

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ им. П.П. ШИРШОВА.**

**На правах рукописи
УДК 551.463.21**

БРИЛЛИАНТОВ Александр Николаевич

**Разработка и исследование основ построения
энергетических систем подводных аппаратов**

специальности 25.00.28 - океанология.

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва - 2005 г.

Работа выполнена в Институте океанологии
им. П.П. Ширшова РАН

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор, Академик РАЕН В.С. Ястребов.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук Вержбицкий Е. В. - (ИОРАН)

Доктор технических наук,
профессор Чельшев В. А. - (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

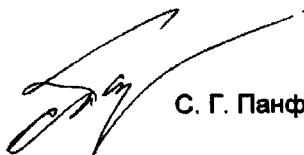
Ведущая организация ФГУП ОКБ ОТ РАН.

Защита состоится «15» мая 2005 г. В 14 часов на заседании диссертационного совета К 002.86.02 в Институте океанологии им. П. П. Ширшова по адресу: Москва, Нахимовский пр. д. 36.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института океанологии им. П. П. Ширшова.

Автореферат разослан «___» _____ 2005 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета,
Кандидат географических наук



С. Г. Панфилова.

Введение

Актуальность работы. Энергетическая обеспеченность НПА является важнейшим показателем, определяющим его возможности и эффективность использования. Система энергообеспечения НПА выполняет две функции: во-первых, обеспечивает НПА достаточным уровнем электроэнергии, во-вторых, обеспечивает режимы минимизации потребления электроэнергии. Основным аспектам этих двух функций посвящены исследования настоящей диссертационной работы.

Каждый из существующих типов НПА, автономные и привязные, по-своему зависят от энергетического обеспечения. Автономные - от энергоёмкости энергоносителей, привязные - от совершенства передачи и преобразования энергии, способности энергосистемы обеспечивать пиковые нагрузки.

С другой стороны эффективность работы энергосистемы, её экономические показатели потребления энергии в существенной степени определяются, во-первых, конструктивным совершенством НПА и, во-вторых, режимами плавания и маневрирования у дна.

Подводные аппараты всех типов можно рассматривать как функционирующее под водой устройство, которое с позиции системотехники представляет собой единство конструкции, энергии и информации, В порядке уточнения можно добавить, что автономные необитаемые подводные аппараты представляют собой класс многомерных систем с избыточностью, которая обеспечивает им адаптацию и минимизирует потребляемую энергию. Нужно заметить, что чем выше вообще адаптационные свойства ПА, тем в более недетерминированной среде он способен действовать, не требуя увеличения расхода энергии.

Конструктивное совершенство оказывается интегральной характеристикой. Так для автономных ПА - (АПА) оно существенно опреде-

ляется движительным комплексом и местом расположения движителей, их избыточностью, типом силового привода и его экономичностью. Для привязных ПА - (ТПА) движительный комплекс так же оказывается определяющим, однако заметное влияние на энергосистему оказывает и система управления пространственным движением и маневрированием. Поскольку весь процесс движения и маневрирования сводится к движению к цели (первый режим) и к маневрированию у цели (второй режим) формирование стратегии управления каждым режимом способно заметно снизить нагрузки на систему энергоснабжения ТПА. При этом финальная часть второго режима - динамическое позиционирование требует особенно тщательных размышлений и остроумных решений, поскольку от его совершенства - способности надежно стабилизировать ТПА у объекта работ - коренным образом зависят все рабочие функции выполняемые аппаратом.

Идеологическая нагрузка на движительный комплекс в основном концентрируется на выборе числа, расположения движителей, на выборе целесообразной избыточности. Это принципиальные вопросы, решению которых посвящено не так много работ в частности [1, 4, 12].

В диссертационной работе использованы и проанализированы их результаты.

Выбор стратегии управления ПА как многомерным объектом требует решения многих вопросов и в частности важнейшим оказывается понятие целенаправленного движения ПА. Принятие этой идеологии формулирует и соответствующие решения по структуре движительного комплекса, способах и технических средствах, используемых для выработки команд управления.

Исследованию этих вопросов посвящено значительно большее число работ. Их результаты также тщательно проанализированы в диссертационной работе.

Для ТПА и БПА, важнейшее значение приобретает система преобразования и передачи электроэнергии по кабелю, часто значительной протяженности (до 8000 м для глубоководных ПА). Выбор требуемых мощностей существенно определяет массогабаритные характеристики не только самого ПА, но и кабеля, спускоподъемного устройства и в конечном итоге - судна обеспечения.

Нужно заметить, что по этому вопросу не существует каких либо конкретных рекомендаций, а аналитические подходы находятся в стадии развития в частности в работах [13, 15, 17, 18, 24]. Анализ характеристик созданных аппаратов при этом показывает, что часто при проектировании ПА закладывается завышенная мощность потребляемой электроэнергии, поскольку этот параметр выбирается исходя из эмпирических или волевых соображений.

Наконец важнейшее значение имеет выбор способа передачи электроэнергии по кабелю. Здесь центральным становится вопрос помеховлияния энергетического канала на чрезвычайно чувствительные каналы передачи информации, управления и телеметрии.

Основополагающих исследований и рекомендаций по применению конкретного типа систем передачи и преобразования энергии не существует, но известна достаточно представительная масса работ с описанием достоинств и недостатков принятых, построенных и испытанных систем передачи и преобразования электроэнергии в частности [13, 15, 17, 18,24].

Единого мнения о целесообразной структуре системы передачи и преобразования энергии пока в известных автору публикациях не обнаруживается.

В результате проведенного анализа автор диссертационной работы пришел к выводу, что именно эти три отмеченные в работе принципиальных фактора заметно влияют на характеристики и эф-

фективность систем энергоснабжения ПА и, в конечном счете, на успешность их применения.

Нужно заметить, что обобщающих работ по проблеме энергообеспечения ПА известно крайне мало. Одна из них была опубликована приблизительно 20 лет назад и содержит конкретный материал 30-ти летней давности.

В то же время она отличается полезными обобщениями и выводами, не потерявшими актуальности до сего времени.

Большинство же работ посвящено рассмотрению конкретных электросистем для конкретных ПА.

По этому, по нашему мнению, в связи с бурным развитием ПА, которое наблюдается в настоящее время, становится актуальным рассмотрение с помощью системного подхода общих и принципиальных положений концепции построения энергосистем ПА различных типов и сфер применения.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование основ построения энергетических систем подводных аппаратов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие

- Анализ основных факторов, влияющих на выбор характеристик энергетической системы существующих типов ПА.
- Анализ и оценка степени влияния систем ПА на параметры энергетической системы.
- Анализ влияния режимов работы ПА на параметры энергетической системы.
- Исследование влияния структуры и степени избыточности движительного комплекса, идеологии управления маневрированием, типа и структуры системы передачи энергии на

структуру энергетической системы ПА и минимизацию потребляемой электроэнергии.

- Формирование типов и структуры энергетической системы в зависимости от типа ПА и особенности их построения.
- Экспериментальное подтверждение результатов проведенных исследований и технической реализации ПА.

