На правах рукописи

Рулевский Виктор Михайлович

# СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА БОЛЬШОЙ ЭНЕРГОВООРУЖЕННОСТИ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2006

#### Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Дементьев Ю.Н.
Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Обрусник В.П.
кандидат технических наук, доцент Орлов Ю.А.
Ведущая организация: ООО Научно-производственное

Защита состоится «27» декабря 2006 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета К 212.269.03 в ауд.217 8 учебного корпуса Томского политехнического университета по адресу 634050, г. Томск, ул. Усова 7.

компания»

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета, по адресу: 634034, ул. Белинского 55.

Автореферат разослан «24» ноября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н., доцент

Ю.Н. Дементьев

предприятие «Томская электронная

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы.* Необходимость оценки и вовлечения в промышленный потенциал минеральных ресурсов Мирового океана поставила задачу создания и эксплуатации подводных технических средств, обеспечивающих проведение геологических исследований на морском дне в пределах больших площадей с высокой качественной достоверностью. В наибольшей степени решению этой задачи на этапе региональных, поисковых и поисковооценочных работ отвечают телеуправляемые подводные аппараты (ТПА), оснащенные различной научно-исследовательской аппаратурой.

Использование научно-исследовательской, фотографической и телевизионной аппаратуры на больших глубинах требует применения мощных осветительных приборов и устройств со значительным энергопотреблением, работающих как в длительном, так и в импульсном режимах. Суммарная мощность токоприемников телеуправляемых подводных аппаратов достигает нескольких киловатт, поэтому вопросы энергоснабжения ТПА приобретают весьма важное значение при проектировании подводных аппаратов.

Выбор систем электропитания (СЭП) ТПА определяется рядом требований, среди которых главную роль играют величина передаваемой мощности, время непрерывной работы без поднятия аппарата на борт обеспечивающего судна и объем информации, которой обмениваются между собой аппарат и обеспечивающее судно.

Для ТПА, как отмечалось выше, важнейшее значение имеет система электропитания, а именно преобразование и передача энергии по кабель-тросу. Причем следует отметить, что рост объемов поставленных и выполняемых задач с помощью ТПА на предельных глубинах ведет к увеличению требуемой полезной мощности СЭП, которую необходимо передавать и преобразовывать.

Выбор требуемых мощностей СЭП ТПА существенно влияет на массогабаритные характеристики не только основных устройств, входящих в состав СЭП ТПА, но и самого ТПА, кабель-троса и заглубителя.

Решению общих и специальных вопросов СЭП на базе статических преобразователей посвящены работы Т.А. Глазенко, В.Е. Тонкаля, В.С. Моина, В.А. Лабунцова, Э.М. Ромаша, А.В. Кобзева, В.П. Обрусника, Г.С. Мыцыка, Б.П. Соустина, Р.Т. Шрейнера, А.Г. Гарганеева и др.

Широкий круг вопросов общего теоретического и практического характера в проблеме создания СЭП для специальных потребителей вышеуказанными авторами и коллективами решены.

Однако вопросы разработки, углубленного теоретического и практического исследования высокоэнергетических СЭП ТПА при работе на предельных глубинах с учетом параметров кабель-троса, рекомендаций по выбору и построению согласующих погружных трансформаторов ТПА, статического преобразователя и других устройств, во многом пока изучены недостаточно, что затрудняет проектирование и создание высокоэффективных СЭП ТПА. Исходя из вышеизложенного, следует отметить, что на сегодняшний день разработка и создание эффективных и высоконадежных глубоководных ТПА в значительной степени зависит от усовершенствования систем электропитания, а именно оптимизации сопряжения информационного и энергетического каналов передачи энергии по единому кабель-тросу и обеспечение стабильного напряжения на потребляющих нагрузках при наименьших массогабаритных показателях. Поэтому теоретические исследования таких систем и вопросы их проектирования чрезвычайно актуальны и имеют практическую ценность.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью настоящей работы является решение комплекса научных и технических проблем, связанных с разработкой нового поколения систем электропитания электротехнического комплекса телеуправляемого подводного аппарата, обеспечивающих достаточную мощность генерируемой электроэнергии и имеющих высокие массогабаритные характеристики.

Достижение указанной цели потребовало решение следующих задач:

1. Проведение анализа современного состояния СЭП ТПА.

2. Обоснование границ применения вариантов СЭП ТПА.

3. Обоснование выбора напряжения и частоты переменного тока в кабельтросе.

4. Обоснование требований к параметрам кабель-троса и анализ его конструктивных особенностей.

5. Анализ тепловых режимов погружных трансформаторов подводной части СЭП ТПА.

6. Разработка схемотехнических моделей СЭП ТПА для исследования динамических характеристик.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись теоретические и экспериментальные методы исследований. В качестве основных методик теоретического исследования применялись: классические методы электрических и магнитных цепей, методы теории автоматического регулирования, методы математического моделирования. Исследования проводились с применением программы Simulink пакета MatLab 7.0. Отдельные теоретические результаты подтверждены экспериментальными исследованиями, выполняемыми на реальных макетных образцах в лабораторных и производственных условиях с использованием специально разработанных стендов и методик.

