

## ОТЗЫВ

на диссертацию 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

В связи с развернувшимся в последние десятилетия освоением ресурсов Мирового океана требуется проведение широкого спектра геолого-разведочных, обзорно-поисковых и других видов работ. В наибольшей степени решению этих задач отвечают телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) – робототехнические комплексы, оснащенные различной научно-исследовательской и специальной аппаратурой, которые требуют соответствующего электропитания. С учётом новизны данной области техники, обслуживающей данное направление, с позиции системного проектирования такого класса электротехнических комплексов (ЭТК) до настоящей работы практически отсутствовало информационно-методическое обеспечение (ИМО), необходимое для решения этой задачи на должном проектном уровне. Представленная работа направлена на её решение.

Объектом настоящего исследования является класс систем электропитания (СЭП) технологического оборудования глубоководных аппаратов с передачей энергии по кабель-тросу на переменном или постоянном токе. Таким образом, по существу, формально не провозглашённой, но объективно имеющей целью работы является создание информационно-методических предпосылок для создания систем электропитания (СЭП) глубоководных телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) и для разработки на этой основе систем данного класса, соответствующих требованиям ТЗ и современному уровню развития электротехники. Все признаки работы характеризуют её как поисковую НИОКР. В методологическом плане такая классификация способствует её оценке.

С учётом важности для экономики страны разработки эффективных подводных робототехнических комплексов данного назначения, актуальность решения поставленных в работе задач сомнений не вызывает.

Кратко о содержании работы.

В 1-й главе соискатель формулирует поле исследования в виде 6 задач и далее последовательно их решает. Предварительно на основе проведённого обзора зарубежных и отечественных работ в исследуемом направлении он фиксирует состояние и общие тенденции развития необитаемых подводных аппаратов и приходит к выводу, что в мировом масштабе мы находимся здесь пока ещё не в числе лидеров. В чём-то это даже как-то «ободряет», – значит есть над чем работать! Выполненный обзор позволил соискателю представить наиболее общую классификацию самоходных ТНПА. Общепризнанной классификации в этой сфере робототехники пока еще не сложилось. Поскольку необходимое ИМО для СП на сегодня отсутствует, то можно считать, что предложенная в работе первая его версия восполняет этот пробел.

Обозначая многомерность направлений исследований, соискатель приводит перечень требований, предъявляемых к СЭП ТНПА, который в первом приближении состоит из 15 пунктов. Среди них присутствуют и традиционные для автономных объектов: минимальные масса и габариты при максимально возможном значе-



нии к.п.д. и высоком (заданном) качестве электрической энергии на выходе и входе СЭП. С учётом этих требований соискатель проводит *синтез альтернативных структур СЭП* с линией электропередачи (ЛЭП, она же кабель-трос) для ТНПА *как на переменном, так и на постоянном токе*, по сути, начиная разработку «с чистого листа», т.е. с нулевой информации об известных структурах, что подтверждается 7-ю полученными патентами на синтезированные с его непосредственным участием полезные модели. Причём при использовании ЛЭП переменного тока соискатель рассматривает варианты с передачей энергии на частотах 50 Гц и 1000 Гц. В результате проведённого сопоставительного анализа (и приобретённого опыта практической работы в этом направлении) *он приходит к следующему выводу: СЭП на переменном токе повышенной частоты (порядка 1000 Гц) в настоящее время являются наиболее простыми в изготовлении и обслуживании, а также имеют лучшие массогабаритные показатели по сравнению с СЭП на постоянном токе и на переменном токе промышленной частоты.*

Главу 1 соискатель заканчивает постановкой задачи синтеза регулятора напряжения в рассматриваемой СЭП, используя при этом основные положения теории оптимизации и последовательно выполняет процедуры аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР). Основываясь на обзоре публикаций по этой части темы диссертации и на предварительном анализе (на качественном уровне) входных и выходных переменных состояния основных узлов СЭП, *он принимает при этом допущение о возможности использования математического описания исследуемой системы в классе линейных непрерывных динамических моделей с нестационарными параметрами*, одновременно отмечая при этом, что правомерность такого допущения количественно подтверждается в работе результатами моделирования реальных режимов работы СЭП (приведёнными во 2-ой и 3-ей главах).

