

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Рулевского Виктора Михайловича на тему «**Энергоэффективные системы электропитания глубоководных телеуправляемых подводных аппаратов**», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности **05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы»**

Актуальность темы

В диссертационной работе Рулевского В.М. поставлена и решается важная научно-техническая проблема обеспечения стабильного электропитания глубоководных аппаратов при высоких энергетических характеристиках системы электропитания (СЭП) в условиях изменяющихся параметров кабель-троса и режимов работы научно-исследовательского и технологического оборудования. Решение поставленной проблемы автор реализует через разработку теоретических основ проектирования таких систем и ряда оригинальных технических решений. Поскольку возможный спектр применения подобных систем электропитания достаточно широк, то тема рецензируемого диссертационного исследования актуальна и соответствует паспорту специальности 05.09.03, в частности, области исследования 3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления» и 4. «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Диссертационная работа содержит 352 страницы машинописного текста и состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 265 наименований, 148 рисунков, 28 таблиц, 12 приложений приложения на 26 стр.

Анализ содержания работы

Первая глава диссертации посвящена определению структуры системы электропитания глубоководных телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) и постановке задачи синтеза оптимального регулятора напряжения. В главе приведён достаточно подробный аналитический обзор состояния и общих тенденций развития необитаемых подводных аппаратов, результатом которого является их классификация, отмечены проблемные вопросы, препятствующие расширению их возможностей, к основным из которых отнесены недостатки систем электроснабжения ТНПА, сформулированы технические требования к характеристикам систем электропитания глубоководных ТНПА. На решение этих вопросов и направлено диссертационное исследование.

Кроме того, в главе проанализированы существующие варианты технических решения систем электропитания постоянного и переменного тока, приведена их краткая классификация и в качестве наиболее перспективной предложена система электропитания ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу переменным напряжением повышенной частоты, защищённая патент РФ № 126217.

Далее, в этой же главе дана постановка задачи синтеза оптимальных регуляторов систем электропитания и приведён вариант её решения, в результате чего автор приходит к выводу о том, что задача синтеза оптимального регулятора напряжения для систем электропитания с априорно известными параметрами, фиксированными режимами работы по критерию минимума обобщенной работы замкнутой системы, заключается в определении компонентов матрицы Риккати.

Основными научными и результатами первой главы диссертации, имеющими и практическую значимость, считаю обоснованную необходимость применения СЭП ТНПА со звеном повышенной частоты и передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе, а также постановку и решение задачи синтеза регулятора напряжения СЭП.

Во второй главе разработаны и 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. Для математического описания электромагнитных процессов в основном ключевом элементе СЭП, инверторе, автор обоснованно использует аппарат коммутационных функций. Математические и имитационные модели разработаны для СЭП с передачей энергии по кабель-тросу как на переменном, так и на постоянном токе, а результаты имитационного моделирования позволяют судить о характере процессов и оценить адекватность выбранной методологии исследования.

Следует отметить, что полученное математическое описание вносит определённый вклад в развитие теории и основ проектирования подобных систем электропитания.

В третьей главе представлен синтез оптимальных регуляторов напряжения на нагрузке СЭП с фиксированными значениями параметрических возмущений в зависимости от режимов работы полезной нагрузки ТНПА. Для обеспечения требуемой точности регулирования напряжения автор справедливо принимает структуру ПИ-регулятора, включая при математическом описании интегрирующее звено в модель объекта управления. При этом несколько изменяется и математическая формулировка оптимизируемого функционала.

Следует отметить, что для практической реализации оптимального регулятора синтезированный закон управляющего воздействия представлен в явном аналитическом виде на основе достаточно точных данных о параметрах элементов СЭП. Кроме того, разработан и реализован алгоритм создания упрощенной линеаризованной модели СЭП, в котором исходная математическая модель СЭП (или ее составных частей) аппроксимируется передаточными функциями на интервалах стационарности параметров для режимов холостого хода и номинальной нагрузки, что позволило использовать достаточно простые передаточные функции и в дальнейшем упростило схемную реализацию регулятора.

Далее автор рассматривает возможность синтеза модального регулятора с формированием желаемой передаточной функции СЭП и оптимального стаби-

лизирующего регулятора напряжения системы электропитания с отрицательной обратной связью по измеряемым переменным состояниям.

