

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2022

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

Научный руководитель **Рулевский Виктор Михайлович,**
доктор технических наук, доцент, ректор

Официальные оппоненты: **Пантелеев Василий Иванович,** доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра «Электроэнергетики», заведующий кафедрой;

Однокопылов Георгий Иванович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Отделение электроэнергетики и электротехники, профессор.

Ведущая организация Акционерное общество «Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск.

Защита диссертации состоится «12» сентября 2022 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации: www.ntsru.ru

Автореферат разослан «___» июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Максим Александрович Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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 обеспечения устойчивого положения России как на внутреннем, так и на внешнем рынке, а также 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.

Дефицит и рост цен на полезные ископаемые, нефтехимические продукты и другие природные ресурсы вынуждают осваивать новые месторождения в шельфовых зонах. Исследование и разработка подобных объектов проводятся при помощи подводных аппаратов, что способствует развитию глобального рынка телеуправляемых необитаемых 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 необитаемых подводных комплексов (ТНПК) является достаточно сложной ввиду ограниченной пропускной способности кабель-троса, связывающего аппарат с судном, при глубинах погружения до 8000 м и передаваемой мощности более 100 кВт.

Степень разработанности темы исследования

Проблемам исследования, разработки и создания современных систем электроснабжения (СЭС) для подводных аппаратов посвящено множество работ отечественных 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., Harfiman Todorovic M., Gupta R., Zhang D., Chi S., Garcés L.

В настоящее время вопросы, связанные с созданием современных СЭС ТНПК на постоянном токе мощностью до 100 кВт для передачи энергии на предельные глубины с учетом параметров кабель-троса, изучены недостаточно, поэтому их решение актуально и имеет практическое значение для развития

высокотехнологичного производства, обеспечения суверенитета и безопасности нашей страны.

Важной научно-технической задачей является формирование и обеспечение 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.

Научная новизна

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 м.

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, создание алгоритмов 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 посредством программы Simulink пакета MatLab. Теоретические результаты подтверждены экспериментальными исследованиями в лабораторных условиях макетного образца, разработанного и изготовленного в НИИ АЭМ ТУСУРа.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Структура СЭС ТНПК за счет передачи энергии по трехжильному кабель-тросу на постоянном токе обеспечивает 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, позволяют исследовать статические и динамические режимы работы данной системы.

3. Методика проектирования регулятора напряжения системы управления бортовой части СЭС ТНПК, учитывающая параметры трехжильного кабель-троса, обеспечивает 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 позволяет за счет разработанных схемотехнических решений и алгоритмов обеспечить исследование различных режимов ее работы.

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

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 в ходе выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект FEWM-2020-0046 «Фундаментальные основы и методология создания высокоэффективного энергопреобразования для систем космического и морского назначения на базе интеллектуальных силовых модулей сверхвысокой степени интеграции» на 2020–2022 гг. — Исполнитель).

Результаты диссертационной работы внедрены при выполнении одного из основных направлений научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ НИИ АЭМ ТУСУРа (г. Томск) в виде технических предложений, при 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 наноэлектроника», 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, способствующие развитию общей теории электротехнических комплексов и систем, изучению системных свойств и связей, позволяющие проводить 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

Результаты диссертационного исследования обсуждались на международных и отечественных научно-технических мероприятиях, среди которых: научно-техническая конференция молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», АО «НПЦ «Полюс», Томск, 2017;

международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2018», Томск, 2018; 29-я международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции», ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург; международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2019», Томск, 2019; 14-й международный форум по стратегическим технологиям IFOST 2019, ТПУ, Томск, 2019; международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2020», Томск, 2020; международная научная конференция «FarEastCon-2020», ДВФУ, Владивосток, 2020.

Научные исследования выполнялись в рамках х/д на проведение составной части опытно-конструкторских работ между НИИ АЭМ ТУСУРа, 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 по 2022 г.

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

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 110 наименований, изложена на

161 странице машинописного текста, содержит 82 рисунка, 17 таблиц, 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цель, основные задачи диссертационной работы, приводятся краткие комментарии к содержанию диссертации, сведения об апробации, публикациях, научной новизне, теоретической и практической значимости работы, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен краткий обзор современного состояния необитаемых подводных аппаратов (НПА). Для СЭС ТНПК определены основные параметры, которые базируются на требованиях к электротехническим корабельным изделиям и источникам вторичного электропитания.

Проведен обзор состояния СЭС ТНПК с передачей энергии на переменном и постоянном токе. Обозначены преимущества СЭС на постоянном токе по сравнению с СЭС на переменном токе. К ним относятся отсутствие реактивных токов в кабель-тросе и лучшие массогабаритные показатели подводной части.

Предложена структура СЭС ТНПК с передачей энергии на постоянном токе (рисунок 1).