**Глава 2** посвящена математическому и имитационному компьютерному моделированию (ИКМ) СЭП глубоководного ТНПА. При моделировании СЭП соискатель принимает *перечень общепринятых допущений, который на первых этапах исследований представляется оправданным*. Последовательное их снятие обычно производится на этапах параметрической оптимизации. Кабель-трос при моделировании реализован в виде схемы замещения *с сосредоточенными параметрами*, причём дроссели компенсации (ДК) в цепи трёхфазной ЛЭП переменного тока включены последовательно.

Здесь получены следующие основные результаты:

1. Для вариантов СЭП ТНПА без контура отрицательной обратной связи (КООС) по напряжению с передачей энергии по ЛЭП (кабель-тросу – далее КТ) как на переменном, так и на постоянном токе при различных коэффициентах модуляции инвертора напряжения (ИН) для основных режимов её (СЭП) работы разработаны:

- математические модели узлов СЭП и СЭП в целом;
- имитационные компьютерные модели узлов СЭП и СЭП в целом (их ИК-модели) в пакете *MatLab 7.0 – Simulink*.

2. Полученные на их основе *результаты* исследования (этих двух способов моделирования) и их сопоставление показали *высокую сходимость* (порядка  $5\div 7\%$ ).

3. С целью упрощения математической модели СЭП за счёт понижения порядка описывающей её системы уравнений, трансформаторы представлены иде-



альными передаточными звеньями. При этом показано, что сделанные допущения не оказывают значительного влияния на точность моделирования.

3. В качестве алгоритма управления трёхфазным инвертором напряжения (ТИН) *использован современный энергоэффективный алгоритм ШИМ*, характеризующийся введением в закон модуляции гармоник нулевой последовательности соответствующего содержания. Такой алгоритм известен также как трапецеидальный или «квазитрапецеидальный» закон ШИМ и на сегодня считается одним из лучших.

4. Для исследования проблемы компенсации ёмкостной составляющей тока кабель-троса (КТ) в математическую модель СЭП в цепь трёхфазной ЛЭП последовательно введен блок, описывающий работу дросселя компенсации (ДК).

5. На основе моделирования режимов работы в разомкнутой СЭП с КТ (без КООС по напряжению) *показано, что напряжение на нагрузке нестабильно и может изменяться в широких пределах*. В режиме, близком к холостому ходу, напряжение больше номинального на 44,6 %, а при работе на номинальную нагрузку – на 23,3 %.

6. Полученные в главе 2 результаты составляют значительную часть информационно-методического обеспечения (ИМО) для системного проектирования СЭП данного класса. На их основе могут решаться задачи параметрической (и возможно даже структурной) оптимизации СЭП.

В главе 3 приведены теоретические положения, позволяющие на основе теории линейных систем, при определенных (принятых) допущениях, выполнить процедуру синтеза *модальных и оптимальных ПИ-регуляторов* напряжения в СЭП ТНПА, причём не только с традиционно внешними, но и с *внутренними* параметрическими возмущениями, обусловленными КТ. Таким образом, в данном случае в качестве последних выступают, как изменяемая электрическая нагрузка ТНПА, так и *изменяемые в соответствии с этим характеристики КТ, включая и изменяемую его длину*. Для СЭП они являются существенными внешними и внутренними возмущающими факторами, которые к тому же имеют и нелинейный характер. В работе соискатель рассматривает два подхода к синтезу оптимальных регуляторов напряжения в СЭП.