Достоверность научных результатов, изложенных в работе, определяется строгим обоснованием расчетных методик и принимаемых допущений, корректным применением современных методов научных исследований, а также подтверждается экспериментальными исследованиями, полученными на макетном образце. Все разделы диссертационной работы логически взаимосвязаны, а выводы и рекомендации органически вытекают из материалов теоретических и экспериментальных исследований.

*Научная новизна* диссертационной работы заключается в теоретических и практических исследованиях, сущность которых состоит в следующем:

1. Разработана и предложена структура СЭП ТПА со звеном повышенной частоты и способом передачи энергии по кабель-тросу на переменном токе, обеспечивающая непрерывное энергоснабжение токоприемников ТПА при наименьших массогабаритных показателях.

2. Разработана методика расчета напряжения переменного тока кабельтроса, позволяющая обоснованно подойти к выбору величины напряжения в кабель-тросе и определить токовую нагрузку коаксиальной пары при заданной передаваемой мощности с учетом собственной емкости кабель-троса.

3. Предложена новая конструкция герметичного с масляной заливкой трехфазного погружного трансформатора СЭП ТПА, обеспечивающая нормальный тепловой режим работы во всем диапазоне нагрузок в различных средах охлаждения.

4. Разработана методика теплового расчета погружных трансформаторов СЭП ТПА, позволяющая за счет введения экспериментально определенного эмпирического коэффициента для заданной конструкции значительно увеличить точность полученных расчетных результатов.

# Практическая ценность работы.

1. Разработанная схема СЭП ТПА обеспечивает передачу энергии большой мощности свыше 30 кВт на глубину до 6000 м морского дна, а также стабилизацию напряжения на потребляющих нагрузках при высоких массогабаритных показателях.

2. Созданный макетный образец СЭП-30 ТПА позволяет получить требуемые выходные характеристики в электротехническом комплексе СЭП ТПА и исследовать электромагнитные процессы, протекающие в системе, при различных режимах работы.

3. Предложенная методика расчета тепловых режимов погружного трансформатора СЭП ТПА позволяет обоснованно подойти к выбору конструкции трансформатора для обеспечения нормального теплового режима в процессе эксплуатации.

#### Основные защищаемые положения.

1. Принципы построения и структура СЭП ТПА, обеспечивающая непрерывное энергоснабжение токоприемников ТПА с улучшенными массогабаритными показателями.

2. Методика расчета напряжения переменного тока при передаче энергии по кабель-тросу, позволяющая обоснованно подойти к выбору величины напряжения в кабель-тросе и определить токовую нагрузку коаксиальной пары при заданной передаваемой мощности с учетом собственной емкости кабель-троса.

3. Методика теплового расчета предлагаемой конструкции погружного трансформатора СЭП ТПА для различных режимов работы и в различных средах охлаждения с целью обеспечения нормального теплового режима.

4. Комплекс теоретических и экспериментальных исследований.

**Реализация результатов диссертации работы.** Результаты диссертационной работы использованы при выполнении ряда научно-исследовательских тем, а также в проектно-конструкторской деятельности ФГНУ НИИ Автоматики и электромеханики при ТУСУРе при разработке в виде технических предложений по выполнению конструктивных схем системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата СЭП-30 ТПА. Методика расчета напряжения кабель-троса с существенной собственной емкостью и методика теплового расчета тороидального трехфазного трансформатора с масляной заливкой в герметичном баке при охлаждении в воздушной среде, либо в воде внедрена в учебном процессе Северской государственной технологической академии при изучении курсов «Преобразовательная техника в электроприводе» и «Электрические машины и трансформаторы», а также в учебном процессе Томского политехнического университета при подготовке студентов направления 14.06.00 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии.».

Подтверждением реализации результатов диссертационной работы является наличие трех актов о внедрении.

Апробация работы. Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрения на Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «СТТ», Томск, 2004-2006 гг.; VIII Всероссийской научной конференции с международным участием «Решетневские чтения», Красноярск, 2004 г.; Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск, 2004 г.; научных семинарах кафедры электропривода и электрооборудования ЭЛТИ ТПУ.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований и теме диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, в том числе 2 в центральных изданиях, сделано 5 докладов, зарегистрирован 1 патент на полезную модель.

*Структура и объем работы.* Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 178 страницах машинописного текста; содержит 71 рисунок, 15 таблиц, список использованных источников включающих 107 наименований и приложения.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проводимой диссертационной работы, сформулирована цель работы, основные задачи, научная новизна и практическая ценность исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен обзор современного состояния систем электропитания телеуправляемых подводных аппаратов, сделан анализ вариантов выполнения, сформулированы основные требования, предъявляемые к СЭП ТПА.

Выбор СЭП ТПА определяется рядом требований, среди которых главную роль играют величина передаваемой мощности, время непрерывной рабо-

ты без поднятия аппарата на борт обеспечивающего судна и объем информации, которой обмениваются между собой аппарат и обеспечивающее судно.