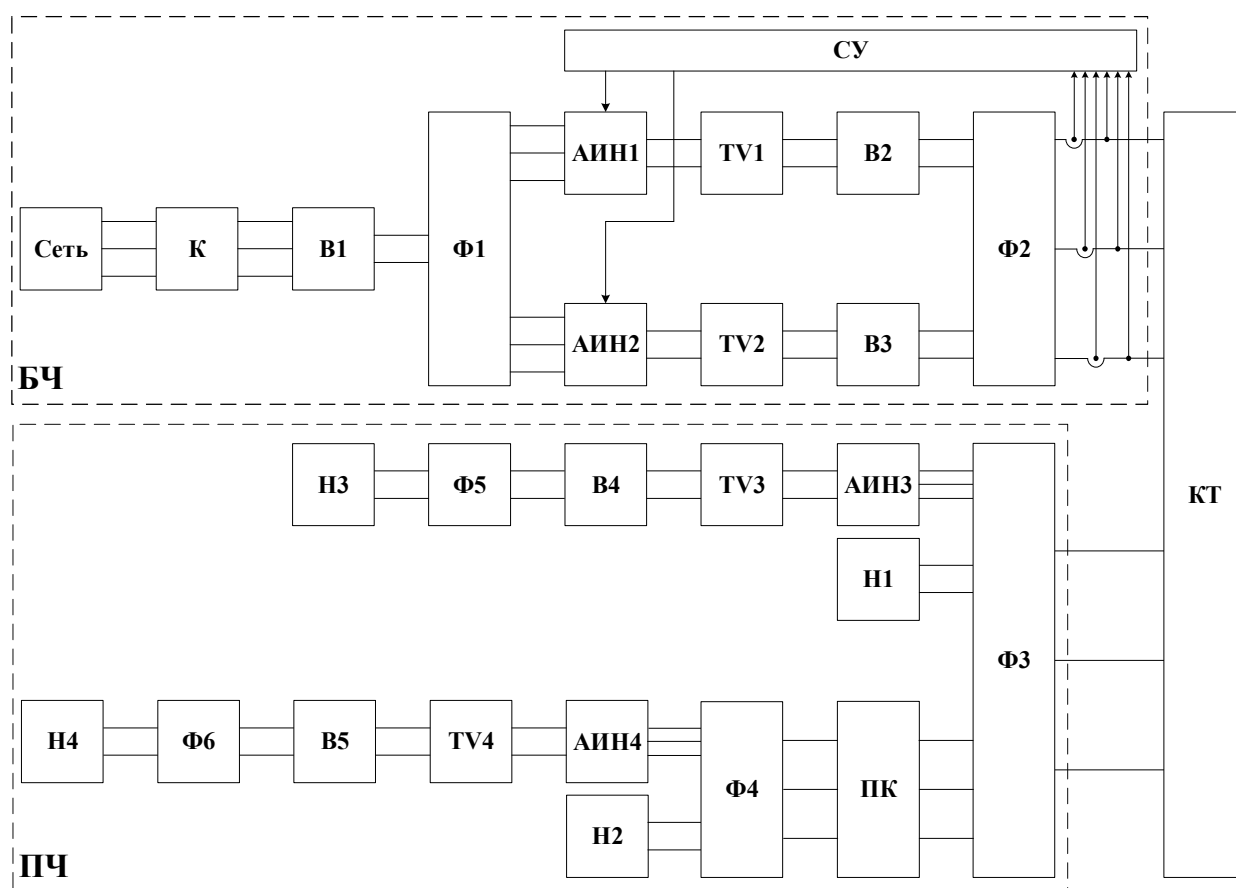


Рисунок 1 – СЭС ТНПК на постоянном токе с передачей энергии по трехжильному кабель-тросу (патент РФ № 2759118)

СЭС включает бортовую часть БЧ, кабель-трос КТ и подводную часть 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 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.

Во второй главе рассмотрены особенности создания математической и имитационной моделей системы электроснабжения, функционирующих в различных режимах. Построение моделей основано на схеме замещения, представленной на рисунке 2.

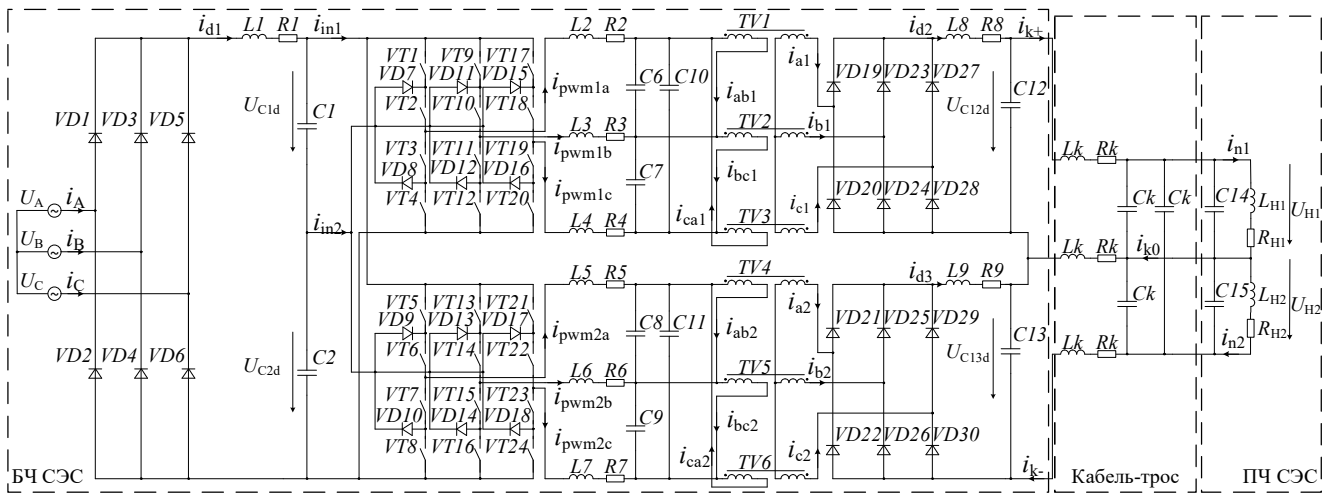


Рисунок 2 – Схема замещения силовой части СЭС ТНПК с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе

Управление реализовано с применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Разностные функции определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned} \xi_{a1}(t) &= K_{ma}(t) - U_{p+}(t); \xi_{a3}(t) = \overline{\xi_{a1}(t)}; \xi_{a2}(t) = K_{ma}(t) - U_{p-}(t); \xi_{a4}(t) = \overline{\xi_{a2}(t)}; \\ \xi_{b1}(t) &= K_{mb}(t) - U_{p+}(t); \xi_{b3}(t) = \overline{\xi_{b1}(t)}; \xi_{b2}(t) = K_{mb}(t) - U_{p-}(t); \xi_{b4}(t) = \overline{\xi_{b2}(t)}; \\ \xi_{c1}(t) &= K_{mc}(t) - U_{p+}(t); \xi_{c3}(t) = \overline{\xi_{c1}(t)}; \xi_{c2}(t) = K_{mc}(t) - U_{p-}(t); \xi_{c4}(t) = \overline{\xi_{c2}(t)}, \end{aligned} \quad (1)$$

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 выражениями

$$U_{p+}(t) = \left| 1 - 2 \cdot \left(\frac{t}{t_{\text{ШИМ}}} - \left\lfloor \frac{t}{t_{\text{ШИМ}}} \right\rfloor \right) \right|; U_{p-}(t) = \left| 1 - 2 \cdot \left(\frac{t}{t_{\text{ШИМ}}} - \left\lfloor \frac{t}{t_{\text{ШИМ}}} \right\rfloor \right) \right| - 1; \quad (2)$$