Таким образом в данной главе сосредоточены теоретические положения, позволяющие при определенных допущениях выполнить процедуру синтеза модальных и оптимальных ПИ-регуляторов напряжения в СЭП ТНПА на основе теории линейных систем.

Четвертая глава посвящена выявлению особенностей конструкции кабель-троса, обоснованию выбора величины напряжения и частоты при передаче энергии по кабель-тросу на переменном токе, а также определению токовой нагрузки жил при заданной передаваемой мощности с учетом собственной емкости кабель-троса. На основании разработанной схемы замещения выполнено исследование влияния ёмкостей кабель-троса на его энергетические характеристики. Предложено решение по компенсации этого влияния и даны рекомендации по выбору рациональных значений частоты и напряжения. Полученные выражения имеют потенциал более широкого применения, чем системы электропитания ТНПА. Следует отметить, что предложенное решение позволило скомпенсировать реактивную мощность, обусловленную емкостным током кабель-троса, без дополнительных дросселей, снизив при этом вес и габариты подводной части системы электроснабжения.

Пятая глава посвящена проектированию конструкции погружного трехфазного трансформатора для электротехнического комплекса системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата, а также разработке методики теплового расчета при охлаждении в различных средах с целью обеспечения нормального теплового режима 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, разработанные с участием автора. Значительная часть представленных здесь технических решений защищена патентами РФ. Показано, что эти решения позволяют обеспечить необходимую мощность от 10 до 47 кВт путем подключения унифицированных модулей, а также заданные удельные характеристики части СЭП, расположенной на борту подводного аппарата, не уступающие мировым аналогам.

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

В результате экспериментальных исследований макетного образца СЭП ТНПА при длине кабель-троса 6000 м получен ряд зависимостей изменения выходного напряжения на нагрузке $U_n(t)$ при пуске на холостом ходу и на номинальную нагрузку, при набросе и сбросе нагрузки, а также внешняя характеристика СЭП ТНПА. 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 составило не более 13,7 %.

Выводы, содержащиеся **в заключении**, обобщают теоретические и практические результаты диссертационной работы. Выводы достоверны, теоретически обоснованы и подтверждены результатами численных и физических экспериментов.

Оценивая изложенное, считаю, что **основными научными и наиболее важными практическими результатами работы** являются:

- предложенная структура СЭП ТНПА со звеном повышенной частоты и передачей энергии по кабель-тросу (до 8000 м) на переменном токе, которая позволяет обеспечить требуемое качество напряжения на подводном аппарате, высокие энергоэффективность и массогабаритные показатели системы;
- разработанные математические модели СЭП ТНПА и её отдельных элементов, которые позволяют исследовать с достаточной точностью статические и динамические процессы в системе с учетом реактивной составляющей тока кабель-троса при передаче энергии на переменном токе;
- методология синтез регуляторов, основанная на оптимизационных процедурах, которая позволяет получить структуру регуляторов, обеспечивающих требуемое качество напряжения в СЭП при изменении параметров кабель-троса и электрической нагрузки технологического оборудования ТНПА;
- разработанная методика и полученные математические соотношения СЭП ТНПА, которые дают возможность обоснованно подойти к выбору величины напряжения и частоты при передаче энергии по кабель-тросу на переменном токе с учетом его собственной емкости;
- теоретическое и экспериментальное обоснование целесообразности совмещения функций компенсирующих индуктивностей с функциями силовых трансформаторов (с учетом их индуктивностей рассеяния), что обеспечило улучшение массогабаритных показателей подводных частей систем электропитания телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов в 1,5–2 раза по сравнению с применением отдельных компенсирующих дросселей;
- предложенная и экспериментально проверенная методика теплового расчета погружных тороидальных трансформаторов (охлаждающая среда морская вода) с масляной заливкой;
- оригинальные технические решения, реализующие разработки автора и защищенные патентами Российской Федерации.

Содержание диссертации достаточно полно опубликовано в 58 научных работах, в том числе в 20 публикациях в изданиях, входящих в перечень ВАК для докторских диссертаций, 10 патентах РФ на изобретения и полезные модели, 5 статьях в изданиях Scopus и Web of Science, 2-х свидетельствах об официальной регистрации программ для ЭВМ и одной монографии.

Автореферат в достаточной степени отражает содержание диссертации.

Замечания по работе

1. Формулировка п.1 Научной новизны (стр.11) собственно научной новизны не содержит, это, скорее, практическая значимость.