Все СЭП ТПА можно классифицировать в зависимости от места расположения первичного источника электроэнергии: СЭП с автономным источником электроэнергии на ТПА и СЭП, подключенные к электрической сети обеспечивающего судна. В свою очередь СЭП ТПА, подключенные к сети обеспечивающего судна, в зависимости от передачи энергии по кабель-тросу на подводный аппарат подразделяются на СЭП переменного и постоянного тока.

Основным достоинством СЭП с автономным источником электроэнергии на ТПА является гальваническая развязка ее силовых цепей и канала связи, что позволяет до минимума снизить помехи в канале связи. К недостаткам следует отнести: ограниченное время работы, определяемое емкостью аккумуляторов; значительные массогабаритные параметры бортовой части СЭП, что приводит к дополнительным механическим нагрузкам на кабель-трос; усиленный износ кабель-троса из-за частых подъемов-спусков ТПА для заряда аккумуляторов.

Перечисленные выше недостатки, а также высокие эксплуатационные расходы указывают на целесообразность замены автономного питания СЭП централизованным, от обеспечивающего судна.

Требованиям, предъявляемым к СЭП ТПА с централизованным питанием от обеспечивающего судна, наиболее полно удовлетворяет СЭП с объединенным энергетическим и информационным каналом. Основные трудности при ее реализации связаны с защитой информационного канала от помех со стороны энергетического канала.

Варианты выполнения СЭП на переменном токе представлены на рис.1 и рис.2 .



Рис.1. Трансформаторный вариант СЭП

1 - судовая сеть переменного тока; 2 - повышающий трансформатор; 3, 7 - заградительные фильтры; 4, 6 - аппаратура высокочастотной связи (ВЧС); 5 – кабель-трос; 8 - понижающий трансформатор; 9 - токоприемники БЧ.

Реализация СЭП (рис.1) связана с введением дополнительных громоздких заградительных фильтров 3, 7 и установкой согласующих трансформаторов 2, 8, габариты которых для промышленной частоты 50 Гц велики. Нестабильность напряжения на токоприемниках 9 ТПА будет определяться колебаниями напряжения трехфазной сети переменного тока обеспечивающего судна и падением напряжения в сопротивлении кабель-троса 5 при изменениях тока нагрузки.

Реализация СЭП (рис.2) связана с введением дополнительных блоков выпрямителя 2 и управляемого инвертора 3, которые осуществляют двойное преобразование энергии, переменного напряжения в постоянное и постоянного в переменное повышенной частоты. Такое построение СЭП обеспечивает уменьшение габаритов согласующих трансформаторов 4, 8, а также стабилизацию напряжения на токоприемниках 10 ТПА.



Рис.2. Вариант СЭП ТПА переменного тока

1 - судовая сеть переменного тока; 2,9 – выпрямитель; 3 – управляемый инвертор; 4 - повышающий трансформатор; 4, 8 - заградительные фильтры; 5, 7 - аппаратура ВЧС; 6 – кабель-трос; 8 - понижающий трансформатор; 10 - токоприемники БЧ.

Характеристики СЭП на переменном токе значительно улучшаются введением регулятора напряжения на передающем конце кабель-троса, обеспечивающего стабилизацию напряжения на приемном конце кабель-троса независимо от нагрузки.

Возможные варианты блок-схем СЭП на постоянном токе приведены на рис.3.



Рис.3. Варианты СЭП на постоянном токе

1 - судовая сеть; 2 - согласующий трансформатор; 3 - регулируемый выпрямитель с фильтром; 4, 8 - заградительные фильтры; 5, 7 - аппаратура ВЧС; 6 – кабель-трос; 9 - автономный инвертор; 10 - нагрузка; 11 - нерегулируемый выпрямитель; 12 - автономный регулируемый инвертор с согласующим трансформатором; 13 - нерегулируемый выпрямитель с фильтром.

Недостатком СЭП (рис.3,а) являются низкие массогабаритные характеристики расположенной на обеспечивающем судне части СЭП, обусловленные сглаживающим фильтром и наличием согласующего трансформатора, типовая (габаритная) мощность которого на частоте питающей сети 50 Гц составляет 105 ÷ 110 % от выходной мощности выпрямителя 3. На современном уровне развития преобразовательной техники и полупроводниковой элементной базы одним из основных путей увеличения удельной мощности и повышения качества устройств преобразования энергии является преобразование напряжения и тока на повышенных частотах. На рис.3, б представлена СЭП ТПА, преобразователь 12, которой выполнен со звеном повышенной частоты.

На основании проведенного анализа построения СЭП ТПА, рассмотрения требований предъявляемых к ним, была предложена и реализована СЭП ТПА со звеном повышенной частоты, которая обеспечивает непрерывное энергообеспечение токоприемников подводного аппарата мощностью до 30 кВт и передачу энергии на глубину до 6000 м (рис.4).



