунок 2.6) состоит из четырех блоков: блока бортовой части Onboard part, блока кабель-троса SPC Cable, блока подводной части Underwater part и блока системы управления Control PSS.

Внутренняя структура бортовой части представлена на рисунке 2.7. Модель БЧ СЭС ТНПК состоит из бортовой трехфазной сети и трехфазного выпрямителя с LC-фильтром; блока входного буферного фильтра (рисунок 2.8); двух трехфазных трехуровневых инверторов напряжения с выходными фильтрами; двух блоков трансформаторов (рисунок 2.9); двух трехфазных выпрямителей с LC-фильтрами.

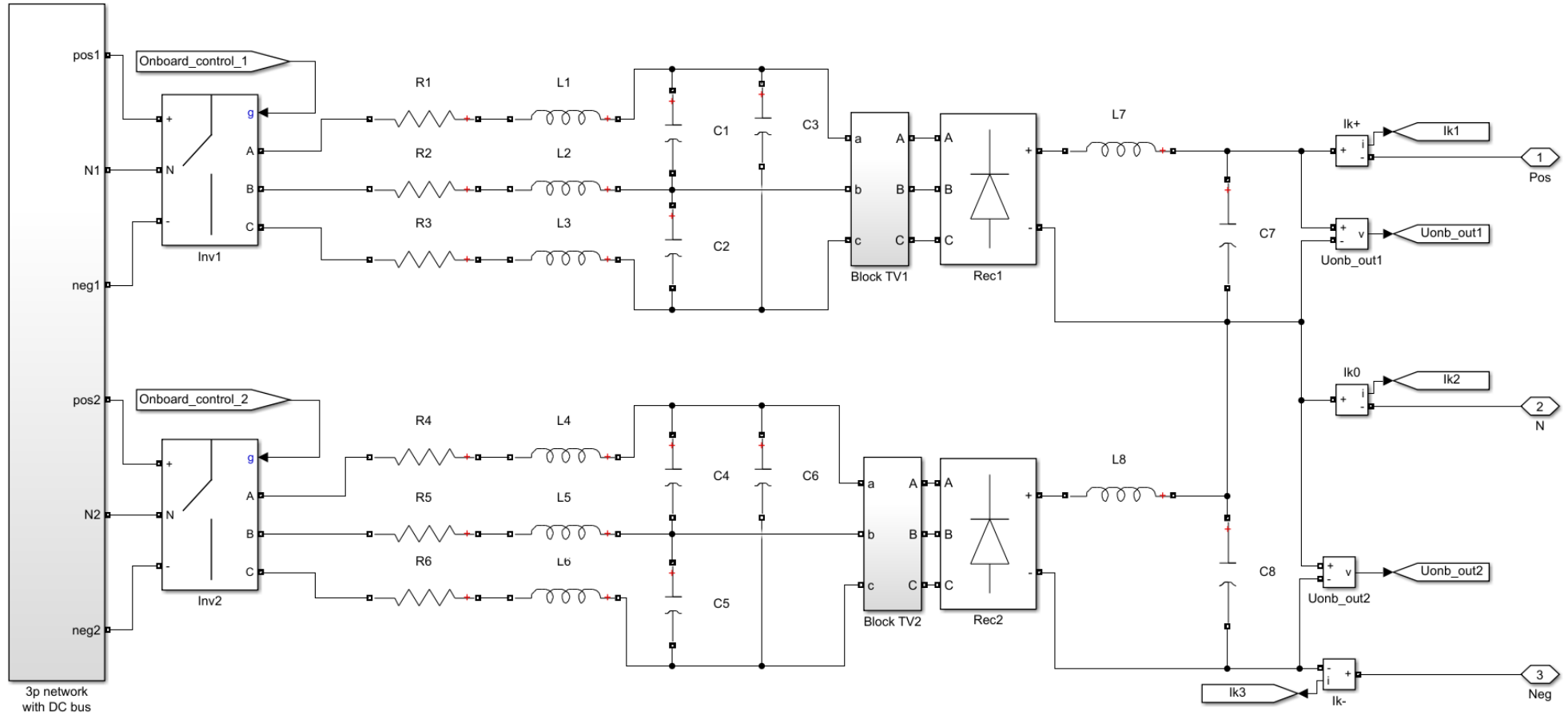


Рисунок 2.7 – Имитационная модель бортовой части СЭС ТНПК

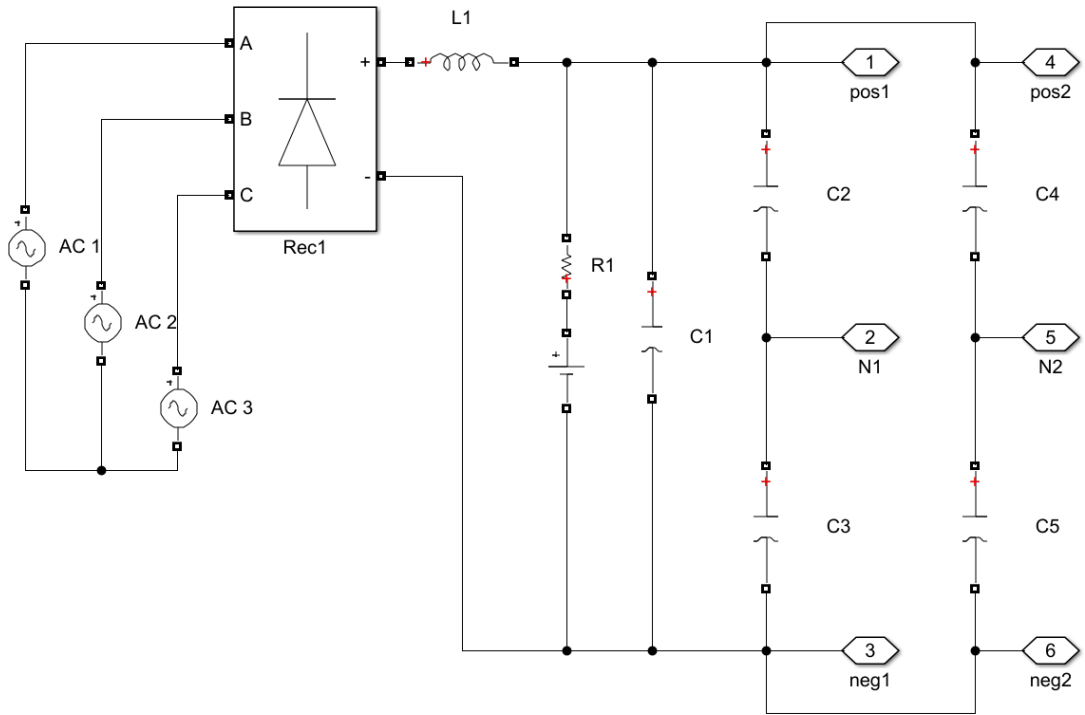


Рисунок 2.8 – Имитационная модель входного фильтра БЧ СЭС ТПК

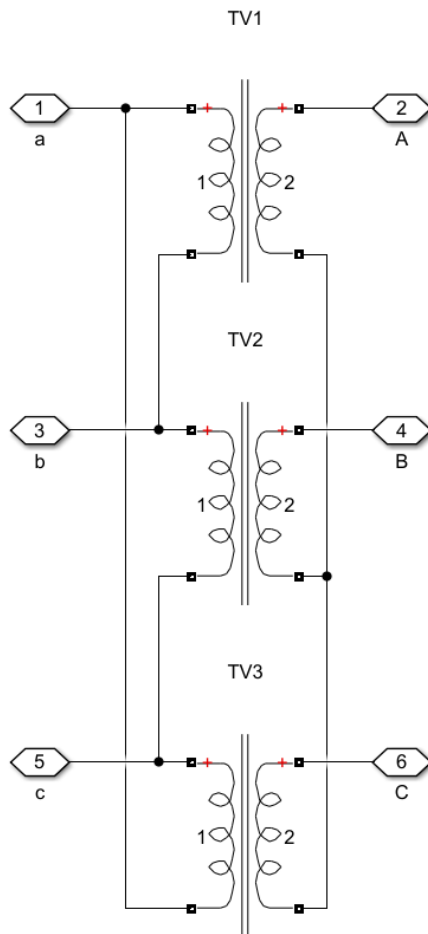


Рисунок 2.9 – Имитационная модель блока повышающих трансформаторов бортовой части СЭС

Кабель-трос в имитационной модели представлен в качестве звена с сосредоточенными параметрами (рисунок 2.10). При этом к основным электрическим параметрам кабель-троса отнесены:

- погонное электрическое сопротивление токопроводящей жилы (R_{Π} , Ом/км);
- погонная величина емкости силовых жил (C_{Π} , мкФ/км);
- погонная величина емкости между силовыми жилами ($C_{\Piж}$, мкФ/км);
- погонная величина индуктивности силовых жил (L_{Π} , мГн/км).

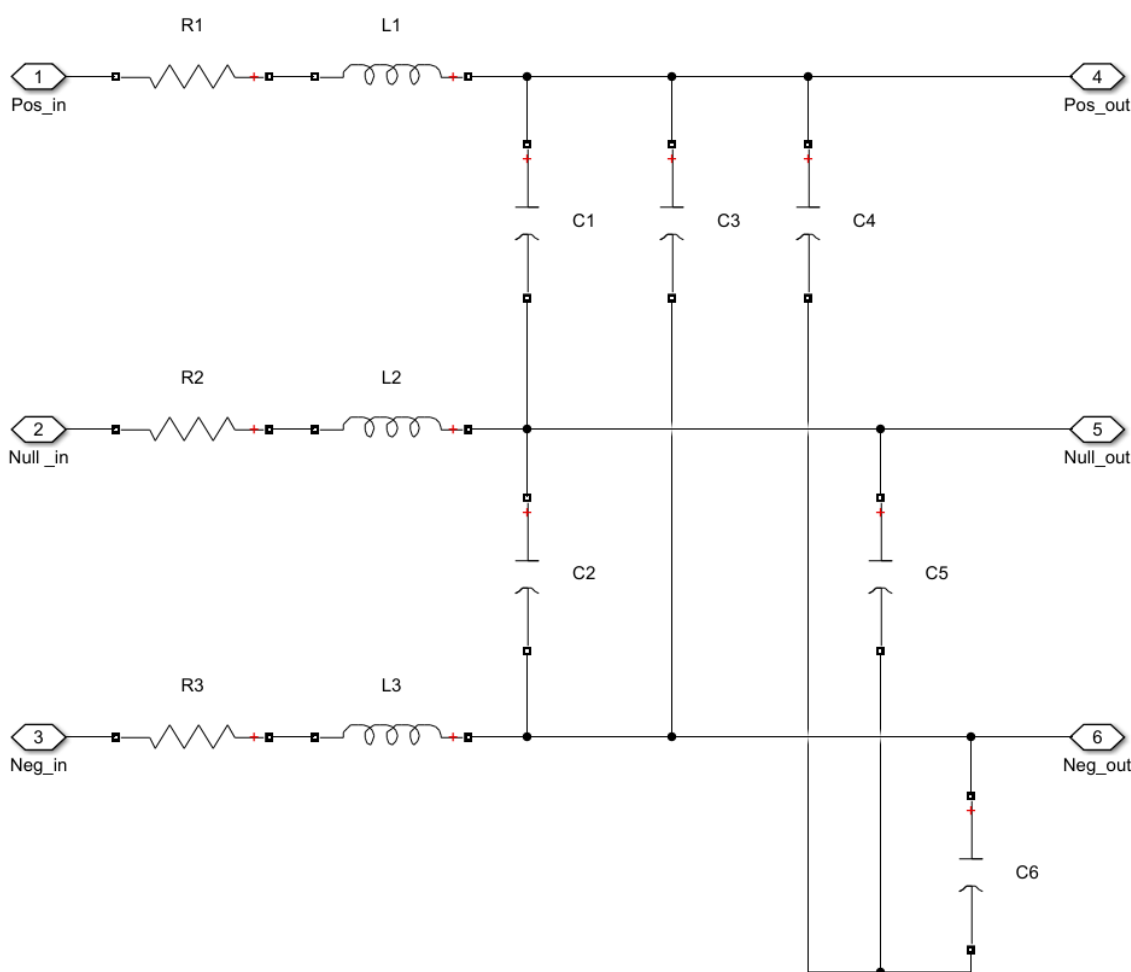


Рисунок 2.10 – Имитационная модель кабель-троса СЭС

Подводная часть модели СЭС ТНПК (рисунок 2.11) содержит входной емкостной буфер, а также индуктивности и сопротивления полезных нагрузок.

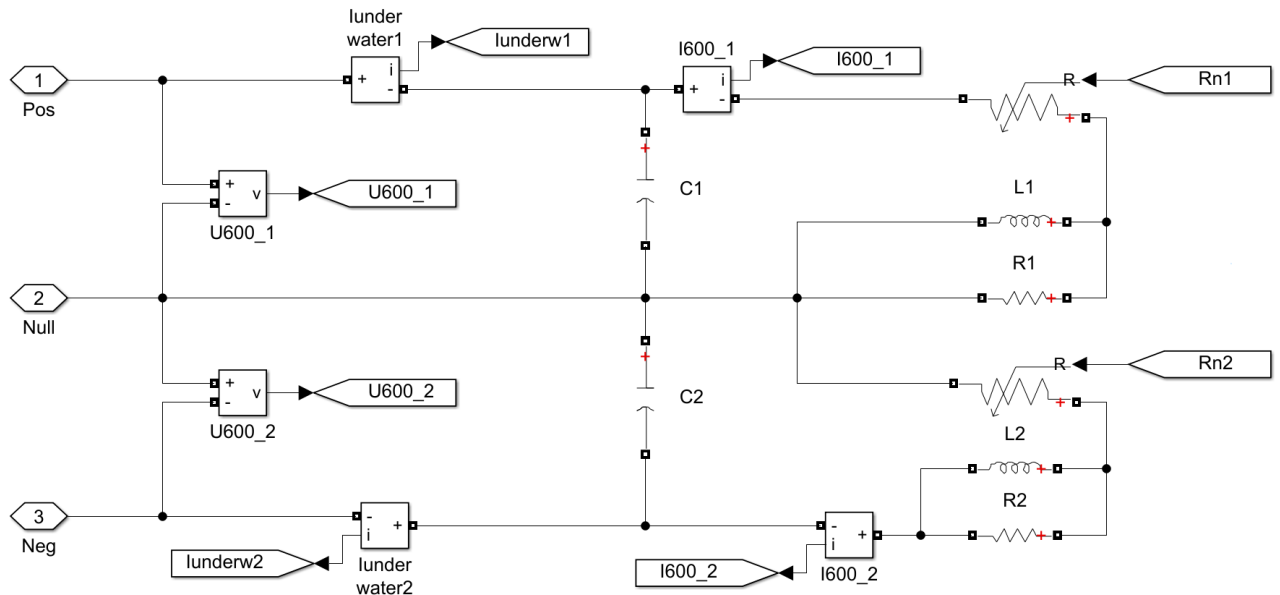


Рисунок 2.11 – Имитационная модель подводной части СЭС ТНПК

В процессе разработки имитационной модели СЭС ТНПК были приняты следующие допущения:

- 1) источник питания бортовой части, включающий в себя судовую сеть, фильтр радиопомех ФРП, выпрямитель В и фильтр Ф, представлен идеальным источником постоянного напряжения;
- 2) трансформаторы работают только на линейном участке кривой намагничивания сердечников;
- 3) трансформаторы являются идеальными;
- 4) транзисторы АИН представляют собой идеальные ключи, переключения происходят мгновенно;
- 5) кабель-трос рассматривается как система с сосредоточенными параметрами;
- 6) процессы коммутации в выпрямителе не оказывают влияния на форму выходного напряжения и тока, диоды идеальны.

Система управления инверторами основана стандартным блоком управления PWM Generator. При этом алгоритм формирования сигнала управления силовыми ключами инверторов подробно описан в параграфе 2.2, посвященном разработке математической модели.

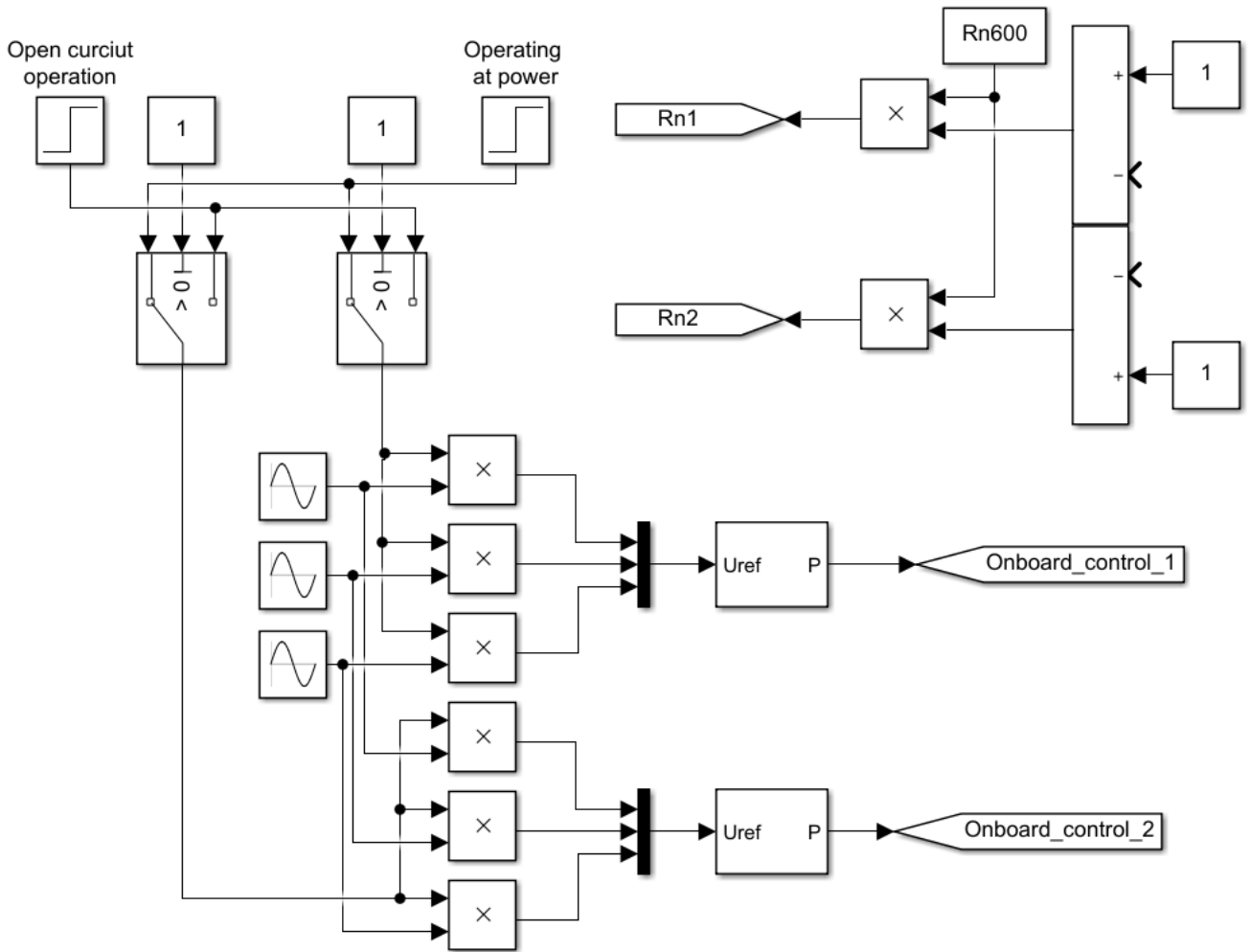


Рисунок 2.12 – Имитационная модель блока управления разомкнутой СЭС ТНПК

В результате имитационного моделирования СЭС ТНПК получены зависимости изменения выходного напряжения при включении СЭС в режиме холостого хода (рисунок 2.13,*а*), в номинальном режиме (рисунок 2.14,*а*) и при несимметричной нагрузке (рисунок 2.15,*б*).

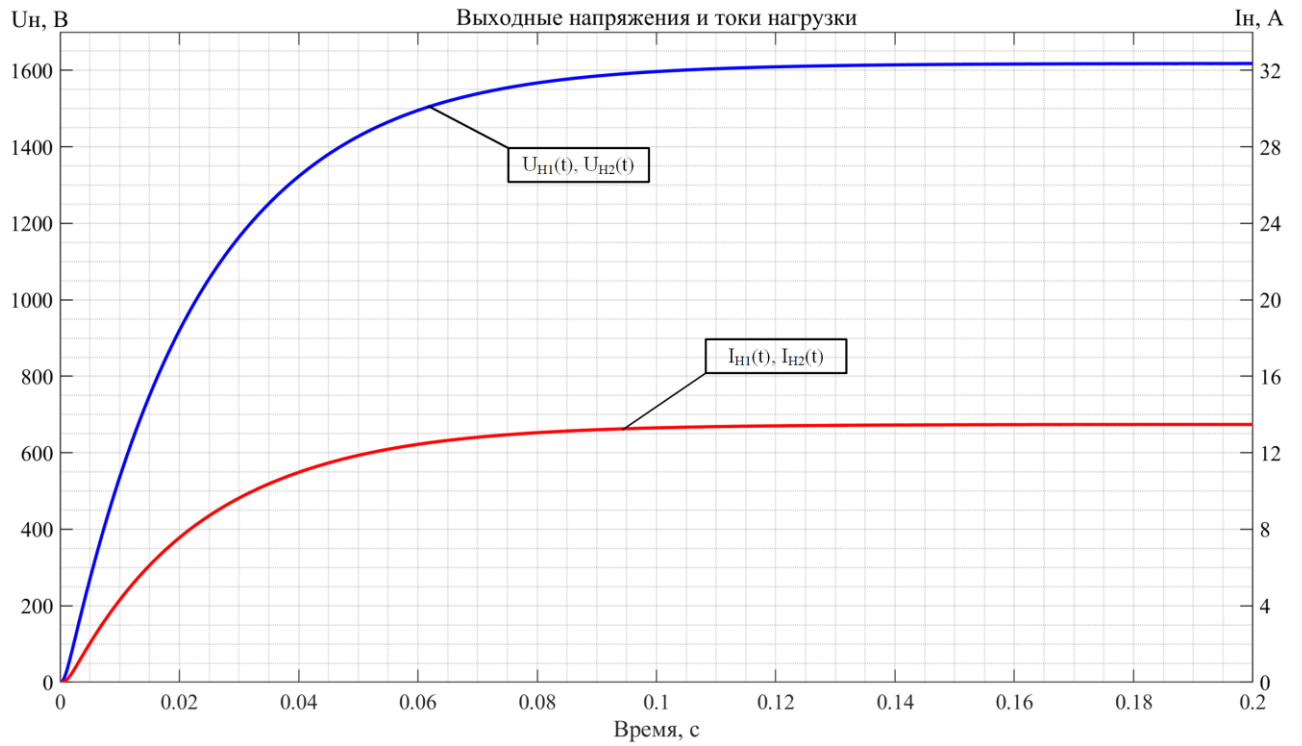
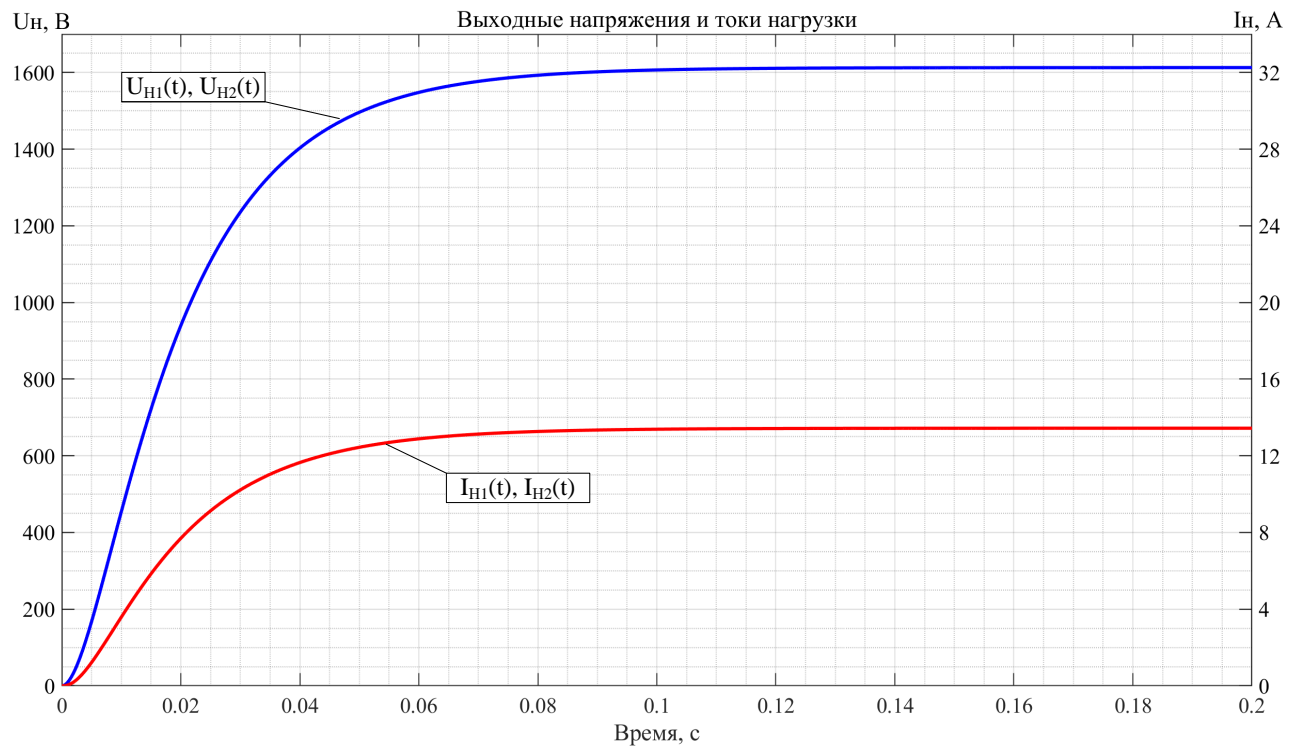
*a**б*

Рисунок 2.13 – Зависимости выходных напряжений и токов нагрузки ТНПК в режиме холостого хода при $K_M = 1$:
a – имитационное моделирование;
б – аналитическое моделирование

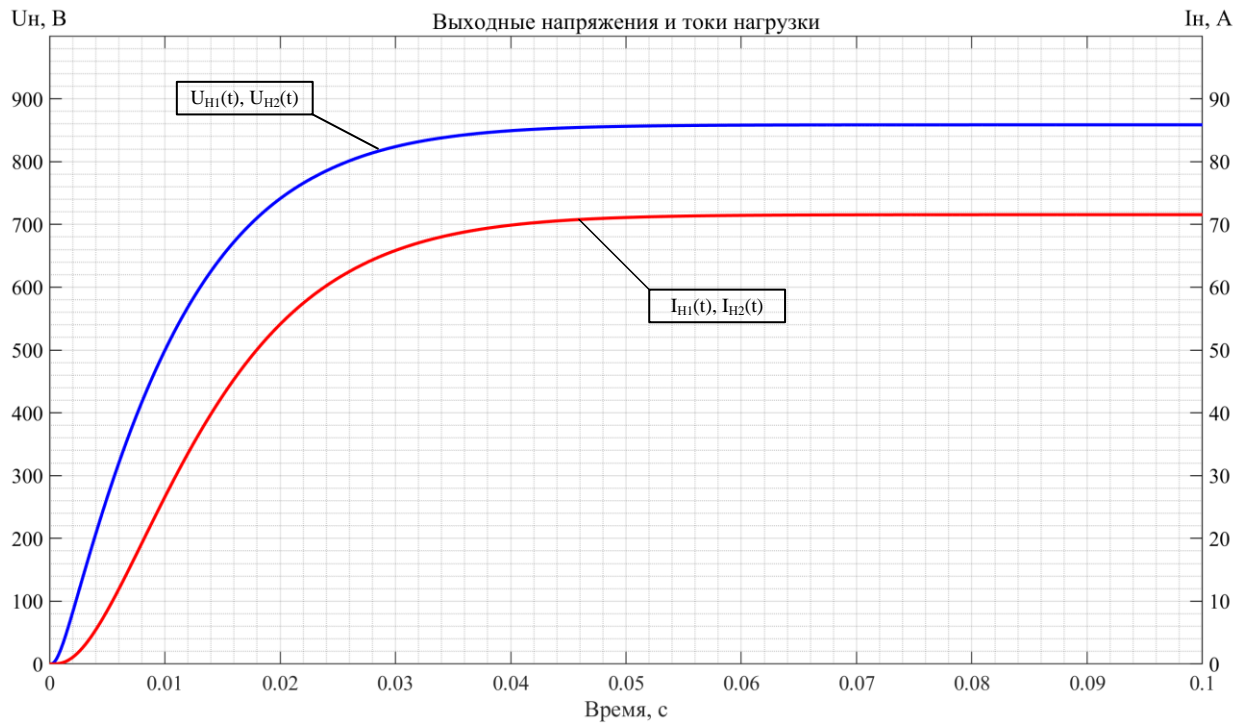
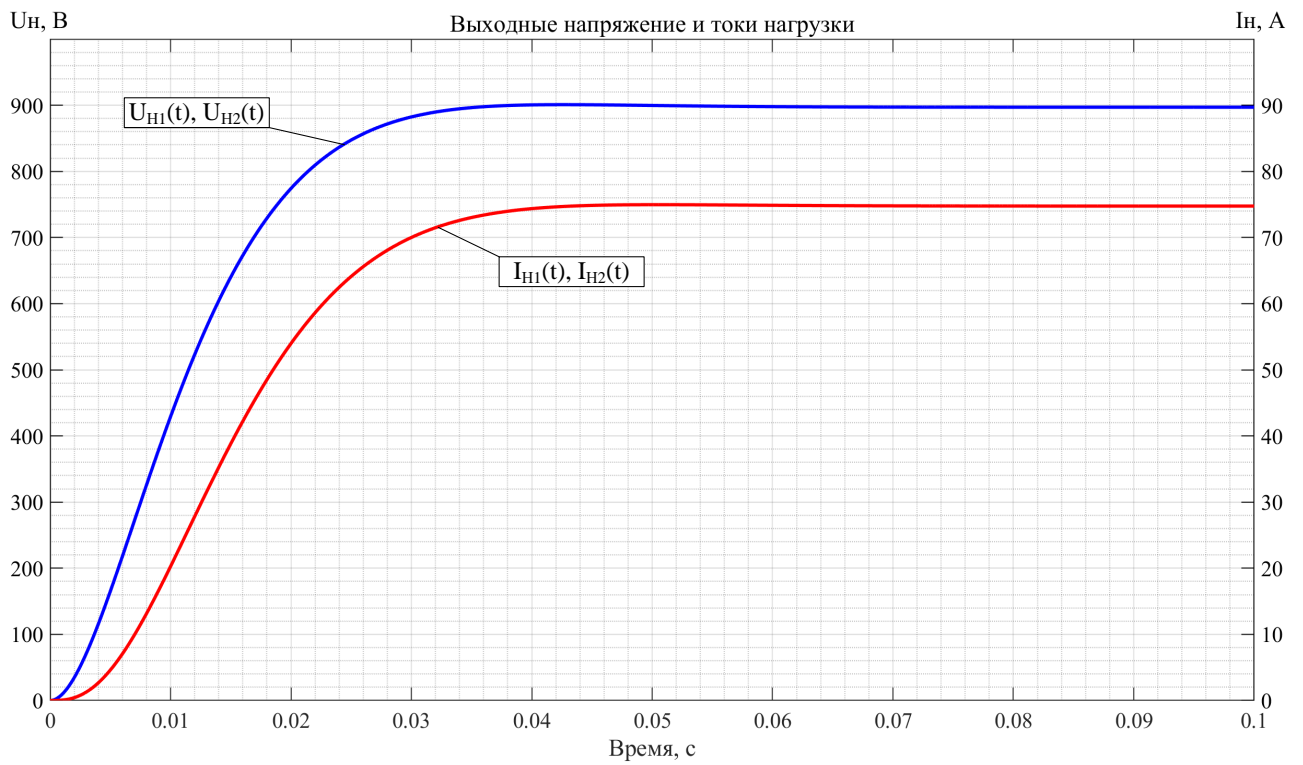
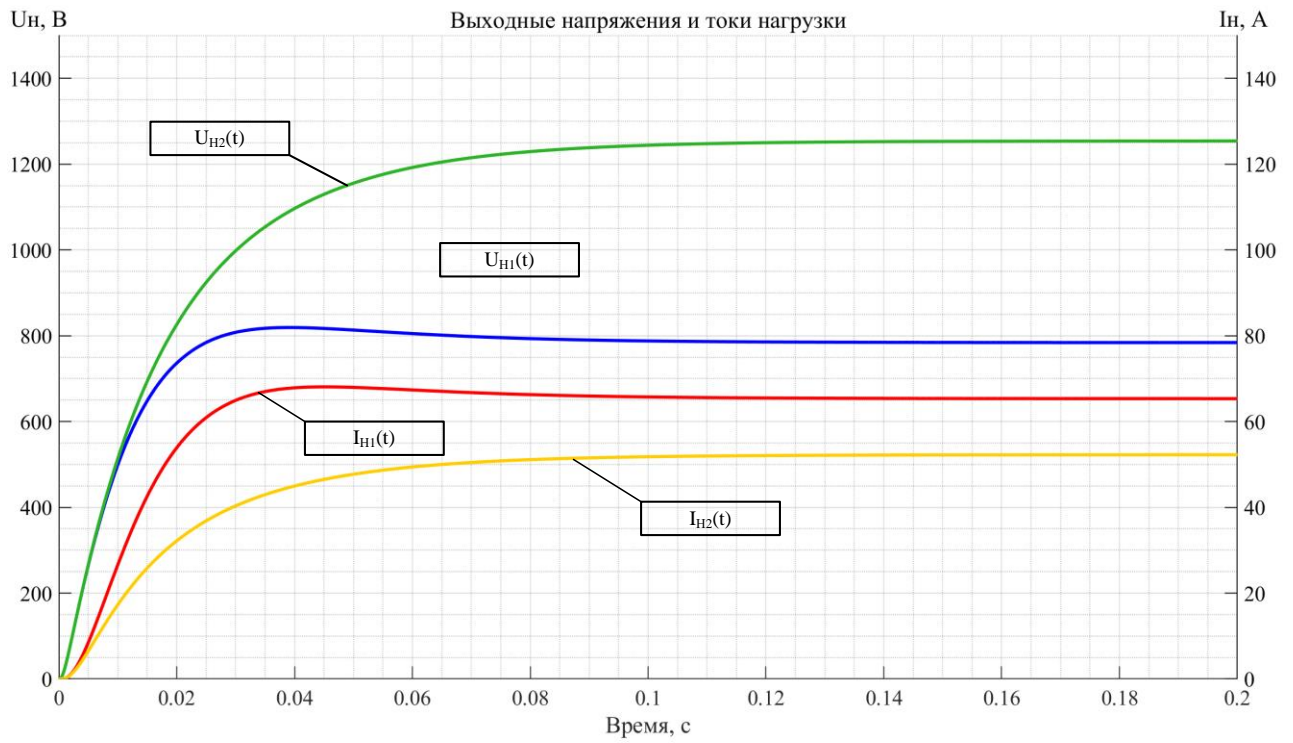
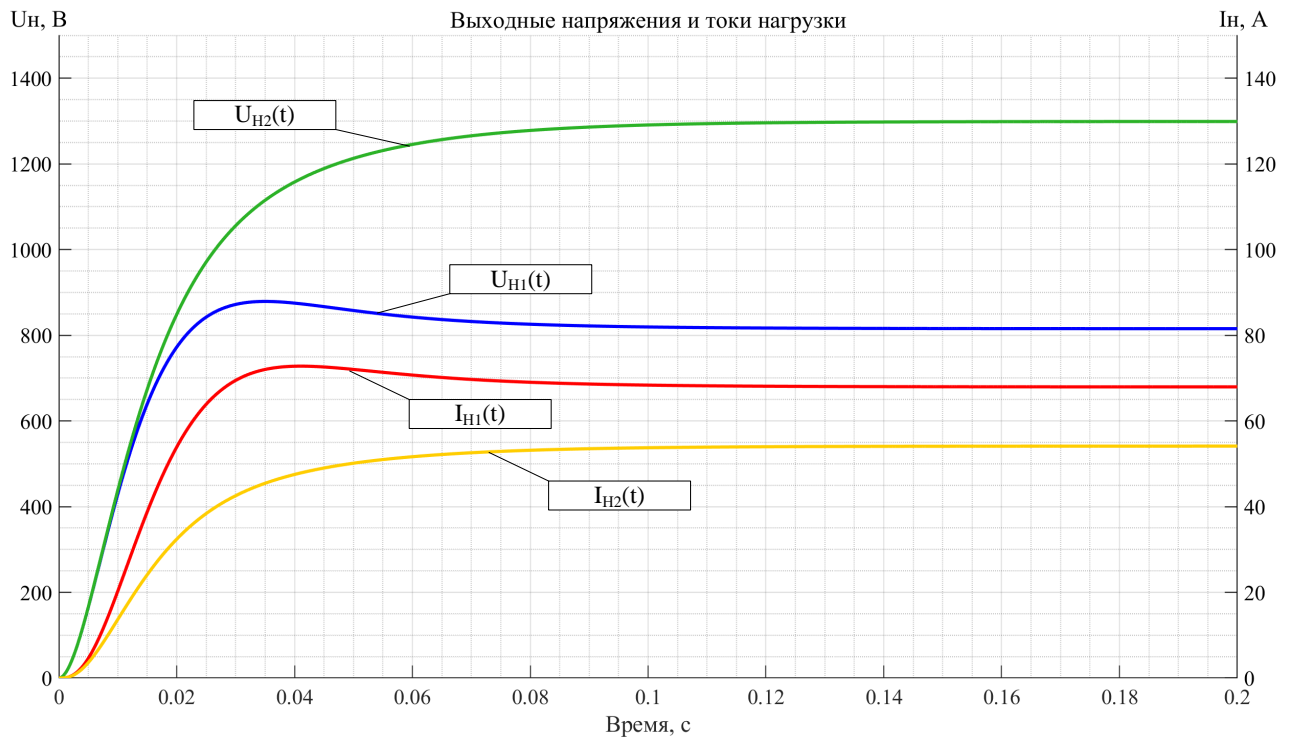
*a**б*

Рисунок 2.14 – Зависимости выходных напряжений и токов нагрузки ТПК в номинальном режиме при $K_M = 1$:
a – имитационное моделирование;
б – аналитическое моделирование



а



б

Рисунок 2.15 – Зависимости выходных напряжений и токов нагрузки ТНПК при несимметричной загрузке и $K_M = 1$:

а – имитационное моделирование;

б – аналитическое моделирование

Из полученных зависимостей видно, что в режиме холостого хода установившееся значение выходного напряжения составляет 1620 В, а время переходного процесса не превышает 69 мс; в номинальном режиме установившееся значение выходного напряжения составило 859 В с временем переходного процесса не более 28 мс. В случае 50 % несимметрии мощности полезной нагрузки СЭС ТНПК установившееся значение выходного напряжения первой нагрузки составило 784 В, а выходное напряжение второй нагрузки – 1254 В. При этом в выходном напряжении первого канала наблюдается перерегулирование, не превышающее 5 %. Время переходного процесса для первой нагрузки составило 39 мс, в то время как для второй нагрузки – 59 мс.