Как уже отмечалась, указанную нелинейность характеристик узлов СЭП, проявляющуюся в различных режимах работы ТНПА, можно аппроксимировать кусочно-линейными (передаточными) функциями, а для каждой линейной части в регуляторе синтезировать свой КООС по соответствующему возмущающему параметру. Такой подход оправдан, так как позволяет значительно уменьшить число дифференциальных уравнений и обеспечить реализацию в реальном времени алгоритмов управления инвертором напряжения на контроллерах с ограниченными вычислительными возможностями. Решая в соответствии с этой концепцией задачу синтеза регулятора напряжения, он проводит аппроксимацию экспериментально снятых внешних характеристик СЭП (в разомкнутой системе) соответствующими математическими моделями и создаёт основу для практической реализации регуляторов.

Соискатель рассматривает *два способа* практической реализации такого (специфического) регулятора с набором нелинейных возмущающих воздействий *по нагрузке и по внутренним параметрам* СЭП (определяемых КТ). При этом (для СЭП мощностью 48 и 21 кВт) он проводит:



– *синтез ПИ-регулятора* традиционным способом путём использования в КООС трёх вариантов ПИ-корректирующих цепочек, каждый из которых по сигналу управления обслуживает определённый диапазон изменяемой нагрузки;

– *синтез модального регулятора по методу желаемой передаточной функции* путём использования в КООС двух цепочек, выполненных на основе фильтра Баттерворта с определёнными параметрами. Показано, что при этом обеспечивается заданная точность и длительность переходного процесса без значительного перерегулирования.

Синтезированные регуляторы (двух типов) с несколькими специально настроенными КООС соискатель обозначает комбинированными оптимальными регуляторами. На основе использования упрощённой модели передаточной функции СЭП (определённой экспериментально) изучены варианты построения оптимальных регуляторов в СЭП при стабилизации: а) напряжения на входе инверторного звена (т.е. на его входном конденсаторе); б) а также напряжения на нагрузке. Даны рекомендации по их применению.

На основе проведенных исследований *показано*, что для стабилизации напряжения во всех режимах работы системы электропитания с погрешностью, не превышающей 10 % через 20 мс от начала переходного процесса, *необходимо в оптимальном регуляторе использовать два или три (в зависимости от способа их реализации) настроенных соответствующим образом КООС*, каждый из которых работает в своем диапазоне регулирования. Переключение КООС производится по сигналу, поступающему от системы управления.

В главе 4 приводится информация о конструктивном исполнении и параметрах кабель-тросов располагаемых типоразмеров, даётся анализ их влияния на работу СЭП глубоководных ТНПА с передачей энергии на глубину до 6000 м и даются рекомендации по выбору конструкции и электрических параметров кабель-троса (рабочих значений его напряжения, тока и частоты). С целью упрощения однозвенная и трёхзвенная схема замещения КТ представлены сосредоточенными (*а не распределёнными*) элементами  $R$  и  $C$  без учёта  $L$ .

Отмечается, что для уменьшения установленной мощности СЭП путём компенсации паразитного ёмкостного тока в ЛЭП (в виде КТ) в известных решениях используют компенсирующие дроссели (ДК), устанавливаемые (параллельно) в начале и в конце ЛЭП. *Показано*, что в структурах СЭП, содержащих согласующие трансформаторы, при соответствующем проектировании последних *функцию ДК можно возложить на них*. Несмотря на некоторое ухудшение энергетических и массогабаритных показателей модифицированных таким образом трансформаторов, как отмечает соискатель, *удастся улучшить эти показатели для СЭП в целом* (относительно варианта-прототипа, в котором используются ДК отдельно). При этом отмечается, что в варианте, когда функция компенсирующих индуктивностей совмещена с функцией трансформатора только в начале ЛЭП, а в её конце ДК и трансформатор выполняются порознь, обеспечиваются лучшие (в 1,5–2 раза) массогабаритные. При этом улучшаются также энергетические и стоимостные показатели СЭП.

Соискатель приводит также свои соображения (*достаточно общего характера*) по выбору частоты напряжения в ЛЭП.

Глава 5 посвящена тепловому расчёту погружных трансформаторов (ПТр) систем электропитания глубоководных аппаратов.