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

Функции состояния стойки инвертора K_a , K_b , K_c имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
K_a &= \begin{cases} 0 & \text{при } K_{fa1} = K_{fa2} = 0 \ \& \ K_{fa3} = K_{fa4} = 1, \\ 1 & \text{при } K_{fa1} = K_{fa4} = 0 \ \& \ K_{fa2} = K_{fa3} = 1, \\ 2 & \text{при } K_{fa1} = K_{fa2} = 1 \ \& \ K_{fa3} = K_{fa4} = 0; \end{cases} \\
K_b &= \begin{cases} 0 & \text{при } K_{fb1} = K_{fb2} = 0 \ \& \ K_{fb3} = K_{fb4} = 1, \\ 1 & \text{при } K_{fb1} = K_{fb4} = 0 \ \& \ K_{fb2} = K_{fb3} = 1, \\ 2 & \text{при } K_{fb1} = K_{fb2} = 1 \ \& \ K_{fb3} = K_{fb4} = 0; \end{cases} \\
K_c &= \begin{cases} 0 & \text{при } K_{fc1} = K_{fc2} = 0 \ \& \ K_{fc3} = K_{fc4} = 1, \\ 1 & \text{при } K_{fc1} = K_{fc4} = 0 \ \& \ K_{fc2} = K_{fc3} = 1, \\ 2 & \text{при } K_{fc1} = K_{fc2} = 1 \ \& \ K_{fc3} = K_{fc4} = 0, \end{cases}
\end{aligned} \tag{3}$$

где K_f – функция состояния силового ключа.

Дифференциальные уравнения выходной цепи выпрямителя записываются следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{di_{d2}(t)}{dt} &= \frac{U_{d2}(t) - U_{c12}(t) - R_8 \cdot i_{d2}(t)}{L_8}; & \frac{dU_{c12}(t)}{dt} &= \frac{1}{C_{12}}(i_{d2}(t) - i_{k+}(t)); \\
\frac{di_{d3}(t)}{dt} &= \frac{U_{d3}(t) - U_{c13}(t) - R_9 \cdot i_{d3}(t)}{L_9}; & \frac{dU_{c13}(t)}{dt} &= \frac{1}{C_{13}}(i_{d3}(t) - i_{k-}(t)).
\end{aligned} \tag{4}$$

Токи кабель-троса определяются согласно уравнениям

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

Выходные напряжения и токи подводной части СЭС описываются соотношениями

$$\begin{aligned}
\frac{di_{n1}(t)}{dt} &= \frac{U_{c14} - R_{n1} \cdot i_{n1}(t)}{L_{n1}}; & \frac{dU_{c14}(t)}{dt} &= \frac{1}{C_{14} + C_k}(i_{k+}(t) - i_{n1}(t)); \\
\frac{di_{n2}(t)}{dt} &= \frac{U_{c15} - R_{n2} \cdot i_{n2}(t)}{L_{n2}}; & \frac{dU_{c15}(t)}{dt} &= \frac{1}{C_{15} + C_k}(i_{k-}(t) - i_{n2}(t)).
\end{aligned} \tag{6}$$

Результаты исследования разомкнутой СЭС ТНПК представлены с применением сред MathCad и MatLab.

В процессе моделирования получены зависимости выходных токов и напряжений в режиме холостого хода (рисунок 3), в номинальном режиме (рисунок 4) и в случае 50% несимметрии нагрузки (рисунок 5).

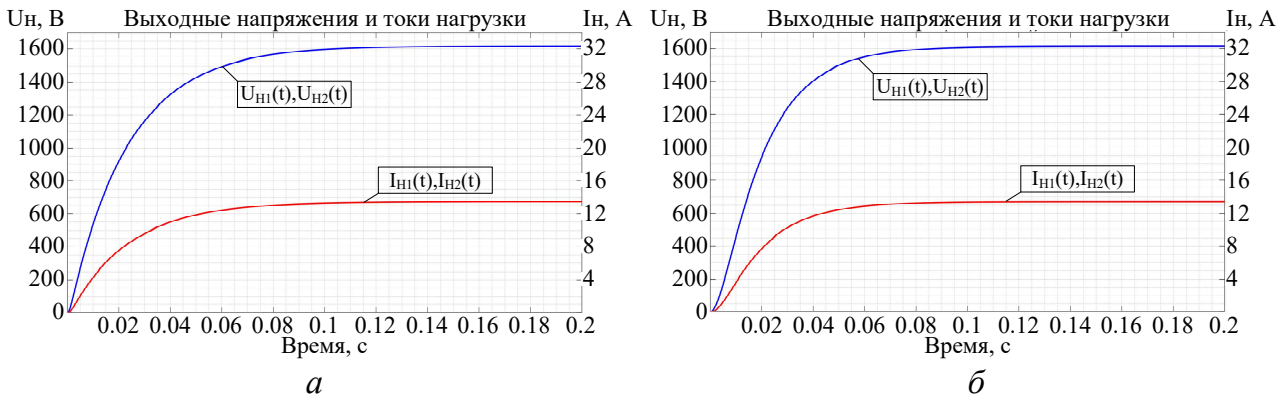


Рисунок 3 – Зависимости выходных напряжений и токов нагрузки ТПК в режиме холостого хода при $K_M = 1$: *a* – имитационная модель; *б* – аналитическая модель

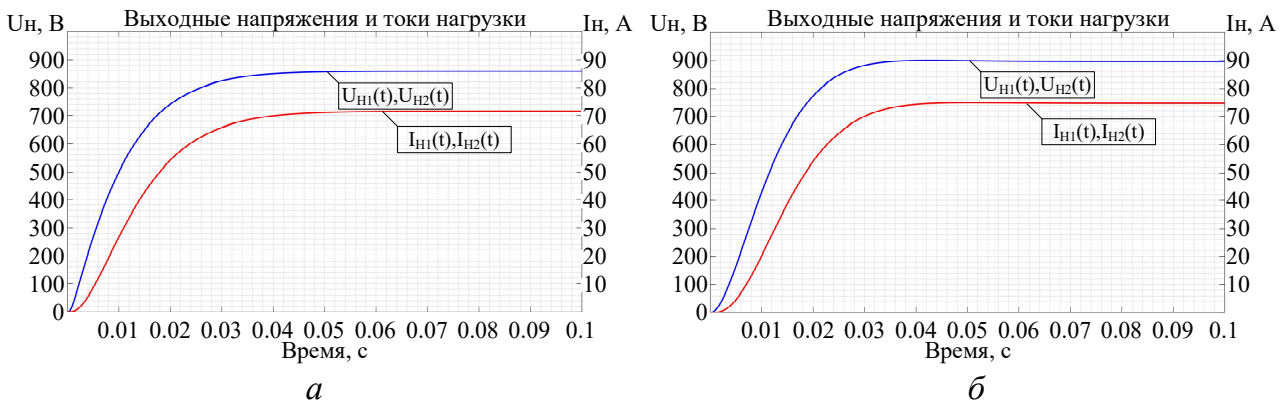


Рисунок 4 – Зависимости выходных напряжений и токов нагрузки ТПК в номинальном режиме при $K_M = 1$: *a* – имитационная модель; *б* – аналитическая модель