Выводы по главе 2

1. На основе предложенной функциональной схемы СЭС ТНПК с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе разработаны аналитическая и имитационная модели с разомкнутым контуром управления. Модели позволяют изучить зависимости токов и напряжений системы в номинальном режиме, в режиме холостого хода и при несимметричной нагрузке.

2. Значения напряжений и токов при сопоставлении результатов аналитического и имитационного моделирования обеспечивают сходимость с погрешностью не более 6 %.

ГЛАВА 3 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОНОМНОГО СПОСОБА НАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

3.1 Разработка и описание работы алгоритма управления системой электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса

Следующим этапом после определения принципов построения СЭС ТНПК и создания математических моделей является разработка системы управления. В ходе разработки системы управления необходимо учитывать следующие параметры системы электроснабжения:

- значения напряжений и мощностей полезной нагрузки с допустимой зоной отклонения;
- режимы работы полезной нагрузки ТНПК;
- электрические параметры кабель-троса;
- уровень максимальной несимметричной нагрузки;
- максимальное время переходного процесса в моменты запуска и смены режима работы полезной нагрузки.

В системе управления СЭС ТНПК требуется обеспечить: стабилизацию напряжения полезной нагрузки в пределах $600 \text{ В} \pm 20 \%$ с временем переходного процесса не более 60 мс при сбросе и набросе нагрузки; корректную работу СЭС при 50 % уровне несимметричной выходной мощности ТНПК; корректировку параметров регуляторов в автоматическом режиме при изменении параметров кабель-троса.

Уязвимым местом данных систем является линия передачи энергии и данных. Использование в качестве сигналов обратной связи напряжения и тока полезной нагрузки приводит к появлению в алгоритме управления задержки, порядок которой возможно оценить как 4,5 мс на 1 км длины кабельной линии.

Также необходимо учитывать момент включения СЭС. В начальный момент времени оборудование ПЧ не проинициализировано, протекают процессы формирования напряжений питания собственных нужд и загрузки микропроцессорного оборудования.

В связи с этим применение классических методов построения замкнутой системы на основе сигналов обратной связи полезной нагрузки нецелесообразно.

Принимая во внимание данные замечания, предложена система управления [88–91] СЭС ТНПК на постоянном токе (рисунок 3.1).

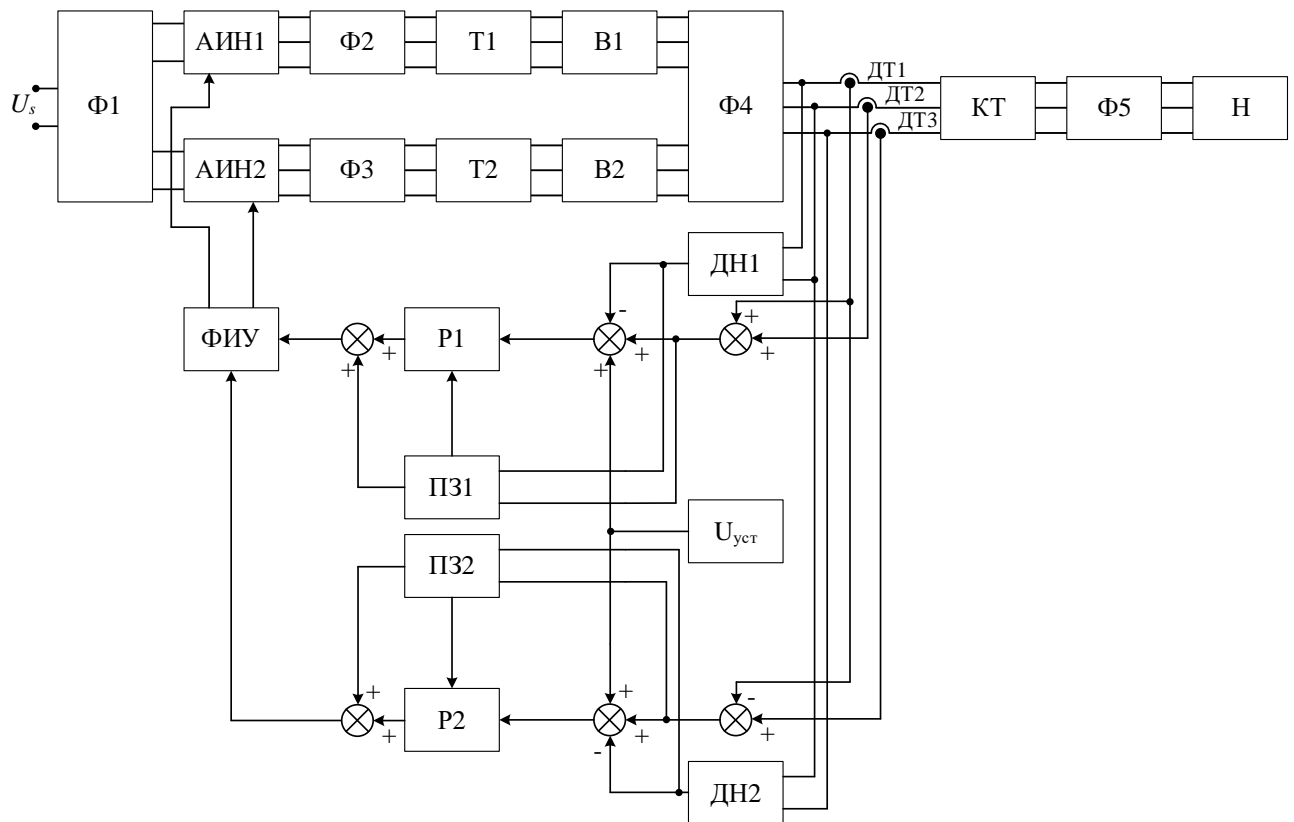


Рисунок 3.1 – Функциональная схема системы управления СЭС ТНПК:
 Ф1, Ф2, Ф3, Ф4, Ф5 – фильтры; АИН1, АИН2 – автономные инверторы
 напряжения; Т1, Т2 – повышающие трансформаторы;
 В1, В2 – неуправляемые выпрямители; КТ – кабель-трос; Н – нагрузка;
 ДТ1, ДТ2, ДТ3 – датчики тока; ДН1, ДН2 – датчики напряжения;
 $U_{уст}$ – напряжение задания; ПЗ1, ПЗ2 – блоки плавного запуска;
 Р1, Р2 – регуляторы; ФИУ – блок формирования
 импульсов управления

Система управления обеспечивает:

- стабилизацию напряжения на полезной нагрузке равной $600 \text{ В} \pm 20\%$;
- плавный запуск СЭС при включении;
- время переходных процессов менее 60 мс;
- работу СЭС при 50 % несимметрии полезной нагрузки;
- корректировку параметров регулятора при изменении параметров кабель-троса.

Работа системы управления разделена на два этапа. Первый этап – корректное включение СЭС при помощи плавного запуска. Блоки плавного запуска ПЗ1, ПЗ2 в течение 50 мс линейно увеличивают коэффициент модуляции K_M до максимального относительного значения. В блоке формирования импульсов управления ФИУ значение K_M перемножается на форму закона управления силовых ключей инверторов АИН1 и АИН2. Сравнивая полученный сигнал с нормированным пилообразным напряжением, формируется относительное время открытого состояния силовых ключей инверторов. Относительное время открытого состояния транзистора формируется независимо для АИН1 и АИН2, что позволяет реализовать корректную работу СЭС при несимметричной нагрузке ПЧ СЭС ТНПК.

БЧ СЭС ТНПК первого преобразователя, состоящего из автономного инвертора напряжения АИН1, фильтра Ф2, повышающего трансформатора Т1, неуправляемого выпрямителя В1 и фильтра Ф4, при помощи датчика напряжения ДН1 и датчиков тока ДТ1 и ДТ2 формируют массивы данных выходных напряжений и токов. На основе полученных данных вычисляется разность выходного напряжения и вольтодобавки, учитывающей ток и сопротивление задействованных силовых линий кабель-троса. При достижении порога 480 В напряжения на полезной нагрузке первого канала ТНПК формируется команда переключения управления. Система переходит из состояния разомкнутой в замкнутую, подключается регулятор Р1. Аналогично первому преобразователю реализовано переключение для второго преобразователя БЧ СЭС ТНПК с применением датчика напряжения ДН2 и датчиков тока ДТ2 и ДТ3. В состав

второго преобразователя входят автономный инвертор напряжения АИН2, фильтр Ф3, повышающий трансформатор Т2, неуправляемый выпрямитель В2 и фильтр Ф4. Отличие для второго преобразователя заключается в противоположном знаке значений данных датчика тока ДТ2.

Второй этап реализует управление замкнутой системой. Вычитается значение выходного напряжения первого преобразователя БЧ СЭС из суммы вольтодобавки верхнего преобразователя и задания уставки $U_{уст}$ напряжения нагрузки и формируется сигнал ошибки, который поступает на блок регулятора. Регулятор Р1 определяется особенностями объекта управления. Сигналом выхода регулятора является значение коэффициента модуляции K_M . Дальнейшие операции повторяют действия первого этапа. Блок формирования импульсов управления ФИУ перемножает коэффициент модуляции K_M на кривую, характеризующую форму закона управления транзистором. Затем данный сигнал сравнивается с нормированным пилообразным напряжением для дальнейшего формирования относительного времени открытого состояния силовых ключей инверторов. Аналогичным образом формируется управление для второго преобразователя БЧ СЭС.

Также, кроме формирования управления замкнутой СЭС, управление позволяет проводить корректировку параметров регулятора, применяя методы идентификации объекта управления [92–97].

3.2 Методы идентификации передаточной функции и влияние обратной связи в системе электроснабжения телеуправляемым необитаемым подводным комплексом с передачей энергии по кабель-тросу

СЭС ТНПК содержит в своей структуре как активные, так и реактивные элементы, такие как емкости, индуктивности и т.д. Этот фактор определяет порядок дифференциальных уравнений, которыми описываются переходные процессы и установившийся режим системы. Более удобным методом описания динамики систем является их представление в виде передаточных функций, что

значительно облегчает процесс настройки регулятора. Выбор желаемой передаточной функции замкнутого объекта управления (ОУ) и идентификация передаточной функции разомкнутого ОУ сводит процедуру определения регулятора к делению первого на второе [98–104].

Определение параметров регулятора выполняется с применением математической модели, представленной в главе 2. Изначально задаются параметры кабель-троса и полезной нагрузки. К параметрам кабель-троса относятся:

- погонное активного сопротивления силовой жилы $R_{ж}$, Ом/км;
- погонная индуктивность силовой жилы $L_{ж}$, мГн/км;
- погонная емкость силовых жил $C_{ж}$, мкФ/км;
- погонная емкость силовой жилы относительно брони кабель-троса $C_{жб}$, мкФ/км.

В то же время к параметрам нагрузки относятся:

- эквивалентная индуктивность движителей ТНПА, мГн;
- эквивалентное сопротивление полезной нагрузки, Ом.

При моделировании СЭС с заданными параметрами снимается переходная характеристика разницы выходного напряжения и тока БЧ СЭС ТНПК от времени. С помощью методов идентификации ОУ вычисляется передаточная функция ОУ при заданном сопротивлении нагрузки.

Идентификация ОУ подразумевает различные методы определения параметров модели, которые в свою очередь представляют необходимую информацию о свойствах объекта.

Вывод передаточной функции ОУ может осуществляться как графическими, так и численными методами. К графическим методам относятся метод номограмм и метод Шварца, которые не требуют автоматизированного расчета и после процедуры уточнения решения дают достаточно точные результаты. Общим недостатком графических методов является зависимость точности аппроксимации от качества построения номограмм, а также сложность автоматизации вычислений [89–93]. Другим вариантом построения

аппроксимирующей передаточной функции является метод площадей, на основании которого рассматриваемый объект описывается линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами, а его нормированная переходная характеристика аппроксимируется передаточной функцией

$$W(s) = \frac{k(1 + b_1s + \dots + b_ms^m)}{1 + a_1s + \dots + a_ns^n}. \quad (3.1)$$

В качестве одного из основных вариантов использован вещественный интерполяционный метод [93–97], который задействует частотную характеристику для получения передаточной функции разомкнутой системы. Входным сигналом системы является коэффициент модуляции K_M , а выходным сигналом – нормированный разностный сигнал датчиков выходного напряжения и тока БЧ СЭС. Выходное напряжение фильтра $U^*(t)$ приведено к единичному значению в установившемся режиме путём его домножения на коэффициент обратной связи $k_{fb} = 1/U_{f\max} = 1,667 \cdot 10^{-3}$, где $U_{f\max} = 600$ В – максимальное установившееся напряжение на полезной нагрузке. Это значение определяется установившимся значением напряжения на фильтре при подаче сигнала $K_M = 1$ на вход системы.

Для применения вещественного интерполяционного метода необходимо выбрать вид передаточной функции, соответствующей переходному процессу. В большей степени этот выбор основывается на знаниях исследователя в области теории автоматического управления. Методы оптимальной настройки регуляторов представляют собой выбор желаемой передаточной функции разомкнутой системы и нахождение передаточной функции регулятора как отношение желаемой и найденной передаточной функций разомкнутой системы. Структура считается устойчивой, если порядок знаменателя передаточной функции больше или равен порядку её числителя. Следовательно, предполагаем, что передаточная функция разомкнутой системы имеет следующую форму:

$$W_o(s) = \frac{p_2 s^2 + p_1 s + p_0}{q_3 s^3 + q_2 s^2 + q_1 s + q_0}, \quad (3.2)$$

где коэффициенты $p_0 = q_0 = 1$ и q_1, q_2, q_3, p_1, p_2 необходимо вычислить.

Для этой цели заменим комплексную переменную s в выражении (3.2) на действительную переменную δ и получим функцию

$$W_o(\delta) = \frac{p_2 \delta^2 + p_1 \delta + 1}{q_3 \delta^3 + q_2 \delta^2 + q_1 \delta + 1}. \quad (3.3)$$

Далее в уравнении (3.3) проиндексируем переменную δ :

$$W_o(\delta_i) = \frac{p_2 \delta_i^2 + p_1 \delta_i + 1}{q_1 \delta_i + q_2 \delta_i^2 + q_3 \delta_i^3 + 1}, \quad (3.4)$$

где $i = 1-5$. Эта индексация соответствует числу неизвестных параметров в выражении (3.4):

$$q_1 \delta_i W_o(\delta_i) + q_2 \delta_i^2 W_o(\delta_i) + q_3 \delta_i^3 W_o(\delta_i) + W_o(\delta_i) = p_2 \delta_i^2 + p_1 \delta_i + 1; \quad (3.5)$$

$$q_1 \delta_i + q_2 \delta_i^2 + q_3 \delta_i^3 + p_1 \left(-\frac{\delta_i}{W_o(\delta_i)} \right) + p_2 \left(-\frac{\delta_i^2}{W_o(\delta_i)} \right) \delta_i = \frac{1}{W_o(\delta_i)} - 1; \quad (3.6)$$

$$A = \begin{bmatrix} \delta_i & \delta_i^2 & \delta_i^3 & -\frac{\delta_i}{W_o(\delta_i)} & -\frac{\delta_i^2}{W_o(\delta_i)} \end{bmatrix};$$

$$X = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad p_1 \quad p_2];$$

$$B = \left[\frac{1}{W_o(\delta_i)} - 1 \right]; \quad (3.7)$$

$$\delta_i = [\delta_1 \quad \delta_2 \quad \delta_3 \quad \delta_4 \quad \delta_5]^T;$$

$$W_o(\delta_i) = [W_o(\delta_1) \quad W_o(\delta_2) \quad W_o(\delta_3) \quad W_o(\delta_4) \quad W_o(\delta_5)]^T.$$

Таким образом, получена система линейных алгебраических уравнений в матричной форме

$$\mathbf{A} \times \mathbf{X} = \mathbf{B}, \quad (3.8)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \delta_1 & \delta_1^2 & \delta_1^3 & -\frac{\delta_1}{W_o(\delta_1)} \\ \delta_2 & \delta_2^2 & \delta_2^3 & -\frac{\delta_2}{W_o(\delta_2)} \\ \delta_3 & \delta_3^2 & \delta_3^3 & -\frac{\delta_3}{W_o(\delta_3)} \\ \delta_4 & \delta_4^2 & \delta_4^3 & -\frac{\delta_4}{W_o(\delta_4)} \end{bmatrix}; \mathbf{X} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ p_1 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{W_o(\delta_1)} - 1 \\ \frac{1}{W_o(\delta_2)} - 1 \\ \frac{1}{W_o(\delta_3)} - 1 \\ \frac{1}{W_o(\delta_4)} - 1 \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Здесь δ_i являются узлами интерполяции, а $W_o(\delta_i)$ – значения функции действительной переменной в узлах интерполяции. Эти узлы находятся в виде

$$\delta_1 = \frac{-\ln \zeta}{T_r}; \delta_2 = 2 \cdot \delta_1; \delta_3 = 3 \cdot \delta_1; \delta_4 = 4 \cdot \delta_1; \delta_5 = 5 \cdot \delta_1; \quad (3.10)$$

где $\zeta = 0,05$ для 5 %-й зоны допустимых отклонений. Также возможно и иное размещение узлов интерполяции. Значения функции $W_o(\delta_i)$ вычисляются как

$$W_o(\delta_i) = \delta_i \cdot \int_0^T U^*(t) \cdot \exp(-\delta_i \cdot t) dt. \quad (3.11)$$

Далее представлена программа [86] в MatLab, реализующая формулы (3.2)–(3.11):

```
delta1=-log(zeta)/Tr;
W1=delta1*trapz(t,U.*exp(-delta1*t));
delta2=2*delta1;
W2=delta2*trapz(t,U.*exp(-delta2*t));
delta3=3*delta1;
W3=delta3*trapz(t,U.*exp(-delta3*t));
delta4=4*delta1;
W4=delta4*trapz(t,U.*exp(-delta4*t));
A=[delta1 delta1^2 delta1^3 -delta1/W1;
delta2 delta2^2 delta2^3 -delta2/W2;
delta3 delta3^2 delta3^3 -delta3/W3;
```

$$\text{delta4 delta4}^2 \text{ delta4}^3 - \text{delta4}/W4];$$

$$B = [(1/W1)-1; (1/W2)-1; (1/W3)-1; (1/W4)-1];$$

$$X = \text{pinv}(A) * B;$$

При помощи программы получены параметры передаточной функции разомкнутой системы соответствующего переходного процесса:

$$q_1 = 0,0044, q_2 = 7,26 \cdot 10^{-6}, q_3 = 1,33 \cdot 10^{-8}, p_1 = 0,003.$$

Следовательно, передаточная функция разомкнутой системы принимает следующую форму: $W_o(s) = \frac{0,003s + 1}{1,33 \cdot 10^{-8}s^3 + 7,26 \cdot 10^{-6}s^2 + 0,0044s + 1}$.

Штриховая линия на рисунке 3.2 иллюстрирует переходный процесс для рассматриваемой передаточной функции (3.2).

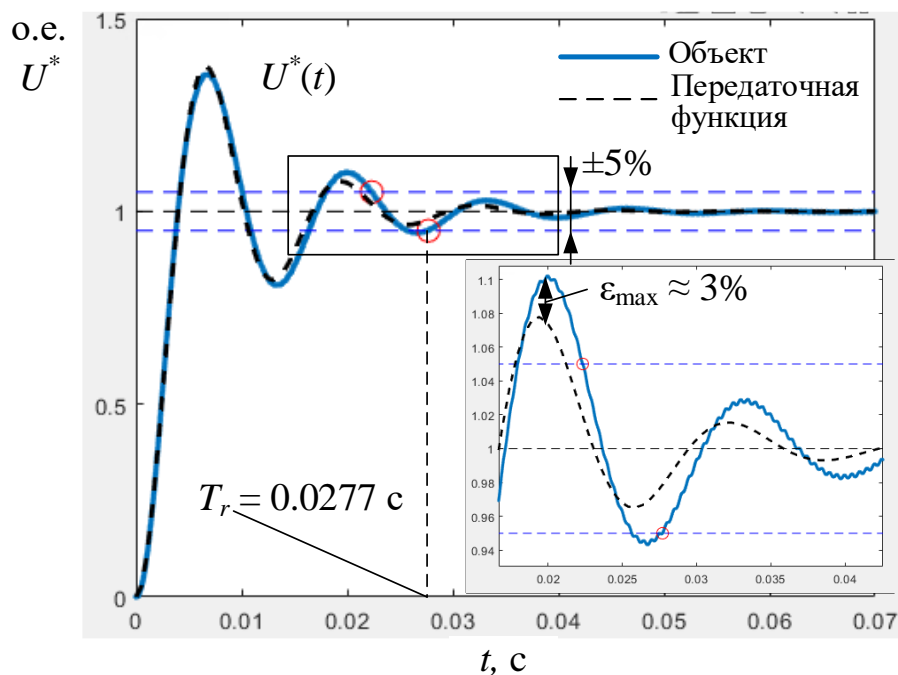


Рисунок 3.2 – Переходный процесс выходного напряжения БЧ СЭС ТНПК с разомкнутой системой управления

В то же время сплошная линия иллюстрирует переходной процесс, полученный на основе решения математической модели. Максимальное отклонение графиков не превышает 3%. Следовательно, данную функцию целесообразно применять для настройки регулятора напряжения в заданной точке внешней характеристики.

3.3 Синтез регулятора напряжения системы управления системой электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса

В параграфе 3.2 представлена методика идентификации передаточной функции ОУ в разомкнутом виде. Методика позволила определить структуру и коэффициенты передаточной функции, описывающей ОУ с точностью до 5 % в заданной точке внешней характеристики.

Разработка регулятора на основе желаемой функции в первую очередь учитывает критерий устойчивости замкнутого объекта. При этом общая запись передаточной функции разомкнутого объекта управления принимает вид

$$W_0(s) = \frac{P(s)}{R(s)} = \frac{P^-(s)P^+(s)}{R^-(s)R^+(s)}, \quad (3.12)$$

где $P^-(s), R^-(s)$ – полиномы с левыми нулями; $P^+(s), R^+(s)$ – полиномы с правыми и нейтральными нулями.

В то же время желаемая передаточная функция замкнутого ОУ $W_{\text{ж}}(s)$ должна соответствовать следующим требованиям:

$$\begin{aligned} W_{\text{ж}}(s) &= \frac{P^+(s)M(s)}{G(s)}; \\ 1 - W_{\text{ж}}(s) &= \frac{R^+(s)N(s)}{G(s)}, \end{aligned} \quad (3.13)$$

где $G(s)$ – знаменатель желаемой передаточной функции, порядок и коэффициенты которого определяются требованиями к качеству переходного процесса замкнутого ОУ; $M(s), N(s)$ – полиномы, коэффициенты которых определяются уравнением [98–104]

$$P^+(s)M(s) + R^+(s)N(s)s^r = G(s). \quad (3.14)$$

Передаточная функция регулятора в данном случае принимает вид

$$W_p(s) = \frac{R^-(s)M(s)}{P^-(s)N(s)s^r}, \quad (3.15)$$

где r – порядок астатизма.

Одновременно необходимо учитывать структуру СЭС. Ее технические параметры не позволяют реализовать обратные связи непосредственно по полезной нагрузке в связи с применением длинной линии электропередачи, представленной кабель-тросом.

Учитывая вышеизложенное, регулятор СЭС ТНПК должен обеспечивать следующие параметры статического и динамического режимов:

- время переходного процесса не более $t_{\text{шт}} = 60$ мс;
- отклонение напряжения на нагрузке от установившегося значения не должно превышать $\Delta = \pm 10$ % ;
- величина перерегулирования σ не должна превышать 20 %.

Также, помимо представленных выше параметров, необходимо уточнить структуру регулятора. Кроме известных параметров – коэффициентов регулятора K_R , K_I , K_D и схемы соединения, регуляторов с формой записи в виде полинома, в структуру регулятора могут входить дополнительные элементы. К таким элементам относится ограничение выходного значения и связанные с ним алгоритмы антинасыщения.

Ограничение или насыщение регулятора характерно в первую очередь для систем с цифровым управлением, поскольку при аналоговом исполнении регулятора его выход ограничен напряжением питания самого регулятора. Данный элемент позволяет определить область возможных значений выходного сигнала регулятора.

Однако ограничение выхода регулятора не исключает ситуации, при которой выходное значение регулятора достигло предельного значения, а входная ошибка продолжает влиять на выход интегральных частей регулятора. В связи с этим насыщение регулятора необходимо неразрывно рассматривать с алгоритмами антинасыщения.

На данный момент применяются два основных метода: корректировки и блокировки.

Главная идея метода корректировки заключается в том, что при достижении зоны ограничения выходной сигнал регулятора через некоторый коэффициент применяется в отрицательной обратной связи. Обратная связь компенсирует значение входной ошибки интегральных частей регулятора. Данное действие позволяет исключить глубокое насыщение интегратора («накрутка интегратора»), что способствует снижению перерегулирования и времени переходного процесса системы.

Аналогично методу корректировки результат достигается при помощи блокировки входной ошибки интегральных частей регулятора. При достижении зоны ограничения выходного сигнала регулятора срабатывает логическая команда. Данная команда отключает входную ошибку от интегральной части регулятора.

На основе данного метода разработана структура ПИ-регулятора СЭС ТНПК (рисунок 3.3).

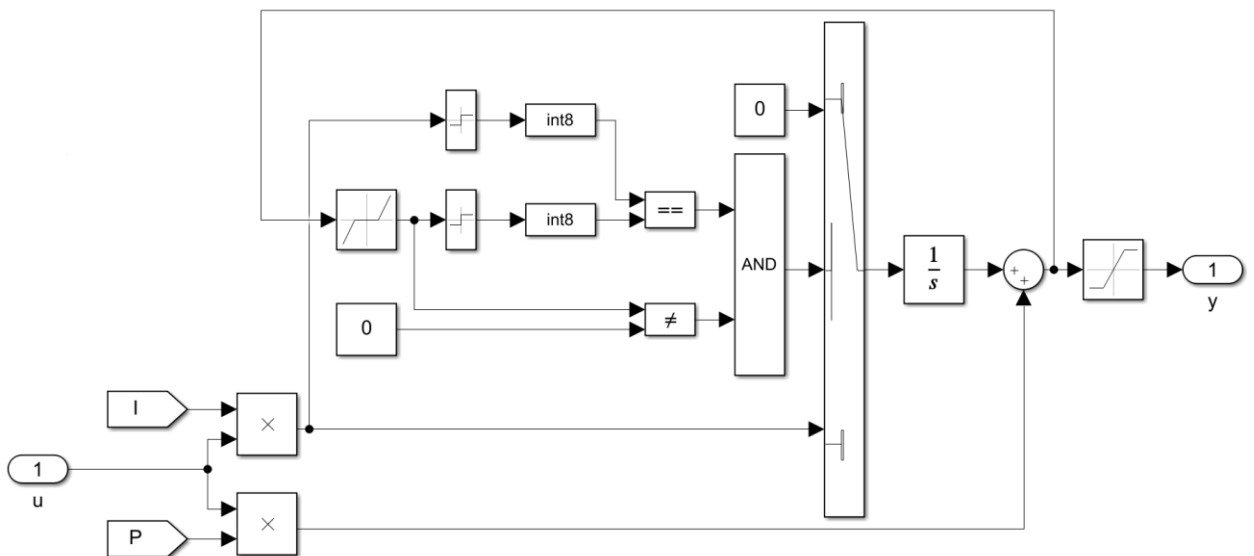


Рисунок 3.3 – Имитационная модель регулятора напряжения СЭС ТНПК с перестраиваемыми коэффициентами и методом антинасыщения

С целью упрощения аналитического вывода коэффициентов представленного регулятора в среде моделирования MatLab Simulink использовался специализированный модуль «PID Tuner». При его запуске вычисляется линеаризованная модель объекта управления, определяются входы и

выходы ОУ в заданной точке внешней характеристики. Первоначально модуль предлагает коэффициенты регулятора с оптимальным соотношением между быстродействием и стабильностью. Используя предложенные параметры, формируется график переходного процесса замкнутого объекта, позволяющий оценить параметры объекта. При настройке данным модулем скорректировано максимальное перерегулирование, которое не должно превышать 10 % от установившегося значения.

Рассмотрим замкнутые СЭС со следующими регуляторами:

- 1) регулятор в точке холостого хода без учета вольтодобавки;
- 2) регулятор в точке номинальной нагрузки без учета вольтодобавки;
- 3) регулятор в точке холостого хода с учетом вольтодобавки;
- 4) регулятор в точке номинальной нагрузки с учетом вольтодобавки;
- 5) регулятор с перестраиваемыми коэффициентами с учетом вольтодобавки.

Проведя идентификацию СЭС в точке холостого хода внешней характеристики, получена передаточная функция

$$W(s) = \frac{3,365 \cdot (2,029 \cdot 10^{-11} s^3 + 2618 \cdot 10^{-9} s^2 + 3,205 \cdot 10^{-2} s + 1)}{1,084 \cdot 10^{-9} s^3 + 845 \cdot 10^{-8} s^2 + 3,547 \cdot 10^{-2} s + 1}. \quad (3.16)$$

Параметры ПИ-регулятора:

$$\begin{aligned} K_p &= 0,0142; \\ K_i &= 5,68, \end{aligned} \quad (3.17)$$

где K_p – коэффициент пропорционального звена регулятора; K_i – коэффициент интегрального звена регулятора.

На рисунке 3.4 представлены графики переходных процессов замкнутого ОУ при запуске СЭС в режиме холостом хода с заблокированным плавным разворотом K_M . Идентификация передаточной функции ОУ производилась в точке холостого хода внешней характеристики без учета вольтодобавки.

Из графиков видно, что время переходного процесса при запуске составляет 125 мс. Превышение заданного времени составило 108 %, перерегулирование 8 %, напряжение при перерегулировании 620 В.

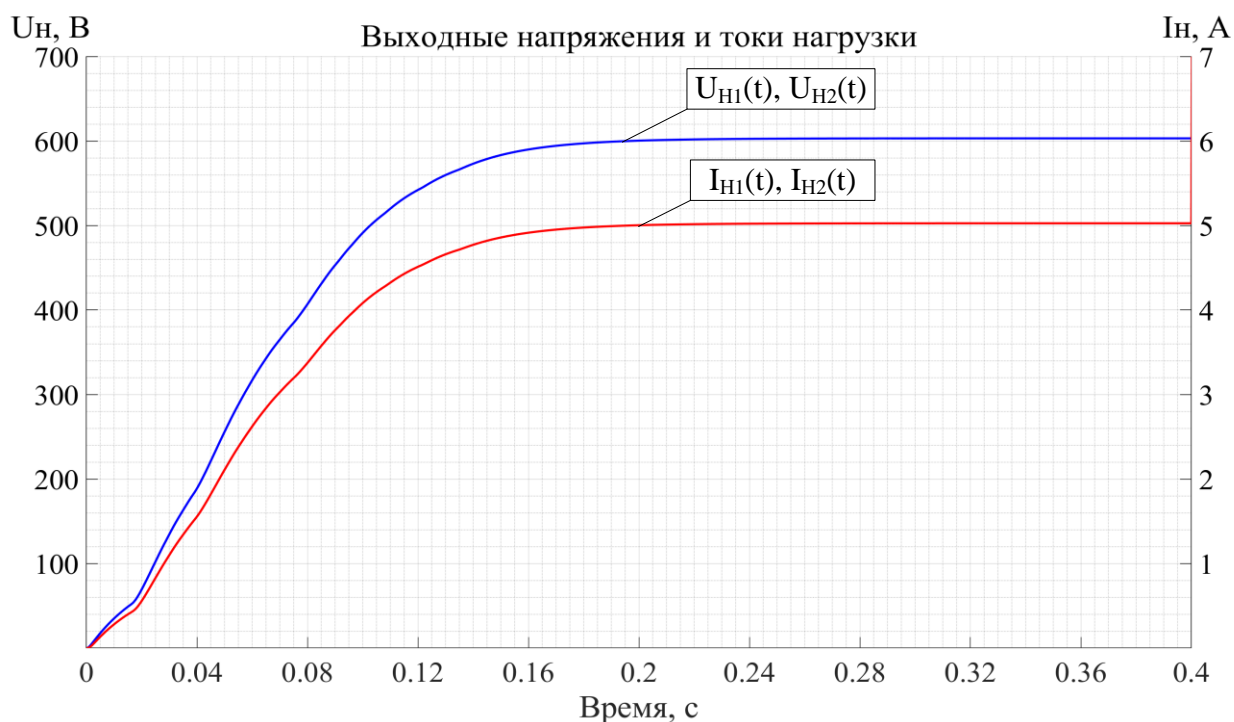


Рисунок 3.4 – Переходные процессы СЭС ТНПК в режиме холостого хода с регулятором холостого хода без вольтодобавки

На рисунке 3.5 представлены графики переходных процессов замкнутого ОУ при изменении режима работы с холостого хода на номинальный режим. В момент времени 0,4 с производится изменение сопротивления полезной нагрузки с 120 Ом на 12 Ом. На графиках можно наблюдать, что время переходного процесса при изменении режима равно 260 мс, т.е. превышение составило 333 %, минимальное напряжение 355 В, превышение заданного предела 26 %.

На рисунке 3.6 представлены графики переходных процессов при изменении режима работы с номинального на режим холостого хода. В момент времени 0,4 с производится изменение сопротивления полезной нагрузки с 12 Ом на 120 Ом. Из графиков наблюдается, что время переходного процесса

при изменении режима равно 270 мс. Превышение заданного времени составило 350 %, максимальное напряжение 940 В, превышение заданного предела 31 %.