Положения, выносимые на защиту

- Принципы формирования структуры ПА различных типов, определяющих минимальное их энергопотребление
- Метод определения достаточной избыточности движительного комплекса, обеспечивающей экономное энергопотребление
- Основы формирования стратегии и тактики целенаправленного управления, обеспечивающего минимизацию энергопотребления
- Методика анализа и синтеза систем энергообеспечения ПА различных типов.

Научная новизна диссертационной работы состоит в разработке основ построения систем энергообеспечения ПА, обеспечивающих минимальное энергопотребление на основе использования избыточности движительного комплекса и принципа целенаправленного управления пространственным движением ПА, тактики построения движения.

Обоснованность научных результатов, положений и выводов обуславливается комплексным подходом к решению проблем минимизации энергопотребления ПА. Результаты диссертационной работы достигнуты на основе применения эффективных подходов, обеспечивающих построение энергосистем ПА с минимальным потреблением энергии.

Личный вклад автора состоит в постановке проблемы и задач исследований, разработанных принципиальных теоретических положений, реализации алгоритмических и схемных решений, доведения до практической реализации систем энергообеспечения в ПА различных типов («МАНТА-1500», «ЗВУК-4», «ЗВУК-ГЕО», «ЛОКСОДРОМИЯ», «СКАТ», «СКАРУС», «ВИЗИТ», «КАЛАН», «МАЛЕК», «ТРИТОН»).

Практическая ценность работы состоит в создании принципиальных подходов к построению систем энергообеспечения ПА, обеспечивающих минимальное их энергопотребление, в практическом создании систем энергообеспечения ПА различных типов.

Область применения результатов включает:

- Проектирование и создание систем энергообеспечения ПА различных типов на основе новой идеологии.
- Создание движительного комплекса ПА с достаточной избыточностью, обеспечивающей экономичность ПА.
- Использование алгоритма целенаправленного движения ПА для достижения минимального их энергопотребления.

Апробация работы. Результаты исследований и практической реализации неоднократно докладывались на Всесоюзных, Всероссийских, Отраслевых конференциях:

1. XIV Тихоокеанский научный конгресс М., 1979,
2. Всесоюзные конференции в Геленджике 1979, 1980, 1982, 1983, 1985 г.
3. Конференция молодых ученых ИОАН 1979, 1981 г.
4. II Всесоюзный съезд океанологов. 1982 г.
5. III-е Всесоюзное научно-техническое совещание "Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей"
6. Всесоюзная школа "Технические средства и методы исследо-

вания мирового океана". Москва, 1987 г.

7. Всесоюзное совещание "Технические средства и методы изучения океанов и морей", Москва, 1989,
8. Всесоюзная школа по техническим средствам изучения океана. Геленджик апрель 1989 г.
9. VIII Международной научно-технической конференции "Современные методы и средства океанологических исследований" Москва ИО РАН 2003 г.

Основное содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируется цель исследования и задачи, которые предстоит решить. Отмечается научная значимость и практическая ценность проведенных исследований и полученных результатов. Отдельно формулируются положения, выносимые на защиту. Даются основные положения, определяющие краткое содержание глав.

В первой главе приводится подробная классификация необитаемых подводных аппаратов, которая далее позволяет обоснованно подойти к формулированию основных научных концепций - созданию структур энергетики, позволяющих найти пути уменьшения потребления электроэнергии.

Нужно отметить, что классификация приносит пользу, так как она обеспечивает четкость и конкретность. Это позволяет более точно определить и стандартизировать анализируемые объекты.

Классификация связана с аббревиатурой и в этом случае аббревиатура не должна содержать излишних элементов. Для удобства количество знаков не должно быть не более 3-4-х. Дополнительное увеличение знаков аббревиатуры затрудняет процесс узнавания и распознавания элементов классификации.

Классификационный анализ показывает, что уменьшение энергозатрат можно достичь на ТПА, БПА и АПА различными технологическими подходами учитывая специфику их использования

Так АПА минимизируют выбором мощностных характеристик электрических приводов движителей с возможностью промежуточного подзаряда буферной аккумуляторной батареи от солнечных батарей или изотопных источников тока, что сулит в перспективе очень экономичный режим их действий.

На энергозатраты НПА, как показал анализ, серьезное влияние оказывает выбор достаточной избыточности движительного комплекса и формирование тактики движения к цели

Для автономных ПА ключевым оказывается построение сценариев и тактики движения при условии минимизации затрачиваемой на это энергии. Для этого вида ПА минимизация энергозатрат оказывается предельно важной, т. к. определяет длительность их действий и, следовательно, эффективность применения.

ПА функционируют в среде, отличающейся высокой нестабильностью гидродинамических параметров. Все это существенно влияет на энергетическую сторону поведения ПА. При этом в зависимости от типа ПА это влияние отличается своим характером и степенью воздействия, прежде всего на выполнение движительных функций.

В зависимости от особенностей гидрологии, течений, стратификации, заметно меняется затрачиваемая на движение ПА мощность, определяемая сопротивлением движению.

К изменчивости среды особенно критичны автономные ПА. При своем движении АПА вынужден адаптироваться к окружающей обстановке и, прежде всего, к меняющимся физическим параметрам воды. При этом процесс адаптации АПА к окружающей среде оказывается многогранным. Это адаптация и к рельефу дна, и к плотности воды, ее прозрачности и т. п. Поэтому важную роль приобретает детальный

анализ среды обитания АПА, который определяет структуру и мощность движительного комплекса и его сенсорной системы.

Обитаемые, телеуправляемые и автономные ПА требуют хорошей подводной навигации. В зависимости от точности определения своего места положения ПА выполняет определенную программу построения траектории, характер которой определяет энергозатраты на ее выполнение. Погрешность подводной навигации зависит от погрешности определения скорости звука в данной акватории и толщине воды. Погрешность же измерения скорости звука определяется знанием гидрологии, погрешностью измерения температуры, солености и давления. Поэтому задача минимизации энергопотребления существенно зависит от знания гидрологии.

При наличии подводной навигации движение ПА к цели может происходить по кратчайшей траектории, и достаточно неравномерной при ее отсутствии. Это приобретает особую важность для автономных ПА.

Большую часть времени ПА затрачивают на работу в придонной области. Знание особенностей придонных течений и точность их регистрации позволяет с минимальной погрешностью определить требуемые мощности движительного комплекса еще на стадии создания ПА. Завышение этих мощностей в связи с незнанием истинных значений придонных течений и гидрологии, приводит к увеличению массы и габаритов всего аппарата, диаметра кабеля, мощности СПУ и, в конечном счете, водоизмещения обеспечивающего судна.

Среда, в которой действует ПА, характеризуется рядом физических полей: гидрофизических, геофизических и рельефа дна.

Наибольший интерес и важность для нас представляют гидрофизические поля: поле течений, поле температуры, поле солености, гидроакустическое и гидрооптическое поля.

Общая циркуляция вод океана возбуждается двумя факторами: механическими и термохалинными.

Механические факторы - это касательное напряжение ветра на поверхности океана и взаимодействие с поверхностью океана неравномерно распределенного над ним атмосферного давления. Они преобладают в поверхностном перемешанном слое.