 $\Phi P\Pi - \phi$ ильтр радиопомех; В – нерегулируемый выпрямитель;  $\Phi_{Bx}$  – входной фильтр; БИ – блок инвертора; БУ – блок управления;  $\Phi_{Bbix}$  – выходной фильтр; ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока; БТр – блок трансформатора; Др<sub>ком</sub> – дроссель компенсации; Н – нагрузка.



**Вторая глава** посвящена исследованию и выбору основных функциональных устройств, входящих в состав электротехнического комплекса СЭП ТПА переменного тока. Основным функциональным устройством СЭП ТПА переменного тока, является полупроводниковый инвертор, преобразующий напряжение постоянного тока в переменное заданного значения. Вследствие чего, в данной главе ставится задача, выявить особенности построения и выбора автономных инверторов судовой части СЭП ТПА переменного тока. А также дать обоснование выбора величины напряжения переменного тока в кабель-тросе и определить токовую нагрузку коаксиальной пары при заданной передаваемой мощности с учетом собственной емкости кабель-троса.

Наибольшее распространение в СЭП ТПА получили преобразователи на базе инверторов напряжения. На рис.5 представлен преобразователь с феррорезонансным стабилизатором напряжения.

Достоинствами данной схемы являются простая схема преобразователя, простая система управления, естественное ограничение тока благодаря использованию ФСН и выходное напряжение приближено к синусоиде.



Недостатками схемы являются большое содержание высших гармоник, низкая точность стабилизации, отсутствие возможности плавно регулировать выход ное напряжение, при сбросах и набросах

нагрузки возникают всплески и провалы выходного напряжения величиной 35÷50% от номинального напряжения и длятся 20÷30 периодов выходной частоты.

В автономном инверторе с широтным способом регулирования выходного напряжения (частный случай широтно-импульсного способа) (рис.6), легко получить стабильность выходного напряжения 1%. Выходное напряжение мо-



жет быть подрегулировано с целью компенсации падения напряжения в кабель тросе, соединяющей СЧ с ПЧ СЭП ТПА и нагрузкой. В схеме может быть получена установка на любое значение тока

Рис.6 нагрузки, а защита может осуществляться системой управления. Коэффициент гармоник может быть 5% и ниже во всех режимах. Недостатком схемы является более сложная (по сравнению с преобразователем с ФСН) система управления. Величина перерегулирования при 100% коммутации нагрузки составляет около 40%.

В АИ с ШИМ (рис.7, а) выходное напряжение инвертора состоит из пакета импульсов с амплитудой, равной напряжению питания, и длительностью, изменяющейся в полупериоде по наперед заданному закону.



Преобразователь с ШИМ обладает теми же преимуществами, что и преобразователь с широтным регулированием выходного напряжения инвертора, кроме того, выходной фильтр здесь меньше, а качество переходных процессов лучше, так как регулирование осуществляется на высокой частоте. Недостатки: большие коммутационные потери, так как для достижения указанных достоинств частота переключения вентилей должна в 10 и более раз превышать выходную частоту.

Автономный инвертор с прямоугольно-ступенчатой формой (рис.7, б) наиболее часто реализуется на основе элементарных мостовых инверторов, ко-

торые работают на выходной или повышенной по отношению к выходной частоте.

Таким образом, учитывая жесткие требования к качеству выходного напряжения и массогабаритным показателям, а также возможности унификации схем на частотах 50 и 400 Гц, предпочтение следует отдавать АИ с ШИМ для применения в современных СЭП глубоководных ТПА.

В процессе проектирования СЭП ТПА часто возникает задача минимизации токовой нагрузки на коаксиальную пару, обусловленную ограниченной токопропускающей способностью. При заданной передаваемой мощности возможность минимизации обусловлена тем, что две составляющие тока линии связи (ЛС) – нагрузочная и емкостная – находятся во взаимно обратной зависимости от величины питающего напряжения. Вследствие этого векторная сумма обеих составляющих имеет минимум при определенной величине напряжения, которую можно считать оптимальной.

В общем случае СЭП с передачей энергии на переменном токе может быть представлена (рис.8), где обозначено:  $r_{\pi}$  – активное сопротивление линии связи;  $C_{\phi\pi}$  – поперечная емкость фильтра при соединения;  $C_{\pi}$  – поперечная емкость линии связи;  $U_1$ ,  $U_2$  – напряжения в начале и в конце линии связи;  $I_1$ ,  $I_2$  – ток в начале и в конце линии связи. Для этой схемы ток  $I_1$  в начале ЛС определяется выражением:

$$I_1 \approx \frac{S_{\scriptscriptstyle \rm H}}{U_2} \cos \varphi_{\scriptscriptstyle \rm H} - j \left( \frac{S_{\scriptscriptstyle \rm H}}{U_2} \sin \varphi_{\scriptscriptstyle \rm H} - \frac{U_2}{x_{\scriptscriptstyle \rm Cl}} \right), \tag{1}$$

Соотношение (1) справедливо для случая, когда величины  $r_{\pi}$  и  $x_{C1}$  удовлетворяют условию:



Зависимость модуля тока  $I_1=f(U_2)$  в соответствии с выражением (1) при  $x_{C1}=400$  Ом,  $\cos \phi_{\rm H}=1$  для трех значений мощности нагрузки  $S_{\rm H}$  приведена на рис.9.