Учитывая, что ПТр работает в морской воде, являющейся одновременно хо-



рошим электролитом и агрессивной средой, был разработан герметичный вариант конструкции с заливкой маслом. На основе анализа тепловых режимов работы и конструктивных особенностей погружных трансформаторов *предложена конструкция ПТр ТНПА* на базе трех однофазных тороидальных трансформаторов, позволяющая обеспечить нормальный тепловой режим работы во всем диапазоне нагрузок при высоких массогабаритных показателях системы. В результате экспериментально выполненных работ *предложена методика теплового расчета* погружного трансформатора, размещенного в герметичном баке с масляной заливкой (*охлаждающей средой является или воздух, или морская вода*).

На основе проведенных экспериментальных исследований *показано, что точность* расчетных значений температур перегрева трансформатора относительно экспериментальных данных находится *в пределах  $\pm 14\%$* .

В главе 6 *приведены результаты технической реализации СЭП* глубоководного аппарата: даются краткое описание и основные технические характеристики бортовой её части с передачей энергии по КТ на переменном токе с условным разделением её блоков на две основные части: бортовую (БЧ) и подводную (ПЧ). При этом БЧ СЭП выполняет 5 функций: 1) обеспечивает на её выходе трехфазное напряжение частотой 1000 Гц для подачи в КТ с линейным напряжением, не превышающим 1500 В при максимальной нагрузке в ПЧ, равной 47 кВт; 2) стабилизацию напряжения на входе ПЧ в пределах  $\pm 5\%$  от номинального напряжения с учетом падения напряжения на КТ при максимальной нагрузке; 3) регулировку системы компенсации потерь в кабель-тросе при изменении резистивной составляющей сопротивления токопроводящей жилы в пределах от 0 до 19,2 Ом; 4) управление и информационный обмен в режиме дистанционного управления (ДУ) от пульта дистанционного управления (ПДУ); 5) контроль выходного напряжения и сопротивления изоляции с индикацией и протоколированием данных.

Отрицательным сигналом обратной связи является пропорциональное выходное напряжение БЧ СЭП, регистрируемое при помощи датчиков напряжения в БП (блоке преобразования). ???

Для компенсации падения напряжения в ЛЭП в качестве положительной обратной связи в этом же регуляторе используется напряжение, пропорциональное выходному току БЧ СЭП.

Соискатель отмечает, что построение системы стабилизации напряжения в бортовой части СЭП ТНПА позволило обеспечить удельные характеристики системы электропитания подводной части подводного аппарата не менее 2,5 Вт/кг, что сопоставимо с мировыми показателями.

### **Глава 7 посвящена экспериментальному исследованию СЭП ТНПА**

Соискатель даёт описание экспериментальной установки СЭП с передачей энергии на переменном токе.

Бортовая часть СЭП ТНПА обеспечивает преобразование трехфазной сети 380 В 50 Гц в трехфазное напряжение 1500 В частотой 1000 Гц. Полученное напряжение поступает в *имитатор кабель-троса* и с выхода кабель-троса подается в подводную часть СЭП ТНПА. К выходным клеммам 600 В подводной части СЭП ТНПА подключена переменная нагрузка  $R_{nvar}$ , при помощи которой меняется мощность нагрузки от номинального значения до холостого хода. В ходе эксперимента осуществляется измерение и контроль выходных значений напряжения и тока. С помощью осциллографа производится запись выходных параметров СЭП при пуске, сбросе и набросе нагрузки от холостого хода до номинальной. Программа и



методика исследований направлена на проверку соответствия макетного образца СЭП ТНПА требованиям технических характеристик, полноты и объективности контролируемых параметров. *Разработанная экспериментальная установка и методика исследований СЭП ТНПА* позволяет воспроизводить все её основные, как автономные, так и дистанционные режимы работы.