Термохалинные факторы - это неравномерно распределенное по площади океана нагревания и охлаждения осадков и испарений, в результате чего образуются соответствующие горизонтальные градиенты давления, а далее градиентные течения.

Термохалинные факторы непосредственно движения океанских вод не возбуждают, однако они формируют поля температуры и солености. Возникает разница в плотностях поверхностных и глубинных вод, формируется поле давления и возникает термохалинная циркуляция. Порядок скорости средней многолетней циркуляции на поверхности океана составляет примерно 0.10 м/с. В вертикальном распределении плотности выделяются три слоя. Верхний, однородный слой испытывает непосредственное влияние атмосферы и отделяется от нижележащего слоя слоем скачка, характеризующимся резким изменением температуры. Самый нижний, глубинный слой называют квазиоднородным, и его свойства определяются только внутренними свойствами.

Разделяющий слой - пикноклин - характеризуется наибольшими изменениями плотности.

В большей части толщи океана сохраняется устойчивая плотностная стратификация, а вертикальная термохалинная структура вод характеризуется хорошо выраженной слоистостью.

Циркуляция придонных вод порождается исключительно термохалинными факторами.

Как показали исследования, в придонных слоях развиты течения, которые идут вдоль изобат океанского дна. Мощные течения способны перейти препятствия, связанные с неровностями океанского дна.

Скорость придонных течений обычно ниже поверхностных, а скорость течений на склонах, разломах и в узких проходах может на порядок превышать скорость течений на равнинных участках дна.

Соленость в океане меняется весьма существенно. В районах стоков рек она заметно падает. Минимальные и максимальные значения солености наблюдаются во внутренних морях в зависимости от того, что преобладает: испарения или речной сток и осадки.

Крупномасштабное распределение солености в глубинах океана зависит от распределения испарения и осадков на его поверхности и циркуляции вод океана. Воды пониженной и повышенной солености обычно отделены ярко выраженным халоклином - слоем повышенного вертикального градиента солености. Середина этого слоя расположена на глубине 300 - 700 м.

Плотность океанских вод является функцией температуры, солености и давления. Несмотря на малую сжимаемость воды, амплитуда плотности в зависимости от давления оказывается в океане выше амплитуды ее изменения в зависимости от температуры или солености.

Температура влияет на плотность воды несколько сильнее, чем соленость. Поэтому в океане общему увеличению плотности с глубиной соответствует общее падение температуры. При этом главному термоклину соответствует главный пикноклин, разделяющий легкие поверхностные воды тропического происхождения и тяжелые глубинные полярные воды. Перепад плотности через главный пикноклин составляет примерно 1,5 единицы плотности.

Основной акустической характеристикой океана является скорость звука. Она изменяется в океане от 1450 до 1540 м/сек.

В большинстве районов океана вертикальные градиенты скорости звука на три порядка больше горизонтальных. Исключение составляют лишь районы схождения теплых и холодных течений. В этих районах вертикальные и горизонтальные градиенты сопоставимы. На больших глубинах, где температуры и соленость не зависят от глубины, вертикальный градиент скорости постоянен.

Поверхность океана всегда возмущена, а донная поверхность имеет сложный рельеф и неоднородную структуру. Из-за рассеяния звука на взволнованной поверхности и неоднородном дне возникают пространственные и временные флуктуации распространяющегося звукового сигнала, изменяется его спектральная характеристика.

Поверхность океана рассеивает звук, донная поверхность рассеивает и поглощает звук.

Рассмотренные особенности гидрофизических полей океана дают возможность дифференцированно подойти к созданию энергетической системы ПА в зависимости от его типа и назначения.

Наименьшее влияние на энергозатраты со стороны окружающих ПА гидрофизических полей испытывают буксируемые ПА, т. к. энергия на их движение передается механически через буксирный кабель от судна.

Напротив, автономные ПА и особенно подводные роботы в существенной степени связаны с гидрологией района действий и рельефа дна. Основные энергозатраты на их движение объясняются избыточностью, тактикой управления движением, точностью подводной навигации.

От перечисленных факторов и, особенно, от гидрологии зависят энергозатраты телеуправляемых ПА.

При создании ПА определяющая идеология обычно закладывается, прежде всего, в его системы. Их режим и тактика работы определяют энергопотребление систем и всего ПА в целом.

Длительное время системы ПА создавались с целью достижения оптимальности их функционирования. В тоже время достаточно плодотворно развивался робототехнический подход, в основу которого закладывался не принцип оптимальности, а принцип работоспособности и достаточности.

Существо второго подхода состоит в том, что процессы регулирования и управления, т. е. процессы поддержания динамически устойчивого состояния системы в целом далеки от оптимальных, а качество их функционирования не всегда оказывается высоким. Но, не смотря на это, система обеспечивает работоспособность, при том часто с минимизацией энергозатрат на выполнение этапа и всей операции управления движением ПА. Поэтому главное достоинство такого подхода к управлению состоит в том, что система малыми и экономичными средствами обеспечивает переход в новое динамически устойчивое состояние.

В отличие от принципа оптимальности, которым определяется единственный оптимальный вариант характеристик системы, принцип достаточности предполагает множество возможных и приемлемых вариантов. Из этого же множества вариантов следует выбрать вариант, который удовлетворяет требованию максимальной простоты.

Весьма важен вопрос выбора структуры движительного комплекса. В диссертационной работе делается попытка использования нетрадиционного, теоретического подхода к решению этой проблемы.

Выбор тактики движения ПА существенно определяет энергетические затраты движительного комплекса.

Развитие идеологии управления многоцелевыми объектами, какими являются и сам ПА и манипуляторы, привело к понятию целенаправленного движения и целенаправленного управления.

Идея целенаправленного управления полноценно оформилась в работах проф. Г.В. Коренева в конце 70-х годов прошлого столетия.

Разделение движения многомерного объекта на собственное, определяемое физическими свойствами объекта (массой, гидродинамическим сопротивлением, остойчивостью) и управляемое оказалось весьма плодотворным и позволило сформулировать основы управления при движении к цели.

Нужно заметить, что целенаправленность управления технически реализовалось в комплексном управляющем устройстве - джойстике - мнемонической рукоятке, управляющей одним параметром - движением к цели. Этот принцип управления был впервые сформулирован в работах проф. В.С. Ястребова.

Целенаправленное управление и его результат - целенаправленное движение ПА позволяют минимизировать энергетические затраты движительного комплекса ПА. Движение к цели происходит по кратчайшей траектории к цели за счет работы движительного комплекса несколькими движителями, в сумме потребляющими минимальную энергию на реализацию программы движения.

Избыточность движительного комплекса обеспечивает, таким образом, выбор в процессе адаптации необходимого числа и (структуры) движителей, обеспечивающих минимум потребления энергии на реализацию заданной программы.