(2)

Рис.8 Схема замещения СЭП ТПА

Из графиков (рис.9) следует, что ток  $I_1$  протекающий в начале линии, имеет явно выраженный минимум, причем значение напряжения, при котором достигается минимум, увеличивается с ростом мощности нагрузки. В области больших значений  $U_2$  ток  $I_1$  практически не зависит от мощности нагрузки, так как состоит в основном из емкостной составляющей.

Исследование  $I_1$  на минимум показывает, что оптимальное значение напряжения  $U_{20117}$ , при котором ток  $I_1$  имеет минимальное значение, равно:

$$U_{2\text{ont}} = \sqrt{x_{C1} \cdot S_{\text{H}}}.$$
(3)

Этому напряжению соответствует минимальная величина тока в начале ЛС:

$$I_{1\min} = \sqrt{2\frac{S_{\scriptscriptstyle \rm H}}{x_{\rm C1}}} \cdot \sqrt{1 - \sin\varphi_{\scriptscriptstyle \rm H}}.$$
 (4)

Реактивную мощность  $Q_c$ , потребляемую СЭП от первичного источника питания при активной нагрузке ( $\cos \phi_{\rm H}$ =l), можно подсчитать по следующей формуле:

$$Q_{\rm C} = \frac{U_2^2}{x_{C2}},\tag{5}$$

где

Sh=5 кВт

4 кВт

3 кВт\_

U<sub>2</sub>, кВ

Рис.9

 $I_1, A$ 

11 10

9

6

5

4

3

2

1

0 -

$$x_{C2} = \frac{1}{\omega(C_{\pi} + 2C_{\Phi\Pi})}.$$
 (6)

Зависимость  $Q_c = f(U_2)$  построена на рис.9. Из зависимости  $Q_c = f(U_2)$  следует,

Qc, KBT

Oc

20

18

16

14

12

10

8

6

4

3

что для разгрузки первичного источника питания реактивную мощность следует компенсировать индуктивным устройством, включенным на входе ЛС. Мощность  $Q_c$  этого устройства должна быть рассчитана на компенсацию реактивной мощности, потребляемую ЛС и обоими фильтрами присоединения. Загрузку ЛС емкостным током можно уменьшить в два раза, если компенсирующее устройство разделить на две части, подключенные к обоим концам ЛС. Полученные соотношения (1), (3) и

(5) дают возможность обоснованно подойти к выбору величины напряжения в ЛС и определить ряд важных показателей, таких как ток в ЛС, потребляемую мощность СЭП от первичного источника электропитания, параметры ЛС, которые являются необходимыми при проектировании СЭП с передачей энергии переменного тока по ЛС с существенной собственной емкостью.

*Третья глава* посвящена разработке конструкции погружного трехфазного трансформатора (ПТр<sub>ТПА</sub>) 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.

На рис.10 представлен эскиз погружного трансформатора СЭП ТПА, мощностью 30кВт. ПТр<sub>ТПА</sub> состоит из трех однофазных тороидальных трансформаторов, соединенных в трехфазную систему по схеме звезда-звезда, помещенных в цилиндрический металлический герметичный бак, заполненный маслом «Пента – ТРМС–110». Выводы выведены через герморазъем, а бак имеет мембрану от повышения давления за счет объемного расширения теплоносителя.



резиновая прокладка; 2) герморазъем; 3) крышка; 4) гайка; 5) мембрана;
 шайба; 7), 9), 11) трансформатор Тр<sub>1</sub>, Тр<sub>2</sub>, Тр<sub>3</sub>; 8), 12) стеклотекстолитовая шайба; 10) бак.

 $D_{\rm k} = 290$  мм – диаметр крышки бака;

 $D_{\rm m} = 228$  мм – диаметр дна бака;

 $d_{\rm ot} = 68$  мм –диаметр отверстия бака;

 $H_{\rm E} = 329$  мм – высота бака;

*S*<sub>д</sub> – площадь дна бака.

Для разработанной конструкции ПТр<sub>ТПА</sub> с масляной заливкой составлена тепловая схема замещения (рис.11), на основании которой был проведен анализ и расчет тепловых режимов работы ПТр<sub>ТПА</sub>.

Рис.10. Эскиз погружного трансформатора ТПА



*R*<sub>и1</sub>, *R*<sub>и2</sub>, *R*<sub>и3</sub> – тепловые сопротивления изоляции магнитопроводов;

*R*<sub>01*i*</sub> – тепловое сопротивление первичной обмотки *i*-го трансформатора;

*R*<sub>02*i*</sub> – тепловое сопротивление вторичной обмотки *i*-го трансформатора;

*R*<sub>wБ</sub> – тепловое сопротивление системы бак – окружающая среда;

 $R_{\delta\Pi}$  –тепловое сопротивление жидкостных прослоек.