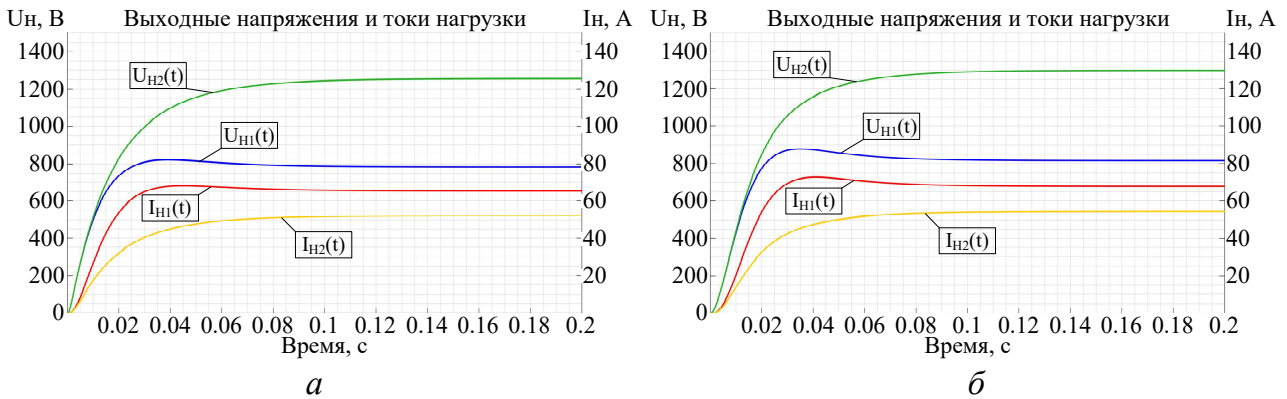


Рисунок 5 – Зависимости выходных напряжений и токов нагрузки ТПК при несимметричной нагрузке и $K_M = 1$: *a* – имитационная модель; *б* – аналитическая модель

Из представленных 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 859 В с временем переходного процесса не более 28 мс. В случае 50% несимметрии мощности полезной нагрузки СЭС ТПК 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 составило для первой нагрузки 39 мс, в то время как для второй нагрузки 59 мс.

В третьей главе представлена разработка системы управления, обеспечивающей требуемые параметры переходных процессов независимо от режима работы полезной нагрузки (рисунок 6).

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 КМ до максимального относительного значения.

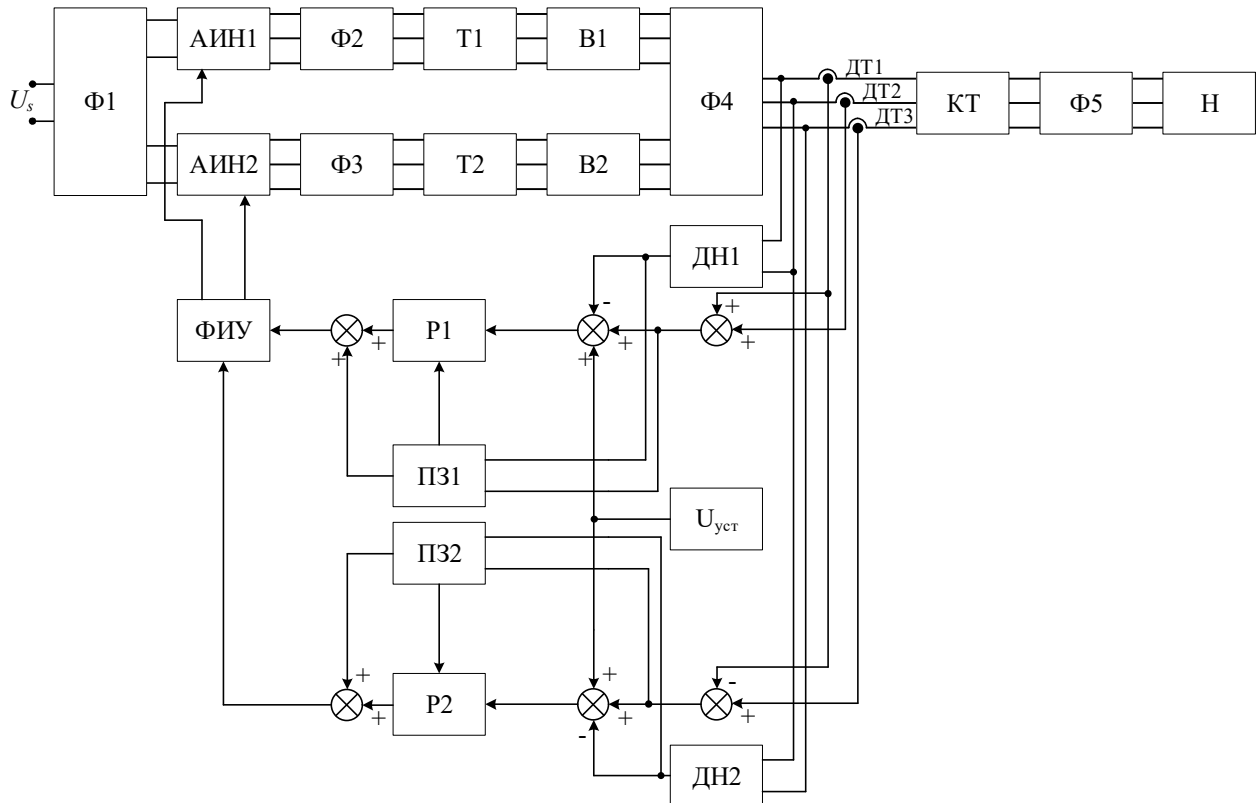


Рисунок 6 – Функциональная схема системы управления СЭС ТНПК:

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

В блоке формирования импульсов управления ФИУ значение КМ перемножается на форму закона управления силовых ключей инверторов АИН1 и АИН2. В результате сравнения полученного сигнала 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 несимметрии нагрузки 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 формируются массивы данных выходных напряжений и токов. На их основе вычисляется разность выходного напряжения и вольтодобавки, учитывающей ток и сопротивление задействованных силовых линий кабель-троса. При достижении порога напряжения 480 В на полезной нагрузке первого канала ТНПК формируется команда переключения управления. Система переходит из состояния разомкнутой в состояние замкнутой, 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 входит автономный инвертор напряжения АИН2, фильтр Ф3, повышающий трансформатор Т2, неуправляемый выпрямитель В2 и фильтр Ф4. Отличие второго преобразователя заключается в противоположном знаке значений показаний датчика тока ДТ2.