Для многомерной системы, каковой является НПА, важное значение имеет его способность к адаптации, т. е. к приспособлению в динамически меняющихся условиях с целью выработки (минимизации) заданных показателей. Однако для того, чтобы приспособляться, необходимо иметь варианты структур, возможности создавать эти структуры, оценивать их пригодность к текущим условиям и режимам. Иными словами, система должна обладать избыточностью. Структура движительного комплекса и его избыточность могут заметно влиять на энергозатраты НПА при реализации заданной программы.

В задаче минимизации энергозатрат избыточность движительно-го комплекса играет положительную роль, поскольку позволяет выбирать такие сочетания движителей для реализации целенаправленного движения, которые дают возможность добиться минимизации суммарных энергозатрат. Однако избыточность должна быть достаточной и не превышать некоторого предела. В противном случае она будет приводить к увеличению энергозатрат, т. к. заданный суммарный вектор упора будет формироваться параллельным участием нескольких движителей.

Таким образом, крайне важное значение для минимизации энергозатрат имеет структура движительного комплекса. Расположение движителей на НПА влияет, прежде всего, на формирование суммарного вектора упора и на управляемость НПА в пространстве.

Для снижения энергозатрат выбирают обтекаемую форму робота и повышают КПД движителей. Как показывают результаты моделирования для АПА, работающего на пересеченных рельефах, углы атаки изменяются в пределах $\pm 90^\circ$. Для таких роботов возможности снижения энергозатрат за счет формы достаточно ограничены.

Из нашего практического опыта наиболее целесообразен движительный комплекс, состоящий из движителей на поворотных колонках (СКАТ). Вектор упора такого движителя может изменяться в фиксированной относительно связанных осей плоскости. К этому типу движителей относятся гребные винты на поворотных колонках, гребные винты с поворотными насадками, поворотные водометы и крыльчатые движители.

Рассмотрим, как соотносятся избыточность управления вектором упора поворотного движителя и способ повышения его быстродействия. Пусть в момент времени $t = t_1$ поворотный движитель развивал упор $T = T_1$, был повернут на угол $\gamma_1 = \gamma_{11}$ и требуется перевести движитель в положение, когда $T = T_2$ и $\gamma_1 = \gamma_{12}$.

Если движитель поворачивается из данного положения на $\pm 360^\circ$, а сам он может работать как на прямом ходу, так и на реверсе, то осуществить этот перевод можно следующими четырьмя способами:

- Повернуть движитель до нужного положения в положительном направлении и изменить упор на $T_2 - T_1$;
- Повернуть движитель до нужного положения в отрицательном направлении и изменить упор на $T_2 - T_1$;
- Повернуть движитель в положительном направлении на 180° от заданного положения и реверсировать упор до $-T_2$;
- Повернуть движитель в отрицательном направлении на 180° от заданного положения и реверсировать упор до $-T_2$.

Минимальным по быстродействию будет тот способ, при котором время перевода из одного положения в другое минимально.

При одновременном изменении поворота движителя и его упора время перевода для α -го способа ($\alpha = 1, 2, 3, 4$) записывается в виде

$$\Delta t_\alpha = \min [\Delta t^\gamma(\Delta \gamma_\alpha); \Delta t^T(\Delta T_\alpha)] ,$$

где $\Delta t^\gamma(\Delta \gamma_\alpha)$ - время поворота движителя на угол $\Delta \gamma_\alpha$; $\Delta t^T(\Delta T_\alpha)$ время изменения упора на ΔT_α . В этом случае оптимальным по быстродействию будет тот способ, при котором

$$\Delta t_\alpha \rightarrow \min. \quad (3.21)$$

Времена Δt^γ и Δt^T зависят от многих величин, и точное их нахождение достаточно сложно, однако для решения задачи (3.21) необходимо найти лишь номер способа перевода. Поэтому для величин Δt^γ и Δt^T можно ограничиться зависимостями от $\Delta \gamma$ и ΔT , которые получают экспериментально.

Для сравнения с энергозатратами избыточного движительного комплекса был проведен следующий модельный эксперимент на ЭВМ. В качестве избыточного движительного комплекса принимался комплекс из шести неподвижно закрепленных движителей, попарно рас-

положенных вдоль связанных осей. Моделировался режим бездифференциального отслеживания синусоидального рельефа дна в вертикальной плоскости. По известному движению определялись необходимые векторы управляющей силы и момента, которые затем пересчитывались на векторы упоров движителей. При амплитуде колебаний траектории робота в диапазоне 1-ого м энергозатраты на движение были на 15 - 20% ниже, чем при использовании избыточного движительного комплекса. На уклонах в 25 - 30° энергозатраты в избыточном движительном комплексе были на 20 - 25% ниже, чем в избыточном. На ровных рельефах энергозатраты были одинаковыми.

Таким образом, для адаптивных подводных АПА-роботов, предназначенных для работы, как на ровном, так и на сложном рельефе дна, использование избыточных движительных комплексов позволяет сократить расход энергии на движение.

Во второй главе диссертационной работы ставятся принципиально важные вопросы целесообразных способов обеспечения НПА энергией.

В настоящее время существует, по крайней мере, 6 типов устоявшихся схем передачи электроэнергии, применяемых к ТПА, БПА и АПА. Одни из них нашли достаточно фундаментальное признание, другие постоянно исследуются варьированием их показателей.

Так для АПА устоявшимся признанным источником энергии является бортовая АБ.

Повышение напряжения необходимо для снижения потерь в кабеле, которые при прочих условиях пропорциональны квадрату тока.

При такой схеме питания на борту судна устанавливается повышающий трансформатор Т1, а на ПА - понижающий трансформатор Т2 с нагрузкой от вторичного источника питания ВИП.

Схема I

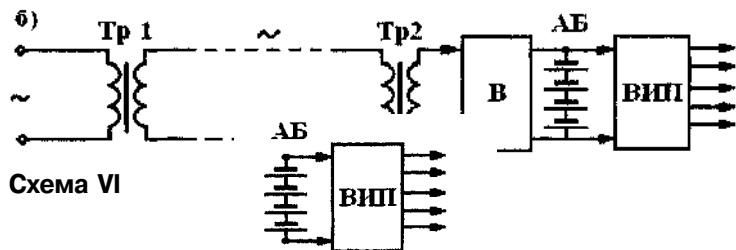
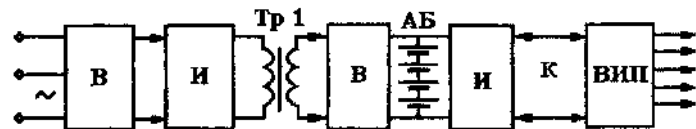
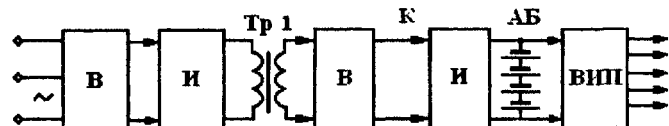
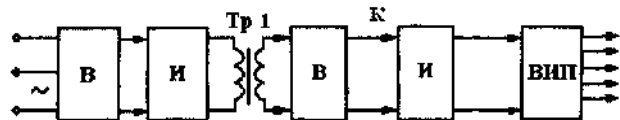
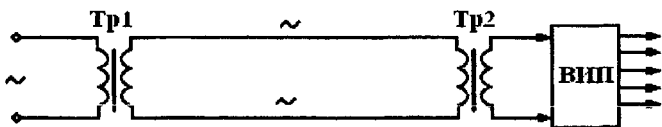
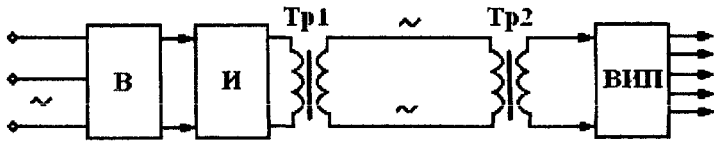


Схема VII



С выхода этого блока снимаются все номиналы напряжений, необходимые для питания аппаратуры.