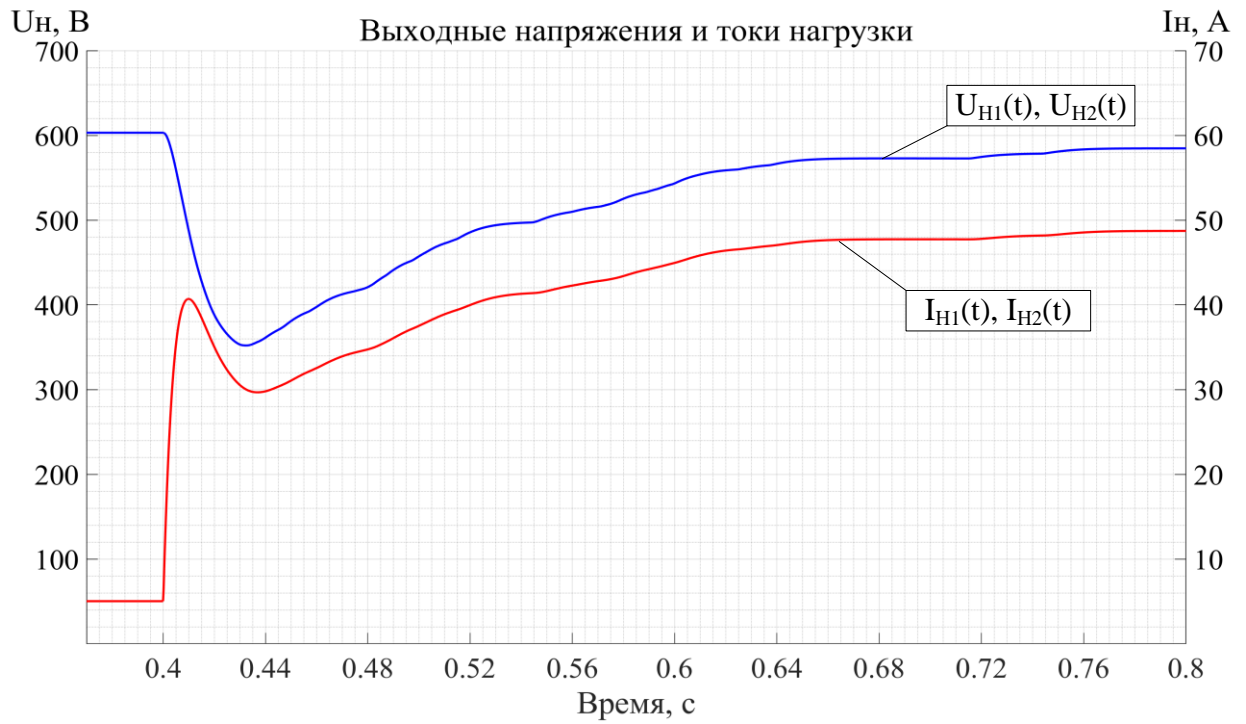


Рисунок 3.5 – Переходные процессы СЭС ТНПК при изменении работы с режима холостого хода в номинальный режим с регулятором холостого хода без вольтодобавки

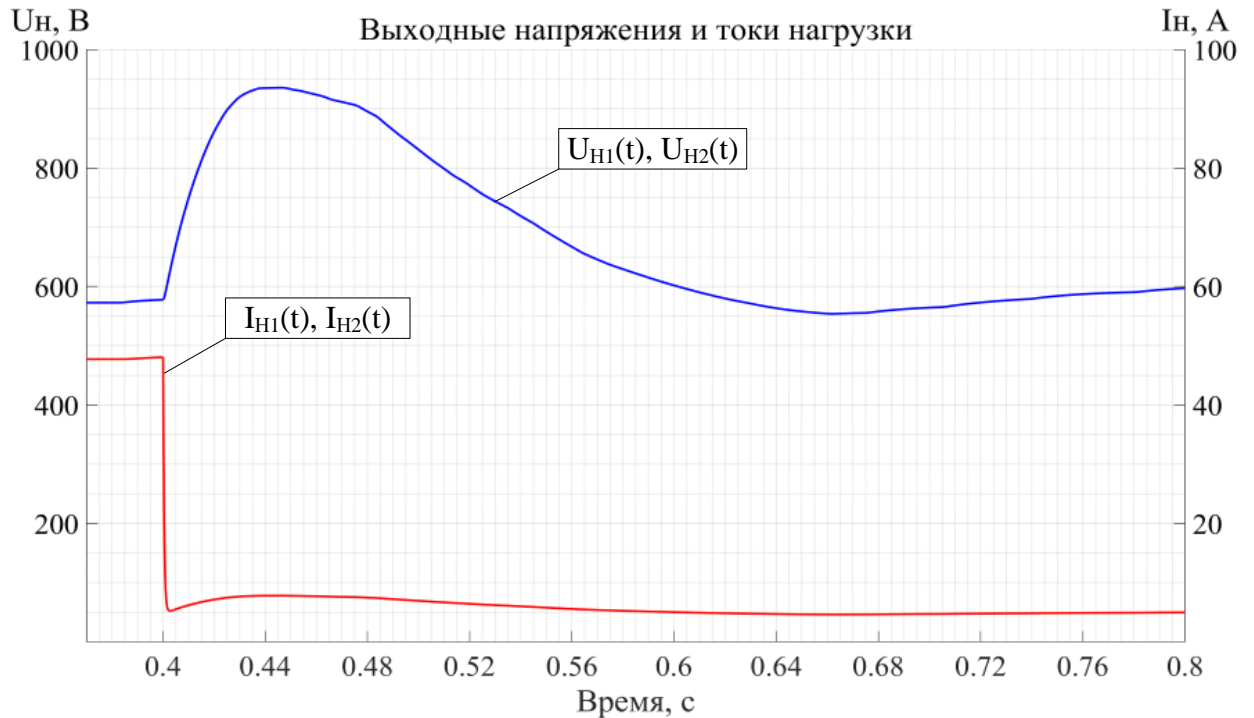


Рисунок 3.6 – Переходные процессы СЭС ТНПК при изменении работы с номинального режима на режим холостого хода с регулятором холостого хода без вольтодобавки

Далее рассмотрим регулятор в точке номинальной мощности внешней характеристики.

Передаточная функция СЭС принимает следующий вид:

$$W(s) = \frac{3,189 \cdot (5,420 \cdot 10^{-11} s^3 + 905,2 \cdot 10^{-9} s^2 + 1,031 \cdot 10^{-2} s + 1)}{0,344 \cdot 10^{-9} s^3 + 2638 \cdot 10^{-9} s^2 + 1,096 \cdot 10^{-2} s + 1}. \quad (3.18)$$

Коэффициенты регулятора в точке номинальной мощности:

$$\begin{aligned} Kp &= 0,0125; \\ Ki &= 32,53. \end{aligned} \quad (3.19)$$

На рисунке 3.7 представлены графики переходных процессов замкнутого ОУ при запуске СЭС ТНПК в режиме холостого хода с заблокированным плавным пуском К_М. Идентификация передаточной функции ОУ производилась в точке номинальной мощности внешней характеристики без учета вольтодобавки.

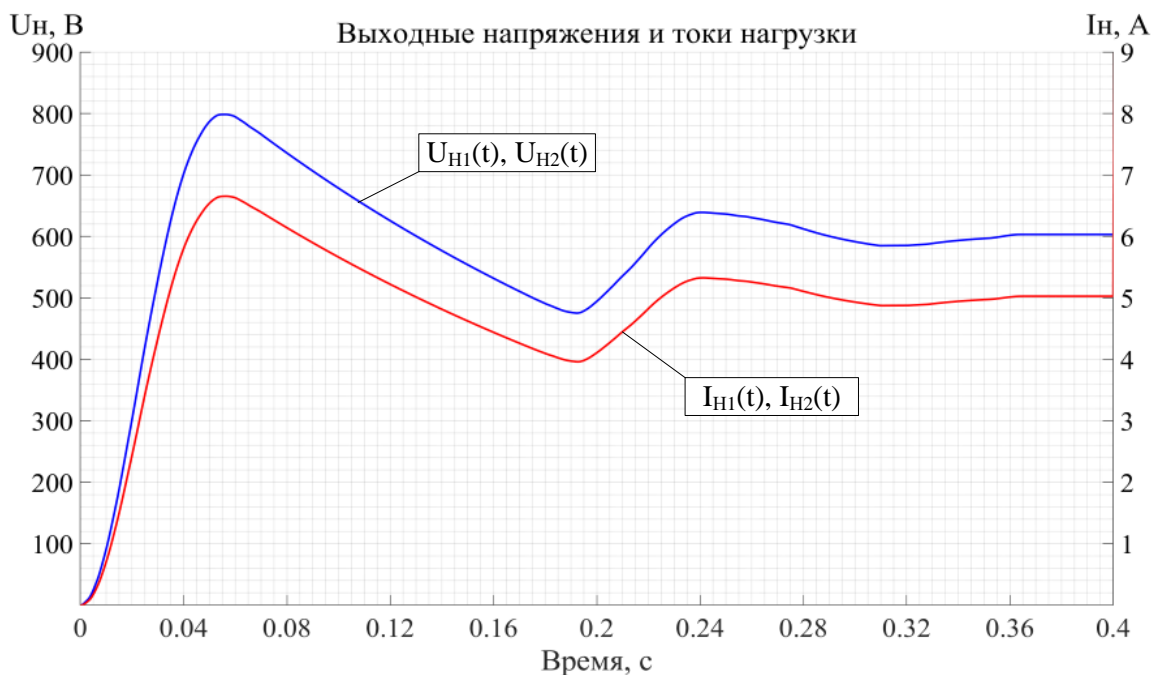


Рисунок 3.7 – Переходные процессы СЭС ТНПК в режиме холостого хода с регулятором номинального режима без вольтодобавки

Из графиков видно, что время переходного процесса при запуске составляет 275 мс, т.е. превышение составило 358 %, перерегулирование 36,3 %, напряжение при перерегулировании 818 В.

На рисунке 3.8 представлены графики переходных процессов замкнутого ОУ при изменении режима работы с холостого хода на номинальный режим. В момент времени 0,4 с производится изменение сопротивления полезной нагрузки с 120 Ом на 12 Ом.

Из графиков наблюдается, что время переходного процесса при изменении режима равно 55 мс. Минимальное напряжение составило 420 В.

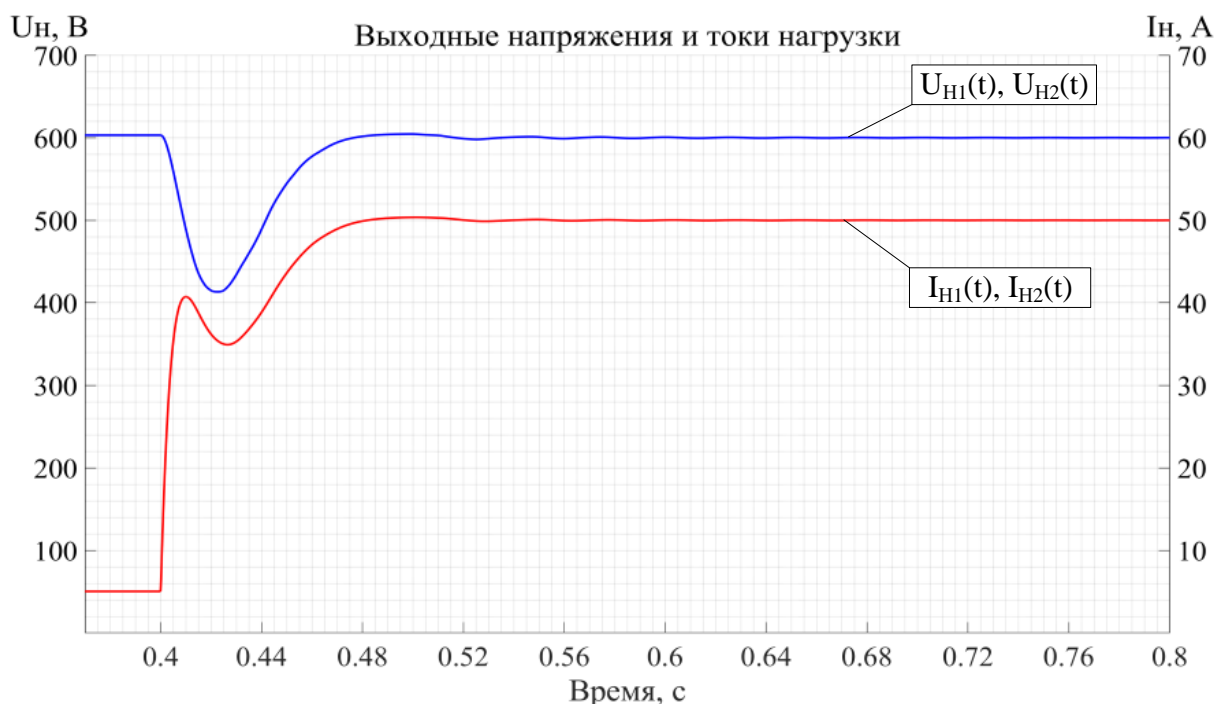


Рисунок 3.8 – Переходные процессы СЭС ТНПК при изменении работы с режима холостого хода на номинальный режим с регулятором номинального режима без вольтодобавки

На рисунке 3.9 представлены графики переходных процессов при изменении режима работы с номинального на режим холостого хода. В момент времени 0,4 с производится изменение сопротивления полезной нагрузки с 12 Ом на 120 Ом.

Из графиков наблюдается, что время переходного процесса при изменении режима равно 255 мс, т.е. превышение составило 325 %, максимальное напряжение 825 В, перерегулирование 37,5%.

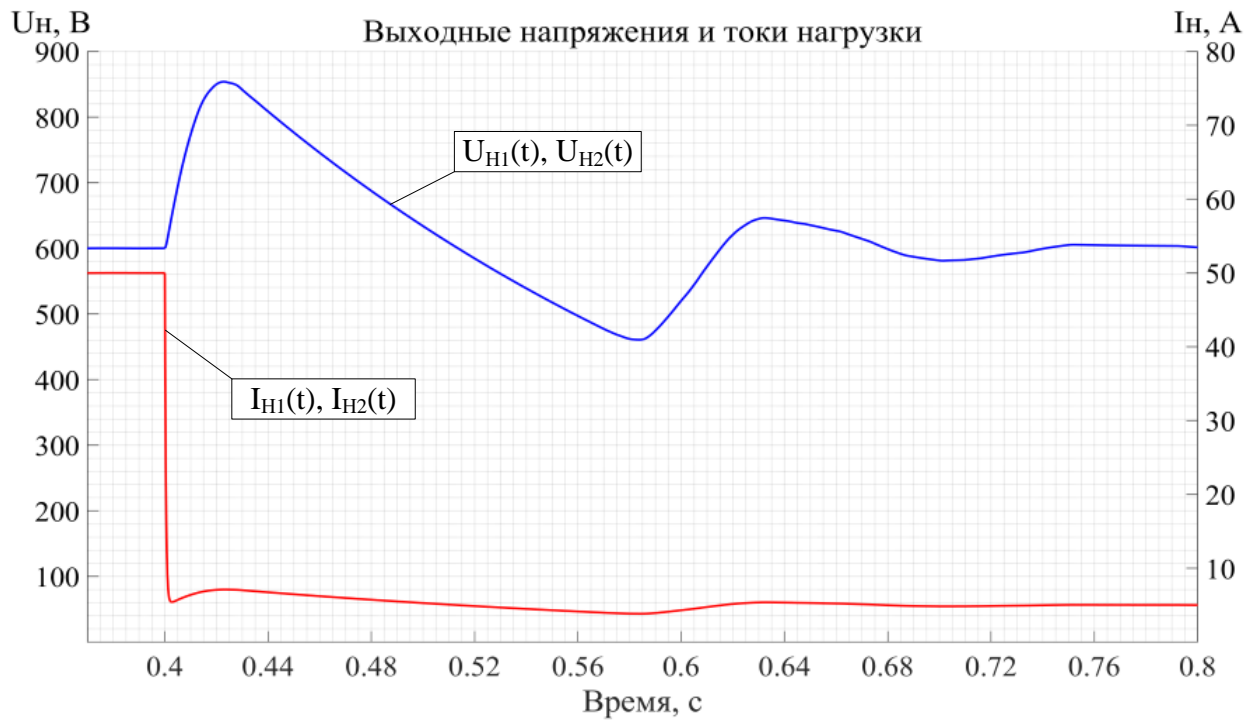


Рисунок 3.9 – Переходные процессы СЭС ТНПК при изменении работы с номинального режима на режим холостого хода с регулятором номинального режима без вольтодобавки

При настройке СЭС без учета вольтодобавки параметры режимов не соблюдаются. Время переходного процесса и напряжение стабилизации превышают заданные пределы.

Исходя из представленных результатов, произведем исследование вольтодобавки, которая компенсирует параметры кабель-троса и нагрузки. Вольтодобавка определяется величиной протекающего тока через жилу кабельной линии. Ранее вольтодобавка корректировала непосредственно значение напряжения уставки и не отражала свойств кабельной линии и нагрузки.

С целью учета параметров кабельной линии и нагрузки выходной массив данных объекта управления задан как разность выходного напряжения бортовой части и напряжения вольтодобавки.

При использовании метода идентификации и модуля настройки регулятора получены передаточная функция и регулятор с учетом вольтодобавки.

Передаточная функция принимает следующий вид:

$$W(s) = \frac{2,914 \cdot (0,168 \cdot 10^{-4} s^2 + 1,297 \cdot 10^{-3} s + 1)}{0,379 \cdot 10^{-8} s^3 + 1872 \cdot 10^{-8} s^2 + 2,437 \cdot 10^{-2} s + 1}. \quad (3.20)$$

При этом коэффициенты регулятора –

$$\begin{aligned} K_p &= 1,792; \\ K_i &= 57,255. \end{aligned} \quad (3.21)$$

На рисунке 3.10 представлены графики переходных процессов замкнутой СЭС ТНПК при запуске в режиме холостого хода с учетом влияния вольтодобавки.

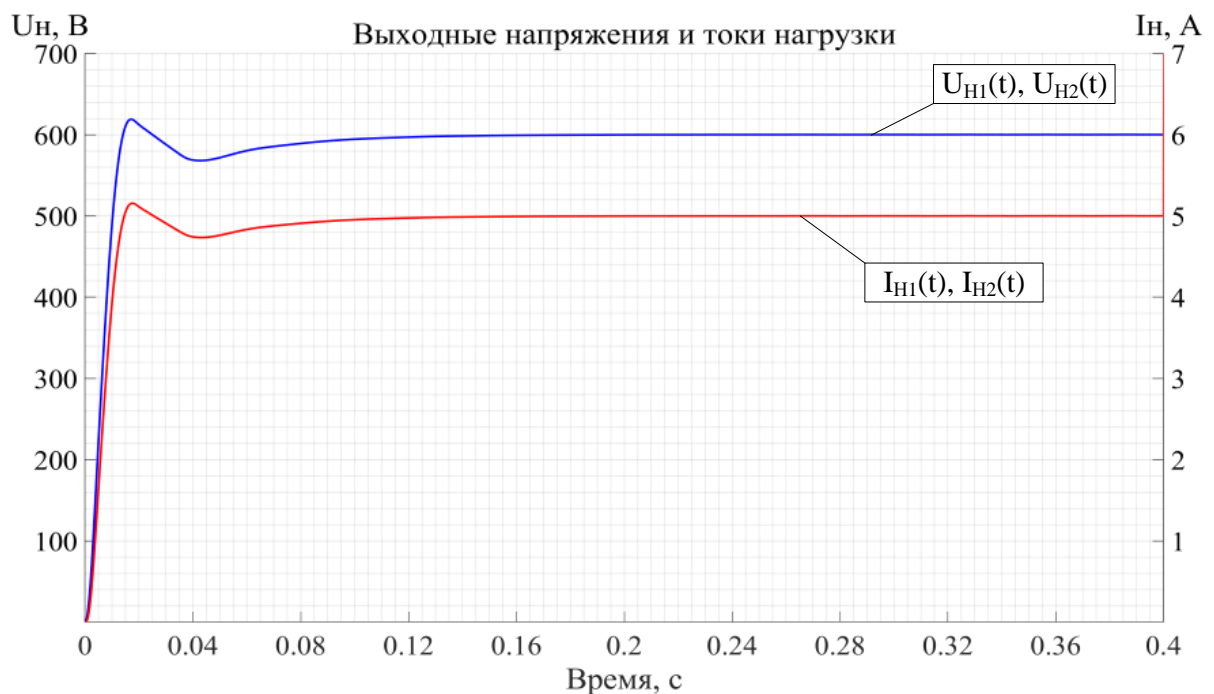


Рисунок 3.10 – Переходные процессы СЭС ТНПК в режиме холостого хода с регулятором холостого хода и учетом вольтодобавки

Из графиков видно, что время переходного процесса при запуске равно 55 мс. Максимальное напряжение составило 640 В, перерегулирование – 6,7 %.

На рисунке 3.11 представлены графики переходных процессов при изменении режима работы с холостого хода на номинальный режим. В момент времени 0,4 с производится изменение сопротивления полезной нагрузки с 120 Ом на 12 Ом.

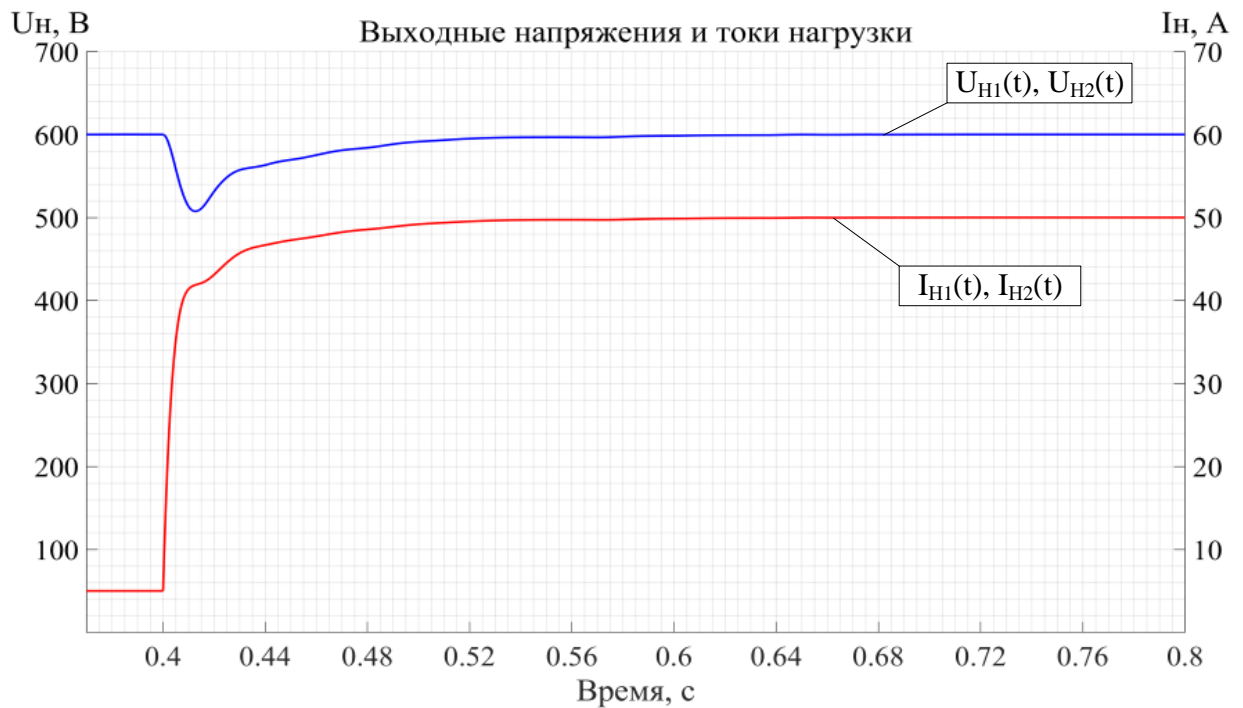


Рисунок 3.11 – Переходные процессы СЭС ТНПК при изменении работы с режима холостого хода на номинальный режим с регулятором холостого хода и учетом вольтодобавки

Из графиков видно, что время переходного процесса при изменении режима равно 50 мс. Максимальное напряжение составило 825 В, минимальное напряжение – 500 В.

На рисунке 3.12 представлены графики переходных процессов при изменении режима работы с номинального на режим холостого хода. В момент времени 0,4 с производится изменение сопротивления полезной нагрузки с 12 Ом на 120 Ом.

Из графиков наблюдается, что время переходного процесса при изменении режима равно 40 мс. Максимальное напряжение составило 715 В, перерегулирование – 19,2 %.

Рассмотрим регулятор в точке номинальной мощности внешней характеристики с учетом вольтодобавки.

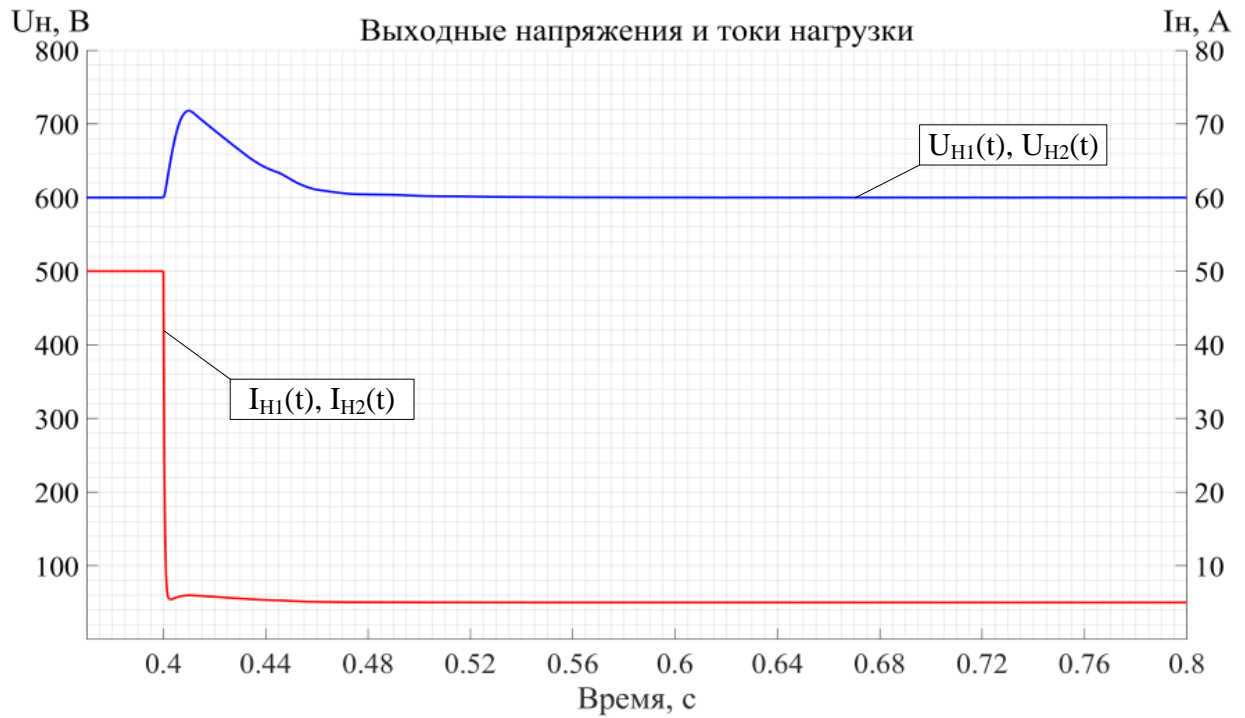


Рисунок 3.12 – Переходные процессы СЭС ТНПК при изменении работы с номинального режима на режим холостого хода с регулятором холостого хода и учетом вольтодобавки

Передаточная функция и коэффициенты регулятора в точке номинальной мощности внешней характеристики можно записать:

$$W(s) = \frac{1,542 \cdot (0,149 \cdot 10^{-4} s^2 + 0,25 \cdot 10^{-3} s + 1)}{0,167 \cdot 10^{-8} s^3 + 879,3 \cdot 10^{-8} s^2 + 1,063 \cdot 10^{-2} s + 1}, \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} Kp &= 1,618; \\ Ki &= 139,157. \end{aligned} \quad (3.23)$$

На рисунке 3.13 представлены графики переходного процесса замкнутой СЭС ТНПК при запуске в режиме холостого хода.

Из графиков видно, что время переходного процесса при запуске равно 90 мс. Максимальное напряжение составило 700 В, перерегулирование – 16,7 %.

На рисунке 3.14 представлены графики переходных процессов при изменении режима работы с холостого хода на номинальный режим. В момент времени 0,2 с производится изменение сопротивления полезной нагрузки с 120 Ом на 12 Ом.

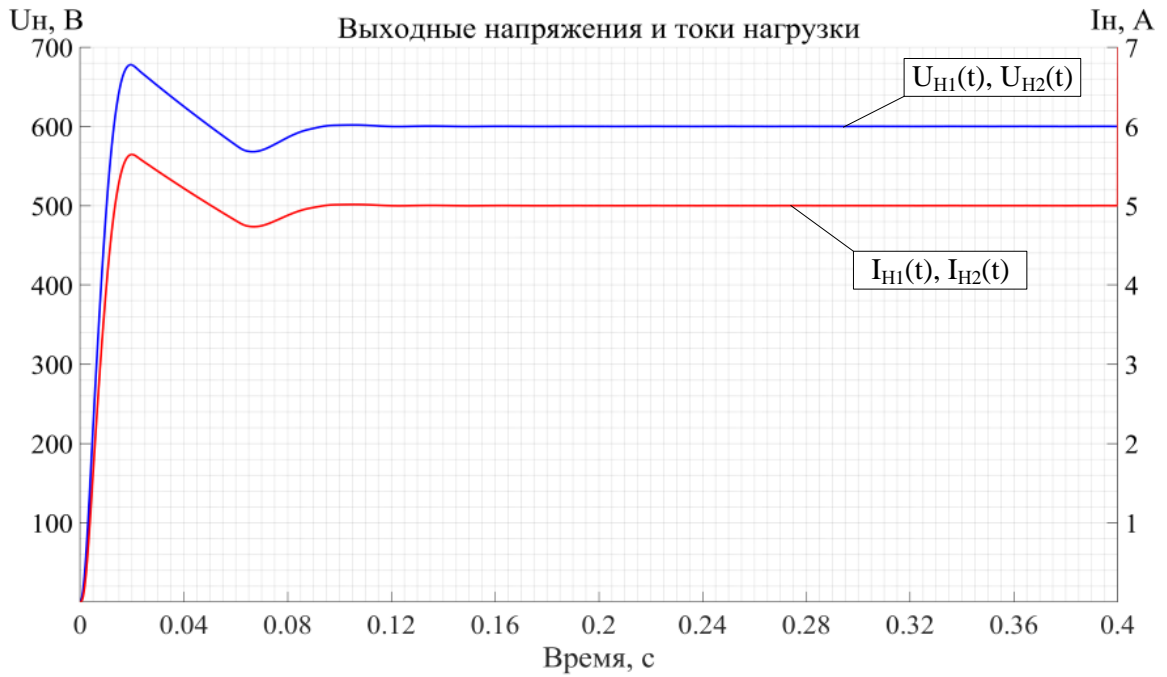


Рисунок 3.13 – Переходные процессы СЭС ТНПК в режиме холостого хода с регулятором номинального режима и учетом вольтодобавки

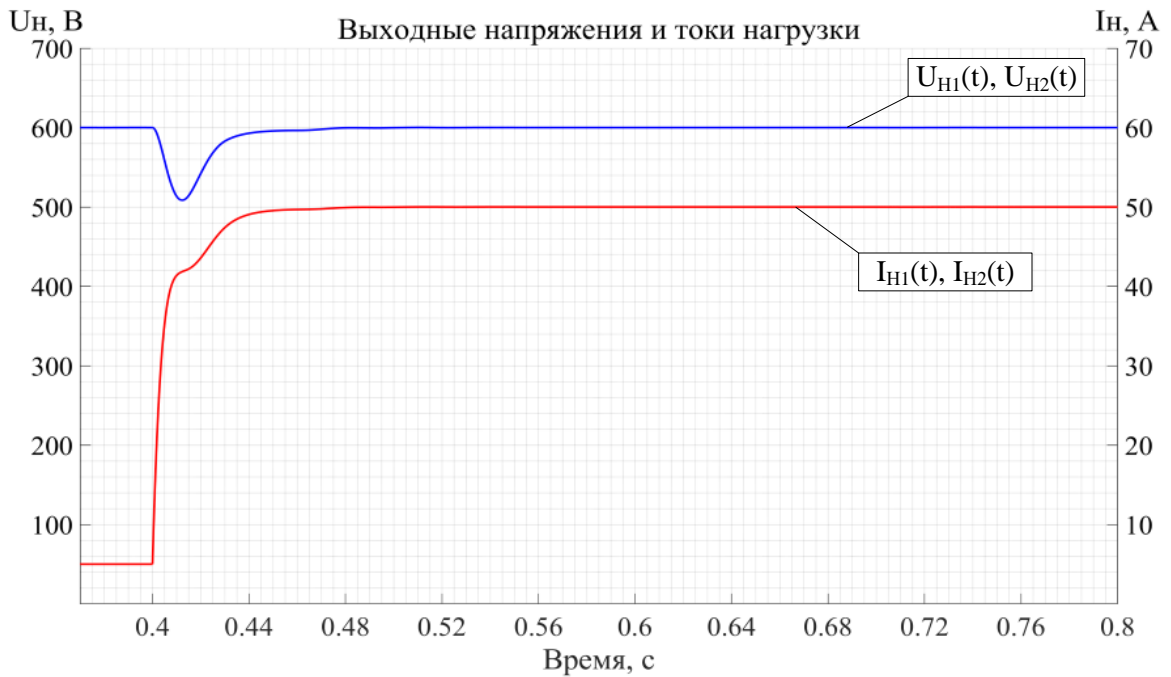


Рисунок 3.14 – Переходные процессы СЭС ТНПК при изменении работы с режима холостого хода на номинальный режим с регулятором номинального режима и учетом вольтодобавки

На графиках можно наблюдать, что время переходного процесса при изменении режима равно 25 мс. Минимальное напряжение составило 515 В.

На рисунке 3.15 представлены графики переходных процессов при изменении режима работы с номинального на режим холостого хода. В момент времени 0,2 с производится изменение сопротивления полезной нагрузки с 12 Ом на 120 Ом.

Из графиков видно, что время переходного процесса при изменении режима равно 85 мс. Максимальное напряжение составило 720 В, перерегулирование – 20 %.

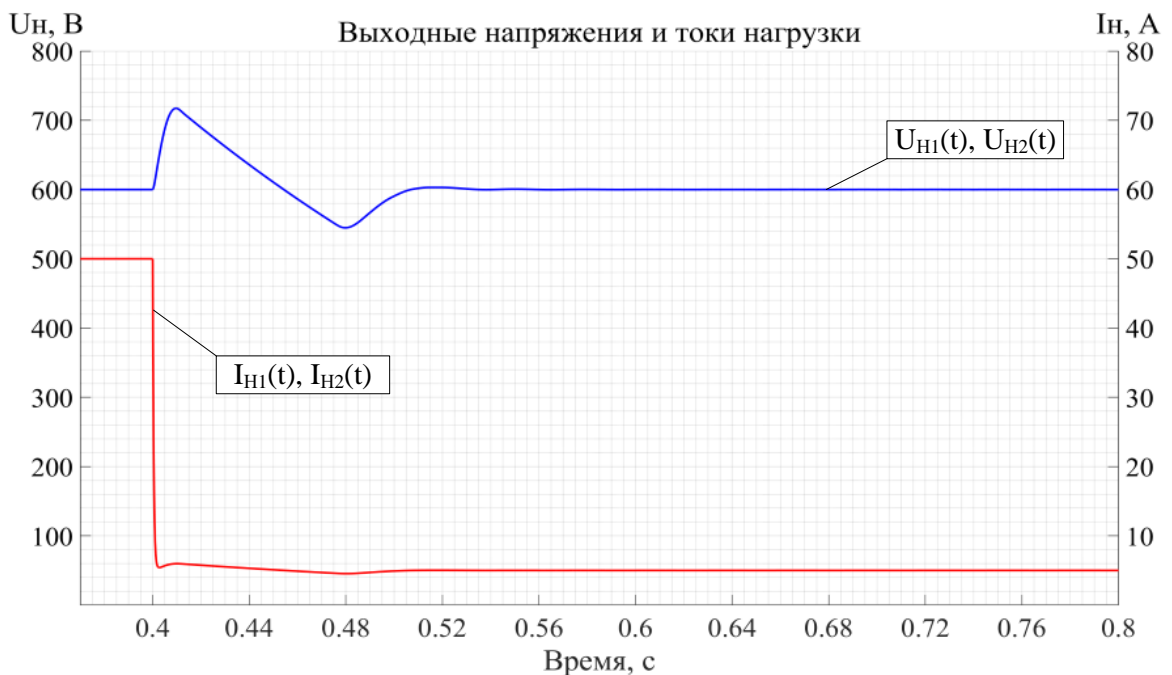


Рисунок 3.15 – Переходные процессы СЭС ТНПК при изменении работы с номинального режима на режим холостого хода с регулятором номинального режима и учетом вольтодобавки

Принимая во внимание вышеизложенные достоинства и недостатки регуляторов в крайних точках внешней характеристики, предложено использовать регулятор с изменяемыми коэффициентами. При этом коэффициенты регулятора в первом приближении изменяются по линейному закону и являются функцией от выходного тока бортовой части.

С помощью параметров регуляторов с учетом вольтодобавки в точках холостого хода и номинальной нагрузки внешней характеристики СЭС ТНПК

аналитически определены линейные зависимости коэффициентов регулятора от выходного тока БЧ СЭС ТНПК.

Функции коэффициентов регулятора:

$$\begin{aligned} Kp_i(I_{ki}) &= (-0,2743) \cdot I_{ki} + 1,854; \\ Ki_i(I_{ki}) &= 90,564 \cdot I_{ki} + 49,176, \end{aligned} \quad (3.24)$$

где I_{ki} – выходной ток i -го преобразователя бортовой части СЭС ТНПК.

На рисунке 3.16 представлены графики переходных процессов замкнутой СЭС ТНПК с регулятором с перестраиваемыми коэффициентами.

Из графиков видно, что время переходного процесса при запуске составило 75 мс, максимальное напряжение 780 В, перерегулирование 30 %.