Рис.11. Тепловая схема замещения ПТр<sub>ТПА</sub>

Из анализа полной эквивалентной тепловой схемы ПТр<sub>тпа</sub> определены основные этапы методики теплового расчёта тороидального трехфазного трансформатора ТПА с масленым заполнением:

- определение среднеповерхностной температуры корпуса герметичного бака в зависимости от условий охлаждения;

- расчёт среднеповерхностной температуры тепловой модели ПТр<sub>ТПА</sub> и средней температуры масла в прослойках;

- корректировка ЭТС ПТр<sub>ТПА</sub>, расчёт тепловых сопротивлений;

- уточнение средних температур масла и средне-поверхностных температур однофазных трансформаторов;

- расчёт геометрических параметров эквивалентного однофазного трансформатора;

- определение максимальных температур обмоток и среднеповерхностных сердечников однофазных трансформаторов;

- оценка полученных результатов теплового расчёта.

По полученной методике теплового расчета были рассчитаны перегревы бака, нагретой зоны тепловой модели и первичной обмотки на границе с магнитопроводом. Далее было проведено сравнение полученных результатов расчета и эксперимента, и определена величина относительной погрешности методики для основных узлов ПТр<sub>ТПА</sub>, которые приведены в табл.1 и 2.

Таблица 1. Сравнение расчетных и экспериментальных данных при охлаждении ПТр<sub>тпа</sub> в воздушной среде

r r r r r r r r r r r r r r r r r r r											
<b>Р</b> <sub>Ті</sub> / <b>Р</b> <sub>н</sub>	<b>Р</b> <sub>Ті</sub> , Вт	<i>t</i> <sub>c</sub> , <sup>0</sup> C	- <sub>0</sub> с,	$\bar{\nu}_{w \bar{b} \mathfrak{I}}, $	<i>δ</i> <sub>wБ</sub> , %	$\bar{\nu}_{wmp},$	$\overline{\nu}_{WM3}, $	δ <sub>wm</sub> , %	υ <sub>Opmax</sub> , <sup>0</sup> C	υ <sub>Opmax</sub> , <sup>0</sup> C	δ <sub>0</sub> , %
XX	156	24,5	37,2	31,6	5,2	46,2	46	0,33	62,2	59,5	4,53
0,2	169,76	28,5	39	39,7	-0,7	65	62,3	3,37	79,6	80,1	-0,62
0,4	212,73	29	47,4	45,6	1,8	77	71,5	6,11	96,6	89,9	-7,45
0,51	243,92	27	53,3	57,2	-3,9	86,5	87,6	-1,0	109,4	110,5	-1
0,52	248,55	28	53,2	59,1	-5,9	87,4	85,3	1,98	108,9	108	0,18
0,6	292,3	32	58,7	56,6	2,1	99,5	89,2	9,03	123,5	114,7	7,67
0,71	347,94	28,5	67,3	68,4	-1,1	116	104,9	8,39	139,9	133,2	5,03
0,72	348,02	29,5	66,7	67,7	-1,0	155,2	106,5	6,47	139,3	134,5	3,56
0,73	345,89	32	66,7	62,5	4,2	114	101	10,16	138,8	127,9	8,44

Таблица 2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных при охлаждении ПТр<sub>тпа</sub> водой

<b>Р</b> <sub>Ті</sub> / <b>Р</b> <sub>н</sub>	<b>Р</b> ті, Вт	<i>t</i> в, <sup>0</sup> С	- <sub>0</sub> с,	$\bar{\nu}_{wE^{3}},$	<i>б<sub>wБ</sub></i> , %	$\bar{\nu}_{wmp},$	$\bar{\nu}_{WM3}, \sigma_{C}^{0}$	<i>б</i> <sub>wм</sub> , %	υ <sub>Opmax</sub> , <sup>0</sup> C	υ <sub>Opmax</sub> , <sup>0</sup> C	δ <sub>0</sub> , %
$XX_1$	156	21	2,6	2,5	0,28	24.5	22,5	5,66	40,1	35,3	13,59
$XX_2$	156	15,3	2,7	4,1	-3,8	24.6	26,4	-7,86	40,3	36,9	8,94
0,21	168,02	17,0	2,6	2,6	0	25.8	27,2	-3,08	43,2	45,5	-4,83
0,22	167,96	14,3	2,9	3,5	-1,28	24,9	29,4	-7,05	44	46,8	-5,98
0,41	199,04	15	3,2	4,7	-2,7	30,2	34,5	-7,73	51,6	55,6	-7,19
0,42	204,67	14,2	3,4	3,8	-0,75	31,7	32,7	-1,87	53,6	53,3	0,56
0,61	270,43	17	3,8	3,5	0,44	42,4	42,3	-0,15	71,5	68,8	3,92
0,62	270,43	14,7	3,7	4,2	0,74	42,3	43,1	-1,18	71,4	67,7	5,46
0,8	369,9	16,8	4,9	6,3	-1,88	52,5	55,3	-3,3	92,2	84,6	8,98
1,0	507,13	19	5,8	7,2	-1,5	68,1	65,7	3,34	112,7	107,7	4,64