Помимо отмеченного преимущества передача энергии на высоком напряжении позволяет обеспечить более стабильное напряжение у потребителя при изменении нагрузки. Доказать это несложно, рассмотрев простейшую схему питания произвольной нагрузки Z_H от произвольного источника U через некоторое передаточное звено (например, линию связи) с собственным сопротивлением Z_H (рис. 1, а).

Очевидно, что для обеспечения одинакового напряжения на потребителе U_H необходимо при повышении напряжения U на входе передаточного звена использовать на приемной стороне трансформатора с меньшим коэффициентом трансформации:

$$n = \frac{U_H}{U} = \frac{W_2}{W_1} < 1 \quad (1)$$

Рассмотрим, каким образом от величины n зависит стабильность напряжения на динамической нагрузке. В расчетной схеме сопротивление нагрузки, приведенное к первичной обмотке трансформатора:

$$Z_H^i = \frac{1}{n^2} Z_H \quad (2)$$

Напряжение по нагрузке Z_H^i составляет

$$U_H^i = \frac{U_H}{n} = \frac{Z_H^i}{Z_H^i + Z_H^i} U \quad (3)$$

Если нагрузка динамическая, то, как следует из выражения (3), изменение ее величины вызывает изменение напряжения у потреби-

теля. При изменении нагрузки на относительное изменение напряжения ΔZ_H у потребителя составляет.

$$\Delta U_H' = \frac{\Delta U_H}{U_H} = \frac{\Delta Z_H}{Z_H} \frac{Z_{II}}{Z_{II} + \frac{Z_H + \Delta Z_H}{n^2}} \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что при колебаниях нагрузки стабильность напряжения на ней при прочих равных условиях будет тем выше, чем меньше величина n , т. е. чем выше напряжение U в линии связи.

Следует иметь в виду, что максимально высокое напряжение U_{\max} , подаваемое в линию связи, не должно превышать предельного значения:

$$U_{\max} \leq U_{\text{прод}} \quad (5)$$

Для ПА значение $U_{\text{прод}}$ лимитируется, во-первых, электрической прочностью изоляции кабеля и кабельных вводов и, во-вторых, требованиями техники безопасности и составляет 2 - 3 кВ.

Основным недостатком схемы I является значительный уровень помех, создаваемых в линии связи.

Если на НПА по кабелю подается постоянный ток при высоком (от нескольких сот вольт до 2 - 3 кВ) напряжении, то преимуществом такой системы по сравнению с предыдущей является меньший уровень помех, создаваемый в кабеле, недостатком - необходимость установки дополнительных элементов - фильтров Φ , выпрямителя B_1 и инвертора И. Поскольку инвертор размещают на заглубителе, масса и габариты ПА не увеличиваются. Кроме того, уменьшая уровень помех в линии связи, они одновременно увеличиваются на ПА, поскольку инвертор является интенсивным генератором помех.

Энергопитание потребителей, установленных на ПА, может осуществляться двумя способами: постоянным высоким напряжением, передаваемым по кабелю, и от аккумуляторной батареи, установлен-

ной на ПА и работающей в режиме постоянного или периодического подзаряда. Достоинство такой схемы по сравнению с рассмотренными выше заключается в том, что с помощью аккумуляторной батареи удастся компенсировать пики нагрузки, возникающие при включении потребителей с кратковременным режимом работы. В результате по кабельной линии связи передается средняя мощность, а не максимальная, что существенно снижает потери в кабеле и уменьшает колебания напряжения на входе ВИП.

Частный случай рассмотренной схемы это передача по линии связи постоянного тока. Аккумуляторная батарея ПА работает в буферном режиме. Достоинства схемы IV по сравнению со схемой III - пониженные масса и габариты устройства и большая простота его бортовой части. Недостаток - сравнительно малая мощность, передаваемая по линии связи.

Питание систем ПА может осуществляться как от судовой сети переменного тока через повышающий трансформатор T_1 , так и от аккумуляторной батареи, работающей в режиме постоянного или периодического подзаряда через выпрямитель В. Достоинство схемы V по сравнению со схемой III - заключается в меньшем уровне помех, создаваемых в линии связи, поскольку по ней передается ток средней мощности, потребляемый ПА, а пики нагрузки покрываются аккумуляторной батареей. Недостаток схемы - повышенные массогабаритные характеристики бортовой части.

Наконец питание всех потребителей ПА осуществляется от автономного источника, установленного на нем.

Практика конструирования и эксплуатации систем энергоснабжения ПА, связанных кабельной линией связи с судном-носителем, позволяет сделать выводы о целесообразности использования каждой из рассмотренных схем.

В тех случаях, когда необходимо обеспечить непрерывное энергопитание систем ПА в течение длительного времени (десятки и сотни часов), и потребляемая ПА мощность достигает 1~2 кВт при высокой динамичности нагрузки, наиболее целесообразной следует признать схему II.

Для питания аппаратуры средней (сотни ватт) мощности в течение нескольких часов (до десяти) рациональной является схема I.

Для питания систем ПА, потребляющих мощности в несколько десятков ватт в течение десятков часов целесообразно использовать схему VI. Эта же схема может служить для питания более мощных потребителей (сотни ватт), если время непрерывной работы ПА составляет несколько часов.

В тех случаях, когда необходимо обеспечить питание систем для создания динамичного графика нагрузки при средних мощностях в несколько десятков ватт в течение сотен часов целесообразно использовать схему VI.

В последнее время привлекает внимание способы передачи энергии на переменном токе повышенной частоты.

Повышение напряжения необходимо для снижения потерь в кабеле, которые при прочих условиях пропорциональны квадрату тока. При такой схеме питания на борту судна устанавливается повышающий трансформатор T_1 , а на ПА - понижающий трансформатор T_2 с нагрузкой от вторичного источника питания ВИП. Повышение частоты необходимо для снижения массогабаритных характеристик трансформаторов. Для повышения частоты применяются инверторы.

Большие перспективы в экономии энергии имеет использование адаптации. Прежде всего, адаптация движительного комплекса - основного потребителя энергии.

Строго говоря, чем больше избыточность системы, тем больше число вариантов может быть создано и тем большее число вариантов выбора может существовать.