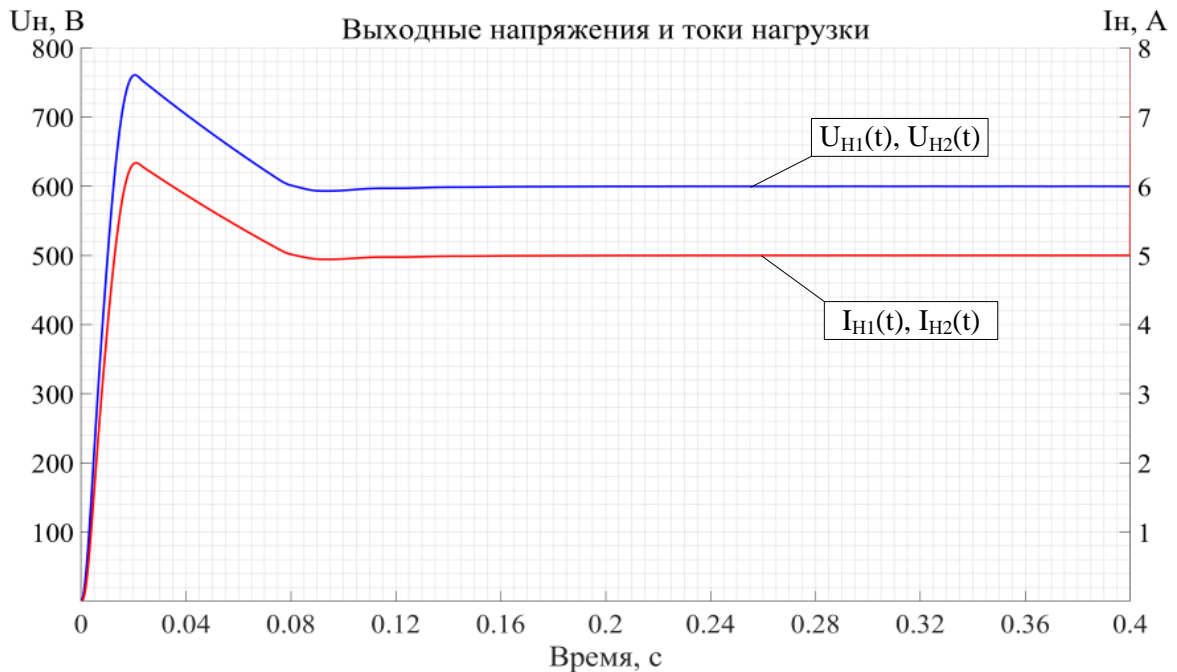


Рисунок 3.16 – Переходные процессы СЭС ТНПК в режиме холостого хода с регулятором с перестраиваемыми коэффициентами

На рисунке 3.17 представлены графики переходного процесса при изменении режима работы с холостого хода на номинальный режим. В момент времени 0,2 с производится изменение сопротивления полезной нагрузки с 120 Ом на 12 Ом.

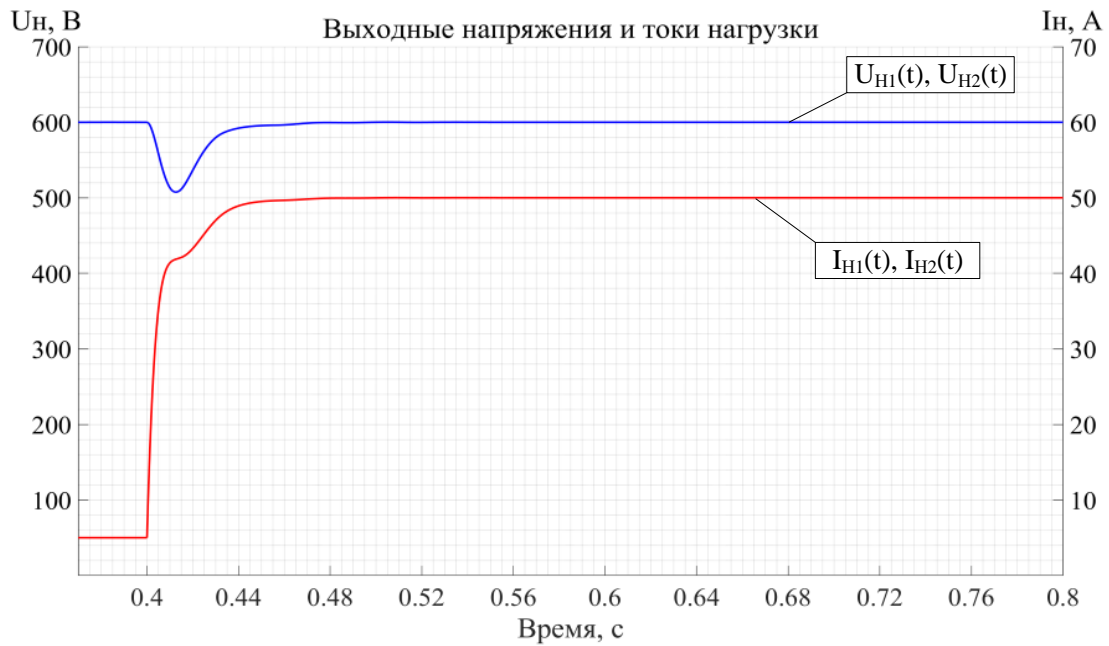


Рисунок 3.17 – Переходные процессы СЭС ТНПК при изменении работы с режима холостого хода на номинальный режим с регулятором с перестраиваемыми коэффициентами

Из графиков наблюдается, что время переходного процесса при изменении режима равно 25 мс. Минимальное напряжение составило 515 В.

На рисунке 3.18 представлены графики переходных процессов при изменении режима работы с номинального на режим холостого хода.

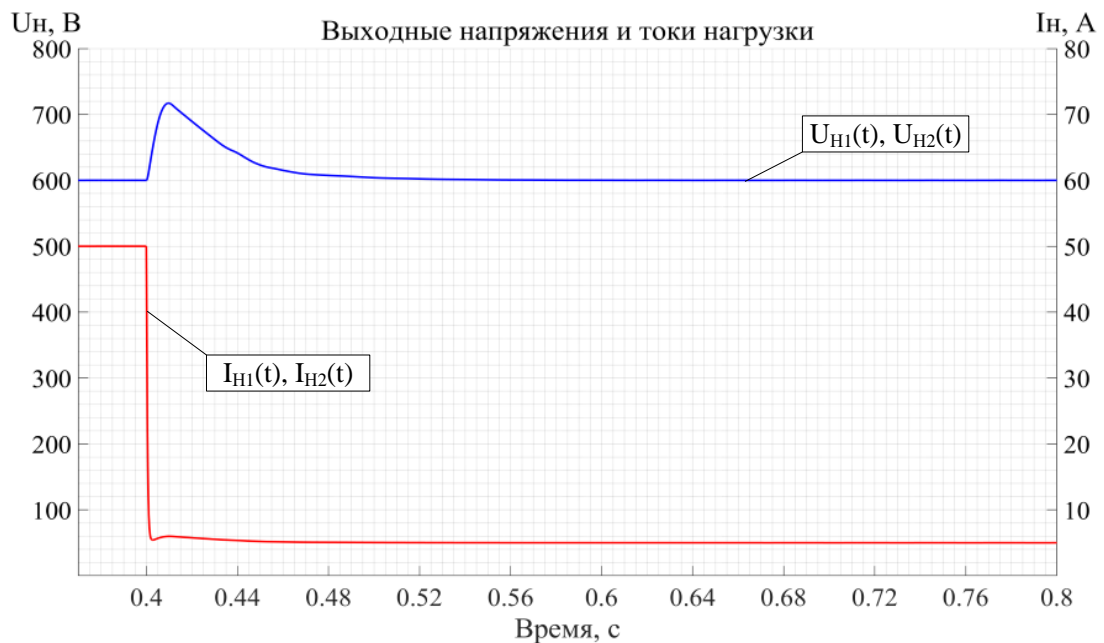


Рисунок 3.18 – Переходные процессы СЭС ТНПК при изменении работы с номинального режима на режим холостого хода с регулятором с перестраиваемыми коэффициентами

В момент времени 0,2 с производится изменение сопротивления полезной нагрузки с 12 Ом на 120 Ом.

Из графиков наблюдается, что время переходного процесса при изменении режима равно 40 мс. Максимальное напряжение составило 720 В, перерегулирование – 20 %.

Перерегулирование при различной смене режимов не превышает 20 % от номинального напряжения нагрузки, равного 600 В. Также в сравнении с ранее представленными регуляторами достигается максимальное время стабилизации. Однако при запуске системы наблюдается перерегулирование, составляющее 30 %. Устранение данной проблемы достигается внедрением в систему плавного пуска.

Рассмотрим работу СЭС ТНПК с регулятором с перестраиваемыми коэффициентами, плавным запуском в режиме холостого хода и с изменением нагрузки согласно этапам работы ТНПА. На рисунке 3.19 представлены зависимости выходных напряжений и токов СЭС ТНПК с момента начала погружения и до возвращения аппарата на судно-носитель.

В процессе моделирования проверяются штатные режимы, такие как запуск и работа СЭС в режиме холостого хода, погружение и подъем ПЧ СЭС, выход аппарата в зону работы и проведение целевых работ аппаратом. Также в ходе моделирования исследованы аварийные режимы работ, в которых производится максимальная загрузка ПЧ СЭС и переход в режим холостого хода.

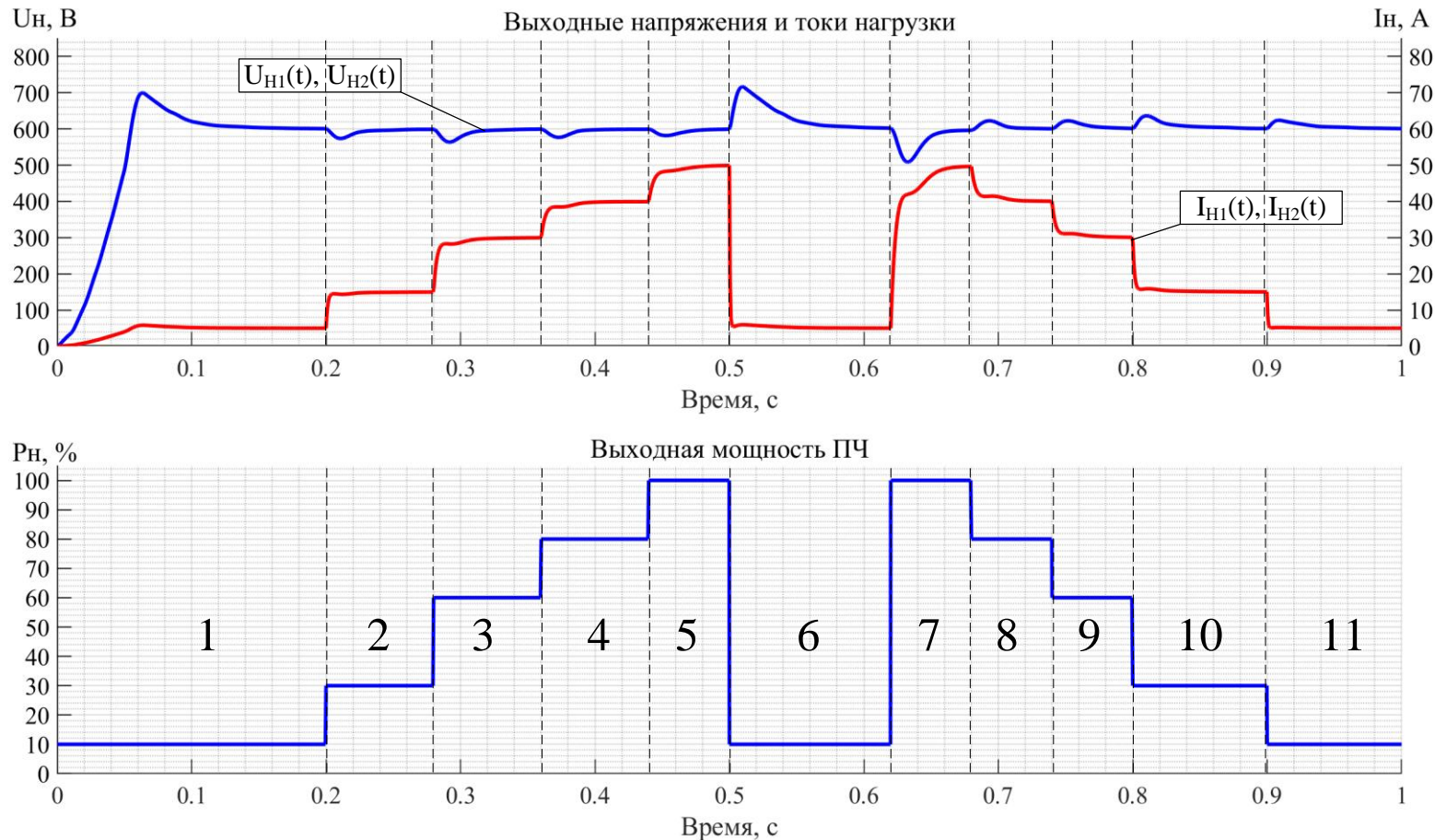


Рисунок 3.19 – Переходные процессы СЭС ТНПК при изменении этапа работы ТНПК:

1 – запуск СЭС ТНПК; 2 – погружение ГЗ с ТНПА; 3, 9 – выход ТНПА в зону проведения работ; 4, 8 – проведения целевых работ аппаратом; 5, 7 – аварийное включение максимальной нагрузки ПЧ СЭС ТНПК; 6 – аварийное отключение нагрузки ПЧ СЭС ТНПК, 10 – подъем ГЗ с ТНПА, 11 – работа ПЧ СЭС ТНПК в режиме холостого хода на судне-носителе

Рассмотрим режимы работы при несимметричной нагрузке ПЧ СЭС ТНПК. На рисунке 3.20 представлены зависимости выходных напряжений и токов в случае, когда первый канал ПЧ СЭС ТНПК находится в режиме холостого хода. При этом полезная мощность второго канала изменяется от 10 до 60 % от номинального значения выходной мощности.

В начальный момент и до 0,2 с производится запуск системы. Сопротивление полезной нагрузки первого канала равно 120 Ом, а второго – 20 Ом. Максимальное напряжение нагрузки первого канала ПЧ СЭС ТНПК составило 615 В, время запуска 47,5 мс. Для второго канала время 88,4 мс.

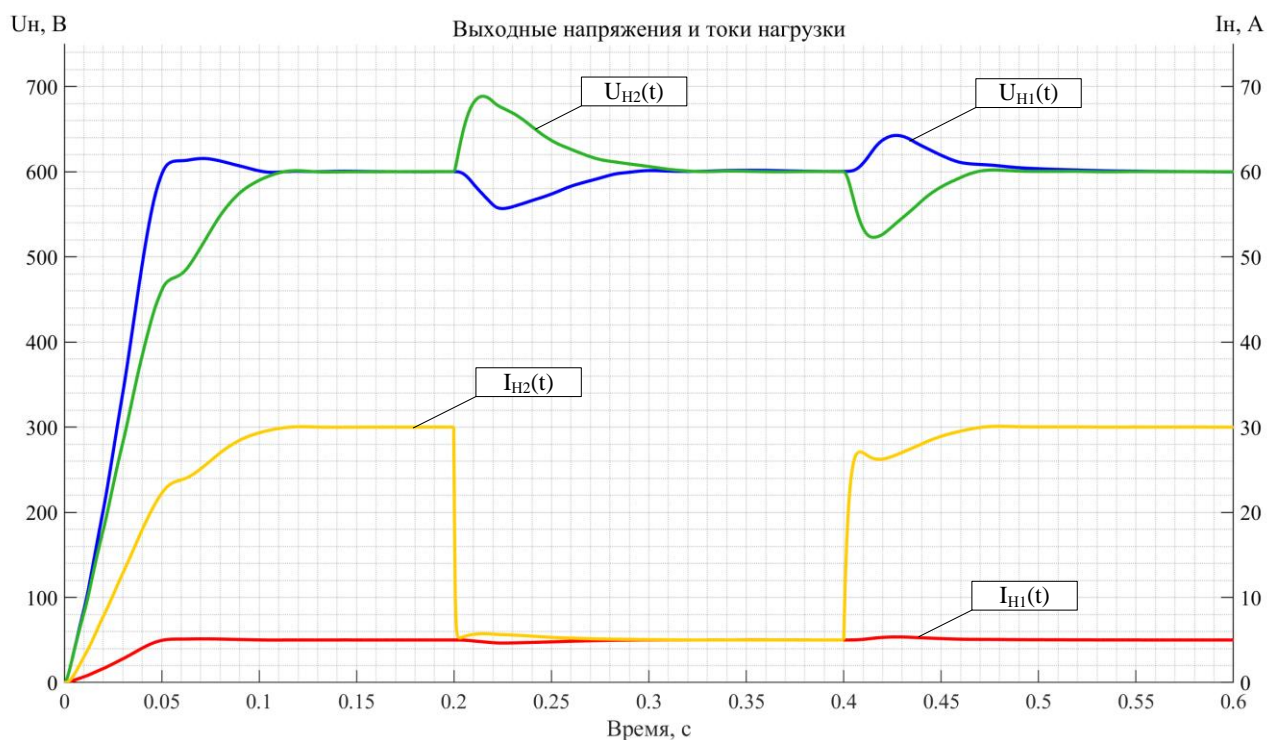


Рисунок 3.20 – Переходный процесс СЭС при несимметричной нагрузке в режиме холостого хода

В момент времени 0,2 с мощность полезной нагрузки второго канала изменяется до 10 % от номинального значения. Минимальное напряжение первого канала составило 556 В, а максимальное напряжение для второго канала – 689 В. Перерегулирования равны 7,3 % и 14,8 % соответственно. Время переходного процесса для первого канала составило 45,3 мс, для второго канала – 56,2 мс.

В момент времени 0,4 с мощность полезной нагрузки второго канала изменяется до 60 % номинального значения. Максимальное напряжение для первого канала составило 643 В, а минимальное напряжение для второго канала – 522 В. Перерегулирования равны 7,2 % и 13 % соответственно. Время переходного процесса для первого канала составило 40,6 мс, для второго канала – 42,2 мс.

На рисунке 3.21 представлены зависимости выходных напряжений и токов в случае, когда первый канал ПЧ СЭС ТНПК находится в номинальном режиме.

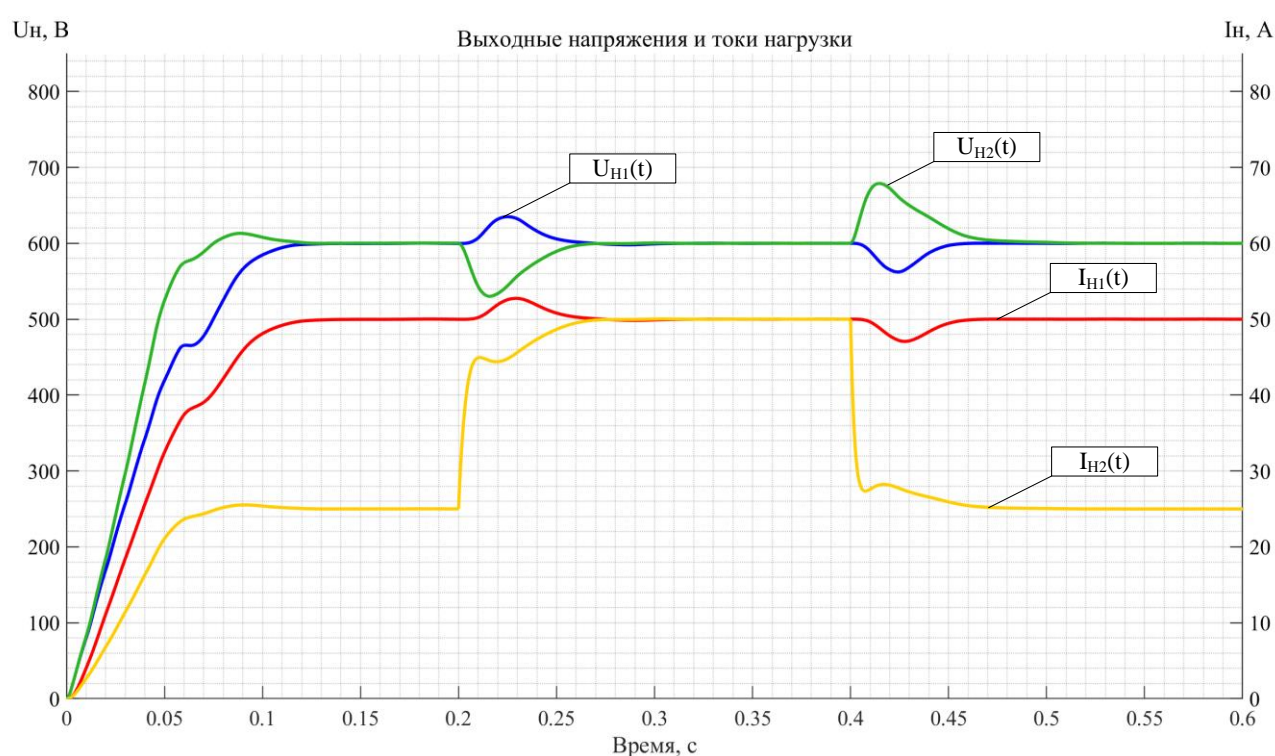


Рисунок 3.21 – Переходный процесс СЭС при несимметричной нагрузке в номинальном режиме

При этом полезная мощность второго канала изменяется от 50 % до 10 % от номинального значения выходной мощности.

В начальный момент и до 0,2 с производится запуск системы. Сопротивление полезной нагрузки первого канала составляет 12 Ом, а второго – 24 Ом. Максимальное напряжение нагрузки второго канала ПЧ СЭС ТНПК –

615 В, время запуска – 57,8 мс. Для первого канала время запуска составило 90,2 мс.

В момент времени 0,2 с мощность полезной нагрузки второго канала изменяется до 50 % от номинального значения. Максимальное напряжение первого канала составило 634 В, а минимальное напряжение для второго канала – 530 В. Перерегулирования равны 5,6 % и 11,7 % соответственно. Время переходного процесса для первого канала составило 31,9 мс, а для второго канала – 23,7 мс.

В момент времени 0,4 с мощность полезной нагрузки второго канала изменяется до 100 % номинального значения. Минимальное напряжение первого канала составило 562 В, а максимальное напряжение для второго канала – 679 В. Перерегулирования равны 6,4 % и 13,2 % соответственно. Время переходного процесса для первого канала составило 30,8 мс, а для второго канала – 43 мс.

Выводы по главе 3

1. Представлены основные положения, определяющие принципы проектирования регулятора напряжения СЭС ТНПК на базе передаточных функций.

2. На основе идентификации методом площадей создан программный модуль, позволяющий определить параметры передаточной функции по переходной характеристике. Идентификация методом площадей является практичной в программной реализации и обеспечивает допустимый уровень точности аппроксимаций.

3. По результатам исследований установлено, что в системе целесообразно использование регулятора напряжения с изменяемыми коэффициентами на основе выходных токов бортовой части СЭС. Применение данного регулятора позволяет достигнуть заданных параметров быстродействия и перерегулирования при различных режимах работы.

4. Разработана схема регулятора, позволяющего обеспечить стабилизацию выходных напряжений на нагрузке в системе электроснабжения при сборе данных выходных напряжений и токов бортовой части СЭС. Создан перестраиваемый регулятор. Моделирование подтвердило, что представленный регулятор обеспечивает заданные требования быстродействия и перерегулирования на нагрузке при изменении режимов работы системы.

ГЛАВА 4 ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

4.1 Разработка технической реализации системы электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе

Структурная схема и визуализация СЭС ТНПК с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе представлены на рисунке 4.1.

СЭС условно разделяется на бортовую и подводную части. При этом энергетическую и информационную связь образует силовой кабель-трос.

Построение бортовой и подводной части СЭС определяет как массогабаритные показатели, так и энергетические.

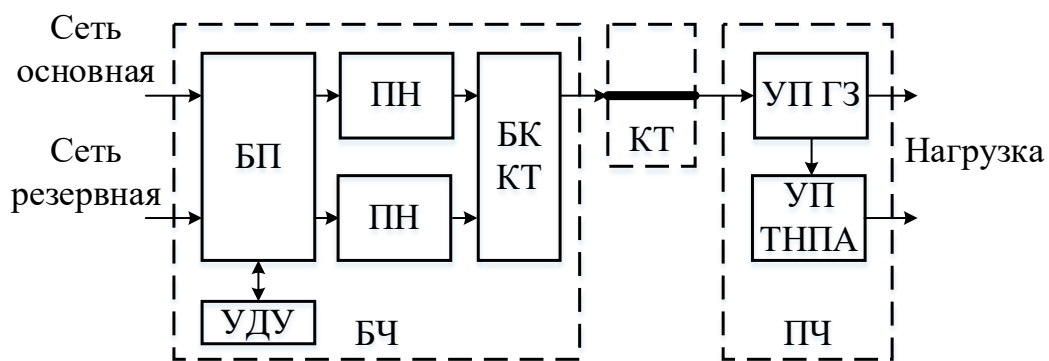
Предлагается бортовую часть СЭС разделить на следующие энергетические и информационные узлы:

- блок питания (БП);
- преобразователь напряжения (ПН);
- блок коммутации кабель-троса (БК КТ);
- устройство дистанционного управления (УДУ).

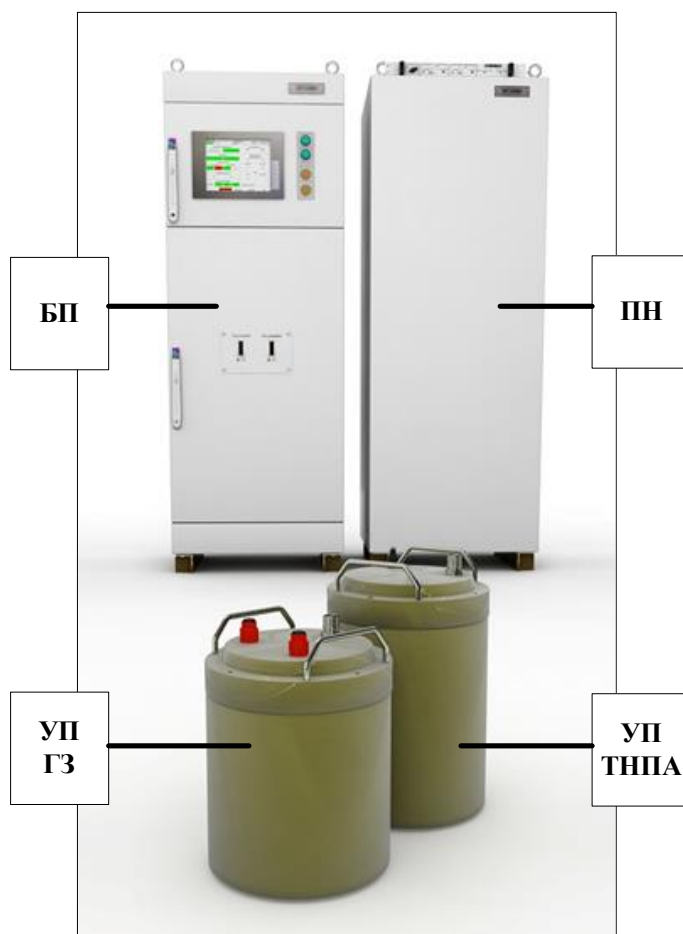
Подводная часть СЭС содержит устройство электропитания гаража-заглубителя (УП ГЗ) и устройство электропитания ТНПА (УП ТНПА).

Энергопитание СЭС ТНПК осуществляется от бортовой сети судна-носителя трехфазным напряжением 380 В частотой 50 Гц.

Энергетические показатели системы определяются потребителями энергии подводной части системы. Также энергетические характеристики СЭС определяются кабель-тросом.



а



б

Рисунок 4.1 – Структурная схема (а) и визуализация (б) СЭС ТНПК с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе

Представленная структура рассматривается для питания подводных потребителей по кабельной линии длиной 8000 км суммарной мощностью 50 кВт. Сформированные шины питания постоянного напряжения 300 В и 600 В подводной части СЭС обеспечивают выходное напряжение в пределах $\pm 10\%$ от

номинального напряжения. Динамические характеристики выходных каналов питания соответствуют максимальному перерегулированию 20 % с длительностью переходных процессов, не превышающих 50 мс.

Далее рассмотрим построение и функциональные возможности основных узлов СЭС ТНПК [105].

Блок питания

Преобразуя входное трехфазное напряжение 380 В, внутри шкафа питания формируется шина постоянного напряжения 500 В. Выпрямленное напряжение используется для питания преобразователей.

Структурно БП (рисунок 4.2) состоит из блока выключателей (БВ), блока входных контакторов (БКВх), блока выходного контактора (БКВых), блока трансформаторов собственных нужд (БТ СН), устройства контроля изоляции (УКИ), устройства питания собственных нужд (УП СН), устройства защит и сопряжения (УЗиС), устройства управления верхнего уровня (УУВУ), устройства контроля и управления контакторами (УКУК).

Кроме представленных выше частей, БП содержит фильтр радиопомех (ФРП), трехфазный выпрямитель В1 с LC-фильтром Ф1, органы аварийного отключения, сенсорный дисплей, а также силовые и интерфейсные разъёмы для подключения преобразователей напряжения, блока коммутации кабель-троса, устройства дистанционного управления, Ethernet и питающей сети.

БП работает следующим образом: от питающей сети через входные клеммы трехфазное напряжение через БВ поступает в БКВх и БТ СН. От БКВх напряжение подаётся на вход выпрямителя через фильтр радиопомех и БКВых. При этом к выходу ФРП подключается УКИ. С выхода выпрямителя через LC-фильтр выпрямленное напряжение 500 В передаётся на силовые разъёмы подключения ПН.

Управление верхнего уровня СЭС организовано в БП и осуществляется взаимодействием с сенсорным монитором при помощи уникального визуального интерфейса.

Рассмотрим детальнее работу устройств, входящих в БП.

Устройство контроля изоляции

УКИ предотвращает поражение обслуживающего персонала при пробое, а также недопустимом снижении сопротивления изоляции между питающей сетью и корпусом. Превышение тока утечки свыше 10 мА приводит к блокировке работы СЭС.

Устройство питания собственных нужд

УП СН при помощи БТ СН формирует гальванически развязанные постоянные напряжения величиной +24, ±15, 12 и 5 В для собственных нужд СЭС.

Устройство управления верхнего уровня

УУ ВУ управляет и контролирует состояние СЭС. В устройство включены функции обмена данных с устройствами управления среднего уровня (УУ СУ) и УКИ высоковольтного выхода (УКИ ВВ) по протоколу Modbus, функции взаимодействия с интерфейсом управления при помощи сенсорного монитора или через ПЭВМ по технологии Ethernet.

УУ ВУ реализовано на промышленном компьютере, который состоит из процессорной платы MSM800SEV и адаптера на 48 каналов ICOP-0101. Программное обеспечение создано на платформе операционной системы Linux. Алгоритмы работы СЭС и его описание приведены в параграфе 4.2.

Устройство защит и сопряжения БП

УЗиС выполняет следующие функции:

- контроль сформированных напряжений 24 В и ±15 В;
- отслеживание заземления БП и БК КТ;
- передачу квитанций в УУ ВУ «сухим» контактом;
- контроль обрыва фаз и уровня сетевого напряжения;
- мониторинг температуры трехфазного выпрямителя БП;
- контроль предохранителя вентилятора БП.

В случае аварии происходит аппаратная блокировка сети и управления с одновременной отправкой соответствующей дискретности в УУ ВУ.

Устройство контроля и управления контакторами

УКУК обеспечивает управление и контроль трехфазными контакторами БКВх и БКВых. Предотвращение замыкания входных сетей между собой реализовано схмотехнически. Подключение питания обмотки КМ1 осуществляется через нормально замкнутые дополнительные контакты КМ2. Аналогично соединена обмотка питания КМ2.

Преобразователь напряжения

Преобразователь напряжения (рисунок 4.3) формирует выходное постоянное напряжение $600 \div 1500$ В из входного выпрямленного напряжения 500 В БП. ПН включает в себя блок повышающих трансформаторов; устройство контроля изоляции высоковольтного выхода (УКИ ВВ); автономные инверторы напряжения (АИН); устройство управления среднего уровня (УУ СУ); устройство защит, питания и сопряжения (УЗПС).

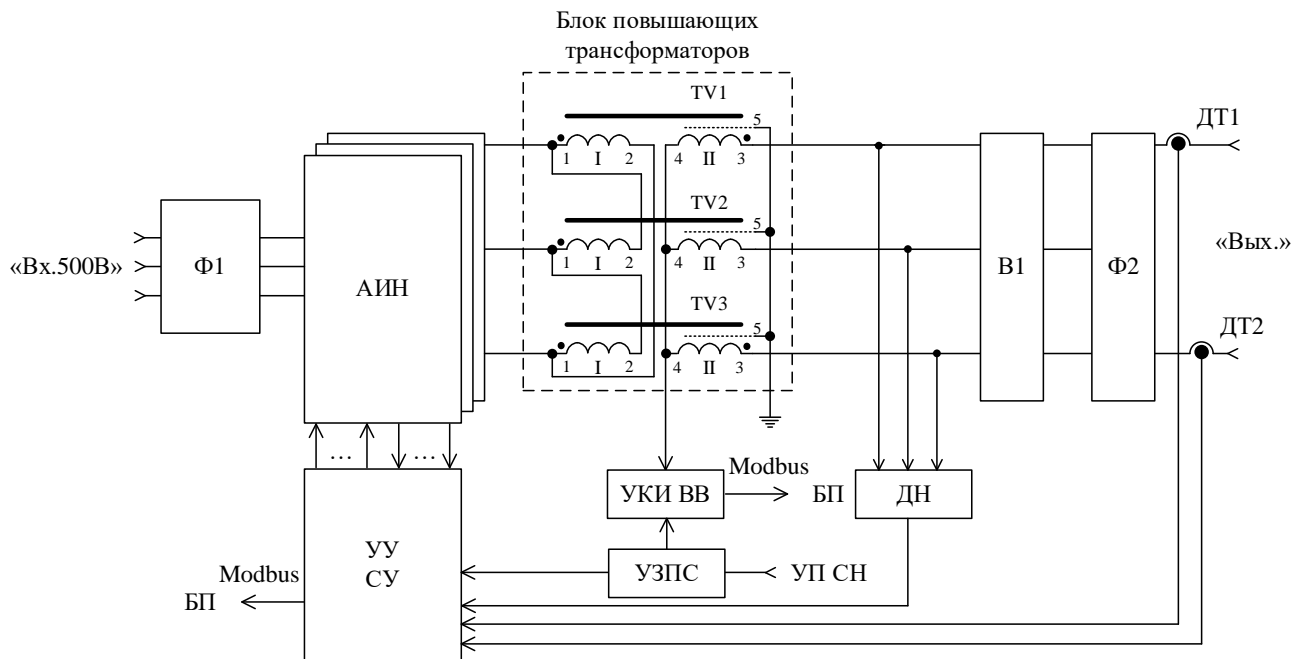


Рисунок 4.3 – Структурная схема преобразователя напряжения

Также в стойке ПН расположены разъемы и зажимы внешних подключений; входной фильтр Ф1; датчики тока ДТ1, ДТ2 и датчик напряжения (ДН).

Информация с датчиков выходных токов ДТ1, ДТ2 используется для расчета падения напряжения токопроводящей жилы кабель-троса, формирования вольтодобавки, симметрирования входного напряжения ПЧ, токоограничения ПН.

Информация с датчиков выходного напряжения ДН применяется для стабилизации выходного напряжения ПН и формирования защиты от перенапряжения.

Устройство управления среднего уровня

Функции УУ СУ разделены на две основные части (рисунок 4.4).

Первая часть основана на контроллере STM32F104 DD1, в котором реализованы следующие функции:

- обмен информацией с контроллером УУ ВУ протоколом Modbus через интерфейс RS-485;
- опрос аварийных и информационных дискрет и передача их в УУ ВУ;
- трансляция кода уставки выходного напряжения ПН $U_{\text{ВЫХ БП}}$ от УУ ВУ в контроллер DD6 по шине SPI;
- трансляция кода уставки компенсации сопротивления линии $K_{\text{ПОС}}$ от УУ ВУ в контроллер DD3 по шине SPI;
- получение и передача в УУ ВУ данных с АЦП DD3, реализующего функцию вольтметра выходного действующего напряжения ПН, от контроллера DD5 через шину SPI;
- получение и передача в УУ ВУ данных с АЦП DD4, реализующего функцию амперметра выходного тока ПН, от контроллера DD5 через шину SPI.