Второй этап реализует управление замкнутой системой. Значение выходного напряжения первого преобразователя БЧ СЭС вычитается из суммы вольтодобавки верхнего преобразователя и задания уставки $U_{уст}$ напряжения нагрузки, тем самым 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 аналогичны действиям 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 формирования относительного времени открытого состояния силовых ключей инверторов. Аналогичным образом формируется управление для второго преобразователя БЧ СЭС.

Рассмотрены методы создания аппроксимирующей передаточной функции и представлен алгоритм идентификации на основе метода площадей (рисунок 7).

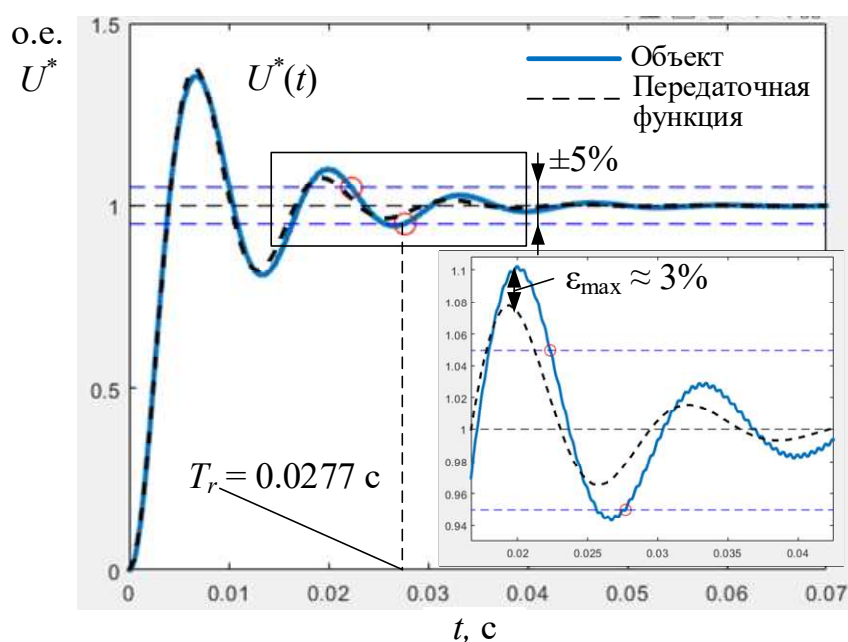


Рисунок 7 – Переходный процесс выходного напряжения БЧ СЭС ТНПК с разомкнутой системой управления

Исследовано влияние структуры обратной связи системы на переходные характеристики при настройке регулятора в различных точках внешней характеристики. Представлены результаты исследования работы системы в различных режимах с применением перестраиваемого регулятора на основе выходного тока бортовой части системы (рисунки 8, 9).

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 исследуются аварийные режимы работ, в которых производится максимальная загрузка ПЧ СЭС и переход в режим холостого хода.

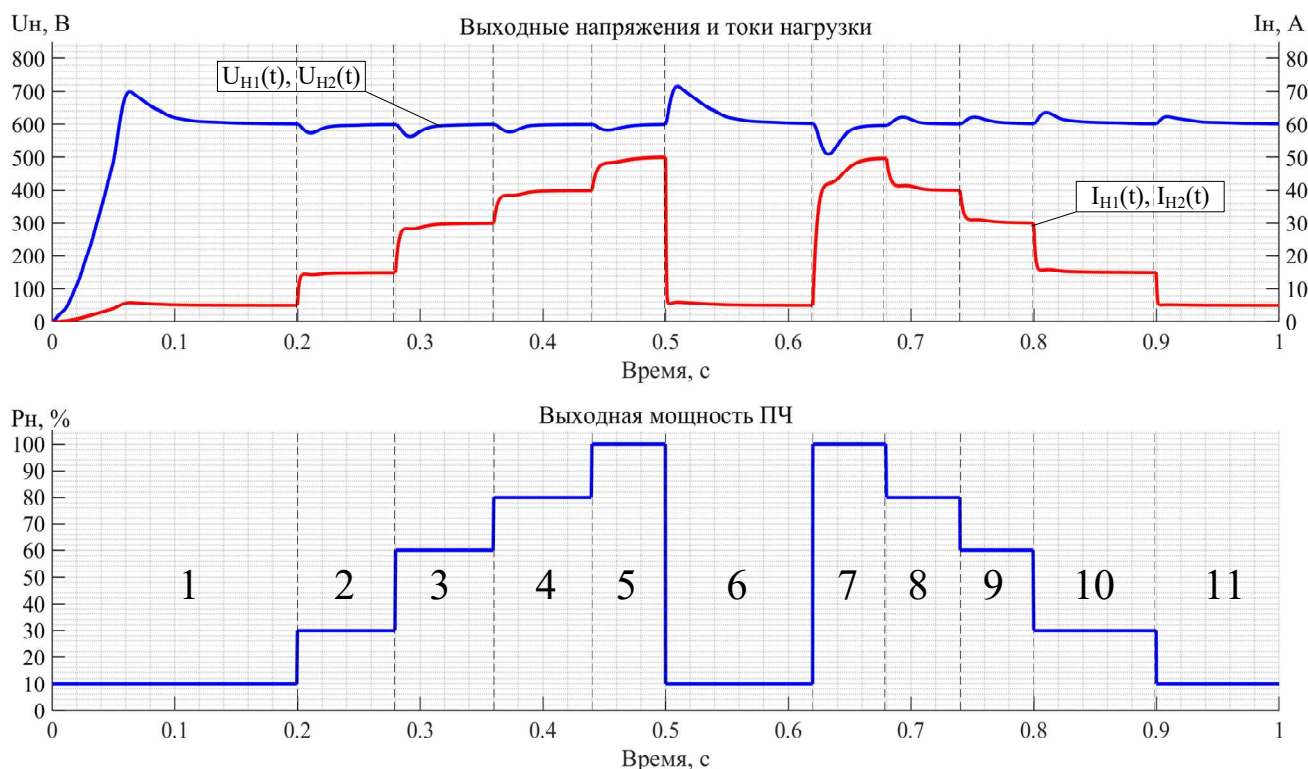


Рисунок 8 – Переходные процессы СЭС при изменении этапа работы ТНПК:
 1 – запуск СЭС ТНПК; 2 – погружение гаража-заглубителя (ГЗ) с ТНПА; 3, 9 – выход ТНПА в зону проведения работ; 4, 8 – проведение целевых работ аппаратом;
 5, 7 – аварийное включение максимальной нагрузки ПЧ СЭС ТНПК;
 6 – аварийное отключение нагрузки ПЧ СЭС ТНПК; 10 – подъем ГЗ с ТНПА; 11 – работа ПЧ СЭС ТНПК в режиме холостого хода на судне-носителе

В режиме несимметричной нагрузки максимальное отклонение напряжения не превышало 13,2% от номинального значения с временем переходного процесса не более 43 мс.