*P*<sub>T*i*</sub> – текущие значения мощности рассеяния трансформатора;

 $P_{\rm H}$  – мощность рассеяния в номинальном режиме;

 $U_{w b p}$ ,  $U_{w b 3}$ ,  $U_{w M p}$ ,  $U_{w M 3}$ ,  $U_{O p}$ ,  $U_{O 3}$  – расчетные и экспериментальные перегревы бака, нагретой зоны тепловой модели и первичной обмотки на границе с магнитопроводом соответственно.

Индексы внизу в графе  $P_{\text{T}i}/P_{\text{H}}$  означают номер эксперимента при выставленной нагрузке.

По результатам расчета относительной погрешности (количество расчет-



ных точек N=123) при определении температур различных узлов ПТр<sub>ТПА</sub> построена гистограмма (рис.12), из которой видно, что расхождение расчетных и экспериментальных данных лежит в пределах  $\pm 14\%$ , а для подавляющего числа точек (86%), относительная погрешность не превышает  $\pm 10\%$ . Это позволяет рекомендовать данную методику для практического использования.

Рис.12. Гистограмма относительной погрешности методики

Четвертая глава посвящена схемотехническому моделированию и экспериментальному исследованию системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата, а также сравнению полученных экспериментальных результатов с результатами, полученными на схемотехнической модели и сделать вывод об адекватности разработанной схемотехнической модели СЭП ТПА и её пригодности для практического применения.

В настоящее время для решения задач проектирования статических преобразователей и исследования процессов, протекающих в них, разработано значительное количество прикладных компьютерных пакетов, таких как MatLab Simulink, PSpice, Worbench, Circuit Market и др. В результате чего, исследование разработанной СЭП ТПА проведено при помощи схемотехнического моделирования в пакете MatLab 7.0 Simulink.

На рис.13 представлена схемотехническая модель СЭП ТПА в пакете MatLab 7.0 Simulink.



Рис.13. Схемотехническая модель СЭП ТПА

Модель СЭП ТПА мощностью 30 кВт состоит из бортовой трехфазной сети обеспечивающего судна (блок Three-Phase Source 380V 50Hz), трехфазного выпрямителя (блок VD1) с LC-фильтром (L1, L2 и C2), трехфазного инвертора (блок VT1) с LC-фильтром (L3...L5, C2...C4), системы управления инвертором (блок Control system), трехфазного трансформатора (блок TV1), кабельтроса (блок Three-Phase Series R), понижающего трансформатора (блок TV2) и выпрямителя (блок VD2) с выходным LC-фильтром (L6, L7 и C5).

В результате схемотехнического моделирования были получены осциллограммы изменения выходного напряжения  $U_{\rm H}(t)$  при набросе тока нагрузки  $I_{\rm H}$ =45 A и сбросе тока нагрузки СЭП ТПА (рис.14).



а) – наброс тока нагрузки; б) – сброс тока нагрузки.

Для подтверждения работоспособности разработанной схемотехнической модели СЭП ТПА (рис.13) и адекватности получаемых результатов реальным процессам в электротехническом комплексе СЭП ТПА произведено сопоставление результатов. Поскольку основным критерием, по которому можно оценить достоверность получаемой информации является эксперимент, то сопоставление результатов осуществляется с экспериментальными данными.

Для проведения экспериментальных исследований был использован разработанный опытно-конструкторский макетный образец системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата мощностью 30 кВт СЭП–30 ТПА (рис.15 и 16.).



Рис.15. Судовая часть СЭП-30 ТПА 1) – преобразователь входной; 2) – стойка инвертора; 3) – блок трансформаторов; 4) – дроссель компенсации



Рис.16. Подводная часть СЭП-30 ТПА

На рис. 17 представлены осциллограммы изменения выходного напряжения  $U_{\rm H}(t)$  при набросе тока нагрузки  $I_{\rm H}$ =45 А и сбросе тока нагрузки СЭП ТПА.



а) – наброс тока нагрузки; б) – сброс тока нагрузки.

Сопоставление результатов показало, что для СЭП ТПА переменного тока мощностью 30 кВт расхождение времени переходного процесса выходного напряжения при набросе тока нагрузки  $I_{\rm H}$ =45 А по схемотехнической модели с экспериментом составляет 17%, при сбросе тока нагрузки 19%. Перерегулирование выходного напряжения при набросе тока нагрузки  $I_{\rm H}$ =45 А по схемотехнической модели отличается от эксперимента на 8%. Количество пульсаций выходного напряжения при набросе и сбросе тока нагрузки совпадают и составляют 1. Расхождение установившегося значения выходного напряжения между схемотехнической моделью и экспериментом составляет при набросе 2,5%, при сбросе 10 %.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе получены следующие результаты:

1. На основании анализа современного состояния систем электропитания телеуправляемых подводных аппаратов выявлены основные принципы построения систем электропитания телеуправляемых подводных аппаратов и обосновано целесообразное выполнение СЭП ТПА на переменном токе повышенной частоты для проведения геологических, научно-исследовательских и спасательных работ на предельных глубинах до 6000 м морского дна, а также передачи энергии большой мощности на токоприемники подводного аппарата свыше 30 кВт.