Вторая часть основана на контроллере STM32F429 DD5, в котором реализованы следующие функции:

- управление и съём информации с АЦП DD3, DD4;
- формирование импульсов синхронизации АИН положительной и отрицательной полуволны;
- регулятор выходного напряжения ПН;
- регулятор токоограничения выходной мощности ПН;

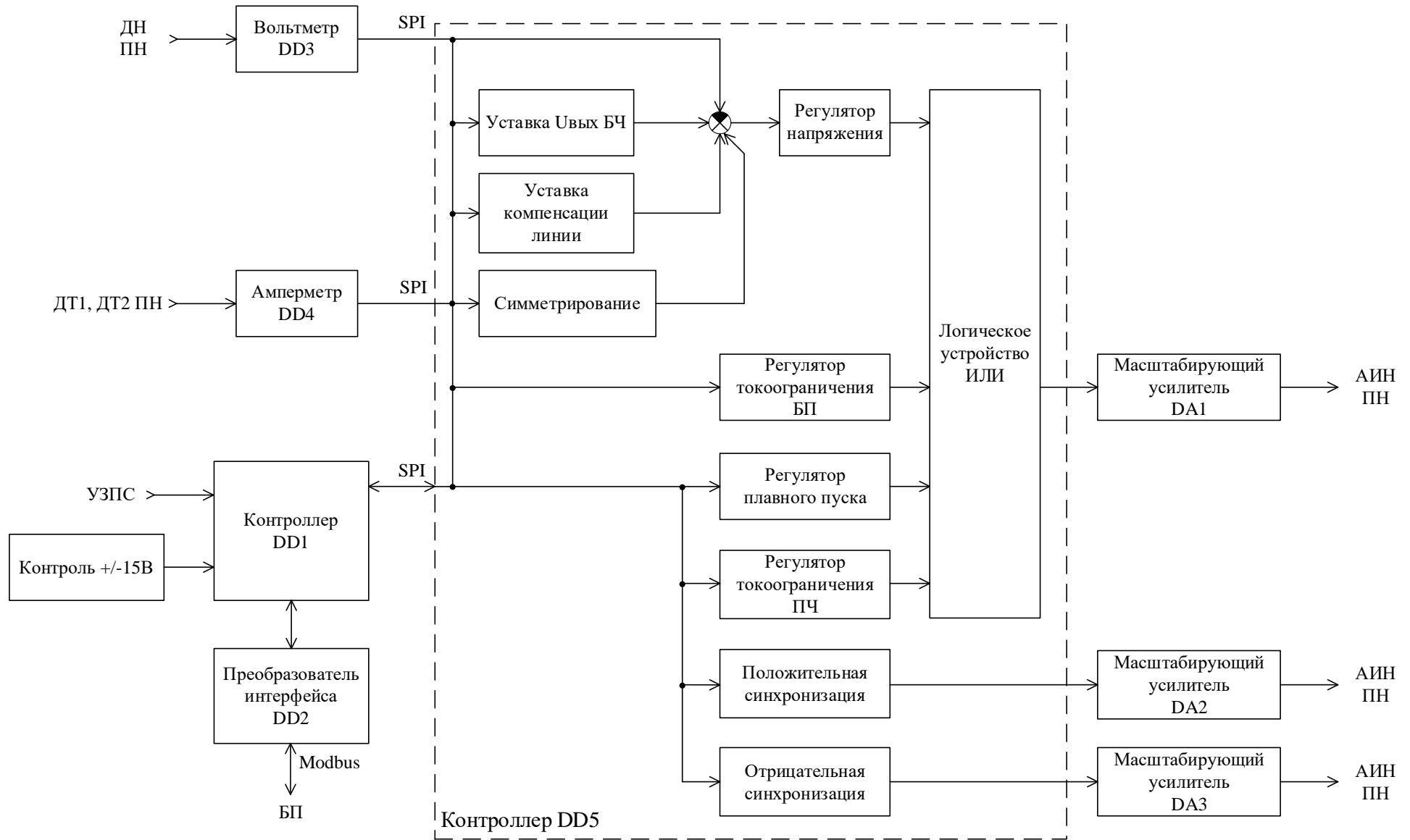


Рисунок 4.4 – Структурная схема устройства управления среднего уровня

- регулятор плавного пуска;
- регулятор токограничения нагрузки ПЧ.

Импульсы синхронизации АИН формируются контроллером DD5 и через магистральные усилители DA1, DA2 поступают в УУ НУ АИН.

После формирования команды включения СЭС на интервале времени блокировки управления (ТС КМЗ = 1) силовые ключи АИН находятся в закрытом состоянии, а DD5 формирует ноль на выходах регуляторов, т.е. коэффициент модуляции равен нулю. По окончании блокировки управления (ТС КМЗ = 0) управление силовыми ключами разрешается, DD5 формирует плавный разворот коэффициента модуляции АИН. Плавный запуск позволяет исключить выбросы напряжения в ПЧ СЭС ТНПК.

Устройство контроля изоляции высоковольтного выхода

УКИ ВВ осуществляет контроль сопротивления изоляции между выходными высоковольтными цепями ПН и корпусом. Измерение сопротивления изоляции производится в диапазоне от 0 до 401 кОм. При снижении сопротивления ниже 150 кОм происходит блокировка СЭС и отправка ТС «Изол.вых.ПН» в УУ ВУ.

Устройство защит, питания и сопряжения ПН

УЗПС выполняет следующие функции:

- контроль сформированных напряжений 24 В и ± 15 В;
- отслеживание заземления ПН;
- передача квитанций в УУ СУ «сухим» контактом;
- контроль обрыва фаз и уровня сетевого напряжения;
- мониторинг температур АИН;
- контроль предохранителей вентиляторов ПН.

В случае аварии происходит аппаратная блокировка сети и управления с одновременной отправкой соответствующей дискреты в УУ СУ.

Автономный инвертор напряжения

АИН (рисунок 4.5) состоит из трехфазного трехуровневого инвертора напряжения; устройств управления силовыми ключами (УУ СК); устройства

управления нижнего уровня (УУ НУ); входных дросселей; устройства защиты АИН (УЗ АИН); входного и выходного фильтров $\Phi 1$, $\Phi 2$; датчиков тока ДТ1–ДТ5.

АИН преобразует входное выпрямленное напряжение 500 В в трехфазное напряжение с частотой 50 кГц.

В цепи выпрямленного напряжения АИН расположены предохранители FU1, FU2. Контроль предохранителей производится УЗ АИН.

Каждая стойка АИН (VT1–VT4, VT5–VT8, VT9–VT12) подключена к входному фильтру $\Phi 1$ через дроссели токоограничения L1, L2 и датчики тока ДТ1, ДТ2, шунтированные обратными диодами VD1, VD2.

К выходам стоек инвертора через выходной фильтр $\Phi 2$ подключены датчики тока ДТ3 – ДТ5, сигнальные выходы которых заведены в УЗ АИН.

Управление силовыми ключами осуществляют УМ, импульсы которых сформированы в УУ НУ.

Устройство управления нижнего уровня

УУ НУ предназначено для управления относительным временем открытого состояния силовых ключей АИН. С выхода УЗ АИН через повторитель на аналоговый вход контроллера поступает скорректированный коэффициент модуляции $K_{\text{мод.к}}$, учитывающий максимальный выходной ток МИ. $K_{\text{мод.к}}$ преобразуется АЦП контроллера в двоичный код управления выходными линейными напряжениями инвертора. Управляющие импульсы генерируются с учетом структуры трехфазного трехуровневого АИН.

Для исключения математических ошибок в процессе обработки информации в контроллер поступает синхронизация положительной и отрицательной полуволны. Каждые 10 мкс на вход контроллера поступает импульс, что служит сигналом для начала формирования следующей полуволны.

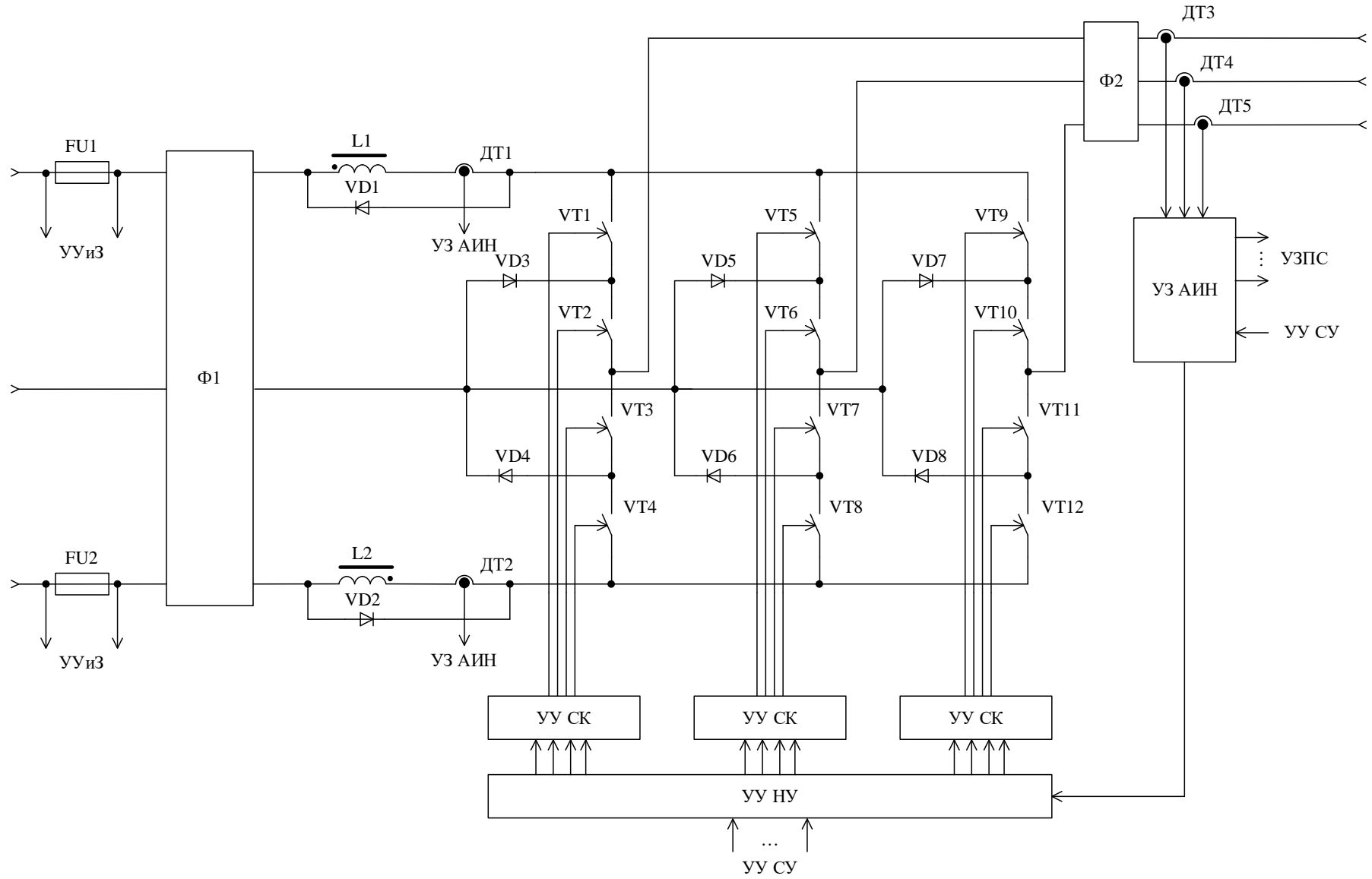


Рисунок 4.5 – Структурная схема автономного инвертора напряжения

Устройство управления силовыми ключами

УУ СК состоит из четырех независимых каналов управления силовыми ключами. Каждый канал содержит микросхему И-НЕ с высокопороговым КМОП-входом, драйвер и гальваноразвязанный DC/DC-преобразователь. Микросхема И-НЕ позволяет исключить ложное открытие силового ключа.

Устройство защит АИН

В УЗ АИН формируются три уровня защита АИН по току.

1. В случае превышения амплитуды входного или выходного тока свыше 30 А производится токоограничение при помощи регулятора тока. Регулятор ограничивает значение скорректированного коэффициента модуляции $K_{\text{мод.к}}$.

2. При превышении амплитуды входного или выходного тока свыше 40 А через компаратор производится блокировка управления силовых ключей АИН. Выполняется токовая отсечка момента перегрузки. Данная защита имеет релейный характер или является повторно восстанавливаемой.

3. В случае превышения амплитуды входного или выходного тока свыше 50 А производится блокировка СЭС и отправка ТС «Ток АИН» в УУ СУ.

Блок коммутации кабель-троса

БК КТ применяется для последовательного подключения ПН СЭС и соединения их с основным или резервным кабель-тросом.

Устройство дистанционного управления

УДУ применяется для реализации режима дистанционного включения и отключения СЭС, а также для индикации «Нарушение изоляции БЧ СЭС» или «Аварии СЭС».

Устройство электропитания гаража-заглубителя

УП ГЗ (рисунок 4.6) состоит из входного фильтра Ф1; устройств питания УП1–УП3, устройств измерения напряжения, тока и сопротивления УИНТС1, УИНТС2 и вентилятора.

Через входные клеммы «Вх. ПЧ» СЭП ГЗ двухполярное постоянное напряжение ± 600 В поступает на входной фильтр Ф1. С выхода фильтра Ф1

напряжение ± 600 В распределяется между устройствами питания УП1–УП3, УИНТС1 и выходными клеммами подключения «УП ТНПА1» и «УП ТНПА2».

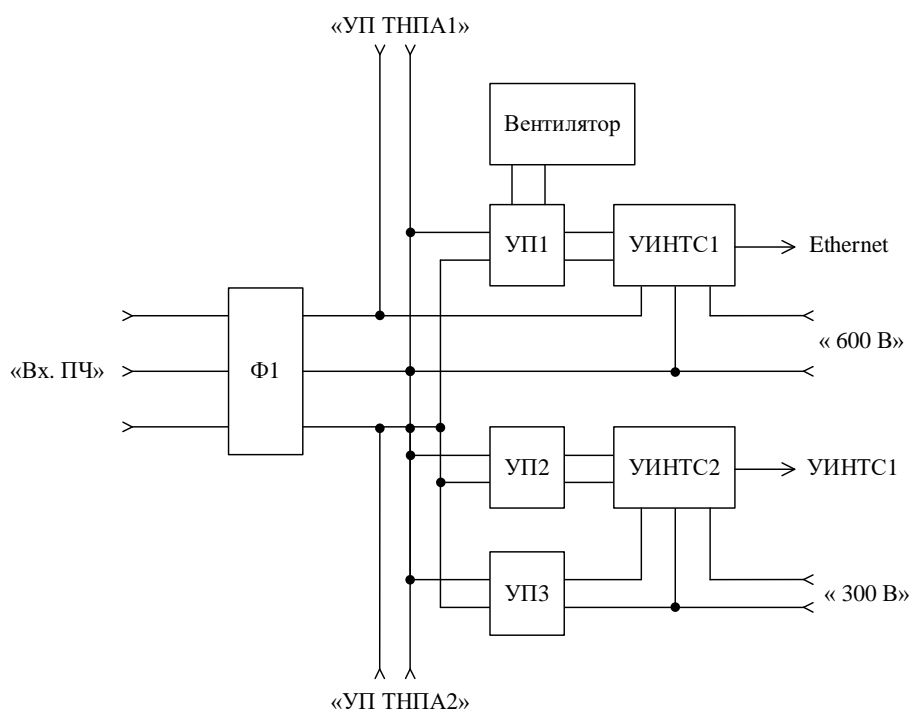


Рисунок 4.6 – Структурная схема устройства электропитания гаража-заглубителя

Постоянное напряжение 600 В через УИНТС1 передается к потребителям канала «600 В» ГЗ. Постоянное напряжения 300 В, сформированное устройством питания УП3, через УИНТС2 распределяется между потребителями канала «300 В» ГЗ. УП1 и УП2 формируют напряжение постоянного тока 24 В для плат УИНТС и вентилятора охлаждения.

Основными потребителями ГЗ являются лебедка плавучего кабеля, системы видеонаблюдения и захвата.

Устройство измерения напряжения, тока и сопротивления

УИНТС (рисунок 4.7) производит контроль выходного напряжения и тока, сопротивления изоляции выходной шины электропитания и температуры внутреннего пространства герметичного корпуса.

Измерение выходного напряжения осуществляется при помощи операционного усилителя DA1 с коэффициентом деления $k = 300$ для шины

питания 600 В и $k = 150$ для шины питания 300 В. Операционный усилитель DA1 необходим для согласования уровня измеряемой величины с входным напряжением АЦП DA2. Цифровой сигнал через изолятор DD1 передается в контроллер, в котором производится обработка полученного измерения.

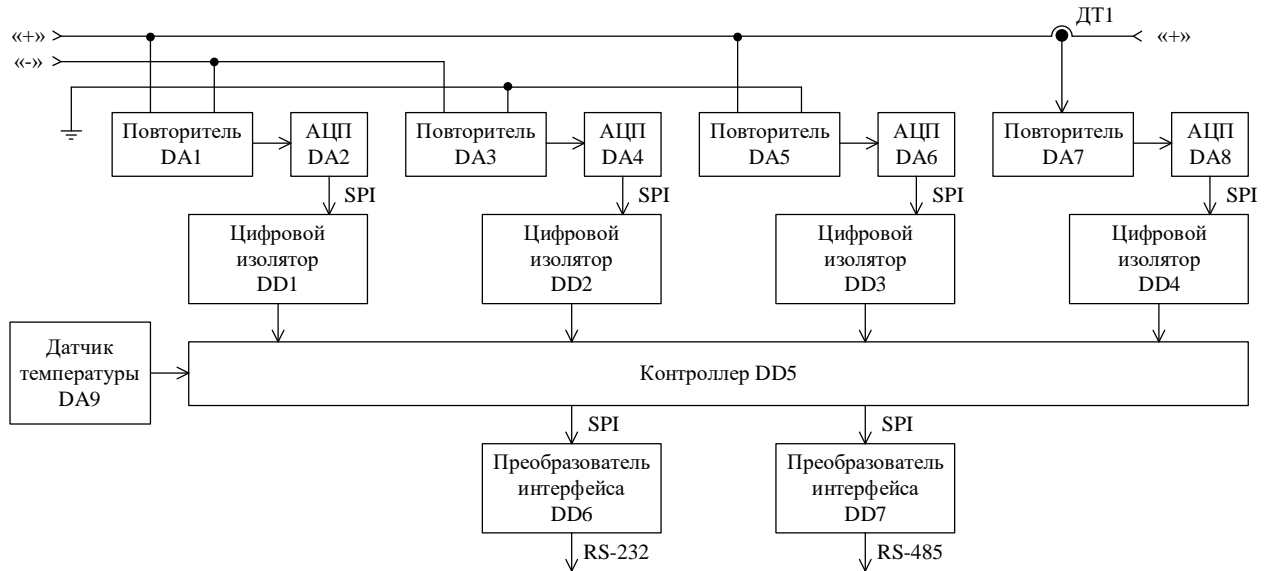


Рисунок 4.7 – Структурная схема устройства измерения напряжения, тока и сопротивления

Расчет сопротивления изоляции выполняется при помощи метода трех вольтметров. Последовательно производится:

- измерение выходного напряжения;
- измерение напряжения между токопроводящим участком герметичного корпуса и положительной шиной;
- измерение напряжения между токопроводящим участком герметичного корпуса и отрицательной шиной.

Измеренные значения обрабатываются в контроллере DD5. Можно рассчитать сопротивление изоляции выходной шины электропитания по формуле

$$R_+ = R_v \left(\frac{U - U_+}{U_-} - 1 \right); R_- = R_v \left(\frac{U - U_-}{U_+} - 1 \right), \quad (4.1)$$

где R_+ – сопротивление изоляции относительно положительной шины; R_- – сопротивление изоляции относительно отрицательной шины; U – выходное

напряжение; U_+ – напряжение между положительной шиной и токопроводящим участком герметичного корпуса; U_- – напряжение между отрицательной шиной и токопроводящим участком герметичного корпуса.

Измерение выходного тока осуществляется датчиком тока ДТ1. Сигнальный выход датчика подключен к операционному усилителю DA7, который необходим для согласования уровня измеряемой величины с входным напряжением АЦП DA8. Цифровой сигнал через изолятор DD4 поступает в контроллер DD5, в котором производится обработка полученного измерения.

Устройство электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата

УП ТНПА (рисунки 4.8, 4.9) состоит из входного фильтра Ф1, устройств питания УП1–УП3, устройств измерения напряжения, тока и сопротивления УИНТС1, УИНТС2 и вентилятора.

Через входные клеммы «Вх. ПЧ» УП ТНПА постоянное напряжение 600 В поступает на входной фильтр Ф1. С выхода фильтра Ф1 напряжение 600 В распределяется между устройствами питания УП1–УП3 и УИНТС1.

Постоянное напряжение 600 В через УИНТС1 передается к потребителям канала «600 В» ТНПА. Постоянное напряжения 300 В, сформированное устройством питания УП3, через УИНТС2 распределяется между потребителями канала «300 В» ТНПА. УП1 и УП2 формируют напряжение постоянного тока 24 В для вентилятора охлаждения и плат УИНТС.

УП ТНПА1 и УП ТНПА2 отличаются конфигурацией подключения шины передачи данных УИНТС1.

Основные потребители ТНПА – двигатели горизонтального и вертикального маневрирования, манипуляторы, гидравлический инструмент и осветительные приборы.

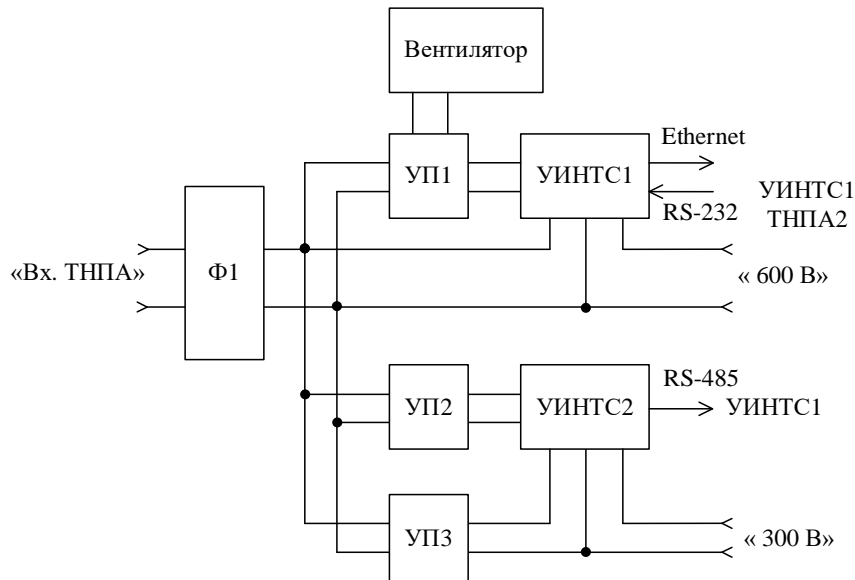


Рисунок 4.8 – Структурная схема устройства электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата в режиме «master»

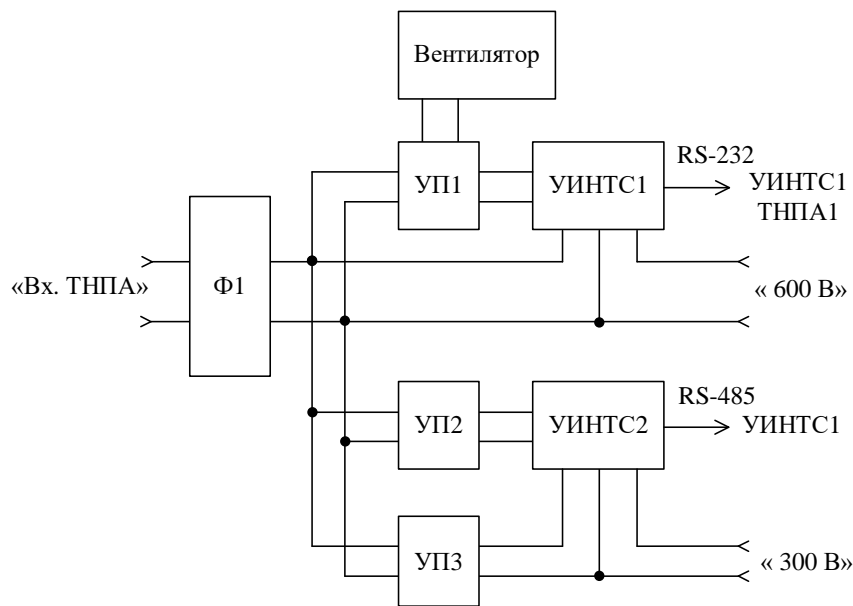


Рисунок 4.9 – Структурная схема устройства электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата в режиме «slave»

На основе изложенного описания в таблице 4.1 представлены аварийные и информационные телесигнализации, которые применяются для отображения информации и обеспечения корректной работы и безопасности обслуживающего персонала. Графическая реализация программного обеспечения верхнего уровня представлена в приложениях А, Б, В.

Таблица 4.1 – Аварийные и информационные телесигнализации

Название ТС	Источник	Название ТС	Источник
Авария QF1	Доп. контакты QF1	Контроль стыковки 500В ПН1	УЗиС, УУ СУ
Авария QF2	Доп. контакты QF2	Контроль стыковки 500В ПН2	УЗиС, УУ СУ
Ненорма сети осн.	УЗиС	Контроль стыковки ПН1	УЗПС
Ненорма сети рез.	УЗиС	Контроль стыковки ПН2	УЗПС
Обрыв фаз сети осн.	УЗиС	Заземление БП	УЗиС
Обрыв фаз сети рез.	УЗиС	Заземление БК КТ	УЗиС
Авария КМ1	Доп. контакты КМ1	Авария $\pm 15В$	УЗиС, УЗПС
Авария КМ2	Доп. контакты КМ2	Авария 24В	УЗиС, УЗПС
Авария КМ3	Доп. контакты КМ3	Авария перегрев БП	УЗиС
Изоляция сети	УКИ	Авария предохранитель БП	УЗиС

4.2 Описание алгоритма работы системы электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного комплекса с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе

Алгоритм работы СЭС ТНПК (рисунок 4.10) состоит из 8 второстепенных алгоритмов функционирования системы, изображенных на рисунках 4.11–4.20.

Алгоритм «ВКЛЮЧЕНИЕ» (рисунок 4.11) включает в себя действие оператора по внешней подаче питания комплекса при помощи механического включения выключателя основной и/или резервной сети БЧ СЭС.

После подачи питания выполняется инициализация бортовой части комплекса, включающая в себя:

- формирование питания собственных нужд;
- загрузку программного обеспечения верхнего уровня;
- инициализацию среднего и нижнего уровня управления бортовой части.

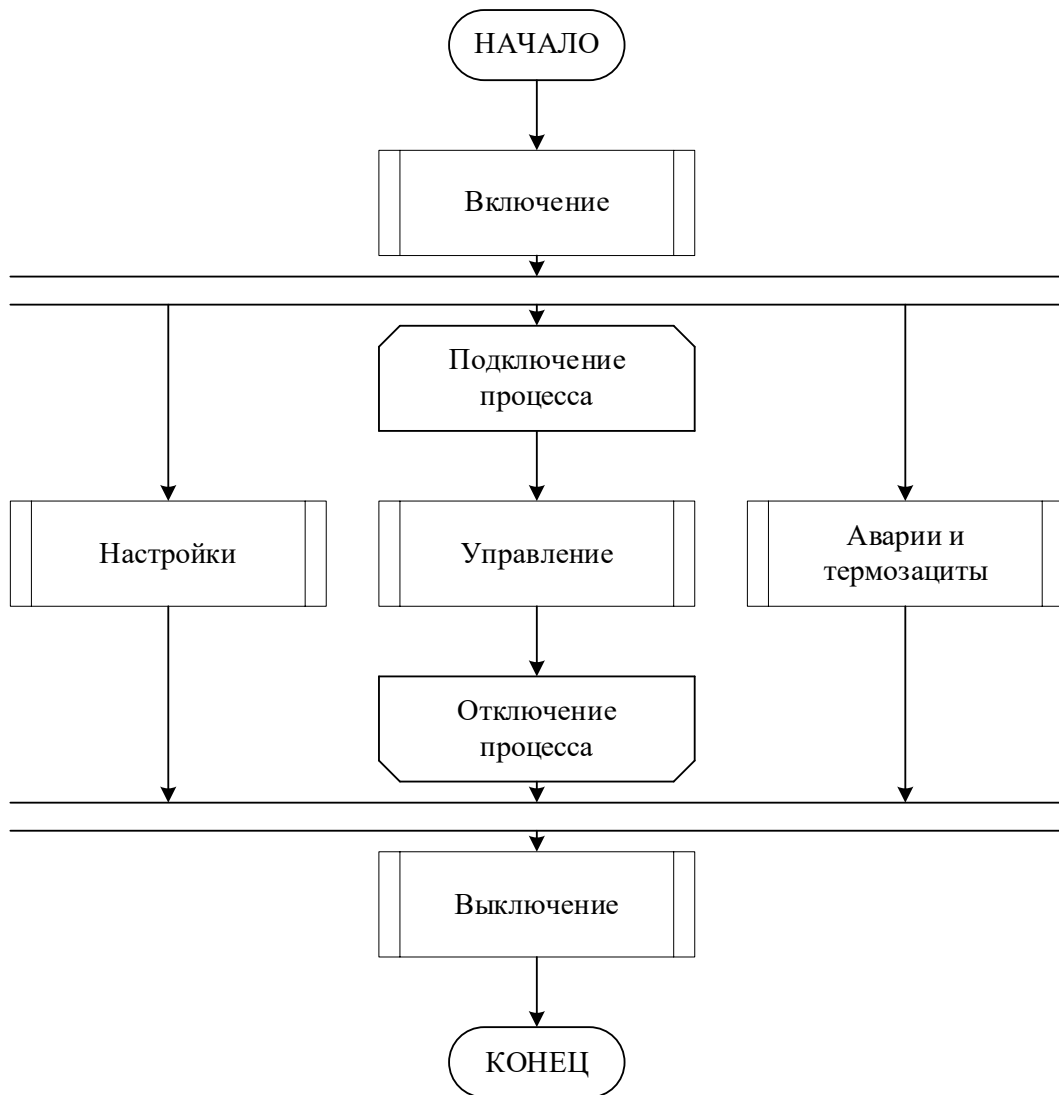


Рисунок 4.10 – Общий алгоритм работы

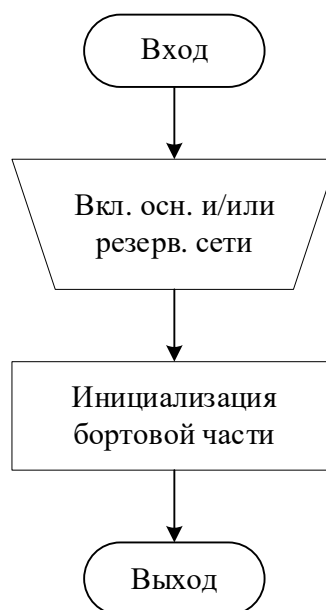


Рисунок 4.11 – Алгоритм «ВКЛЮЧЕНИЕ»

Алгоритм «НАСТРОЙКА» (рисунок 4.12) производит задание параметров работы комплекса. Алгоритм позволяет обеспечить установку, изменение и считывание параметров комплекса как с применением энергонезависимой памяти контроллера верхнего уровня, так и при помощи взаимодействия с интерфейсом работы комплекса.

В функциональные возможности «НАСТРОЙКИ» заложены следующие опции:

- изменение параметров кабельной линии;
 - а) погонное сопротивление;
 - б) погонная индуктивность;
 - в) погонная емкость;
 - г) длина;
- выбор режима перекоммутации питающей сети;
- компенсация электрических потерь кабельной линии.

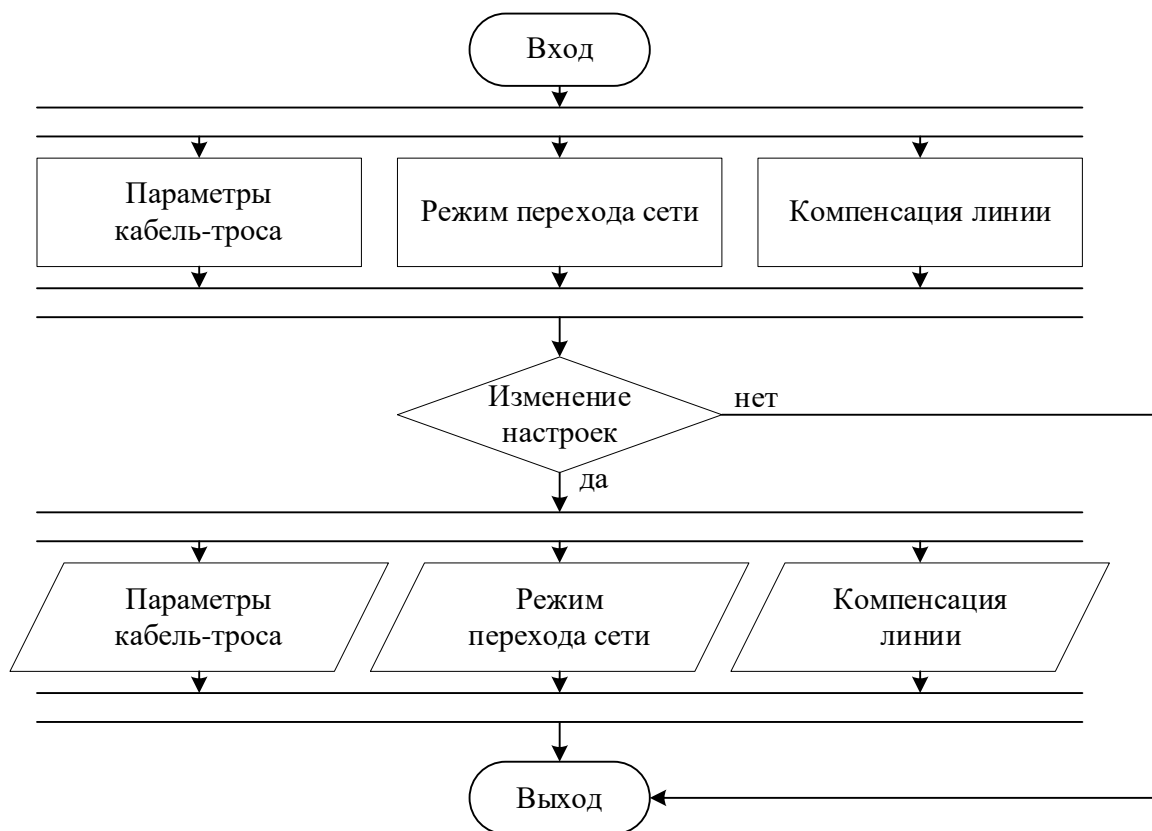


Рисунок 4.12 – Алгоритм «НАСТРОЙКА»

Алгоритм «УПРАВЛЕНИЕ» (рисунок 4.13) обеспечивает корректное функционирование системы в моменты подключения, работы и отключения подводной части системы.

Перед подключением ПН и подачи энергии в подводную часть системы выбирается режим работы и первичная сеть питания. Режим работы позволяет произвести выбор между дистанционным управлением от УДУ или непосредственно через монитор в БП. Выбор первичной сети определяет приоритет основной и резервной питающей сети относительно друг друга.

После определения режима работы и первичной сети происходит набор следующих действий, связанных с подключением шины 500 В к ПН:

- подключение сети к ФРП путем замыкания входного контактора первичной сети;
- предварительный заряд емкости фильтра шины питания 500 В через токоограничивающие резисторы;
- шунтирование токоограничивающих резисторов путем замыкания выходного контактора.

После подключение шины 500 В к ПН в работу вступает цикл «ПЧ». Цикл содержит в себе ряд операций:

- контроль сетевого напряжения;
- перекоммутацию;
- развертку и контроль;
- отключение питающей шины от БП.

Контроль сети отслеживает наличие трех входных фаз напряжений и их амплитуду. При обрыве или понижении входного напряжения сети происходит выбор операции согласно заданной функции в алгоритме «НАСТРОЙКА». При наличии всех фазных напряжений и соответствии их уровням, заданным государственным стандартом, происходит переход к операциям алгоритма «РАЗВЕРТКА И КОНТРОЛЬ».

В случае ручной перекоммутации происходит выход из цикла «ПЧ» и отключение питающей шины от БП.