Показано, что предложенные алгоритмы работы СЭП ТНПА обеспечивают согласованное функционирование всех её узлов и элементов. *Результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность имитационной модели замкнутой СЭП ТНПА и её практическую применимость.* Расхождение между расчетными и измеренными параметрами выходного напряжения на нагрузке находится в пределах  $\pm 10\%$ .

**В Заключении** формулируются основные итоги работы и отмечаются элементы её научной новизны и практической значимости, что отражено в отзыве при анализе содержания глав, также и в автореферате.

Полученные результаты в объеме ИМО СП имеют научную и практическую значимость, а их *достоверность* подтверждается использованием: классических методов анализа электрических и магнитных цепей, методов математического моделирования, известных теоретических положений современной теории автоматического регулирования, а также проверкой результатов на адекватность различными способами – аналитическими, компьютерным и натурным моделированием.

Чёткая логическая взаимоувязка всех частей работы, подтверждает единство авторского замысла и свидетельствует о **преимущественном личном вкладе соискателя в выполненную работу**, который сформулирован им и в автореферате.

Автореферат достаточно полно отражает объём выполненной и представленной в диссертации работы.

Укрупнённо научную новизну работы можно сформулировать следующим образом: *изложены результаты разработки нового класса электротехнических комплексов (ЭТК, конкретно СЭП), обеспечивающих электропитание телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА).* Показано, что *эффективное решение проблемы разработки и проектирования не простой многозвенной структуры ЭТК (среди которых кабель-трос оказался наиболее проблемным), в соответствии с поставленными требованиями, с неизбежностью приводит к реализации и использованию концепции системного проектирования (ИСП).* В его рамках соискателем решен комплекс задач по определению рациональных структур, как ЭТК, так и её звеньев, алгоритмов управления ими, а также по согласованию характеристик звеньев между собой. При этом проведено сопоставление вариантов структур СЭП с передачей по кабель-тросу электроэнергии как на переменном (на двух частотах), так и на постоянном токе. Охват вариантов и проблем достаточно велик, что характеризует соискателя как целенаправленно и уверенно идущего к поставленной цели, невзирая на объективно имеющиеся трудности. Очевидно, что таким образом вероятность случайного пропуска лучшего решения он пытается свести к минимуму. *Для ряда звеньев, в частности, для кабель-троса и погружного трансформатора, ему пришлось разработать методики их проектирования, а при разработке средств стабилизации напряжения СЭП с внутренними параметрическими возмущениями ему удалось предложить также и новые решения и в конечном счёте выполнить ТЗ на разработку СЭП.*



Экспериментально показано, что принятые при проектировании ЭТК допущения дают отклонение установившегося значения его выходного напряжения не более 10%. Более подробно научная новизна объективно изложена в диссертации и в автореферате.

*С учётом вышеизложенного с учётом принятых допущений результаты диссертационной работы могут быть компактно сформулированы как создание 1-й версии информационно-методического обеспечения (ИМО) системного проектирования средств электропитания (СЭП) погруженных ТНПА с протяжённой линией (кабельного типа) электропередачи переменного и постоянного тока.* Наличие ИМО даже ещё в не достаточно завершённом объёме (из-за допущений), тем не менее, позволяет уже значительно сузить число подлежащих сопоставительной оценке альтернативных вариантов и для инженерной практики обеспечивает оперативный выбор из них не худших решений, которые подлежат более углубленной параметрической оптимизации. Таким образом, ИМО, в первую очередь, необходимо для обоснованного решения задач структурно-алгоритмического синтеза разрабатываемой СЭП, которое, во-первых, определяет содержание 1-го этапа ИСП, обеспечивая формирование облика разрабатываемого объекта. А, во-вторых, *по мере решения задачи ИМО в должном объёме (в соответствии с концепцией ИСП) открываются новые возможности для дальнейшего совершенствования такого класса СЭП на основе последовательного снятия принятых допущений с последующей углубленной параметрической их оптимизацией.*

