

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВО «СПбГМТУ»,

д.т.н., профессор  
Иликущенко Д.В.  
14 апреля 2019 г.

## О Т З Ы В

ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» на диссертационную работу Рулевского Виктора Михайловича **«Энергоэффективные системы электропитания глубоководных телеуправляемых подводных аппаратов»**, представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

### 1. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

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

Применение ТНПА на больших глубинах предполагает установку на борту подводного аппарата устройств со значительным энергопотреблением, таких как манипуляторы, двигатели, мощные осветительные приборы, а также бортовые модули управления, фото- и видеокамеры, гидролокаторы, гидроакустические системы подводной навигации, альтиметры, эхолоты и т.п. Энерговооруженность этих аппаратов может достигать 60 кВт и более. Для решения задач обеспечения электроэнергией такого сложного технологического оборудования значительно возрастает роль проектирования систем электропитания (СЭП) и оптимизации регуляторов силовых импульсных преобразователей, как основных элементов силового канала СЭП.

Диссертационная работа Рулевского В.М. посвящена решению важной научно-технической проблемы обеспечения стабильного электропитания глубоководных аппаратов при высоких энергетических характеристиках СЭП



в условиях изменяющихся параметров кабель-троса и режимов работы научно-исследовательского и технологического оборудования.

## 2. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертационная работа представлена в виде законченной научно-квалификационной работы и включает в себя: введение, семь глав, заключение, список литературы из 265 наименований. В введении дана общая характеристика работы, обосновывается актуальность проблемы, связь темы диссертации с научно-техническими программами, формулируется цель работы, ее научная новизна, практическое значение, описываются результаты внедрения и апробации работы.

В первой главе автором приведен аналитический обзор и общие тенденции развития необитаемых подводных аппаратов, представлены основные варианты выполнения систем электропитания подводных аппаратов при передаче энергии на переменном и постоянном токе по кабель-тросу, достоинства и недостатки.

Во второй главе представлены математические и имитационные модели разомкнутых систем электропитания глубоководных аппаратов, учитывающие компенсацию емкостной составляющей реактивной мощности в кабель-тросе и импульсный характер работы транзисторных ключей АИН. Полученные результаты на математических и имитационных моделях разомкнутой СЭП ТНПА значительно отличаются от требуемого номинального значения по условиям эксплуатации подводного аппарата, что потребовало введения регуляторов и построения замкнутой системы для проведения экспериментальных исследований на опытных образцах.

В третьей главе представлены методы синтеза оптимальных регуляторов напряжения на нагрузке СЭП с фиксированными значениями параметрических возмущений в зависимости от режимов работы полезной нагрузки ТНПА. Предложенные методы обеспечили построение не только модального, но и оптимального регулятора в форме пропорциональной отрицательной обратной связи по выходу СЭП на основе линеаризованной модели с интервальными значениями параметров кабель-троса и нагрузки.

Четвертая глава посвящена анализу особенностей конструкции кабель-троса, обоснованию выбора величины напряжения и частоты при передаче энергии по кабель-тросу на переменном токе, а также определению токовой нагрузки жил при заданной передаваемой мощности с учетом собственной емкости кабель-троса, которая является дополнительной нагрузкой емкостного характера для инвертора.

Пятая глава посвящена проектированию конструкции погружного трехфазного трансформатора для электротехнического комплекса системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата, а также методики теплового расчета при охлаждении в различных средах, что обеспечило нормальный тепловой режим в процессе эксплуатации и компенсации реактивной мощности кабель-троса.



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

Седьмая глава посвящена экспериментальным исследованиям системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе. Результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность имитационной модели замкнутой СЭП ТНПА и ее практическую применимость, так как расхождение между расчетными и измеренными параметрами выходного напряжения на нагрузке находится в пределах 13,7 %.

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

### 3. НАУЧНАЯ НОВИЗНА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Научной новизной обладают следующие результаты:

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

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

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

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



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

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

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

#### 4. СТЕПЕНЬ ОБОСНОВАННОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Достоверность научных результатов и выводов диссертационной работы обеспечивается строгим обоснованием расчетных методик и принимаемых допущений, корректным использованием современных методов научных исследований, а также подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями на макетных и опытно-промышленных образцах. Все разделы диссертационной работы логически взаимосвязаны, а выводы и рекомендации органически вытекают из материалов теоретических и экспериментальных исследований.

#### 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты диссертационной работы имеют важное значение для развития теории и практики проектирования энергоэффективных систем электропитания ТНПА. В работе были получены следующие значимые результаты:

- предложены новые схемные решения, позволяющие улучшить энергетические и массогабаритные показатели системы электропитания с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе.