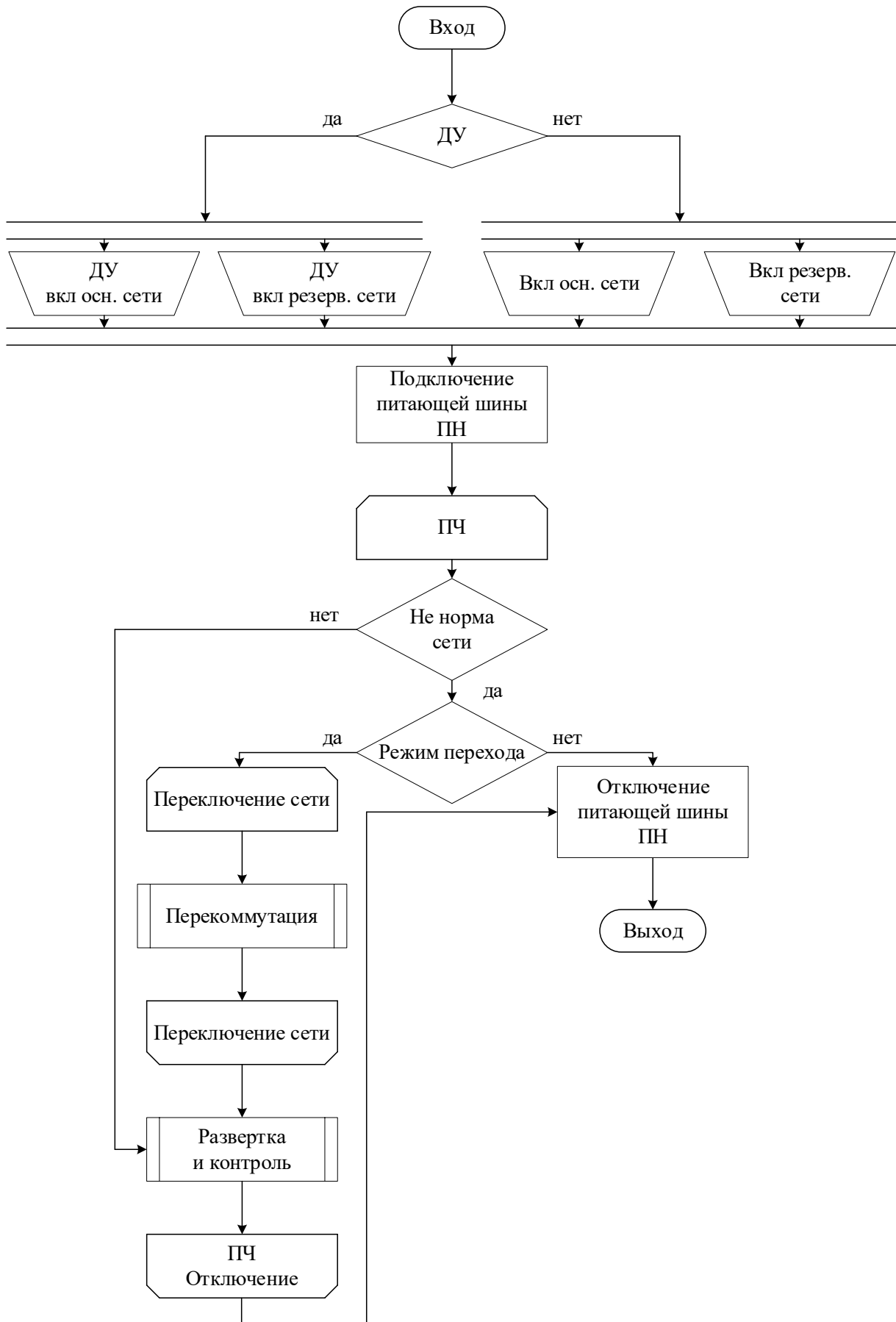


Рисунок 4.13 – Алгоритм «УПРАВЛЕНИЕ»

Алгоритм «ПЕРЕКОММУТАЦИЯ» (рисунок 4.14) реализует функцию переключения СЭС с первичной на вторичную сеть, что позволяет в кратчайшие сроки возобновить питание потребителя энергии в подводной части системы. Алгоритм содержит последовательные операции отключения питающей шины БП и подключение питающей шины БП от второстепенной сети.

Операции по выполнению отключения шины 500 В от ПН описаны ранее в алгоритме «УПРАВЛЕНИЕ».

Процесс подключения второстепенной сети обобщает набор следующих последовательных действий:

- отключение первичной сети от ФРП путем размыкания входного контактора первичной сети;
- подключение вторичной сети к ФРП путем замыкания входного контактора вторичной сети;
- предварительный заряд емкости фильтра шины питания 500 В через токоограничивающие резисторы;
- шунтирование токоограничивающих резисторов путем замыкания выходного контактора.



Рисунок 4.14 – Алгоритм «ПЕРЕКОММУТАЦИЯ»

Результатом данного алгоритма является переключение СЭС с первичной сети на вторичную.

Алгоритм «РАЗВЕРТКА И КОНТРОЛЬ» (рисунок 4.15) выполняет действия, направленные на плавный пуск СЭС при подключении ПЧ и контроль выходных параметров бортовой и подводной частей.

Плавный пуск обеспечивает линейное нарастание выходного напряжения БЧ. Линейное нарастание уставки и выходного напряжения БЧ СЭС исключает перенапряжение в каналах питания потребителей ПЧ, что позволяет корректно произвести включение аппаратуры ПЧ СЭС.

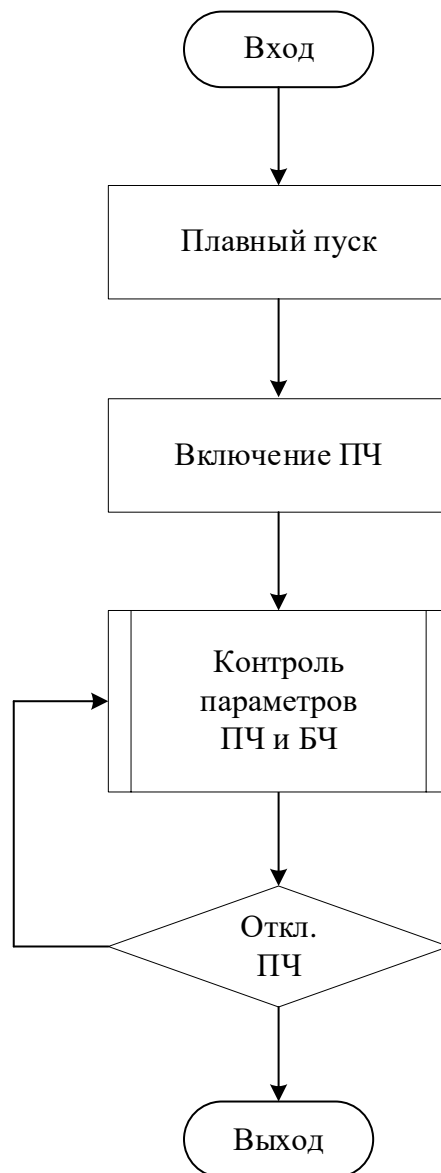


Рисунок 4.15 – Алгоритм «РАЗВЕРТКА И КОНТРОЛЬ»

Алгоритм «КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ БЧ И ПЧ» (рисунок 4.16) производит проверку изоляции в выходных каналах БЧ и ПЧ, считывание информации датчиков напряжения и тока бортовой части, а также датчиков напряжения подводной части СЭС.

При подключении ПЧ СЭС происходит непрерывный опрос тока утечки через сопротивления изоляции силовых трансформаторов и кабельной линии. При снижении сопротивления изоляции ниже 150 кОм происходит отключение ПЧ СЭС и отключение питающей шины блока преобразователя.

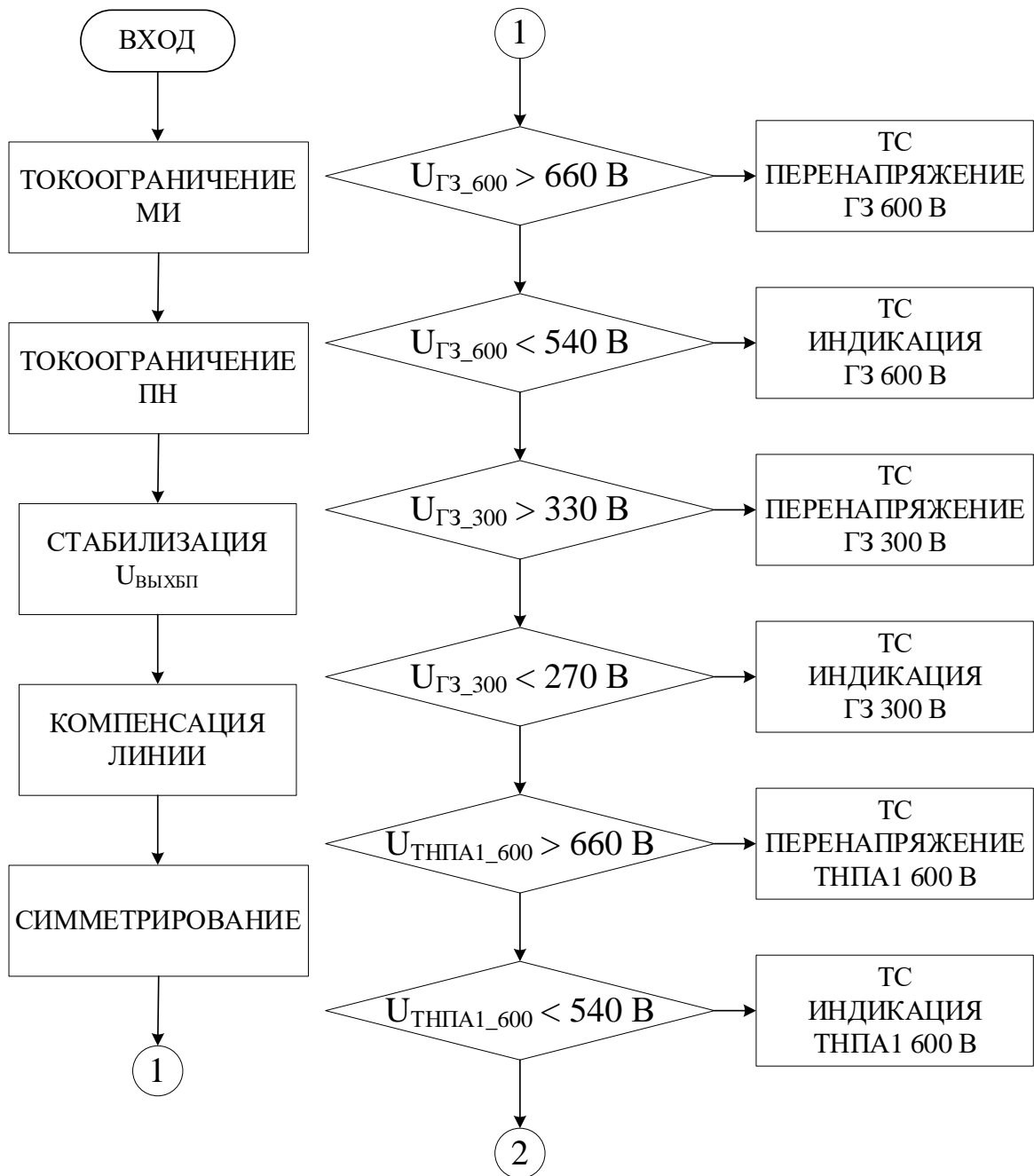


Рисунок 4.16 – Алгоритм «КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ БЧ И ПЧ»

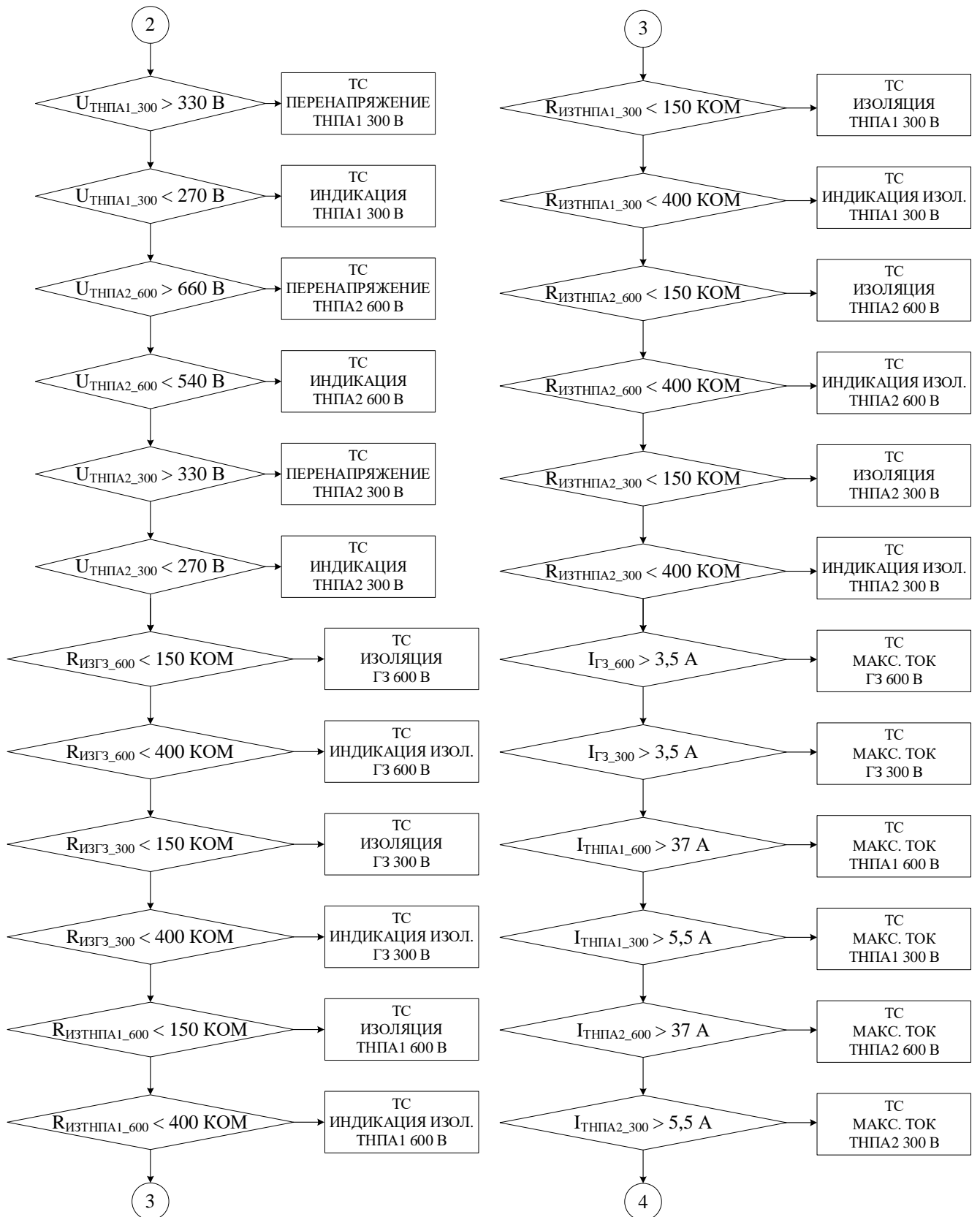


Рисунок 4.17 – Продолжение алгоритма «КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ БЧ И ПЧ»

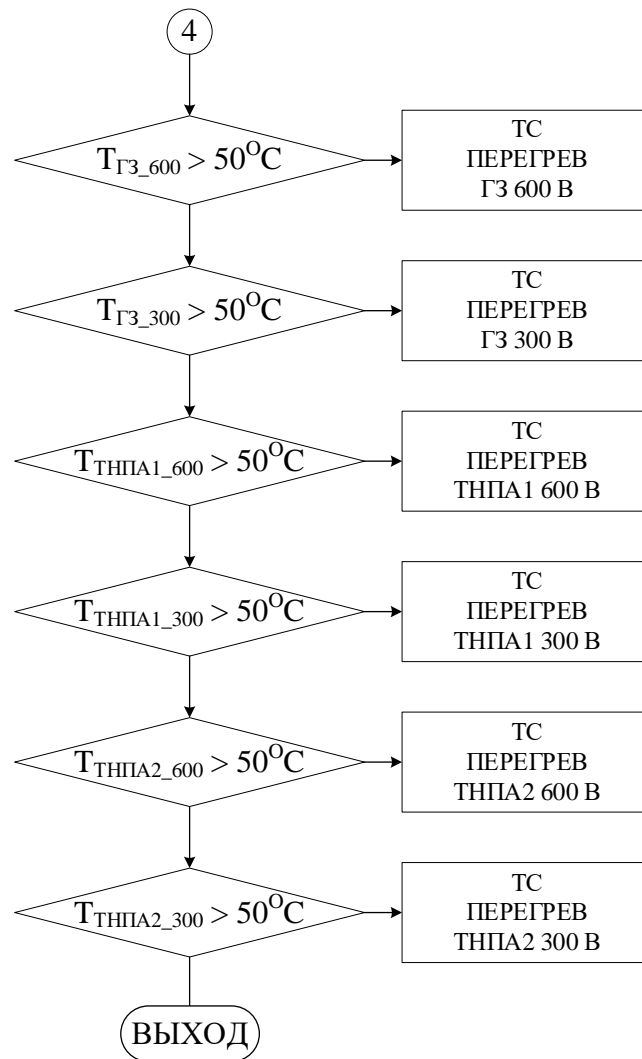


Рисунок 4.18 – Продолжение алгоритма «КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ БЧ И ПЧ»

При считывании информации с датчиков напряжения ПЧ СЭС производится контроль выходных напряжений и сопротивления изоляции каналов питания потребителей ПЧ. При возникновении перенапряжения или снижении сопротивления изоляции ниже 150 кОм происходит отключение ПЧ СЭС и отключение питающей шины блока преобразователя.

Информация датчиков напряжения и тока бортовой части СЭС применяется для стабилизации выходных напряжений бортовой части СЭС. Выходной ток бортовой части позволяет скомпенсировать падение напряжения в кабельной линии, а также определить режимы работы двух трактов формирования выходного напряжения БЧ СЭС. Алгоритм позволяет осуществлять передачу энергии при несимметричной нагрузке силовых жил кабельной линии при стабилизации напряжений ПЧ СЭС.

Алгоритм «АВАРИИ И ТЕРМОЗАЩИТА» (рисунок 4.19) реализует функции термозащиты и контроля аварийных дискрет.

При превышении температуры одного из силовых модулей БЧ СЭС свыше 50 °С производится включение вентиляторов БЧ СЭС. Отключение вентиляторов осуществляется при снижении температуры всех силовых модулей БЧ СЭС ниже 40 °С.

Непрерывный контроль внештатной ситуации, при возникновении которой отключается питающая шина БЧ и блокируется подключение ПЧ СЭС, производится отслеживанием состояния аварийных дискрет.

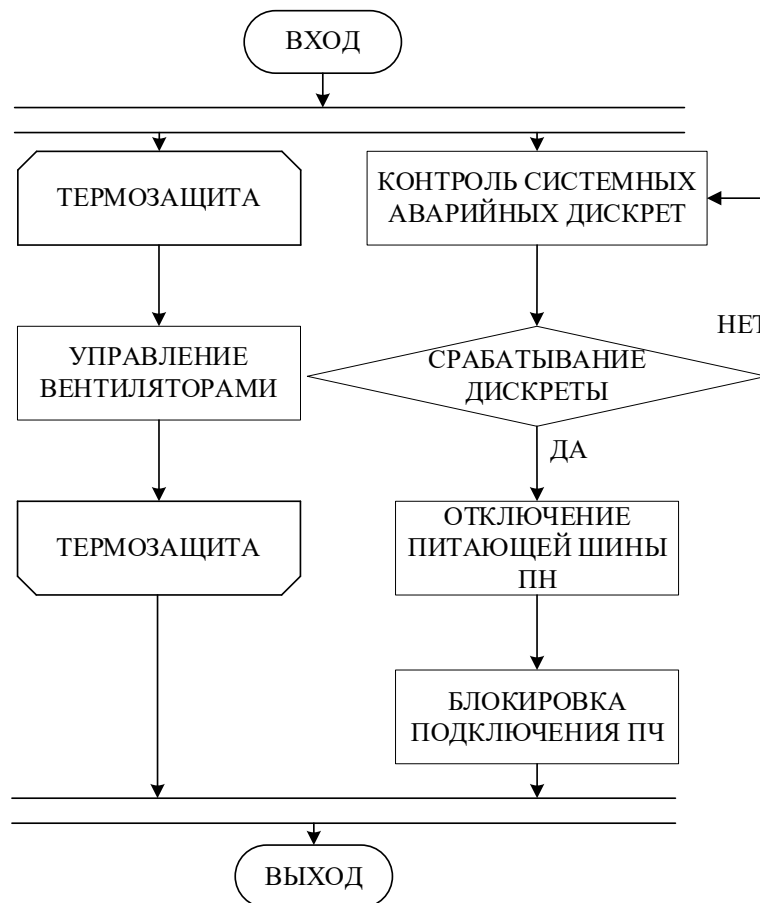


Рисунок 4.19 – Алгоритм «АВАРИИ И ТЕРМОЗАЩИТА»

Алгоритм «ВЫКЛЮЧЕНИЕ» (рисунок 4.20) включает в себя действия оператора по завершению работы ПО верхнего уровня и отключению питания комплекса при помощи выключателя основной и/или резервной сети БЧ СЭС.

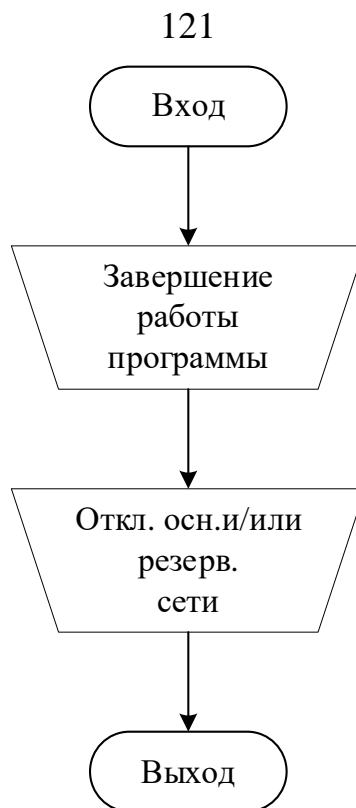


Рисунок 4.20 – Алгоритм «ВЫКЛЮЧЕНИЕ»

4.3 Методика экспериментального исследования системы электроснабжения

В ходе разработки и проектирования СЭС ТНПК неотъемлемой частью экспериментального исследования является макетирование. С данной целью разработан макетный образец СЭС ТНПК, состоящий из бортовой части, кабель-троса и подводной части с полезной нагрузкой ТНПК. БЧ состоит из двух инверторов, плат управления, силовых трансформаторов, неуправляемых выпрямителей и выходных *LC*-фильтров. Макетный образец позволяет получать переходные характеристики выходных напряжений и токов при изменении режима работы полезной нагрузки от значений холостого хода до номинальных [105–110].

Функциональная схема макетного образца СЭС ТНПК с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе для исследования выходных электрических параметров приведена на рисунке 4.21. На рисунке 4.22 представлены фотографии макетного образца.

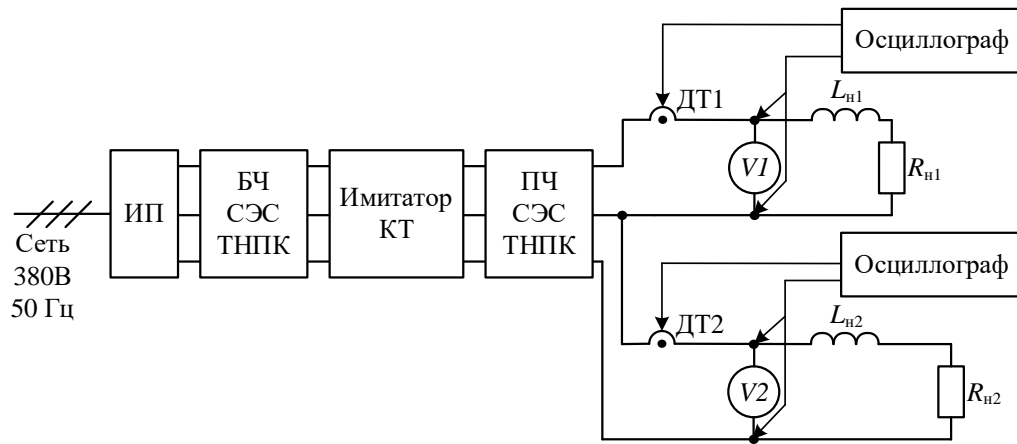


Рисунок 4.21 – Функциональная схема макетного образца СЭС ТНПК

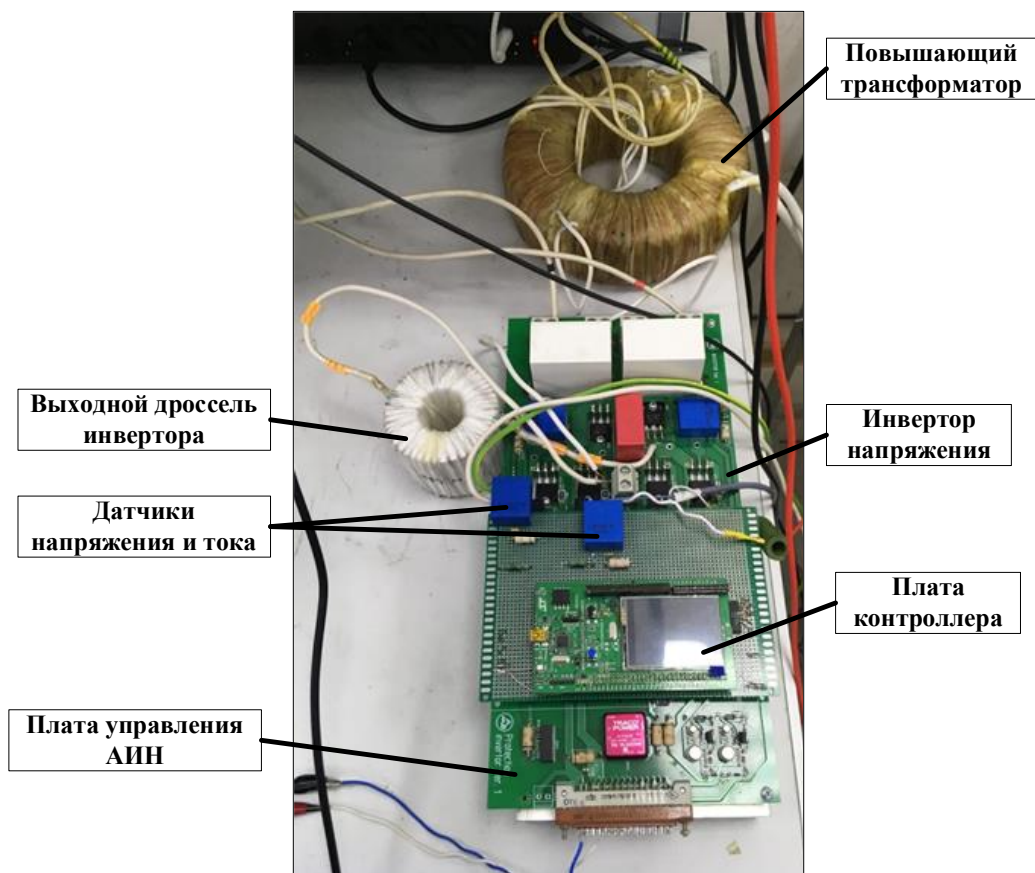


Рисунок 4.22 – Макетный образец преобразователя напряжения БЧ СЭС ТНПК с передачей энергии на постоянном токе

Исследование макетного образца производилось по упрощённой структуре с обеспечением необходимой электробезопасности. Шина питания 600 В подводной части исследовалась при пониженном напряжении и мощности полезной нагрузки.

Проверка корреляции разработанных математических моделей и макетного образца СЭС ТНПК проводилась при следующих параметрах экспериментальной установки:

- выходной фильтр инвертора: индуктивность 482 мкГн; емкость 4,7 мкФ;
- силовой трансформатор: коэффициент трансформации 3,91;
- выходной фильтр ПН: индуктивность 669 мкГн; емкость 1611 мкФ;
- имитатор кабель-троса: индуктивность 396 мкГн; сопротивление 48 Ом;
- ПЧ СЭС ТНПК: емкость 893 мкФ; индуктивность 2,18 мГн.

Ранее уточнялось, что мощность выходных шин питания 600 В составляет более 90 % от номинальной суммарной мощности ПЧ. Влияние выходных шин питания 300 В пренебрежимо мало и не вносит искажений в результаты при исследовании основных потребителей энергии. Таким образом, выходные шины питания 300 В не исследуются.

Макетный образец СЭС ТНПК (см. рисунок 4.21) состоит из автономного инвертора напряжения, выходного фильтра инвертора, повышающего трансформатора, неуправляемого выпрямителя, выходного фильтра выпрямителя, которые входят в состав преобразователя; эквивалентных индуктивности и сопротивления кабель-троса; емкости входного буфера, эквивалентных индуктивности и сопротивления полезной нагрузки ПЧ СЭС ТНПК; осциллографов (марка АКИП-4126/2А-Х) с токовым пробником (марка Tektronix ТСР312А) и усилителем (марка Tektronix ТСПА300); мультиметров (Agilent Technologies HP34401А).

Преобразователь конвертирует низковольтное постоянное входное напряжение в высоковольтное постоянное выходное напряжение БЧ СЭС ТНПК. Полученное напряжение передается через эквивалентные индуктивность и сопротивление кабель-троса в ПЧ СЭС ТНПК. К выходным клеммам ПЧ подключены переменные нагрузки $R_{Н1}$ и $R_{Н2}$, изменение которых приводит к смене режима работы – от режима холостого хода до номинального режима. При помощи осциллографа производится контроль и запись выходных тока и

напряжения экспериментальной установки при запуске, сбросе и набросе полезной нагрузки системы.

Исследование СЭС ТНПК при запуске в режиме холостого хода

К клеммам входного буфера ПЧ СЭС ТНПК подключить универсальные вольтметры HP34401A Agilent Technologies (далее вольтметр), предварительно включить режим измерения напряжения постоянного тока и осциллографы АКИП-4126/2А-Х (далее осциллограф).

Автомат нагрузок R_{H1} и R_{H2} перевести в разомкнутое положение.

Включить и подать питание от источника напряжения на плату управления АИН.

Вводной автомат перевести в верхнее положение.

Включить источник напряжения Lambda. Предварительно выставить выходное напряжение 410 В и выходной ток 10 А.

Далее данную процедуру будем называть «Включить СЭС ТНПК».

Подать напряжение от Lambda на автономный инвертор напряжения, нажав кнопку OUT.

Нажать кнопку «start» на отладочной плате контроллера. Произойдет плавный разворот выходных напряжений ПЧ СЭС ТНПК.

Далее данную процедуру будем называть «Включить ПН».

При помощи вольтметров измерить выходные напряжения, а осциллографами записать временные характеристики выходных напряжений и токов нагрузок СЭС ТНПК при запуске в режиме холостого хода.

Выключить СЭС ТНПК в следующей последовательности:

- снять напряжение с Lambda, нажав кнопку OUT;
- на отладочной плате нажать кнопку «reset».

Выключить источник напряжения Lambda.

Выключить источник напряжения платы управления АИН.

Вводной автомат перевести в нижнее положение.

Исследование СЭС ТНПК при запуске в номинальном режиме

Автомат нагрузок R_{H1} и R_{H2} перевести в замкнутое положение.

Включить СЭС ТНПК.

Включить ПН. При помощи вольтметров измерить выходные напряжения, а осциллографами записать временные характеристики выходных напряжений и токов нагрузок СЭС ТНПК при запуске в номинальном режиме с нагрузкой 43,6 Ом.

Выключить СЭС ТНПК.

Исследование СЭС ТНПК при набросе нагрузки

Автомат нагрузок R_{H1} и R_{H2} перевести в разомкнутое положение.

Включить СЭС ТНПК.

Включить ПН. Перевести автомат нагрузок в замкнутое положение. Осциллографами записать временные характеристики выходных напряжений и токов нагрузок СЭС ТНПК при набросе нагрузки.

Выключить СЭС ТНПК.

Исследование СЭС ТНПК при сбросе нагрузки

Автомат нагрузок R_{H1} и R_{H2} перевести в замкнутое положение.

Включить СЭС ТНПК.

Включить ПН. Перевести автомат нагрузок в разомкнутое положение. Осциллографами записать временные характеристики выходных напряжений и токов нагрузок СЭС ТНПК при сбросе нагрузки от номинального значения 43,6 Ом до холостого хода.

Выключить СЭС ТНПК.

Исследование СЭС ТНПК на жесткость внешней характеристики

Автомат нагрузок R_{H1} и R_{H2} перевести в замкнутое положение.

Включить СЭС ТНПК. Включить ПН. Измерить выходные напряжения на вольтметрах.

Выключить ПН.

Повторить эксперимент, осуществляя последовательное увеличение нагрузки до 56 Ом, 69 Ом, 81 Ом, 93 Ом, 242 Ом, 484 Ом.

Перевести автомат нагрузок в разомкнутое состояние. Измерить значения выходных напряжений нагрузок СЭС ТНПК в режиме холостого хода.

Выключить СЭС ТНПК.

Исследование СЭС ТНПК в режиме несимметричной нагрузки

Установить сопротивления нагрузок $R_{Н1} = 43,6 \text{ Ом}$, $R_{Н2} = 93 \text{ Ом}$.

Автомат нагрузок $R_{Н1}$ и $R_{Н2}$ перевести в замкнутое положение.

Включить СЭС ТНПК.

Включить ПН. Осциллографами записать временные характеристики выходных напряжений и токов несимметричных нагрузок СЭС ТНПК при запуске.

Автомат нагрузок $R_{Н1}$ и $R_{Н2}$ перевести в разомкнутое положение.

На осциллографах записать зависимости выходных напряжений и токов несимметричных нагрузок СЭС ТНПК при сбросе полезной нагрузки.

Автомат нагрузок $R_{Н1}$ и $R_{Н2}$ перевести в замкнутое положение.

Осциллографами записать временные характеристики выходных напряжений и токов несимметричных нагрузок СЭС ТНПК при набросе полезной нагрузки.

Выключить СЭС ТНПК.

4.4 Сопоставление результатов моделирования и экспериментального исследования

По результатам исследований макетного образца СЭС ТНПК получены временные характеристики выходных напряжений $U_H(t)$ и токов $I_H(t)$ нагрузки при запуске в режиме холостого хода, в номинальном режиме, при набросе и сбросе нагрузки, а также внешняя характеристика СЭС ТНПК.

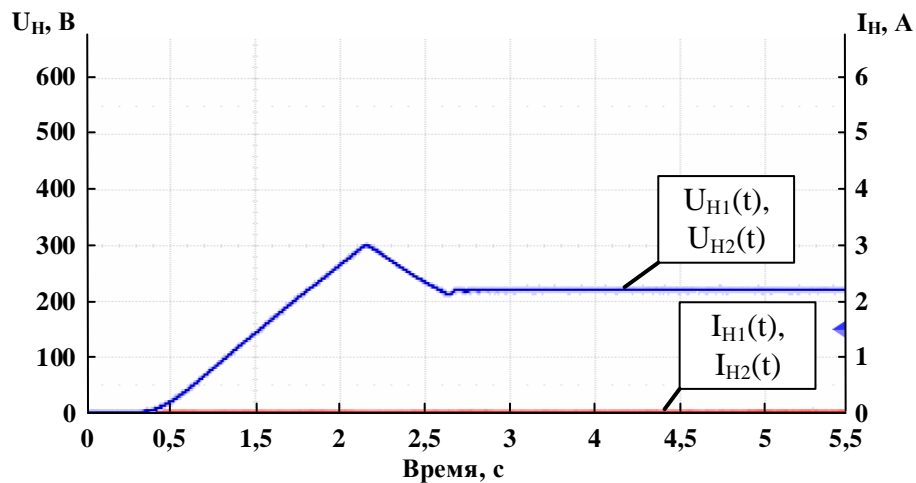
Для проведения сравнительного анализа в среде MatLab произведено дополнительное моделирование с учетом заявленных параметров макетного образца.

Из графиков определялись следующие параметры:

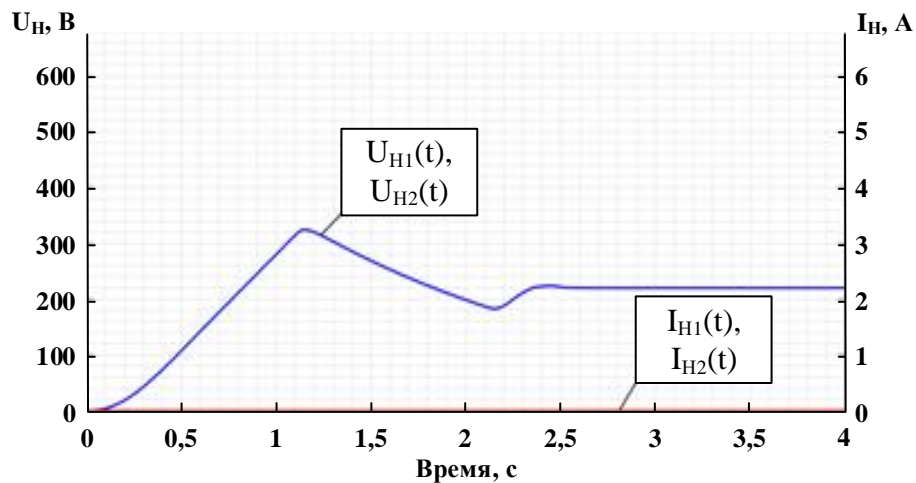
- установившееся выходное напряжение $U_{уст}$;
- максимальное отклонение напряжения от установившегося U_{max} ;
- минимальное отклонение напряжения от установившегося U_{min} ;

- перерегулирование по напряжению σ_U ;
- количество колебаний по напряжению n_U ;
- установившийся ток кабель-троса $I_{уст}$;
- время переходного процесса $t_{пп}$.

На рисунке 4.23 представлены зависимости выходных напряжений и токов полезной нагрузки СЭС ТНПК при пуске в режиме холостого хода, а в таблице 4.2 приведены основные параметры.