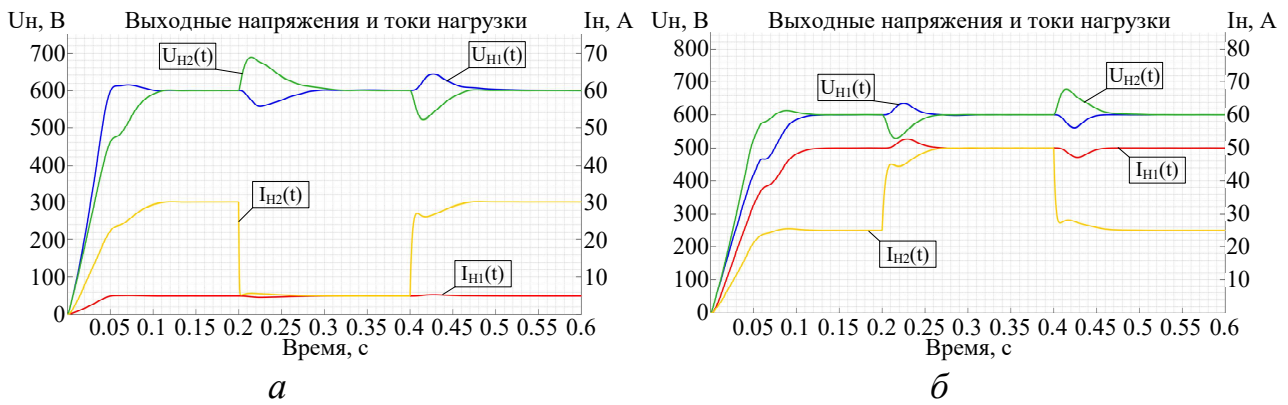


Рисунок 9 – Зависимости выходных напряжений и токов нагрузки ТПК при несимметричной нагрузке: *а* – в режиме холостого хода; *б* – в номинальном режиме

В четвертой главе представлен вариант технической системы электроснабжения ТПК с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе, реализованный на основе принципа модульности, позволяющий обеспечить необходимую мощность путем подключения унифицированных модулей, а также заданные удельные характеристики СЭС (рисунок 10).

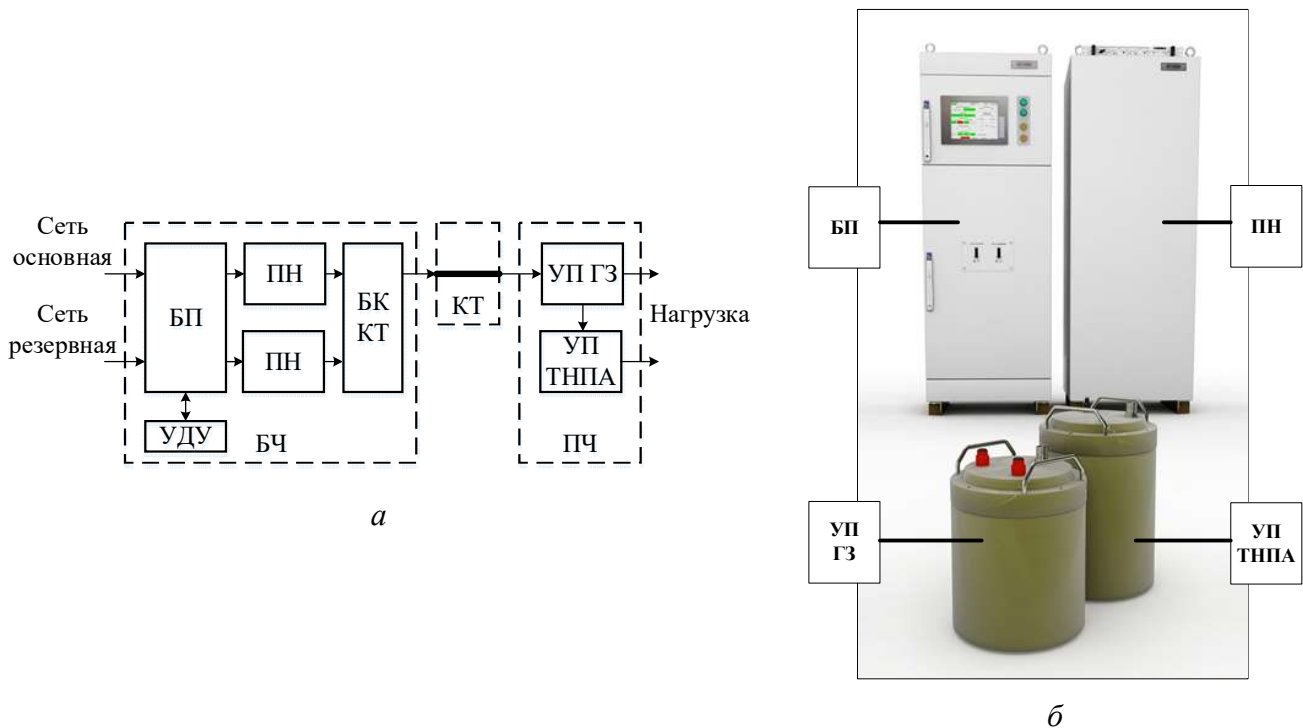


Рисунок 10 – Структурная схема (а) и визуализация (б) СЭС ТПК с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе

Предлагается бортовую часть СЭС разделить на энергетические и информационные узлы: блок питания (БП), преобразователь напряжения (ПН), блок коммутации кабель-троса (БК КТ) и устройство дистанционного управления (УДУ). При этом подводная часть СЭС содержит устройство питания гаража-заглубителя (УП ГЗ) и устройство питания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (УП ТНПА).

Энергопитание СЭС ТПК осуществляется от основной или резервной бортовой сети судна-носителя трехфазным напряжением 380 В с частотой 50 Гц.