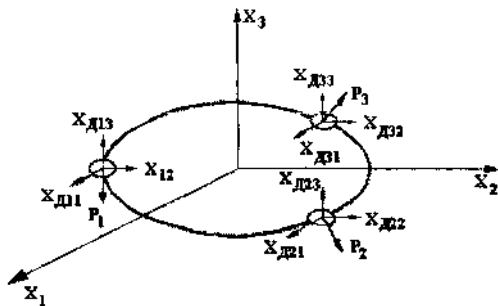
Из сказанного вытекает естественный вывод о необходимости обеспечения наибольшей степени избыточности по каждой из систем. Это позволит создавать высокую универсальность и качество функционирования ПА. Однако ограничением являются технические возможности его реализации и экономическая целесообразность. Именно поэтому процесс выбора степени избыточности по системам ПА должен быть компромиссным, учитывающим сферу функционирования, среду обитания, важность безотказного функционирования, безопасность существования ПА как технической системы.

Для нас критическим является минимум энергопотребления. Остается важным вопрос как выбрать достаточную избыточность для обеспечения работоспособности.

В подводном аппарате одной из основных систем избыточность, которой в существенной степени определяет конечный результат функционирования ПА, является движительная система. Поэтому выбору достаточной степени избыточности необходимо уделить специальное внимание, выработав некоторый логико-аналитический подход.

Для возможности выявления и анализа роли каждого из движителей ПА, контролирования его влияния и степени участия в формировании результирующего вектора упора и скорости движения ПА необходимо ввести базовую и дополнительные системы координат.

Представим каждый движитель ПА развиваемым им упором, поместив начало вектора упора в начало дополнительной системы координат (рис. 1). Тогда связь координат конца вектора упора каждого i -го движителя в базовой системе координат будет определяться следующим матричным уравнением перехода:



1. Базовая и дополнительная системы координат

$$X_{Di} = \alpha_{i5}(X_{De} - X_{Oe}), \quad (6)$$

где α_{i5} - матрица направляющих косинусов, определяющая ориентацию векторов упора в базовой системе координат; X_{De} - координаты точки конца вектора упора i -го движителя в базовой системе координат; X_{Oe} - координаты i -й дополнительной системы в базовой системе координат; X_{Di} - координаты точки конца вектора упора i -го движителя в i -й дополнительной системе координат.

Для движительной системы ПА в качестве критерия, по которому выбирается вариант взаимодействия движителей, может быть время формирования суммарного вектора упора движителей, определяющего вектор скорости движения ПА, при переходе его из одного стационарного состояния в другое или же затрачиваемую при этом энергию.

Время формирования суммарного вектора упора будет определяться числом движителей, их расположением и конструктивным решением. По мере увеличения числа движителей, установленных на ПА, это время будет уменьшаться. Такое уменьшение времени формирования суммарного упора движителей по мере увеличения их числа вначале будет заметным, но затем с определенного момента (с определенного количества движителей) темп начнет снижаться.

Границу достаточной степени избыточности, по-видимому, можно установить, задавшись предельным значением темпа уменьшения этого времени. Следовательно, число движителей ПА и связанную с этим степень локомOTIONной избыточности можно установить в зависимости от принятого предела (целесообразного, достаточного) темпа снижения времени формирования суммарного упора движительного комплекса. Такая задача может быть решена как экспериментально, так и аналитически. Наибольший интерес представляет аналитическое решение задачи, в результате которого окажется возможным установить некоторые общие принципы подхода к решению задачи выбора целесообразной избыточности в общем случае.

Для аналитического решения задачи определения достаточной степени избыточности движительного комплекса ПА необходимо найти выражение некоторой сложной функции, для которой затем сформулировать условия, устанавливающие границы области, обеспечивающей цель функционирования. Эта сложная функция должна связывать функции упоров каждого движителя и определять модуль и направление суммарного вектора упора.

Зависимость изменения упора движителя от оборотов привода имеет обычно линейный характер: $P(\omega) = k \omega$. Зависимость же нарастания упора движителя во времени может быть представлена характеристикой апериодического звена 2-го порядка

$$A \frac{d^2 P}{dt^2} + B \frac{dP}{dt} + C P, \quad (7)$$

или, если попытаться упростить процесс нарастания упора и свести все к чистому запаздыванию, то этот процесс может быть представлен более простой зависимостью $P(t) = e^{-t} P_0$.

Полученные зависимости результирующего упора P_{Σ} от упоров движителей дают основу для решения задачи выбора достаточной и целесообразной степени избыточности движительной системы ПА.

При этом критерием, как было отмечено выше, должно быть время формирования результирующего упора. Очевидно, с увеличением степени избыточности это время будет уменьшаться, однако с какого-то момента (соответствующего определенному числу движителей или их степеней свободы) это уменьшение замедлит темп. По-видимому, этот процесс можно аппроксимировать достаточно близко к реальному, экспоненциальной зависимостью, где по вертикальной оси отложена степень избыточности, определяемая как числом, так и степенями свободы движителей.

Целесообразный и достаточный предел увеличения степени избыточности, очевидно, можно принять равным $2/3$ от времени достижения экспоненциальной характеристикой момента насыщения, по аналогии с тем, как принято обычно определять постоянную времени физических процессов, имеющих подобный характер.

Важным является вопрос нарастания суммарного упора.

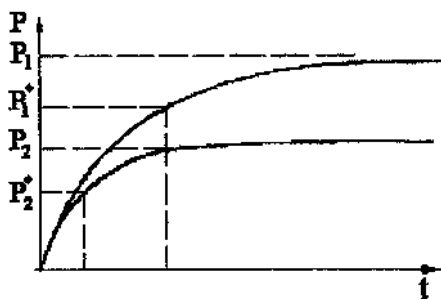


Рис. 2. Процессы нарастания упора

Будем считать процесс нарастания каждого вектора упора во времени экспоненциальным (рис. 2). Характерное время этого процесса нарастания упора τ_1 . Оно определяется следующими соотношениями:

$$P_1^* = P_1 \frac{e-1}{e} \approx \frac{2}{3} P_1. \quad (8)$$

Реальный процесс нарастания упора упрощенно можно записать в виде

$$P = P_1(1 - e^{-t/\tau_1}). \quad (9)$$

Представим теперь, что ПА имеет большее число движителей: $n_2 > n_1$. Поскольку добавленные движители идентичны существовавшим, то начало процесса нарастания упора, очевидно, будет совпадать, однако конечное значение упора $P_2 = \frac{n_1}{n_2} P_1$ будет меньше первоначального P_1 . Характерное время процесса нарастания суммарного упора аналогично определим выражением $P = P_2(1 - e^{-t/\tau_2})$.

Зависимость времени нарастания упора от числа движителей можно записать

$$\tau = -\tau_1 \ln\left(1 - \frac{2}{3} \frac{1}{n}\right). \quad (10)$$

Эта зависимость может быть представлена графически (рис. 3).