а



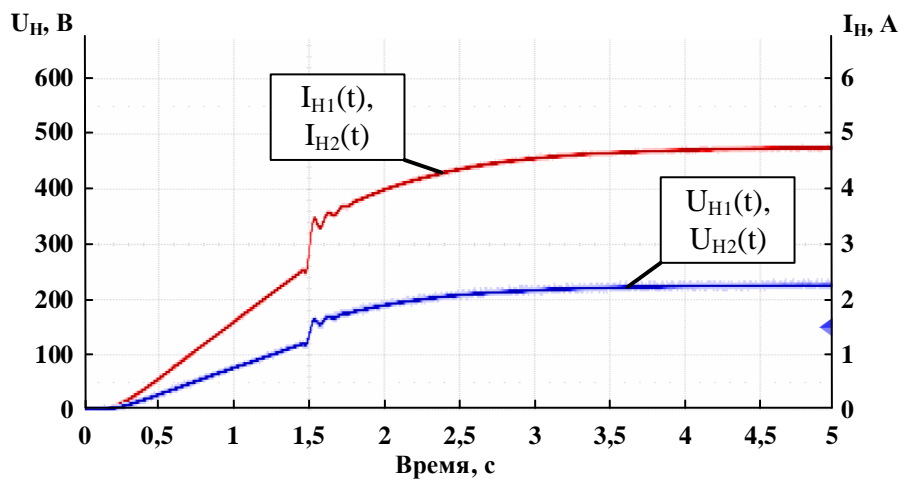
б

Рисунок 4.23 – Зависимости выходных напряжений и токов нагрузки СЭС ТНПК при запуске в режиме холостого хода: *а* – макетный образец; *б* – имитационная модель; синий луч – выходные напряжения нагрузок; красный луч – токи нагрузок

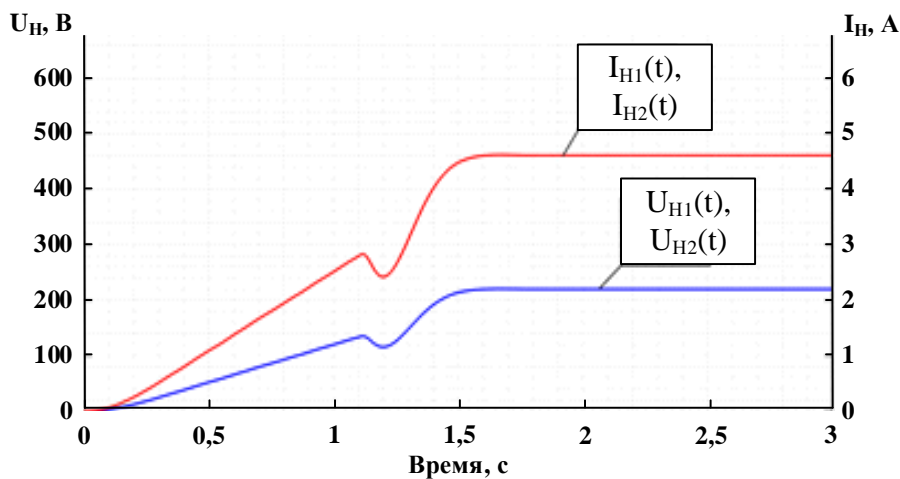
Таблица 4.2 – Параметры выходных напряжений и токов нагрузки СЭС ТНПК при запуске в режиме холостого хода

Параметр	$U_{уст}, В$	$U_{max}, В$	$U_{min}, В$	$\sigma_U, \%$	n_U	$t_{пп}, с$
Модель	220	287	174	30,45	1	2,16
Эксперимент	221	270	210	22,17	1	1,52

На рисунке 4.24 представлены зависимости выходных напряжений и токов полезной нагрузки СЭС ТНПК при пуске в номинальном режиме, а в таблице 4.3 приведены основные параметры.



а



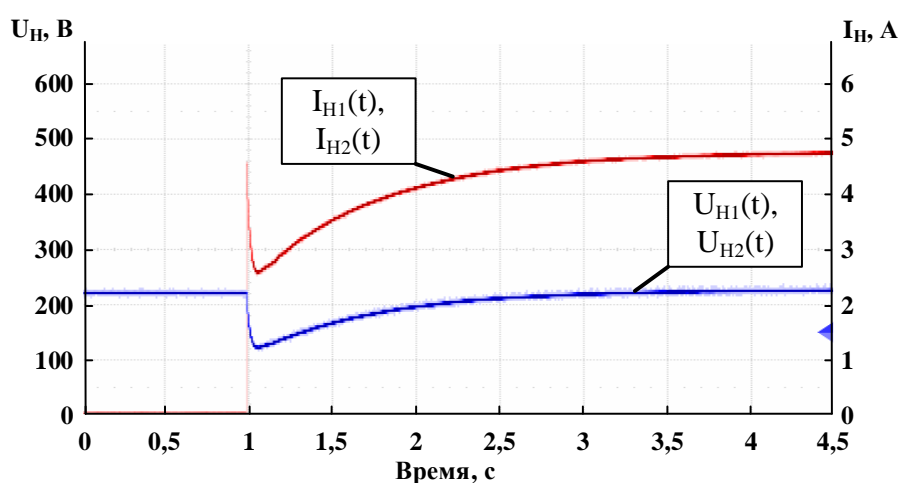
б

Рисунок 4.24 – Зависимости выходных напряжений и токов нагрузки СЭС ТНПК при запуске в номинальном режиме: а – макетный образец; б – имитационная модель; синий луч – выходные напряжения нагрузок; красный луч – токи нагрузок

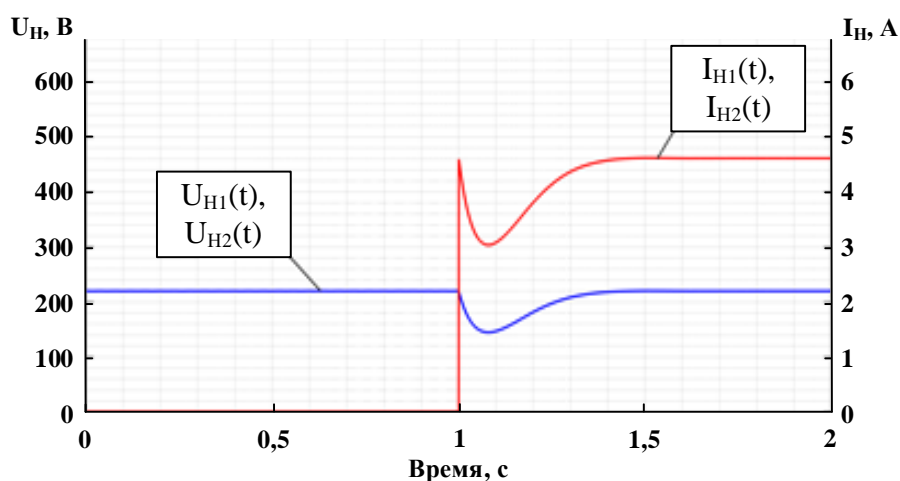
Таблица 4.3 – Параметры выходных напряжений и токов нагрузки СЭС ТНПК при запуске в номинальном режиме

Параметр	$U_{уст}, В$	$U_{max}, В$	$U_{min}, В$	$\sigma U, \%$	n_U	$I_{уст}, А$	$t_{пп}, с$
Модель	220	–	–	–	–	5,07	1,78
Эксперимент	228	–	–	–	–	5,24	2,74

На рисунке 4.25 представлены зависимости выходных напряжений и токов полезной нагрузки СЭС ТНПК при набросе полезной нагрузки от значения холостого хода до номинального, а в таблице 4.4 приведены основные параметры.



а



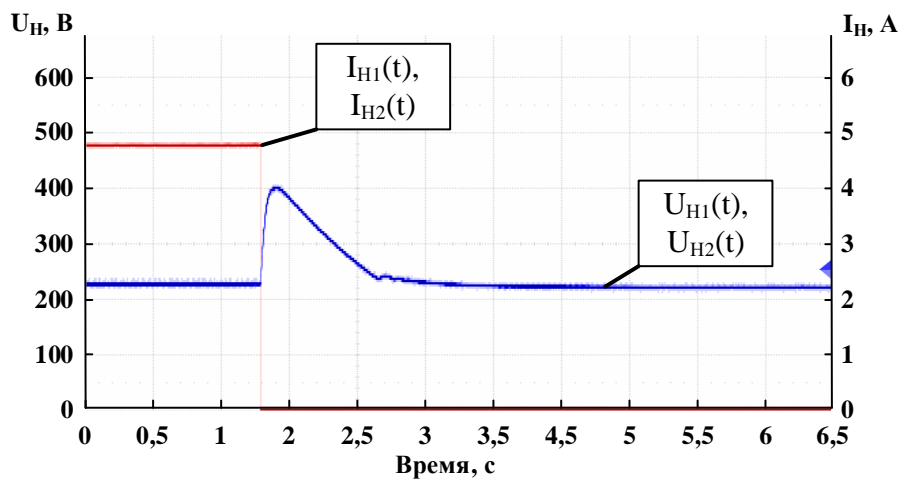
б

Рисунок 4.25 – Зависимости выходных напряжений и токов нагрузки СЭС ТНПК при набросе полезной нагрузки: а – макетный образец; б – имитационная модель; синий луч – выходные напряжения нагрузок; красный луч – токи нагрузок

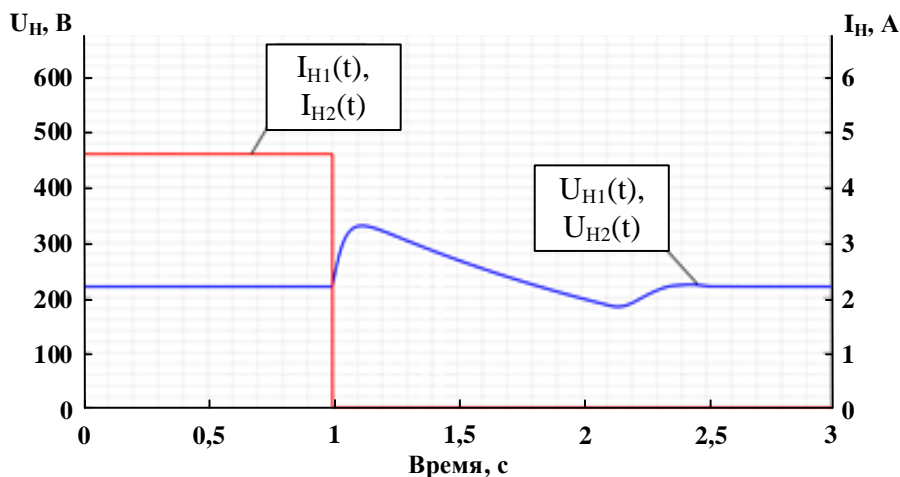
Таблица 4.4 – Параметры выходных напряжений и токов нагрузки СЭС ТНПК при набросе полезной нагрузки

Параметр	$U_{уст}, В$	$U_{max}, В$	$U_{min}, В$	$\sigma U, \%$	n_U	$I_{уст}, А$	$t_{пп}, с$
Модель	220	–	133	39,55	1	5,07	0,32
Эксперимент	228	–	121	46,93	1	5,24	1,47

На рисунке 4.26 представлены зависимости выходных напряжений и токов полезной нагрузки СЭС ТНПК при сбросе нагрузки от номинального значения до значения холостого хода, а в таблице 4.5 приведены основные параметры.



а



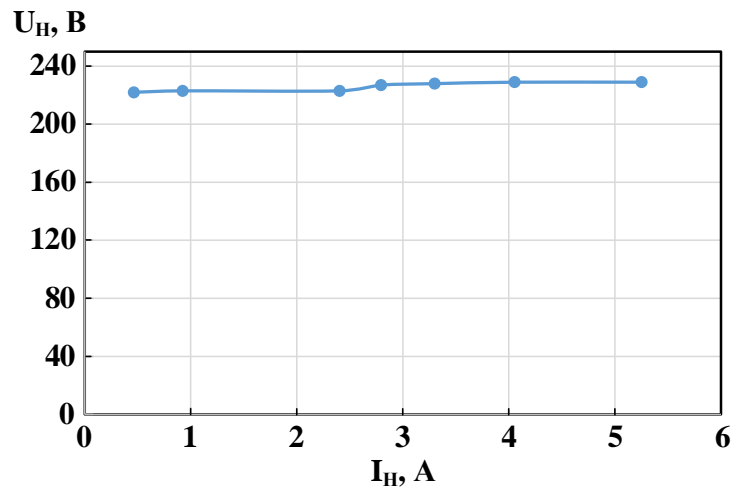
б

Рисунок 4.26 – Зависимости выходных напряжений и токов нагрузки при сбросе полезной нагрузки: а – макетный образец; б – имитационная модель; синий луч – выходные напряжения нагрузок; красный луч – токи нагрузок

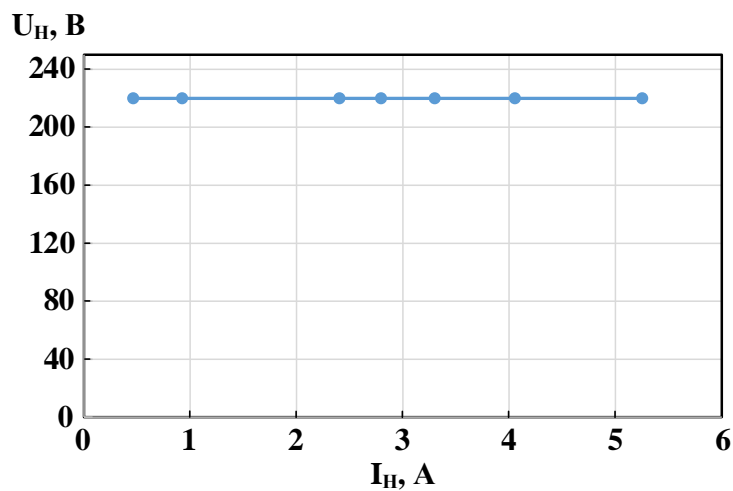
Таблица 4.5 – Параметры выходных напряжений и токов нагрузки СЭС ТНПК при сбросе полезной нагрузки

Параметр	$U_{уст}, В$	$U_{max}, В$	$U_{min}, В$	$\sigma_U, \%$	n_U	$I_{уст}, мА$	$t_{пп}, с$
Модель	220	359	175	63,18	1	464	1,14
Эксперимент	222	399	–	81,08	1	480	1,06

На рисунке 4.27 представлена зависимость выходного напряжения нагрузки от тока нагрузки макетного образца СЭС ТНПК и имитационной модели. Форма характеристик позволяет заключить, что СЭС ТНПК обеспечивает заданную точность выходного напряжения во всех режимах работы и не превышает значения 4,09 %.



а

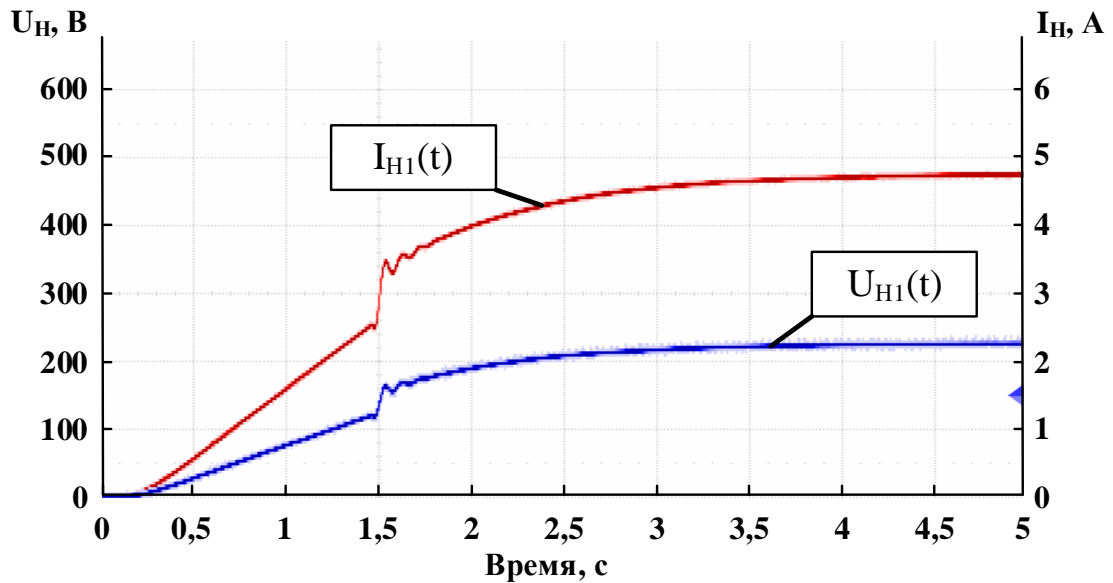


б

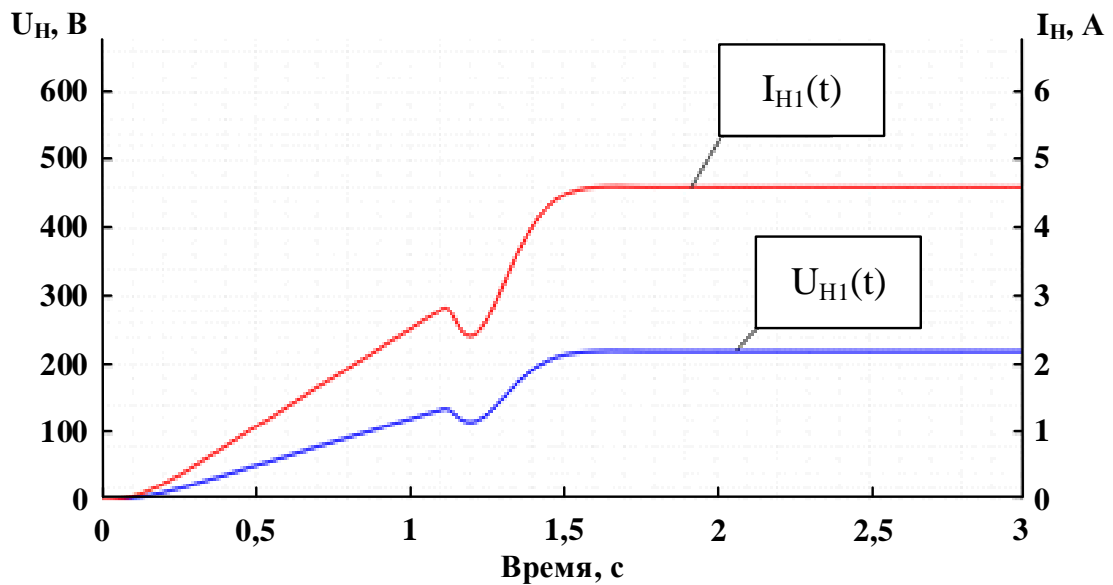
Рисунок 4.27 – Зависимости выходного напряжения ПЧ от тока нагрузки:

а – макетный образец; б – имитационная модель

На рисунках 4.28, 4.29 представлены зависимости выходных напряжений и токов полезной нагрузки СЭС ТНПК при запуске с несимметричной нагрузкой, а в таблице 4.6 приведены основные параметры.



а



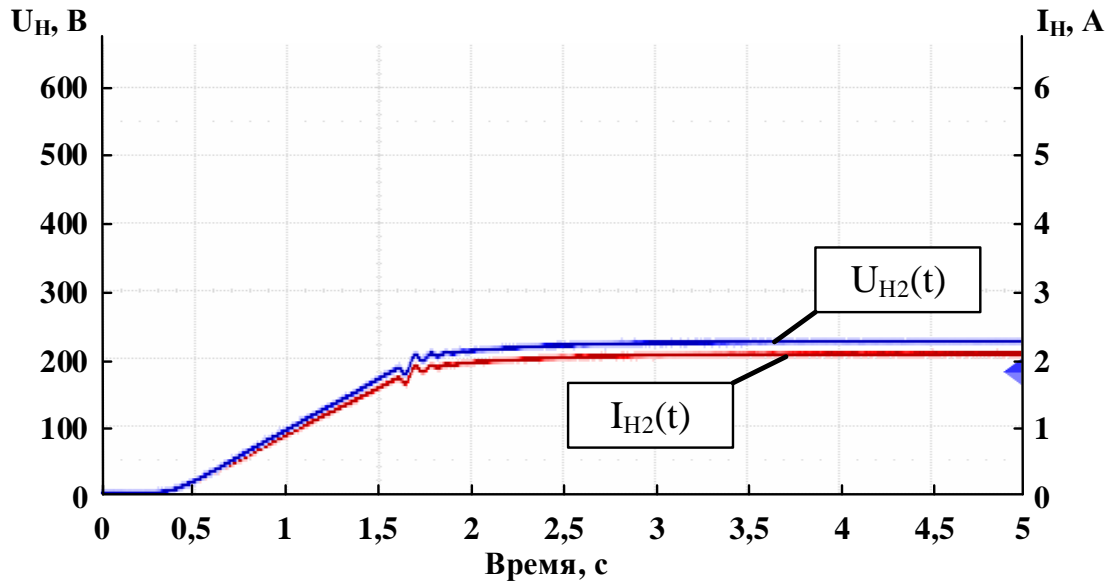
б

Рисунок 4.28 – Зависимости выходного напряжения и тока нагрузки первого канала при запуске с несимметричной нагрузкой:

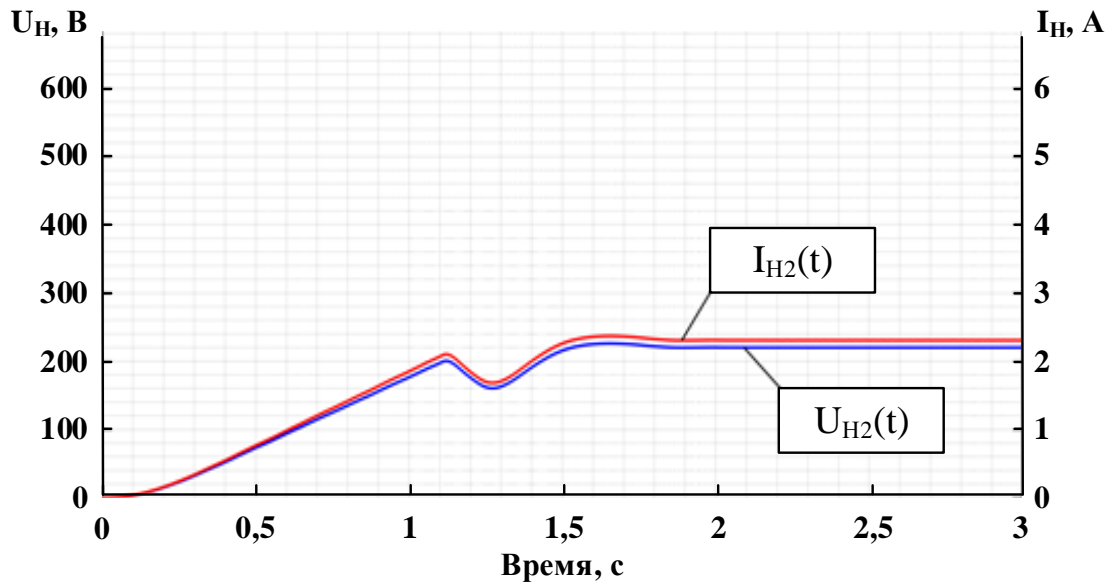
а, – макетный образец; б, г – имитационная модель;

синий луч – выходное напряжение нагрузки;

красный луч – ток нагрузки



а



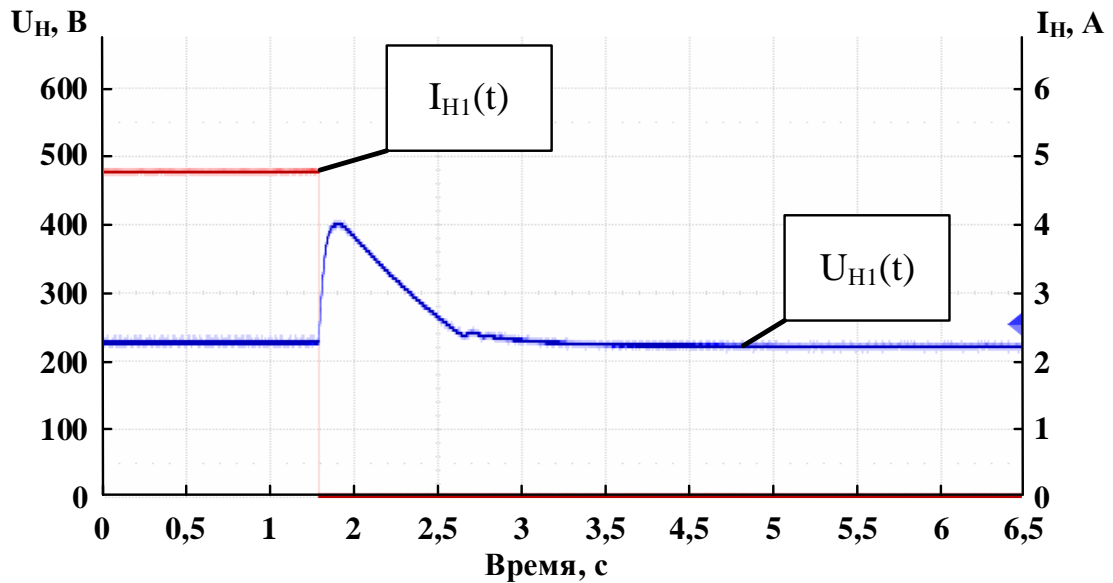
б

Рисунок 4.29 – Зависимости выходного напряжения и тока нагрузки второго канала при запуске с несимметричной нагрузкой:
 а, – макетный образец; б, г – имитационная модель;
 синий луч – выходное напряжение нагрузки; красный луч – ток нагрузки

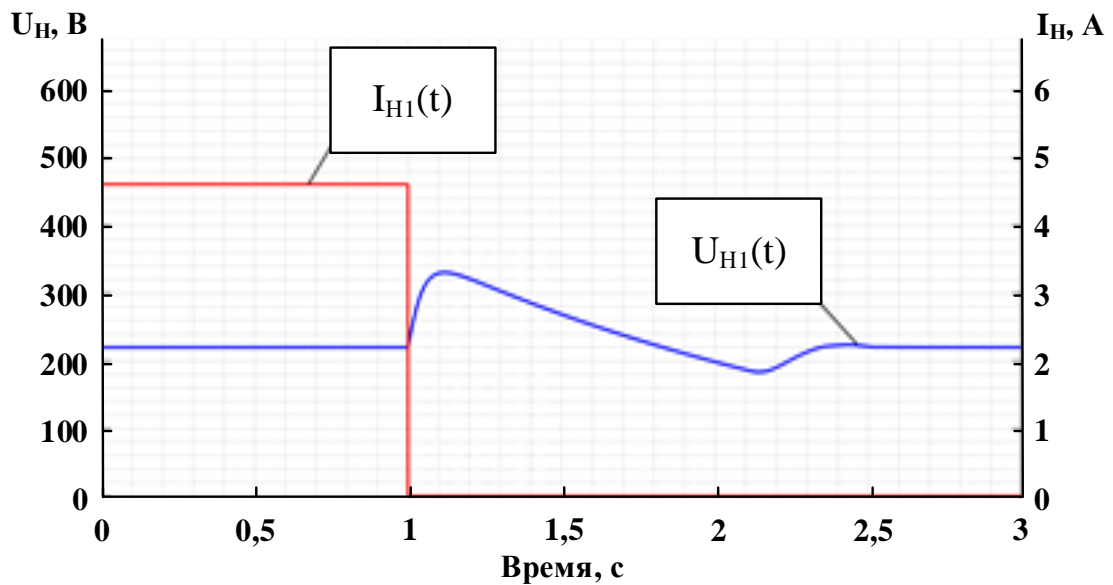
Таблица 4.6 – Параметры выходных напряжений и токов нагрузки СЭС ТНПК при запуске с несимметричной нагрузкой

Параметр	$U_{уст}, В$	$U_{max}, В$	$U_{min}, В$	$\sigma_U, \%$	n_U	$I_{уст}, МА$	$t_{пп}, с$
Модель	220	359	175	63,18	1	464	1,14
Эксперимент	222	399	–	81,08	1	480	1,06

На рисунке 4.30, 4.31 представлены зависимости выходных напряжений и токов полезной нагрузки СЭС ТНПК с несимметричной нагрузкой при сбросе полезной нагрузки, а в таблице 4.7 приведены основные параметры.

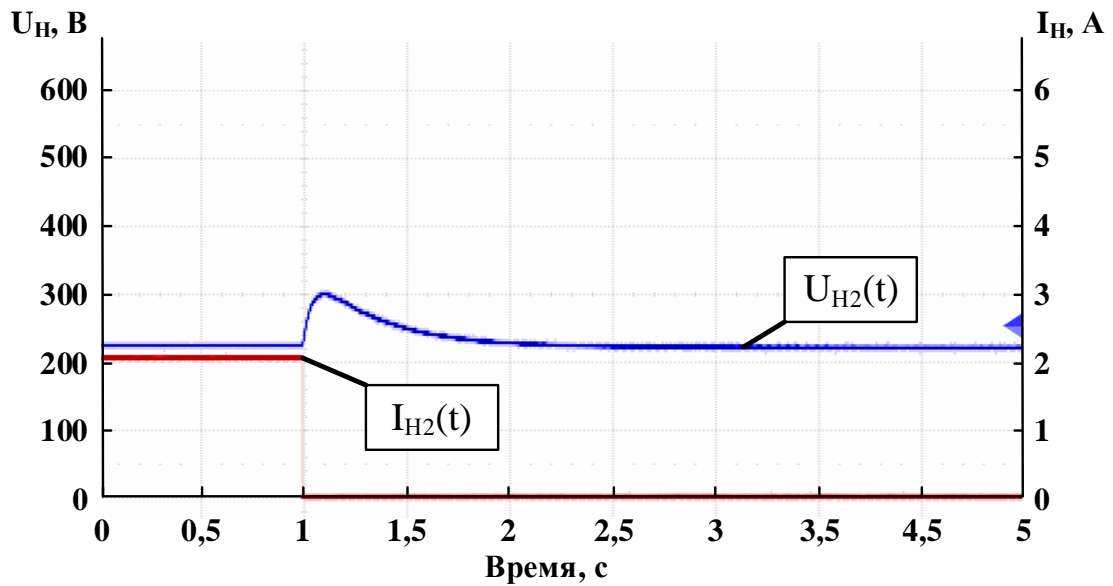


а

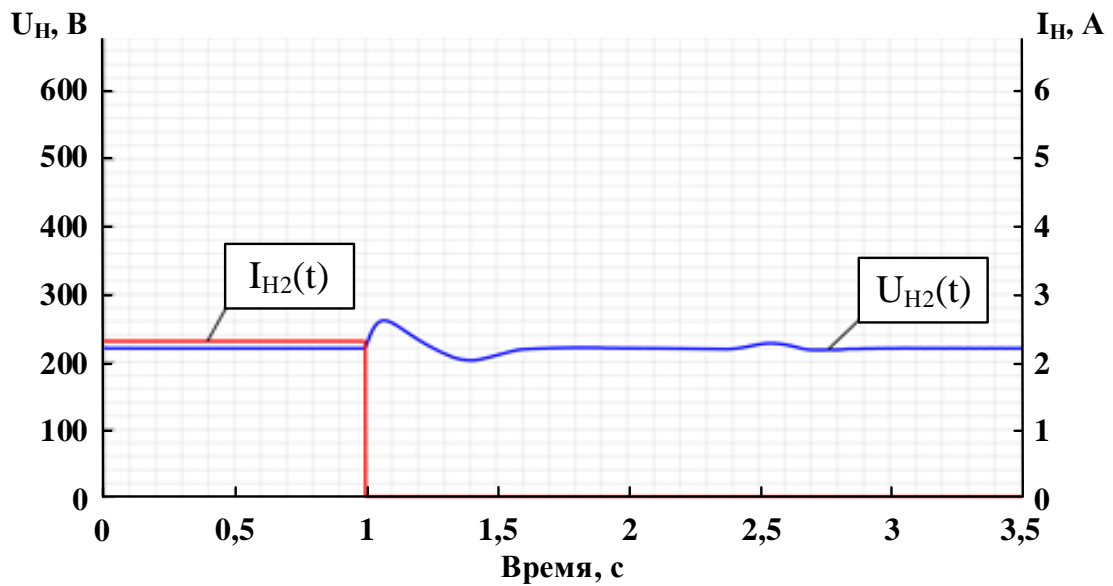


б

Рисунок 4.30 – Зависимости выходного напряжения и тока нагрузки первого канала при сбросе несимметричной полезной нагрузки:
а, б – макетный образец; в, г – имитационная модель;
синий луч – выходное напряжение нагрузки;
красный луч – ток нагрузки



а



б

Рисунок 4.31– Зависимости выходного напряжения и тока нагрузки второго канала при сбросе несимметричной полезной нагрузки:

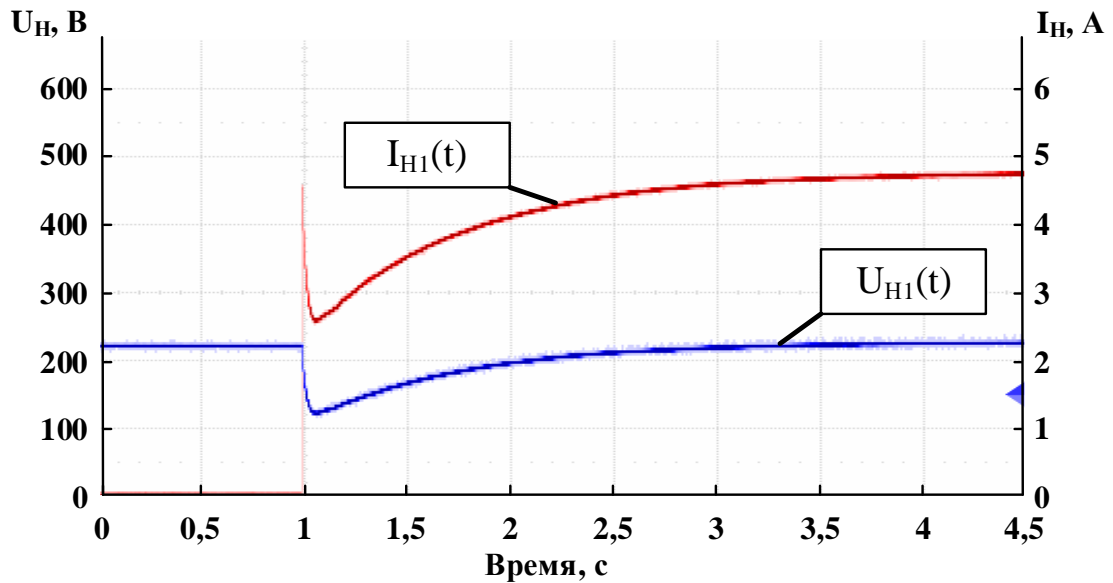
а, б – макетный образец; в, г – имитационная модель;

синий луч – выходное напряжение нагрузки; красный луч – ток нагрузки

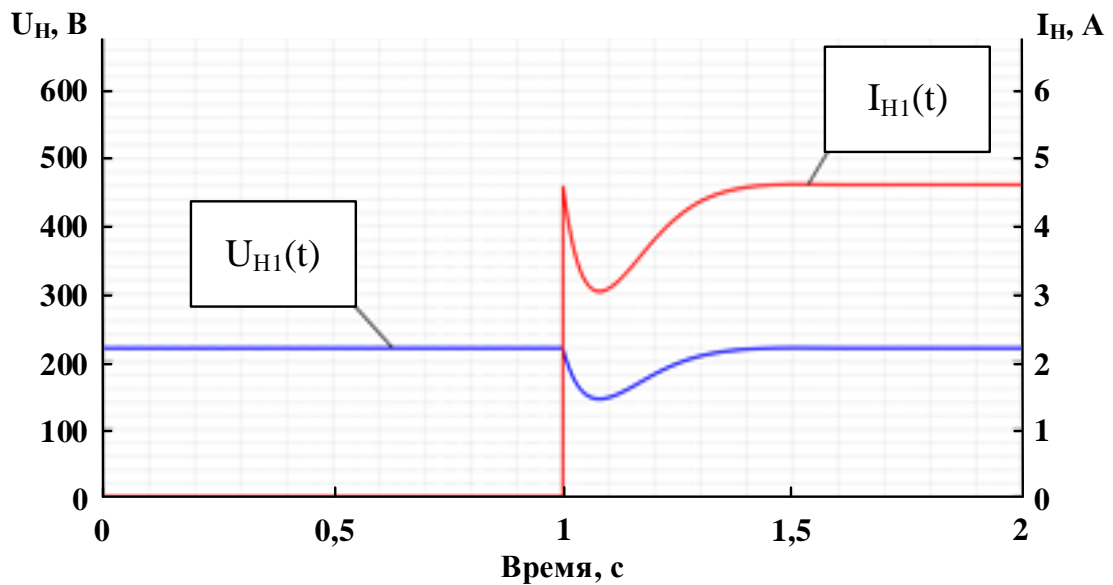
Таблица 4.7 – Параметры выходных напряжений и токов нагрузки СЭС при сбросе несимметричной полезной нагрузки

Параметр	$U_{уст}, В$	$U_{H1max}, В$	$U_{H2max}, В$	$\sigma_{H1}, \%$	$\sigma_{H1}, \%$	n_{H1}	n_{H2}	$t_{H1пп}, мс$	$t_{H2пп}, мс$
Модель	220	356	262	61,8	19,1	1	1	571	483
Эксперимент	222	121	165	46,93	25	1	1	736	641

На рисунке 4.32, 4.33 представлены зависимости выходных напряжений и токов полезной нагрузки СЭС ТНПК с несимметричной нагрузкой при набросе полезной нагрузки, а в таблице 4.8 приведены основные параметры.