2. Страница 24 открывается фразой «Радиопередающие, телевизионные и им подобные устройства нуждаются как в низковольтном, так и в высоковольтном постоянном напряжении, составляющем сотни вольт», при этом не понятно

– автор имеет ввиду напряжение постоянного тока или постоянное (стабильное) напряжение любого рода тока? Тем более, что на той же странице есть словосочетание «Допуск по переменному напряжению...».

3. Одним из основных требований к СЭП (стр. 27) автор называет «Высокое качество электрической энергии, т. е. постоянство значений напряжения и частоты», но понятие качества ЭЭ более широкое, чем стабильность напряжения и частоты.

4. В задаче АКОР важнейшее значение имеет выбор весовых коэффициентов, однако автор ограничивается замечанием о том, что «Выбор значений компонентов матрицы Q и коэффициента r представляет собой достаточно сложную задачу, решение которой в диссертации не рассматривается и является предметом дальнейших исследований.» (стр. 45) Можно ли в таком случае говорить о решении оптимизационной задачи?

5. На стр. 61 (то же и на стр.70 и 79) автор сначала говорит о том, что «При построении математической модели системы электропитания трансформаторы принимаются идеальными элементами с коэффициентами трансформации K_{p1} и K_{p2} », но далее отмечается, что «Для трансформатора TV1 учитывается индуктивность ветви намагничивания, приведенная ко вторичной обмотке L_{m2} », тогда в каком же смысле трансформаторы принимаются идеальными элементами?

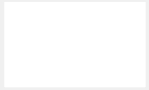
6. В выводах по главе 3 (стр.133) сказано: «В результате расчетов синтезирован комбинированный регулятор, включающий три регулятора, каждый из которых рассчитан на свой диапазон изменения нагрузки». С позиций терминологии теории автоматического управления было бы уместнее говорить о регуляторе с изменяющимися (или переключаемыми) параметрами.

7. При описании системы передачи электроэнергии по длинному кабелю, разработанной в США (стр.165, 166 и далее), сказано о дополнительно введенных компенсирующих индукторах. Почему используется термин «индуктор», а не «дроссель» или «реактор»? Ведь под индуктором обычно понимают катушку со сталью, создающую поле, а в данном случае их назначение несколько иное.

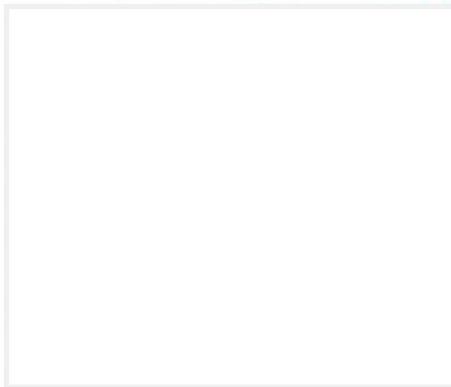
Общее заключение о соответствии выполненной работы требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям

Диссертация Рулевского Виктора Михайловича является законченным научным исследованием, посвященным разработке, структурному и параметрическому синтезу электротехнических комплексов и систем, направленных на обеспечение работоспособности и качества их функционирования в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях. Диссертация выполнена по актуальной тематике, логически выстроена, содержит новые теоретические результаты и имеет важную практическую значимость. Разработанные в диссертации теоретические положения можно квалифицировать как решение крупной научно-технической проблемы, имеющей важное значение для проектирования и создания телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов. Содержание работы соответствует специальности 05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы».

В целом диссертационная работа ««Энергоэффективные системы электропитания глубоководных телеуправляемых подводных аппаратов»» соответствует критериям п.п.9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы», а её автор, Виктор Михайлович Рулевский, заслуживает присуждения ему степени доктора технических наук по названной специальности.

Официальный оппонент, заведующий кафедрой «Электротехнические комплексы и системы» Политехнического института Сибирского федерального университета, д.т.н., профессор  Пантелеев Василий Иванович
01.12.2019 г.

Адрес: 660074, г. Красноярск, ул. акад. Киренского, 26
E-mail: vpanteleev@sfu-kras.ru
Тел. 8(391) 2275665



У ВО СФУ
Пантелеев В.И. заверяю
в Периодике
12 2019 г.

Отзыв на работу 03.12.2019 г. (Добро М.А.)

С отзывом ознакомлен.
Рулевский В.М.
09.12.2019 г.