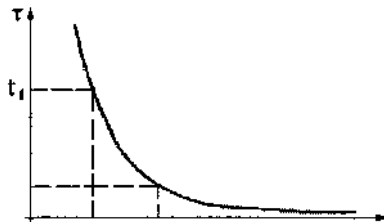


Рис. 3. Зависимость времени нарастания упора от числа движителей

Будем считать, опять же для упрощения, целесообразной ту степень избыточности движительного комплекса, при которой значение характерного времени формирования упора всего движительного комплекса упадет в e раз по сравнению с достаточным для данного случая вариантом. Вспомним, что за исходный был принят вариант с од-

ним движителем. В этом случае $\frac{r_1}{r} = e$ или $-e^{-1} = \ln\left(1 - \frac{2}{3} \frac{1}{n}\right)$, откуда $n = 2,15$.

Следовательно, если взять два движителя, то время формирования упора движительного комплекса уменьшится в e раз.

Поэтому в общем случае можем записать: $n/n_{\text{дост}} = 2,15$.

Из этого следует, что достаточной является избыточность движительного комплекса, равная двум.

Потребление энергии зависит и от режима движения АПА, особенно при обходе конкретного объекта. Здесь тактика обхода препятствия способна существенно влиять на энергозатраты. При этом не следует забывать соблюдение качества выполняемой теле-фото съемки.

Кроме выполнения основной задачи, АПА и ТПА должны обеспечить свою безопасность. Опасные ситуации могут возникать при обходе препятствий или столкновения с дном.

Рассмотрим метод обнаружения препятствий. Определение препятствий будем проводить методом поверхностей безопасности, предложенным в монографиях Профессора Г.В. Коренева. Применение этого метода обеспечивает обнаружение и обход препятствий АПА. Кроме того, при соответствующем выборе формы поверхности объем вычислений, требуемый для обработки информации, сводится к минимуму.

Окружим АПА воображаемой поверхностью, форма которой в связанной системе координат может зависеть от скорости аппарата. Общее уравнение этой поверхности, изображенной на рис. 4, в связанной системе координат имеет вид

$$f: \{g_1, g_2, g_3, v\} = 0, \quad (11)$$

где $g_1 \dots g_3$ - координаты точек поверхности; v - скорость робота.

Обстановка считается опасной, если препятствие попадает внутрь объема, ограниченного поверхностью (11). Поэтому она должна быть выбрана так, чтобы АПА успевал совершать маневр обхода при наступлении опасной обстановки. При движении подводного аппарата выражение (11) определяет своеобразный коридор, в котором робот может безопасно выполнять основную задачу.

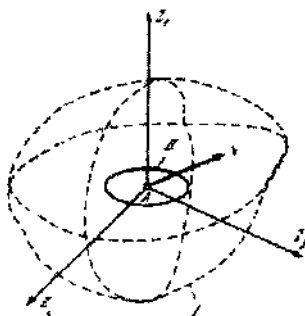


Рис. 4. Общий вид непрерывной поверхности безопасности относительно подводного робота: I - непрерывная поверхность безопасности; II - робот

Классификация препятствия определяется по знаку левой части уравнения (11), где вместо g_1, \dots, g_n , необходимо поставить координаты точек препятствия. Если для любой точки препятствия левая часть уравнения (11) больше нуля, то обстановка безопасна, а если какой-то участок попал внутрь поверхности, то обстановка опасна и необходимо начинать маневр обхода.

Рассмотренные алгоритмы движений АПА или ТПА, отслеживающее требуемое качеством съемки расстояние до донной поверхности, позволяют формировать работоспособную (но не оптимальную) траекторию движения. Особенность построения такой траектории состоит в том, что на ее реализацию должна затрачиваться минимальная энергия движительного комплекса. Заметим, что движительный

комплекс избыточен, а потому способен конструировать варианты траекторий и решать задачу минимизации энергозатрат.

Поэтому важным становится критерий минимальных энергозатрат на формирование траектории движения АПА и ТПА в режиме отслеживания дна.

Следует также подчеркнуть, что траектория движения отличается плавностью, что играет определенную роль в процессе минимизации энергозатрат. Плавность траектории не влияет существенно на качество и процесс картографирования и съемки, но в тоже время обеспечивает минимальное количество пиковых активных действий движительного комплекса.

Формирование достаточного (работоспособного) режима движения АПА является гарантом минимизации энергозатрат.

Как показывают расчеты, моделирование и экспериментальные данные целенаправленное движение экономит затраты энергии. Разделение движения НПА (АПА и ТПА) от исходной точки к цели позволяет конструировать движение НПА наиболее экономичным образом и динамически на всех отрезках управляемого движения. При этом изменяется результат осуществления этого движения.

Алгоритм движения ПА из стартовой точки к точке цели должен строиться на следующих основах:

- 1) Вектор скорости ПА должен быть направлен в точку цели.
- 2) Расстояние S между стартовой точкой и точкой цели должно стремиться к нулю ($\Delta S \rightarrow 0$).

- 3) Движение ПА к целевой точке должно осуществляться в пределах некоторой цилиндрической области (трубки), не выходя за её пределы.

Длина траектории ПА в пределах трубки будет больше длины прямой между стартовой точкой и точкой цели. Поэтому:

$$L_{\max} - L_{\min} = \Delta L, \quad \Delta L \rightarrow 0.$$

Уравнения расстояния между ПА и целью $S^2 = (x_p - x_a)^2$ есть уравнение сферы радиусом S и с центром в точке цели.

Управление состоит в том, что требуется постоянное уменьшение радиуса сферы, до совпадения центра величины ПА с точкой цели, или с принятой малой областью вокруг цели с радиусом ϵ . Здесь ϵ - величина принятой ошибки выхода к цели.

Третья часть условий - управление движением ПА в заранее заданной цилиндрической области, требует минимизации длины траектории движения ПА к цели. Предел же отклонений ПА при движении к цели, ограничивается заданной цилиндрической областью.

Закон движения к цели $S = S(t)$, в основу которого положена минимизация по затрачиваемой мощности, обеспечивает движение ПА в пределах заданной трубки допустимых отклонений.

Если между ПА и точкой цели обнаруживается препятствие, то тактика целенаправленного движения строиться путём разделения прямой соединяющей начальную точку и точку цели на ряд прямолинейных участков траектории (кусочно-линейной траектории). Алгоритм движения ПА на этих участках рассмотрен выше. Алгоритм построения кусочно-линейной траектории основывается на предварительном разбиении траектории и последующем уточнении её средствами гидролокации ПА. Частные целевые точки при этом, определяются при планировании программы движения на основе данных донной акустической навигации и гидролокационной информации о положении цели и препятствия.

Система управления, работающая по такому алгоритму, должна постоянно получать результаты измерения только одной ошибки управления - расстояния от НПА до цели.

В процессе движения к цели НПА (АПА и ТПА) совершает целенаправленное движение, и в этом случае присутствует приоритетное направление движения, обеспечиваемое движительным комплексом.

Как правило, в этом режиме основная нагрузка приходится на маршевые движители, обеспечивающие прямолинейное движение НПА в направлении к цели. Остальные движители играют подчиненную роль, корректируя движение к цели.

Итак, для того, чтобы подводный аппарат двигался целенаправленно, необходима, во-первых, выработанная соответствующая программа движения, задаваемая аналитически, и, во-вторых, на ПА должны быть наложены соответствующие связи ограничения его собственных движений в виде некоторой (непрерывно вычисляемой) дополнительной обобщенной силы $Q_{ш}$.