а



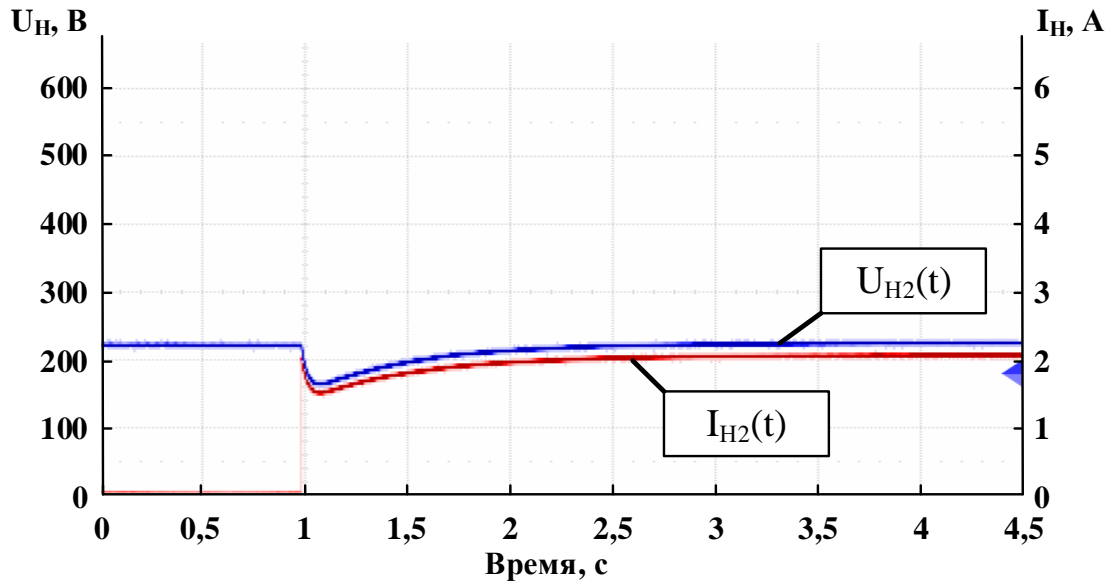
б

Рисунок 4.32 – Зависимости выходного напряжения и тока нагрузки первого канала при набросе несимметричной полезной нагрузки:

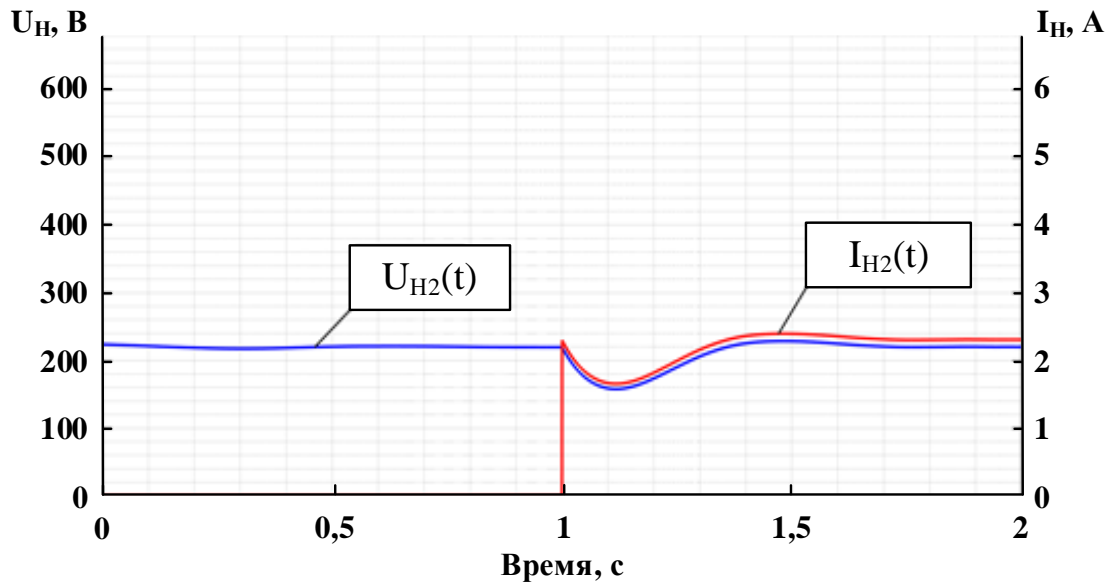
а, б – макетный образец; в, г – имитационная модель

синий луч – выходное напряжение нагрузки;

красный луч – ток нагрузки



а



б

Рисунок 4.33 – Зависимости выходного напряжения и тока нагрузки второго канала при набросе несимметричной полезной нагрузки:

а, б – макетный образец; в, г – имитационная модель

синий луч – выходное напряжение нагрузки; красный луч – ток нагрузки

Таблица 4.8 – Параметры выходных напряжений и токов нагрузки СЭС ТНПК при набросе несимметричной полезной нагрузки

Параметр	$U_{уст}$, В	U_{H1min} , В	U_{H2min} , В	σ_{H1} , %	σ_{H2} , %	n_{H1}	n_{H2}	$t_{H1пп}$, мс	$t_{H2пп}$, мс
Модель	220	138	183	37,2	16,8	1	1	296	146
Эксперимент	222	121	165	46,93	25	1	1	983	525

Выводы по главе 4

Алгоритмы работы СЭС ТНПК обеспечивают скоординированную работу всех блоков и устройств системы.

Разработан макетный образец СЭС ТНПК и методика его исследования, позволяющие провести основные режимы работы системы, такие как запуск на холостом ходе и в номинальном режиме, сброс и наброс нагрузки.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают адекватность имитационного моделирования замкнутого макетного образца СЭС ТНПК и доказали его практическую применимость. Значения выходного напряжения при различных режимах работы в случае экспериментального исследования соответствуют имитационному моделированию с погрешностью 1 %. Значения выходного напряжения в переходных процессах экспериментального исследования отличаются от имитационного моделирования в среднем не более чем на 8 %. Исключением являются переходные процессы при сбросе полезной нагрузки. Погрешность выходного напряжения в переходных процессах составляет 18 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработаны принципы и подходы к проектированию и технической реализации системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе. Выполненные научные исследования представлены следующими новыми научными результатами:

1. Предложенная структура СЭС ТНПК с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе, которая позволяет обеспечить требуемое качество напряжения на выходных фидерах системы при удельной характеристике ПЧ от 2,5 кВт/кг с учетом устройства защиты от импульсного перенапряжения.

2. Математические модели СЭС ТНПК, которые предоставляют возможность исследовать статические и динамические процессы в системе при передаче энергии на постоянном токе с погрешностью не более 6%.

3. Система управления обеспечивает работу СЭС с заданной точностью, при пуске на холостом ходе и в номинальной режиме, сбросе и набросе нагрузки, а также при несимметрии.

4. Регулятор на основе перестраиваемых коэффициентов с методом антинасыщения интегральной составляющей, обеспечивающий стабилизацию выходного напряжения ПЧ с максимальным отклонением не более 20% от номинального значения в режимах работы ТНПК.

5. Макетный образец СЭС ТНПК и методика его исследования, позволяющие провести исследования всех режимов работы системы.

6. Экспериментальные исследования на макетном образце СЭС ТНПК подтвердили корректность заявленных допущений в ходе моделирования. Максимальная погрешность экспериментального исследования относительно математического моделирования составила не более 18%.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АИН	– автономный инвертор напряжения
АЦП	– аналого-цифровой преобразователь
БВ	– блок вентиляторов
БК	– блок коммутации
БП	– блок питания
БЧ	– бортовая часть
ГЗ	– гараж-заглубитель
ДН	– датчик напряжения
ДТ	– датчик тока
ДУ	– дистанционное управление
ИВЭП	– источник вторичного электропитания
ИП	– источник питания
К	– коммутатор
К _м	– коэффициент модуляции
КПД	– коэффициент полезного действия
КТ	– кабель-трос
МИ	– модуль инвертора
Н	– нагрузка
НПА	– необитаемый подводный аппарат
ОУ	– объект управления
П	– пропорциональный
ПДУ	– пульт дистанционного управления
ПИ	– пропорционально-интегральный
ПН	– преобразователь напряжения
ПФ	– передаточная функция
ПЧ	– подводная часть
ПЭВМ	– персональная электронно-вычислительная машина
РЭА	– радиоэлектронная аппаратура

СУ	– система управления
СЧ	– судовая часть
СЭС	– система электроснабжения
ТНПА	– телеуправляемый необитаемый подводный аппарат
ТНПК	– телеуправляемый необитаемый подводный комплекс
Тр	– трансформатор
УВ	– управляемый выпрямитель
УВХ	– устройство выборки и хранения
УЗиС	– устройство защиты и сопряжения
УЗПС	– устройство защит, питания и сопряжения
УИНТС	– устройство измерения напряжения, тока и сопротивления
УКИ	– устройство контроля изоляции
УКИ ВВН	– устройство контроля изоляции высоковольтного выхода
УМ	– усилитель мощности
УП	– устройство питания
УС	– устройство сопряжения
УУ	– устройство управления
УУК	– устройство управления контакторами
ЦАП	– цифроаналоговый преобразователь
ШИМ	– широтно-импульсная модуляция
ЭДС	– электродвижущая сила

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации [Электронный ресурс]. – URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449> (дата обращения: 04.04.2022).
2. Ястребов, В.С. Телеуправляемые подводные аппараты. – Л.: Судостроение, 1985. – 232 с.
3. Ястребова, Л. Система и элементы глубоководной техники и подводных исследований. Л. – Л.: Судостроение, 1986. – 172 с.
4. Molland, Anthony F. The Maritime Engineering Reference Book / Anthony F. Molland. – L.: Elsevier Ltd, 2008. – 907 s.
5. Подводные аппараты для геологических исследований / под ред. А.М. Игнатова. – Геленджик: ПО «Южморгеология», 1990. – 92 с.
6. Заслонов, В.В. Развитие глубоководной роботизированной техники. История вопроса / В.В. Заслонов, Н.А. Кравченко // Молодой ученый. – 2016. – № 7. – С. 85–88.
7. Бочаров, Л. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития [Электронный ресурс] / Л. Бочаров // Электроника: наука, технология, бизнес. – М., 2009. – С. 88–93. – URL: https://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_311_772.pdf (дата обращения: 04.04.2022).
8. Войтов, Д.В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты + CD / Д.В. Войтов. – М.: Моркнига, 2012. – 506 с.
9. Агеев, М.Д. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
10. Тетис Про – водолазное снаряжение и подводное оборудование [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.tetis-pro.ru/> (дата обращения: 04.04.2022).
11. Росгеология / Южморгеология [Электронный ресурс]. – URL: <http://ymg.rosgeo.com/ru> (дата обращения: 04.04.2022).

12. АО «Научно-производственное предприятие подводных технологий «ОКЕАНОС» [Электронный ресурс]. – URL: <http://oceanos.ru/> (дата обращения: 04.04.2022).
13. Российские технологии ROV [Электронный ресурс]. – URL: <http://subboat.com/> (дата обращения: 04.04.2022).
14. Inspectionclass remotely operated vehicles – a review / R. Capocci, G. Dooly, E. Omerdic' [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. – 2017. – Vol. 5 (1), N 13. – P. 1–32.
15. Forum Energy Technologies [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.f-e-t.com/> (дата обращения: 04.04.2022).
16. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.jamstec.go.jp/e/> (дата обращения: 04.04.2022).
17. Fugro [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fugro.com> (дата обращения: 04.04.2022).
18. Planys Technologies [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.planystech.com> (дата обращения: 04.04.2022).
19. ROVCO [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rovco.com> (дата обращения: 04.04.2022).
20. Saab Seaeye: Electric Underwater Robotics (ROVs) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.saabseaeye.com> (дата обращения: 04.04.2022).
21. Total Marine Technology – People, Technology & Unique Remote Systems [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tmtrov.com.au> (дата обращения: 04.04.2022).
22. Каталог подводных роботов // RoboTrends [Электронный ресурс]. – URL: <http://robotrends.ru/robopedia/katalog-podvodnyh-robotov> (дата обращения: 04.04.2022).
23. Christ, Robert D. The ROV Manual: A User Guide for Observation-Class Remotely Operated Vehicles / Robert D. Christ and Robert L. Wernli. – L.: Elsevier Ltd, 2007. – 327 s.

24. Greening, J. Robotic Propulsion Technology // Subsea UK Underwater Robotics Conference. 2020. P. 1–12.
25. Филаретов, В.Ф. Устройства и системы управления подводных роботов / В.Ф. Филаретов, А.В. Лебедев, Д.А. Юхимец. – М.: Наука, 2005. – 270 с.
26. Занин, В.Ю. Использование телеуправляемых подводных аппаратов со специализированных и неспециализированных плавсредств [Электронный ресурс] / В.Ю. Занин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3(104). – С. 179–186. – URL: https://oceanos.ru/s1/files/File/2010_UFU_VZ.pdf (дата обращения: 04.04.2022).
27. ГОСТ Р 56960-2016. Аппараты необитаемые подводные. Классификация [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/62069/> (дата обращения: 04.04.2022).
28. Гейтенко, Е.Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет: учеб. пособие / Е.Н. Гейтенко. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 448 с.
29. Классификация блоков вторичного электропитания // Источник [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.blokpit.ru/> (дата обращения: 04.04.2022).
30. ГОСТ РВ 2090-006-2008. Устройства и изделия электротехнические корабельные. Общие технические [Электронный ресурс]. – URL: <http://search.rsl.ru/ru/record/01004571229> (дата обращения: 04.04.2022).
31. Бриллиантов, А.Н. Разработка и исследование основ построения энергетических систем подводных аппаратов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Бриллиантов Александр Николаевич. – М., 2005. – 48 с.
32. Taking power distribution under the sea: Design, manufacture, and assembly of a Subsea electrical distribution system / T. Hazel, H.H. Vaerd, J.J. Legeay [et al.] // IEEE Industry Applications Magazine. – 2013. – Vol. 19(5), N 6553138. – P. 58–67.
33. Wrinch, M.C. An analysis of subsea electric power transmission techniques from dc to ac 50/60 hz and beyond / M.C. Wrinch, M.A. Tomim, J. Marti // OCEANS. – 2017. – 6 p. – doi:10.1109/oceans.2007.4449349.
34. Шматков А.А. Разработка модульной системы электропитания и движительного комплекса ТНПА тяжелого рабочего класса на постоянном токе /

А.А. Шматков, П.В. Крутиков, А.Г. Шматков, Р.В. Олешко // Подводные исследования и робототехника. – 2021. – № 4(38). – С. 15–25. – doi: 10.37102/1992-4429_2021_38_04_02.

35. Рулевский, В.М. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов [Электронный ресурс] / В.М. Рулевский, Ю.Н. Дементьев, О.В. Бубнов. – Томск: Известия ТПУ, 2004. – 4 с. – URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/418/1/bulletin_tpu-2004-307-5-27.pdf (дата обращения: 04.04.2022).

36. Мишин, В.Н. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов переменного тока мощностью свыше 10 кВт [Электронный ресурс] / В.Н. Мишин, В.М. Рулевский, А.Г. Юдинцев. – Томск: Известия ТПУ, 2013. – 4 с. – URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/4765/1/bulletin_tpu-2013-322-4-24.pdf (дата обращения: 04.04.2022).

37. 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.

38. Рулевский, В.М. Система энергоснабжения телеуправляемого подводного робототехнического комплекса / В.М. Рулевский // Тез. докл. Одиннадцатой всерос. науч.-практ. конф. «Перспективные системы и задачи управления», Южный федеральный университет. – Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального университета, 2016. – С. 15–22.

39. Lai, R. Deep Water Electrical Power Distribution System and Power Components [Электронный ресурс] / R. Lai // MSDC Electrical System for Deepwater Subsea Process. – NY, 2013. – 353 p.

40. A modular stacked DC transmission and distribution system for long distance subsea applications [Электронный ресурс] / J. Song-Mangue, M. Harfman Todorovic, R. Gupta [et al.] // Offshore Technology Conference, Houston. – 2013. – 22 p.

41. Филаженко, А.Ю. Система электроснабжения привязных необитаемых подводных объектов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Филаженко Алексей Юрьевич. – Владивосток: ИПИМТ ДВО РАН, 2010. – 20 с.

42. Restivo, A. Supplying Additional Power Subsea through Intervention ROV Systems / A. Restivo, C. Glenn, L. Williams // Offshore Technology Conference. – 2017. – 8 p. – doi:10.4043/27652-ms.

43. Патент № 2008142707/22 Российская Федерация. Устройство для электроснабжения подводного аппарата с судна-носителя с компенсацией реактивной мощности в кабель-тросе : опубл. 10.10.2009 / Мишин В.Н., Рулевский В.М., Пчельников В.А., Бубнов О.В. – Бюл. № 28.

44. Chen, Qi. A novel voltage regulation strategy for the electric power delivery system of a 6000-m ROV / Qi Chen, Zhaobing Liu // Applied Ocean Research. – Vol. 80. –P. 112–117. – doi:10.1016/j.apor.2018.08.020/

45. Патент № 2012147664/07 Российская Федерация. Система электроснабжения подводного телеуправляемого аппарата : заявл. 08.11.2012 : опубл. 20.03.2013 / Мишин В.Н., Пчельников В.А., Рулевский В.М., Юдинцев А.Г., Цебенко Н.Н. – Бюл. № 8.

46. Патент № 2012117672/08 Российская Федерация. Система электроснабжения подводного телеуправляемого аппарата с судна-носителя (варианты) : заявл. 27.04.2012 : опубл. 27.08.2012 / Мишин В.Н., Пчельников В.А., Рулевский В.М., Юдинцев А.Г. – Бюл. № 24.

47. Патент № 2012124602/07 Российская Федерация. Система электроснабжения подводного аппарата с судна-носителя с компенсацией реактивной мощности в кабель-тросе (варианты) : заявл. 14.06.2012 : опубл. 27.11.2012 / Мишин В.Н., Пчельников В.А., Рулевский В.М., Юдинцев А.Г. – Бюл. № 33.

48. Патент № 2015109519/02 Российская Федерация. Устройство для электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с борта судна-носителя на постоянном токе : заявл. 18.03.2015 : опубл. 27.12.2015 /

Мишин В.Н., Рулевский В.М., Пчельников В.А., Юдинцев А.Г., Безрученко А.А. – Бюл. № 36.

49. Патент № 2014141683/07 Российская Федерация. Устройство для электроснабжения подводного аппарата с борта судна-носителя : заявл. 15.10.2014 : опубл. 10.11.2015 / Мишин В.Н., Рулевский В.М., Пчельников В.А., Юдинцев А.Г. – Бюл. № 31.

50. Патент № 2015151299/07 Российская Федерация. Устройство передачи мощности постоянного тока к телеуправляемому необитаемому подводному аппарату : заявл. 30.11.2015 : опубл. 10.08.2016 / Мишин В.Н., Рулевский В.М., Юдинцев А.Г., Бурцев В.Е. – Бюл. № 22.

51. Чех, В.А. Система электропитания телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов постоянного тока / В.А. Чех, Д.Ю. Ляпунов // Научная сессия ТУСУР-2017. – Томск: В-Спектр, 2017. – С. 240–244. – URL: https://storage.tusur.ru/files/61046/2017_2.pdf (дата обращения: 04.04.2022).

52. Чех, В.А. Система электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии постоянного тока по кабель-тросу / В.А. Чех, В.М. Рулевский // Электронные и электромеханические системы и устройства. – 2018. – С. 60–62.

53. Рулевский, В.М. 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.

54. Chekh, V.A. The power supply of a remotely operated unmanned underwater vehicle with high voltage direct current transmission via a strength-power communication cable / V.A. Chekh // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2018. – Т. 1, Ч. 3. – С. 236–239.

55. Патент № 2021101351 Российская Федерация. Устройство электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии постоянного тока по кабель-тросу : заявл. 03.07.2020 : опубл. 09.11.2021 / Чех В.А., Рулевский В.М. – Бюл. № 31.

56. Bose, A. Digital simulation of power systems / A. Bose // Proceedings of IEEE TENCON'98. IEEE Region 10 International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control (Cat. No.98CH36229). – doi:10.1109/tencon.1998.798232.

57. ЦИТМ Экспонента – MATLAB&Simulink, инженерные сервисы, модельно-ориентированное проектирование [Электронный ресурс]. – URL: <https://exponenta.ru> (дата обращения: 04.04.2022).

58. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

59. Долинина, А.А. Алгоритм моделирования нелинейных устройств на основе методов понижения порядка моделей и кусочно-линейной аппроксимации / А.А. Долинина, В.Н. Ланцов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – № 4 (16). – С. 28–33.

60. Bond, B. Stable Reduced Models for Nonlinear Descriptor Systems through Piecewise Linear Approximation and Projection / B. Bond, L. Daniel // IEEE Trans. on ComputerAided Design of Integrated Circuits and Systems. – 2009. – V. 26, N 12. – P. 2116–2129.

61. Storace, M. Piecewiselinear approximation of nonlinear dynamical systems / M. Storace, O. De Feo // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – 2004. – V. 55 (4). – P. 830–842.

62. Rewiński, M. A trajectory piecewiselinear approach to model order reduction and fast simulation of nonlinear circuits and micromachined devices / M. Rewiński, J. White // IEEE Trans. Comput. Aided Design Integr. Circuits Syst. – 2003. – V. 22, N 2. – P. 155–170.

63. Дьяконов, В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.: ил.

64. Герман-Галкин, С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона-Век, 2008. – 368 с.

65. Torokhti, A. Optimal mathematical models for nonlinear dynamical systems / A. Torokhti, P. Howlett, C. Pearce // *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. – 2003. – V. 9 (3). – P. 327–343.

66. Чех, В.А. Математическая модель системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии постоянного тока по кабель-тросу / В.А. Чех, Д.Ю. Ляпунов // *Научная сессия ТУСУР-2019*. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – С. 273–276.

67. Chekh, V.A. Mathematical model of power supply system for remotely operated underwater vehicle with dc power transmission line and load voltage feedback / V.A. Chekh, D.Y. Lyapunov, A.A. Pravikova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – № 1019. – doi:10.1088/1757-899X/1019/1/012028.

68. 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.

69. Судовые полупроводниковые преобразователи: учеб. по курсу «Полупроводниковые преобразователи» / Б.Ф. Дмитриев, В.М. Рябенский, А.И. Черевко, М.М. Музыка ; Сев. (Арктич.) федер. ун-т. – 2-е изд., перераб. и доп. – Архангельск: САФУ, 2015. – 556 с.: ил.

70. Зиновьев, Г.С. Силовая электроника / Г.С. Зиновьев. – М.: Юрайт, 2015. – 667 с.

71. Roberts, S. AC/DC Book of Knowledge Practical tips for the User / S. Roberts. – Gmunden: RECOM Engineering, 2019. – 105 p.

72. Roberts, S. DC/DC Book of Knowledge Practical tips for the User / S. Roberts. – Gmunden: RECOM Engineering, 2014. – 234 p.

73. Розанов, Ю.К. Силовая электроника: учеб. / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – М.: Изд. дом «МЭИ», 2007. – 632 с.

74. Петрович, В.П. Силовые преобразователи электрической энергии: учеб. пособие / В.П. Петрович, А.В. Глазачев ; Том. политехн. ун-т. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2012. – 209 с.
75. Готтлиб, И.М. Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы / И.М. Готтлиб. – М.: Постмаркет, 2002. – 544 с.
76. Кулик, В.Д. Силовая электроника. Автономные инверторы, активные преобразователи: учеб. пособие / В.Д. Кулик ; ГОУВПО СПбГТУРП. – СПб., 2010. – 90 с.
77. Машков, В.Е. Система электропитания кабельного типа автономного объекта / В.Е. Машков // Электропитание. – 2017. – № 3. – С. 11–19.
78. Мелешин, В.И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / В.И. Мелешин, Д.А. Овчинников. – М.: Техносфера, 2011. – 576 с.
79. Adaptive control of uninterruptible power supply based on AC/AC Power Converter / M. Kissaoui [et. al.] // International Conference on Multimedia Computing and Systems – Proceedings. – 2014. – N 6911208. – P. 1557–1562.
80. Salimi, M. Cascade nonlinear control of DC-DC buck/boost converter using exact feedback linearization / M. Salimi, S. Siami // 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, EPECS. – 2015. – N 7368525. – P. 1–7.
81. Liu, H. Mathematical Modeling and Control of a Cost Effective AC Voltage Stabilizer / H. Liu, J. Wang, O. Kiselychnyk // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2016. – Vol. 31 (11), N 7370804. – P. 8007–8016.
82. Shuai, D. Optimal control of Buck converter by state feedback linearization / D. Shuai, Y. Xie, X. Wang // Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). – 2008. – N 4593275. – P. 2265–2270.
83. Salimi, M. Closed-Loop control of DC-DC buck converters based on exact feedback linearization / M. Salimi, S. Siami // 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, EPECS. – 2015. – N 7368537.

84. Хныков, А.В. Теория и расчет трансформаторов источников вторичного электропитания / А.В. Хныков. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 128 с.

85. Стародубцев, Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности / Ю.Н. Стародубцев. – М.: РадиоСофт, 2005. – 320 с.: ил.

86. Свидетельство ГР программы для ЭВМ № 2020618587. Программа для идентификации передаточной функции динамического объекта : № 2020617754 : заявл. 15.07.2020 : зарег. в Реестре программ для ЭВМ 30.07.2020 / Чех В.А., Ляпунов Д.Ю., правообладатель ФГБОУ ВО ТУСУР.

87. Chekh, V.A. Estimating load parameters in the power supply system of a remotely operated unmanned underwater vehicle with the high voltage direct current transmission / V.A. Chekh // XXV international scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists "TUSUR Scientific Session – 2020», May 25–27, 2020, Tomsk, Russia. – Tomsk: B-Spectrum, 2020. – P. 242–244.

88. Rulevskiy, V.M. Voltage stabilizer in power supply of underwater vehicle / V.M. Rulevskiy, V.A. Chekh, D.Y. Lyapunov, A.A. Pravikova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 10. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017 – Simulation and Automation of Production Engineering (MEACS 2017): proceedings, Tomsk, December 4–6. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – Vol. 327 (2).

89. Chekh, V.A. Tuning the Controller of a Power Supply for an Autonomous Object / V.A. Chekh, D.Y. Lyapunov, D.S. Lunkin // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2020. – doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271426.

90. 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. – СПб.: ЦНИИ РТК, 2019. – Т. 7, № 1. – С. 71–79.

91. Chekh V.A. Closed-loop power supply for an autonomous object with a DC power transmission line and voltage drop compensation / V.A. Chekh, V.M.

Rulevskiy, D.Y.Lyapunov, A.A Pravikova // Journal of Physics: Conference Series – 2021 – №1862. – doi:10.1088/1742-6596/1862/1/012008.

92. Воронцов, Е.Ю. Исследование методов настройки ПИД-регулятора на примере моделирования объекта второго порядка с запаздыванием [Электронный ресурс] / Е.Ю. Воронцов, В.Г. Лисиенко, Н.Н. Пономарев. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – С. 37–41. – URL: http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/38616/1/tim_2013_12.pdf (дата обращения: 04.04.2022).

93. Онуфриев, В.А. Разработка и исследование устройства для настройки регуляторов систем автоматического управления : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Онуфриев Вадим Александрович. – Томск: Том. политехн. ун-т, 2015. – 23 с.

94. Вещественный интерполяционный метод в задачах автоматического управления: учеб. пособие / А.С. Алексеев [и др.]. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2009. – 219 с.

95. Черепанов, О.И. Основы теории идентификации систем: учеб. пособие / О.И. Черепанов, Р.О. Черепанов. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 288 с.

96. Алексеев, А.А. Идентификация и диагностика систем / А.А. Алексеев, Ю.А. Кораблев, М.Ю. Шестопапов. – М.: Академия, 2009. – 351 с.

97. Анисимов, Д.Н. Идентификация линейных динамических объектов методом экспоненциальной модуляции / Д.Н. Анисимов // Вестник МЭИ. – 1994. – № 2. – С. 68–72.

98. Лукас, В.А. Теория автоматического управления / В.А. Лукас. – М.: Недра, 1990. – 416 с.

99. Егупов, Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления / Н. Д. Егупов. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2000. Т. 1. – 748 с.

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

101. Красовский, А.А. Основы автоматики и технической кибернетики / А.А. Красовский, Г.С. Пospelов. – М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1961. – 723 с.
102. Кузовков, Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н.Т. Кузовков. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
103. Синтез систем автоматического управления методом модального управления / В.В. Григорьев [и др.]. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 108 с.
104. Johnson, M.A. PID control: new identification and design methods / M.A. Johnson, M.H. Moradi. – L.: Springer-Verlag London Ltd, 2005. – 543 p.
105. Герасимов, В.А. Исследование и разработка системы энергообеспечения привязного подводного робота с модернизированным источником электропитания / В.А. Герасимов, А.В. Комлев, Н.А. Найденко, А.Ю. Филоженко // Подводные исследования и робототехника. – 2021. – № 3(37). – С. 82–89. – doi: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_08.
106. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем: учеб. пособие / Л.Н. Александровская [и др.]. – М.: Логос, 2003. – 736 с.: ил.
107. Захаров, О. Г. Испытания электротехнических изделий / О.Г. Захаров. – М.: Высшая школа, 1987. – 247 с.
108. ГОСТ Р 50779.30-95. Статистические методы. Приемочный контроль качества. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 1996. – 28 с.
109. Жаднов, В.В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств / В.В. Жаднов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 464 с.: ил
110. Маликов, И.М. Надежность судовой электронной аппаратуры и систем автоматического управления / И.М. Маликов. – Л.: Судостроение, 1967. – 315 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Главное окно

БЧ СЭС ТНПА		ГЛАВНОЕ ОКНО		Выход		Отключение			
Автоном	ДУ	Наработка, ч	000000						
Переход на резервную сеть				Бортовая часть					
Автоматический		Ручной		Uвых1, В	Iвых1, А	Rвых1, Вт	Rиз.вых1, кОм		
0		0		0	0	0	-		
Uвых2, В		Iвых2, А		Rвых2, Вт		Rиз.вых2, кОм			
0		0		0		0			
Питания БЧ				Подводная часть Гараж-заглубитель					
Сеть основная		Сеть резервная		U600, В	I600, А	P600, Вт	Rиз.600, кОм		
0		0		0	0	0	-		
Включение СЭС				U300, В	I300, А	P300, Вт	Rиз.300, кОм	T, °C	
Сеть основная		Сеть резервная		0	0	0	-	0	
Вкл	Откл	Вкл	Откл						
Блокировка доступа				ТНПА 1					
БП		ПН		БК КТ					
0		0		0		-			
U300, В		I300, А		P300, Вт		Rиз.300, кОм		T, °C	
0		0		0		-		0	
Контроль стыковки				ТНПА 2					
500В	ПН	БК КТ	УДУ	Ethernet					
0		0		0		-			
U300, В		I300, А		P300, Вт		Rиз.300, кОм		T, °C	
0		0		0		-		0	
Главное окно		Диагностика		Протокол		Настройка		Сеть	

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Окно ДИАГНОСТИКА

БЧ СЭС ТНПА		ДИАГНОСТИКА			
Аварии					
Блок питания					
QF1	QF2	СН 48В	СН 15В	КМ1	КМ2
КМ3	Уровень сети осн.	Уровень сети рез.	FU вент.	ДТем	RS-485
Ethernet	Обрыв фаз осн.	Обрыв фаз рез.	Заземление	Изоляция сети	
Преобразователь напряжения					
Ток МИ1	Ток МИ2	Ток МИ3	Ток МИ4	Ток МИ5	Ток МИ6
FU МИ1	FU МИ2	FU МИ3	FU МИ4	FU МИ5	FU МИ6
ДТ МИ1	ДТ МИ2	ДТ МИ3	ДТ МИ4	ДТ МИ5	ДТ МИ6
Перенапряжение	Изоляция выхода	Заземление	СН 48В	СН 15В	FU вент.
Блок коммутации кабель-троса					
Заземление					
Главное окно	Диагностика	Протокол	Настройка	Сеть	

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Окно НАСТРОЙКА

БЧ СЭС ТНПА	НАСТРОЙКА	Версия ПО 1.0.0 НИИ АЭМ ТУСУР Сборка		
Параметры кабель-троса				
<input type="text" value="0"/> Rпетл., Ом	<input type="text" value="0"/> Rпогон., Ом/км	<input type="text" value="0"/> Спогон., мкФ/км		
<input type="text" value="0"/> Lпетл., мкГн	<input type="text" value="0"/> Lпогон., мкГн/км	<input type="text" value="0"/> Спогон., мкФ/км		
Параметры компенсации линии электропередачи				
<input type="text" value="0"/> Uвых.хх, В	<input type="text" value="0"/> Ручной Кпос, %	Автоматическая компенсация		
		Кпос, % <input type="text" value="0"/>		
<input type="button" value="Отмена"/>	<input type="button" value="Исходное"/>	<input type="button" value="Принять"/>		
<input type="button" value="Главное окно"/>	<input type="button" value="Диагностика"/>	<input type="button" value="Протокол"/>	<input type="button" value="Настройка"/>	<input type="button" value="Сеть"/>

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Патент и свидетельства о государственной регистрации
программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020618587

**Программа для идентификации передаточной функции
динамического объекта**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) (RU)*

Авторы: *Ляпунов Данил Юрьевич (RU),
Чех Вадим Андреевич (RU)*

Заявка № 2020617754

Дата поступления 15 июля 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 30 июля 2020 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.И. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Д**Акты внедрения результатов диссертационной работы****АО «Тетис Про»**

Адрес: ул. Поляны (п. Сосенское), владение 54, строение 1, этаж 3, помещение 161, Москва, 142791
Адрес для корреспонденции: а/я 73, Москва. ИНН 7724643714 КПП 775101001 ОКПО 18496295
Тел.: (495) 786-98-55 E-mail: tetis@tetis-pro.ru www.tetis-pro.ru

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Результатов диссертационной работы
Чех Вадима Андреевича

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы использованы при создании системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного комплекса «СЭП ТНПК», ГБНК.565414.001 в проектно-конструкторской деятельности Научно-исследовательского института Автоматики и электромеханики ТУСУР.

Надежность и эксплуатационные качества разработанного оборудования СЭП проверены при предварительных испытаниях системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного комплекса с рабочей глубиной аппарата -1000 м, разработанного в АО «Тетис Про». Испытания показали, что разработанное оборудование полностью соответствует техническому заданию, требованиям и условиям его работы.

Использование указанных результатов позволяет:

- повысить качество проектирования систем электроснабжения современных глубоководных телеуправляемых необитаемых подводных комплексов для выполнения тяжелых подводно-технических работ;
- обеспечить высокую энергоэффективность и улучшенные массогабаритные показатели системы.

Результаты внедрялись при выполнении договора № 1921187101272432209200503/01/ТНПК/20 на «Изготовление и поставку Системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного комплекса (СЭП ТНПК)» для мобильного комплекса рабочего телеуправляемого аппарата.

Руководитель группы
развития робототехники

06.05.2022 г.



Д.В. Войтов

ТУСУР

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

ОКПО 02069326, ОГРН 1027000867068,
ИНН 7021000043, КПП 701701001

тел: (382 2) 510-530
факс: (382 2) 513-262, 526-365
e-mail: office@tusur.ru
http:// www.tusur.ru

пр. Ленина, 40, г. Томск, 634050

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе

ТУСУР, к.т.н., доцент

П.В. Сенченко

« 23 » апреля 2022 г.



АКТ

использования результатов диссертационной работы
Чех Вадима Андреевича
в учебном процессе Факультета электронной техники
Томского университета систем управления и радиоэлектроники

Настоящий акт составлен в том, что в учебный процесс кафедры промышленной электроники факультета электронной техники внедрены следующие результаты:

1. Математическое моделирование динамических и статических процессов в системах электроснабжения телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе, учитывающие изменение параметров кабель-троса и полезной нагрузки.

2. Методика проектирования регулятора системы управления бортовой части системы энергоснабжения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата, учитывающая параметры трехжильного кабель-троса, обеспечивающая стабилизацию выходного напряжения подводного аппарата при различных режимах работы.

3. Программно-аппаратные комплексы глубоководных буксируемых и телеуправляемых подводных аппаратов.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке студентов по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», профиль «Промышленная электроника».

Зав. кафедрой ПрЭ,
д.т.н., профессор

С.Г. Михальченко



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Инженерной школы
энергетики ТПУ, к.т.н., доцент
А.С. Матвеев

« 5 » мая 2022 г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы
Чех Вадима Андреевича в образовательном процессе «Инженерной школы
энергетики Национального исследовательского Томского политехнического
университета»

Настоящий Акт составлен в том, что в образовательный процесс Инженерной школы
энергетики внедрены следующие результаты:

- основные принципы построения современных систем электроснабжения телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном и переменном токе, обеспечивающих стабилизацию напряжения на технологическом оборудовании подводного аппарата с улучшенными энергетическими и массогабаритными показателями;
- математические и имитационные модели систем электроснабжения телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе, учитывающие изменение параметров кабель-троса и нагрузки, позволяющие исследовать статические и динамические режимы ее работы;
- методика проектирования регулятора напряжения системы управления бортовой части систем электроснабжения телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов, учитывающая параметры кабель-троса и обеспечивающая стабилизацию выходных напряжений подводного аппарата при различных режимах работы.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке студентов направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника (профиль «Электроприводы и системы управления электроприводов»).

Профессор отделения электроэнергетики и
электротехники инженерной школы
энергетики, д.т.н.

В.Г. Букреев