Энергетические показатели системы определяются потребителями энергии ее подводной части, а также кабель-тросом. Представленный вариант СЭС предназначен для питания подводных потребителей по кабельной линии длиной 8 км суммарной мощностью 47 кВт. Сформированные шины питания постоянного напряжения 300 В и 600 В подводной части СЭС обеспечивают стабилизацию в пределах $\pm 10\%$ от номинального напряжения. Динамические характеристики выходных каналов питания соответствуют максимальному перерегулированию 20% с длительностью переходных процессов, не превышающей 50 мс.

Создан алгоритм работы программного обеспечения верхнего уровня СЭС ТНПК (рисунок 11), осуществляющий управление, контроль и диагностику состояний основных элементов системы с записью и отображением информации на встроенном сенсорном мониторе для безопасного и качественного электроснабжения подводного аппарата.

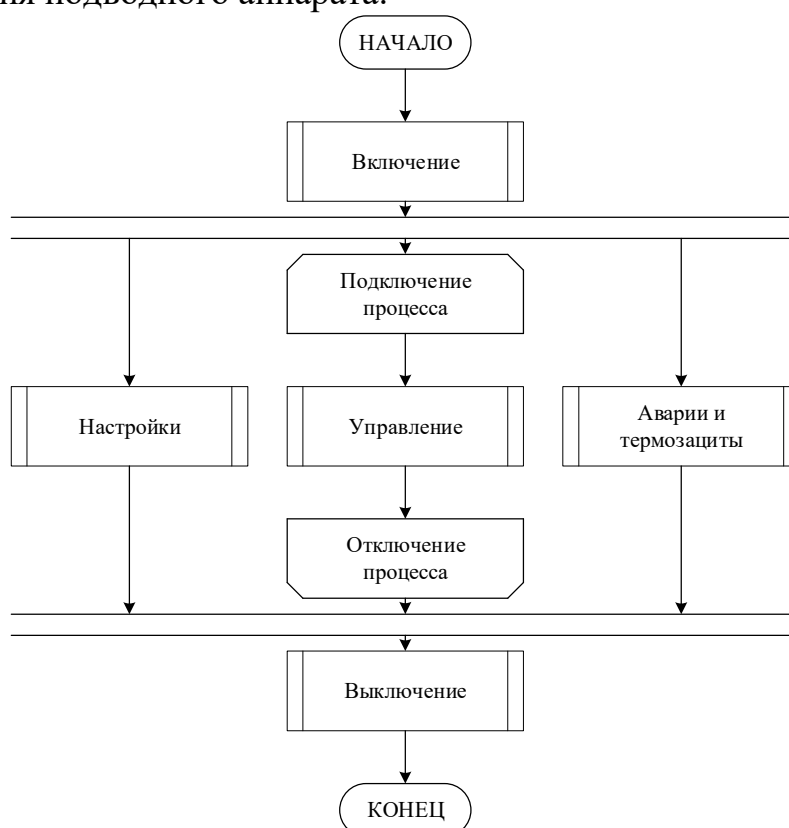


Рисунок 11 – Общий алгоритм работы СЭС ТНПК

Представлена методика экспериментального исследования макетного образца и выполнено сопоставление результатов с моделированием макетного образца в среде MatLab.

Функциональная схема макетного образца СЭС ТНПК с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе для исследования выходных электрических параметров приведена на рисунке 12.

Как было установлено, мощность выходных шин питания 600 В составляет более 90 % от номинальной суммарной мощности ПЧ. Поэтому 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.

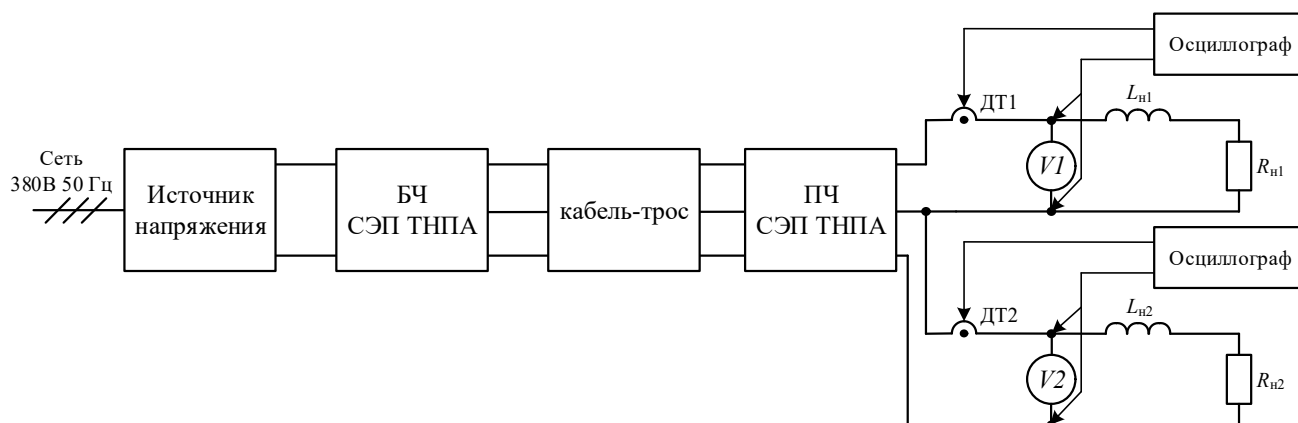


Рисунок 12 – Функциональная схема макетного образца СЭС ТПК

Макетный образец СЭС ТПК (рисунок 13) 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 ТПК; осциллографов (АКИП-4126/2А-Х) с токовым пробником (Tektronix TCR312A) и усилителем (Tektronix TCR300); мультиметров (Agilent Technologies HP34401A).