- созданы программы в пакетах MatLab и Mathcad, реализующие математические и имитационные модели СЭП оптимальных регуляторов и позволяющие исследовать динамические процессы в разомкнутой и замкнутой системе при решении задач стабилизации напряжения на полезной нагрузке ТНПА.

- разработан алгоритм работы контроллера СЭП ТНПА, позволяющий осуществить управление, контроль и диагностику состояния всей системы с отображением информации на встроенном сенсорном мониторе для обеспечения безопасной и высокой энергетической эффективности работы подводного аппарата.



- предложена инженерная методика расчета погружного тороидального трансформатора системы электропитания, позволяющая обеспечить компенсацию реактивной мощности кабель-троса без дополнительных дросселей и требуемый тепловой режим в процессе его эксплуатации.

- разработаны и внедрены в промышленную эксплуатацию пять систем электропитания для телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов: «РТ-6000», «КМТС», «УМБК», «ТНПК» и «Магеллан-1» с глубиной погружения до 6000 метров и мощностью до 47 кВт.

## 6. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Результаты диссертационной работы целесообразно использовать на предприятиях и в организациях, занимающих разработкой и выпуском телеуправляемых и буксируемых необитаемых подводных робототехнических комплексов большой энерговооруженности с глубиной погружения до 6000 метров.

Новые решения по созданию энергоэффективных системы электропитания для телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов могут найти применение в работах Научно-учебного комплекса «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Института механики МГУ (г. Москва), АО «Южморгеология» (г. Геленджик), ЦКБ МТ «Рубин», ЦНИИ РТК (г. Санкт-Петербург), Института проблем морских технологий ДВО РАН (г. Владивосток), ЦНИИ «Гидроприбор» и др.

Теоретические и практические результаты диссертационной работы рекомендуется использовать в учебных курсах ВУЗов, связанных с электротехническими системами, электропитанием удаленных объектов, микропроцессорным управлением и преобразовательной техникой при выполнении аспирантами и студентами выпускных квалификационных работ.

## 7. ЗАМЕЧАНИЯ

1. Непонятно, с какой целью автор во второй главе исследует и сопоставляет результаты моделирования имитационной и математической модели разомкнутых СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном и постоянном токе?
2. В чем же заключаются явные преимущества оптимального регулятора, рассчитанного на основе квадратичного критерия качества, по сравнению с модальным регулятором? Очевидно, что тот и другой обладают свойством субоптимальности, поскольку методики синтеза их параметров базируются на линеаризованных моделях системы электропитания.
3. Каким образом влияет изменения длины и параметров кабеля в зависимости от глубины погружения ТНПА на работу СЭП?
4. При экспериментальном исследовании СЭП ТНПА используется имитатор трехфазного кабель-троса. Из работы не ясно, на сколько



точно он воспроизводит тактико-технические характеристики реального кабель-троса и чем это подтверждается?

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

Диссертационная работа Рулевского В.М. является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения и решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение - повышение энергоэффективности систем электропитания для глубоководных телеуправляемых подводных аппаратов, использующих сложное технологическое оборудование на глубинах до 6000 метров.

Представленная диссертационная работа выполнена на актуальную тему, связанную с основными направлениями экономического и социального развития страны, программами и планами развития промышленного производства, имеет научную и практическую значимость, результаты работы внедрены в промышленных и специальных подводных аппаратах различных типов.

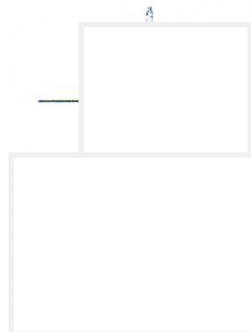
Считаем, что представленная диссертационная работа отвечает требованиям пп. 9 и 10 положения ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, кандидат технических наук Рулевский В.М. заслуживает ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы.

Диссертация Рулевского В.М. рассмотрена на заседании кафедры электротехники и электрооборудования судов 27 ноября 2019 г.

Содержание отзыва обсуждалось и единогласно утверждено на заседании кафедры электротехники и электрооборудования судов ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет».

Протокол № 9/19 от «27» ноября 2019 г.

д.т.н, профессор, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования судов ФГБОУ СПбГМТУ



А.А. Воршевский

д.т.н., профессор кафедры электротехники и электрооборудования судов ФГБОУ СПбГМТУ

А.П. Сеньков

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (СПбГМТУ)

190121, г. Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3

телефон: 714-07-61

e-mail: office@smtu.ru

*Отзыв получен 09.12.2019г  
М/Давко М.А.*

*С отзывом ознакомлен.  
Рулевский В.М. 6  
12.12.2019г.*