*Наряду с теоретической следует отметить и большую практическую значимость выполненной на достаточно высоком научном уровне конкретной разработки, имеющей важное значение для развития промышленно-экономического и оборонного потенциалов страны.*

#### Замечания

1. Одну из проблемных задач, решаемых в работе, создаёт протяжённый (до 6 км) кабель-трос (КТ), соединяющий систему электропитания (СЭП) с ТНПА. Свойства КТ в данном его применении при передаче электроэнергии напряжением переменного тока практически не изучены. Реально распределённые по длине КТ ёмкостные, индуктивные и резистивные сопротивления определяют особые его свойства, на исследование которых требуется отдельная НИР, заставили соискателя принимать соответствующие упрощающие допущения, что в итоге привело к проявлению не ожидаемых в СЭП эффектов и находить необходимые средства по их ослаблению (или устранению). *В итоге, наряду с найденным здесь соискателем не худшим решением проблемы (путём использования компенсирующих дросселей – КД), для последующих работ в этом направлении, по сути, поставлена задача по детальному исследованию свойств КТ с целью выявления (изыскания) более эффективных и физически аргументированных решений.*

1.1. *В связи с вышеизложенным, можно не согласиться с целесообразностью использования автором последовательного включения КД в линию электропередачи (ЛЭП), а не параллельного, как в указанном им патенте США, так как это с очевидностью должно приводить к ухудшению не только энергетических, но и массогабаритных показателей, как трансформатора, так и СЭП.*

1.2. *Эффективность идеи совмещения в трансформаторе имманентной*



*его функции трансформации с функцией компенсации реактивной мощности, к сожалению, в работе не доказана количественно.* Представляется, что энергетические показатели трансформатора (при передаче той же активной мощности) здесь должны быть хуже (из-за возрастания тока ХХ).

2. В поисках лучшего практического решения задачи стабилизации напряжения на нагрузке (ТНПА) соискатель в рамках теории линейных систем исследует и использует два способа – традиционный с ПИ корректирующими цепочками в контуре отрицательной обратной связи (КООС) и способ модального управления. Задачу он решает для конкретной структуры СЭП (с учётом КТ) двумя способами: аналитическим и на основе имитационного компьютерного моделирования (ИКМ). При этом он приводит все необходимые результаты решения, однако, *аргументированные рекомендации о предпочтительности выбранного им способа управления (с целью стабилизации напряжения в СЭП) он так и не приводит.*

3. Изначально задачу синтеза структуры СЭП для ТНПА соискатель (в обзорной части) решает в нескольких вариантах. Однако, в результате предварительного отбора он для сопоставительных исследований оставляет, по сути, две основные конкурирующие между собой структуры – с ЛЭП: а) на переменном токе на частоте 1000 Гц; б) и на постоянном токе. На первый взгляд, после сопоставления всех трудностей, которые ему пришлось преодолеть в первом варианте, *практическая реализация второго варианта представляется потенциально более простой, менее ресурсоёмкой и более энергоэффективной. Однако, соискатель приходит к другому выводу – он отдаёт предпочтение ЛЭП переменного тока, не приводя при этом должной аргументации (на количественном уровне).*

4. Сегодня компьютерные технологии во многих случаях освобождают разработчика от аналитического модельного описания рабочих процессов (и особенно в электронных устройствах). Например, графический редактор в программном обеспечении *OrCAD Pspice Schematics* берёт на себя эту процедуру и обеспечивает решение задач модельного описания большинства электротехнических задач и решение их численными методами. При этом проверка результатов на адекватность обеспечивается известными способами, например, путём использования критерия энергетического баланса. *Дублирование результатов ИКМ (ручным) аналитическим методом не представляется целесообразным и, прежде всего из-за несоизмеримых затрат времени. Замечание относится, прежде всего, к модельному описанию процессов в трёхфазном инверторе (ТИН) с ШИМ. Не указано смысловое значение дублирования.*