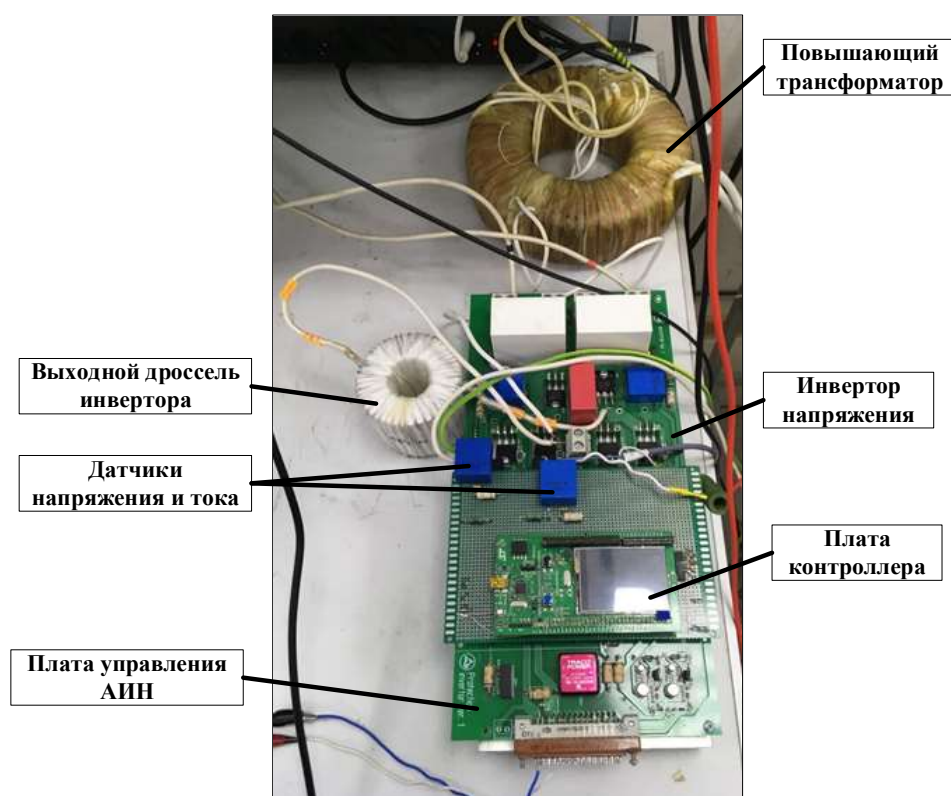


Рисунок 13 – Макетный образец преобразователя БЧ СЭС ТПК

Преобразователь конвертирует низковольтное постоянное входное напряжение в высоковольтное постоянное выходное напряжение БЧ СЭС ТПК. Полученное напряжение передается через эквивалентные индуктивность и сопротивление кабель-троса в ПЧ СЭС ТПК. К выходным клеммам ПЧ подключены переменные нагрузки $R_{н1}$ и $R_{н2}$, изменение которых приводит к

смене режима работы от холостого хода до номинального. При помощи осциллографа производится контроль и запись выходных тока и напряжения экспериментальной установки при запуске, сбросе и набросе полезной нагрузки системы.

В результате экспериментальных исследований макетного образца СЭС ТНПК получен ряд зависимостей выходного напряжения $U_H(t)$ и тока $I_H(t)$ на нагрузке при пуске на холостом ходу и на номинальную нагрузку, при набросе и сбросе нагрузки, а также внешняя характеристика СЭС ТНПК.

На рисунке 14 представлена внешняя характеристика макетного образца СЭС ТНПК и имитационной модели. По виду внешней характеристики макетного образца (рисунок 14, *а*) можно заключить, что СЭС ТНПК обладает достаточной жесткостью во всем диапазоне нагрузок – от холостого хода до номинального значения $\Delta U_H = 4,09\%$.

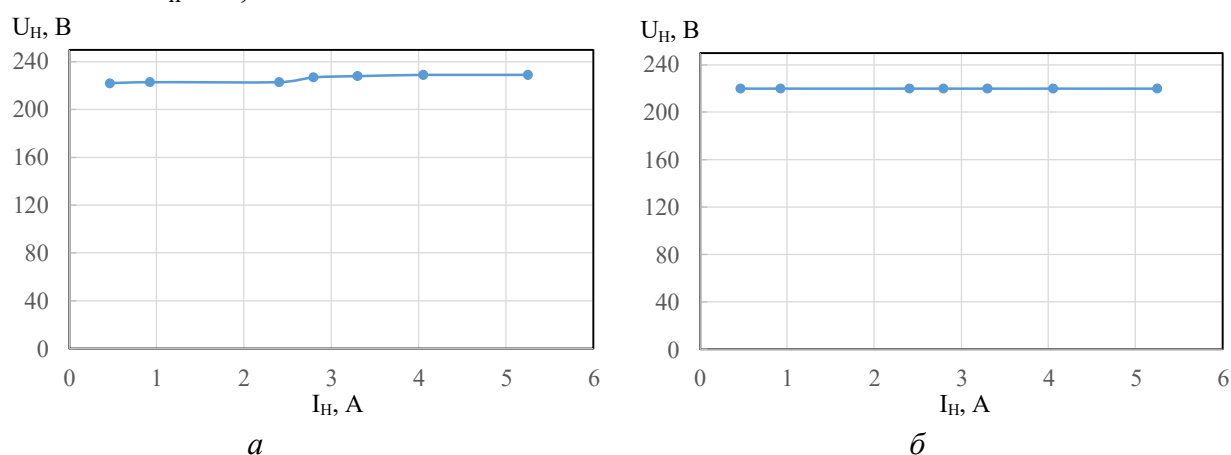


Рисунок 14 – Внешняя характеристика макетного образца СЭС ТНПК:
а – макетный образец; *б* – имитационная модель

В заключении изложены основные научные результаты диссертационного исследования, отражающие решение проблемы. **В приложениях** приведены интерфейсы управления и контроля СЭС ТНПК.

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.

Предложенная структура СЭС ТНПК с передачей энергии по кабель-тросу на постоянном токе 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.

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

Созданная система управления обеспечивает работу СЭС с заданной точностью при пуске на холостом ходу и в номинальном режиме, сбросе и набросе нагрузки, а также при несимметричной нагрузке.

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

Макетный образец СЭС ТНПК и методика его исследования позволяют провести исследования всех режимов работы системы.

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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. 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.

2. 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.

3. 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.

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

4. 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

5. 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

6. 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

7. 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).

В сборниках и трудах конференций

8. 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 // 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.

9. 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. – Томск, 2019. Ч. 1. – С. 273–276.

10. 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 // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2018. Т. 1, ч. 3. – С. 236–239.

11. 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. – Томск, 2018. – С. 60–62.

12. Чех В. А. Система электропитания телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов постоянного тока / В. А. Чех, Д. Ю. Ляпунов // Научная сессия ТУСУР. – Томск, 2017. – С. 240–244.

Патент на изобретение РФ

13. Устройство электроснабжения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии постоянного тока по кабель-тросу : пат. 2759118 Рос. Федерация от 03.07.2020 / Чех В.А., Рулевский В.М.

Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ

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

Отпечатано в типографии

Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. Тел. 8 (3822) 53-30-18.

Формат 60x84 1/16. Объём 1 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № 191. Подписано в печать 04.07.2022.