2. Предложена функциональная схема СЭП ТПА большой энерговооруженности со звеном повышенной частоты, которая обеспечивает непрерывное энергоснабжение токоприемников ТПА при минимально возможных массогабаритных показателях.

3. Получены математические соотношения, которые дают возможность обоснованно подойти к выбору величины напряжения в кабель-тросе и определить ряд важных показателей при проектировании СЭП ТПА с передачей энергии переменного тока по кабель-тросу с существенной собственной емкостью.

4. Выявлено, что для передачи энергии мощностью до 30 кВт необходимо использовать кабель-трос с сечением жил 2,5 мм<sup>2</sup> при напряжении линии связи 3,5 кВ, при этом мощность преобразователей судовой части СЭП должна быть не менее 45 кВт.

5. Предложена методика теплового расчета тороидальных трансформаторов, размещенных в герметичном баке с масленой заливкой (охлаждающая среда либо воздух, либо морская вода).

6. Экспериментально проверена предложенная методика теплового расчета тороидального трехфазного  $\Pi Tp_{T\Pi A}$  с масленой заливкой и подтверждена ее практическая применимость. Расхождение между расчетными и измеренными температурами лежит в пределах  $\pm 10\%$ .

7. Экспериментальная проверка схемотехнической модели СЭП ТПА на макетном образце подтвердила её практическую применимость, так как расхождение между расчетными и измеренными параметрами выходного напряжения на нагрузке лежит в пределах  $\pm 20\%$ .

8. Результаты исследований СЭП ТПА переменного тока позволяют повысить качество проектирования и эффективность систем электропитания телеуправляемых подводных аппаратов, а так же сократить затраты на проведение опытно-конструкторских работ и натурных испытаний.

Автор благодарит сотрудников НИИ АЭМ при ТУСУРе заведующего 14 отд., к.т.н. Мишина В.Н., к.т.н. Инзеля В.В. и н.с. Бубнова О.В. за практическую помощь в решении задач, поставленных при написании диссертационной работы и внимательное отношение к работе.

## Основные работы, опубликованные по теме диссертации:

1. Патент на полезную модель 46611 РФ. Система электроснабжения телеуправляемого подводного аппарата с судна-носителя / Мишин В.Н., Бубнов О.В., Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н. Бюл. №19, 2005.

2. Rulevsky V.M. Power supply system of remote controlled submersible crafts // X International Scientific and Practical Conference of students, post – graduates and young scientists "Modern Techniques and Technology", Tomsk, Tomsk Polytechnic University. – 2004. – C. 70–71.

3. Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 5. – С. 120–123.

4. Рулевский В.М., Бубнов О.В. Система управления трехфазным инвертором напряжения системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата // Труды международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». Томск. – 2004. – С. 134–137.

5. Рулевский В.М. Методы стабилизации напряжения тиристорных выпрямителей с высокоомной линией сети переменного тока // VIII Всероссийская научная конференция с международным участием «Решетневские чтения». Красноярск. – 2004. – С.68–69.

6. Рулевский В.М., Бубнов О.В. Система электропитания телеуправляемого подводного аппарата большой энерговооруженности // Сборник трудов НИИ АЭМ «Аппаратно-программные средства автоматизации технологических процессов». Томск. – 2004. – №5. – С.38–42.

7. Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Массогабаритные характеристики системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – №1. – С. 163–167.

8. Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Особенности применения интеллектуальных IGBT-модулей фирмы Semikron в системах электропитания телеуправляемых подводных аппаратах // Сборник научных трудов «Электротехнические системы и комплексы». Магнитогорск. – 2005. – С.138–142.

9. Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Оптимизация электрического режима в системе электропитания телеуправляемого подводного аппарата с передачей энергии на переменном токе // XII международная научнопрактическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «СТТ 2006». Томск. – 2006. – С.102–104.

## Личный вклад автора

Две работы написано автором единолично. В работах написанных в соавторстве, автору принадлежит: разработка бортовой части СЭП ТПА, а также некоторых узлов силовой части СЭП ТПА [1] (45%); систематизация вариантов выполнения СЭП ТПА и предложение варианта СЭП ТПА с передачей энергии на переменном токе [3] (60%); разработка блоков системы управления [4] (60%);разработка структуры СЭП ТПА [6] (70%); обоснование параметров кабель-троса и их влияние на массогабаритные параметры СЭП ТПА [7] (45%); обзор интеллектуальных IGBT-модулей фирмы Semikron [8] (40%); разработка обобщенной схемы замещения СЭП ТПА переменного тока [8] (60%).