5. *Выявленное в процессе исследований (в главе 2) существенно завышенные отклонения (в сторону увеличения) значений внешней характеристики СЭП от ожидаемой можно объяснить, скорее всего, упрощённой моделью кабель-троса, из-за не учёта в ней распределённых параметров  $R, L, C$ , последовательным включением Д-К, а также возможными свойствами выходного фильтра ТИН, параметры которого, не исключено, что были переразмерены. К сожалению, информация о параметрах фильтров и об искажениях выходного напряжения в начале ЛЭП и в её конце (в виде осциллограмм) в работе не приводится.*

6. Фильтры являются неотъемлемой частью СЭП. Не рациональное определение значений их параметров может существенно влиять на характеристики и показатели СЭП. *Перечисляя требования к качеству выходного напряжения СЭП, следовало бы оговаривать и выполнять требования к этим показателям не только в динамике, но и в квазистатике – об уровне пульсаций при использова-*



нии ЛЭП постоянного тока, и о коэффициенте гармоник выходного напряжения  $K_{Г(У)}$  – при использовании ЛЭП переменного тока. Разумеется, затронуть в должном объёме все вопросы идеального системного проектирования (ИСП) в первоначальной версии ИМО практически не реально, однако, *при экспериментальных исследованиях образцов СЭП целесообразным было бы приводить соответствующие осциллограммы процессов, в сжатом формате дающие ответы (или подсказки) на многие вопросы физического и концептуального характера.*

7. О выборе тактовой частоты. Для различных по физической природе звеньев СЭП оптимальное значение рабочей частоты  $f_p$  различно и зависит от критерия проектирования. Например, в соответствии с известными публикациями при нормальных условиях охлаждения для трансформаторов мощностью от единиц до десятков кВА на магнитопроводах из аморфных сплавов по критерию минимума массы при заданном перегреве частота  $f_p$  лежит в области  $f_p=20\div 30$ кГц. Для дросселей переменного тока примерно такой же диапазон. *С учётом этого принятое в работе значение тактовой частоты ШИМ  $f_{\tau}=48$ кГц для дросселей фильтра представляется завышенным и требует обоснования, тем более, что для транзисторов по критерию динамических потерь в них частота  $f_{\tau}=30$ кГц предпочтительнее, чем  $f_{\tau}=48$ кГц.*

8. Неясно, каким образом результаты измерений напряжения в конце ЛЭП (в подводной её части) передавались на БЧ СЭП ?

9. Каким образом при экспериментальных исследованиях проверялась адекватность имитатора ЛЭП (К-Т) на переменном токе?

10. Использование термина «оптимальный регулятор» обязывает автора указывать на тот параметр, по которому производится оптимизация.

### Заключение

Отмеченные замечания, в конечном счёте (с учётом практически значимого решения поставленной задачи), не подвергают сомнению полученные в работе результаты и не снижают общей положительной её оценки, а лишь могут способствовать пониманию важности их решения в последующих разработках подобного типа. Работа выполнена по актуальной тематике, во многом имеет поисковый характер, является самостоятельным и вполне законченным научным исследованием, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, а также свидетельствует о преимущественном личном вкладе автора в решение поставленных задач. Диссертационная работа вносит существенный вклад в практическое освоение процедуры структурно-алгоритмического и параметрического синтеза рассматриваемого класса систем электропитания и может рассматриваться как создание 1-й версии информационно-методического обеспечения для системного их проектирования.

**Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных автором исследований изложены научно обоснованные технические, технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие промышленного и оборонного потенциалов страны.**



Выполненная работа удовлетворяет квалификационным требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а ее автор Рулевский Виктор Михайлович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Официальный оппонент

д.т.н., профессор кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов и электрический транспорт» НИУ «МЭИ»

профессор  Мыцык Г.С.

Подпись руки Г.С. Мыцык

Удостоверяю:  
Начальник управления по работе с персоналом Савин Н.Г.

  
Г. Савин

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

*С отзывом ознакомился*

*Рулевский В.М.  
12.12.2019г.*