Программа движения ПА на каждом шаге вырабатывается в автоматическом режиме бортовым вычислительным комплексом, на основе анализа информации о состоянии внешней среды и внутреннего состояния.

Программа движения ПА формируется на основе выбора тактики движения к цели и выбора закона, по которому следует двигаться к этой цели.

В конечном итоге программа движения ПА, которая шаг за шагом формируется бортовым вычислительным комплексом, состоит в планируемом на каждом шаге изменении следующих четырех параметров: трех углов Эйлера (курс, дифферент, крен) и расстояния до ближайшей намеченной цели S . Параметр S является обобщенным параметром управления. Этот параметр может изменяться по произвольному закону, в конечном счете, обращаясь в нуль. Если $S = 0$, то, следовательно, задача планирования движения ПА на рассматриваемом шаге выполнена полностью. В реальной обстановке всегда существует ошибка ΔS попадания ПА в заданную точку пространства. Поэтому обычно программой определяется некоторая цилиндрическая область, осью которой является планируемая траектория движения центра величины подводного аппарата. Задача выхода в цель считается

выполненной, если центр величины ПА не вышел за пределы допустимой цилиндрической зоны ошибки.

Третья глава диссертационной работы содержит материалы практической реализации выполненных теоретических и экспериментальных исследований. Приведены разнообразные НПА, в которых автором создавались системы энергообеспечения и формировались защищаемые положения диссертационной работы.

В качестве примеров практической реализации СЭП ТПА и БПА рассмотрим технические решения, использовавшиеся в ПТА "МАНТА-1500", "ПОМОР", «ВИЗИТ», «КАЛАН», «ТРИТОН», «МАЛЕК», БПА "ЗВУК", "ЛОКСОДРОМИЯ", в создании которых автор принимал активное участие.

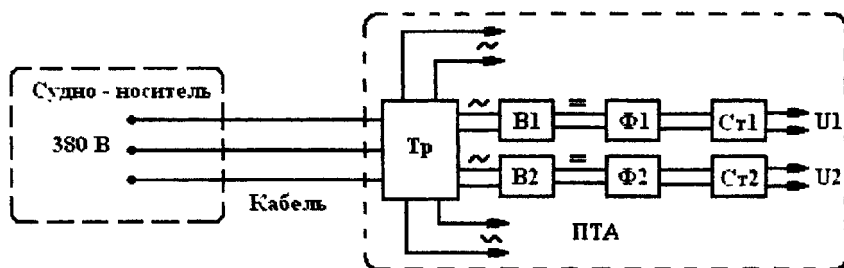


Рис.5 Схема электропитания ТПА «МАНТА-1500»

Электроснабжение ПА «МАНТА-1500» (рис. 5) осуществляется путем передачи трехфазного переменного тока с генератора, расположенного на борту судна-носителя, через токосъемник на кабельной лебедке по кабель-тросу на бортовой блок, состоящий из трансформатора Тр, выпрямителей В, фильтров Ф и стабилизаторов СТ, обеспечивающих необходимым напряжением отдельные группы потребителей ПА. Для электроснабжения и связи аппарата используется многожильный кабель-трос с внутренним грузонесущим элементом разрывным усилием до m 19,6 кН, позволяющий передавать трехфазный

ток напряжением 380 В, частотой 50 Гц и мощностью до 8 кВт по трем силовым жилам, а также высокочастотные сигналы по трем коаксиальным проводам. Для коммутации силовых и высокочастотных жил кабеля на аппарате используется прочный коллектор, через гермоводы которого выводится силовое питание в один корпус, а высокочастотные сигналы в другой. Коллектор шарнирно соединяется с несущей рамой аппарата и в нем крепится грузонесущий трос.

Система силового энергопитания ТПА «ПОМОР» предназначена для преобразования электроэнергии переменного тока, поступающей от судовой трёхфазной системы распределения электрической энергии судна носителя, в электроэнергию постоянного тока высокого напряжения для передачи её через кабель-трос на борт ТПА, а также для электропитания аппаратуры пульта управления и её защиты от кратковременных значительных бросков и провалов напряжения питания.

Серия буксируемых аппаратов «ЗВУК» отличается потребляемой мощностью.

На ПА „ЗВУК-4“ одной из модификаций в качестве бортового питания используются свинцово-кислотные аккумуляторы типа СП-200 емкостью 200 А/час. Общее потребление энергии ПА „ЗВУК-4“ составляет 100 Вт.

При необходимости большей мощности потребления устанавливаются две батареи по 27 В каждая. Они развязаны электрически и питают разные потребители: одна - системы, чувствительные к помехам, такие как телевидение и системы управления, другая - системы, создающие помехи: фотосистемы, гидролокатор бокового обзора, акустический профилограф и др. При однобатарейном питании необходима установка фильтров для обеспечения минимума помех телевидению от блока накачки импульсного осветителя фотосистемы.

Буксировка ПА „ЗВУК-4” другой модификации и электрическая связь аппарата с судном-носителем осуществляются с помощью коаксиального кабель-троса наружным диаметром 19,2 мм и разрывным усилием 81,6 кН, передающего переменный ток напряжением 220 В, частотой 50 Гц. При этом в кабель-тросе одновременно проходят электрические сигналы разных частот, поступающие как с судна на аппарат, так и в обратном направлении.

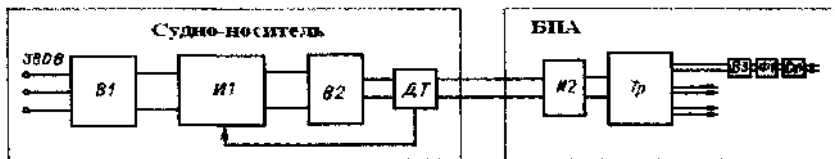


Рис. 6. Схема электропитания буксируемого ПА "ЗВУК-6"

Высокими показателями, в том числе КПД и массогабаритными характеристиками, отличается СЭП буксируемого ПА "ЗВУК-6" (рис. 6). Передача постоянного тока осуществляется по коаксиальному кабель-тросу одновременно с высокочастотным информационным сигналом с использованием стабилизации на борту судна-носителя напряжения, подаваемого к аппарату. Система электроснабжения ПА „Звук-6" состоит из судовой стойки питания, блока питания бортовой части и высокочастотных фильтров-заградителей. Трехфазное напряжение с судового дизель-генератора 380 В частотой 50 Гц выпрямляется блоком В1 и преобразуется управляемым инвертором И1 в переменное с частотой 3 кГц. Для управления инвертором И1 используется датчик тока ДТ, с помощью которого на выходе выпрямителя В2 обеспечивается необходимый для питания инвертора И2 бортового блока электро-снабжения ПА уровень напряжения с учетом его падения при передаче по кабель-тросу. Отдельные бортовые потребители получают питание от инвертора И2 через распределительный трансформатор Тр и соответствующие выпрямители, фильтры и стабилизаторы (например ВЗ, Ф1 и СТ1).

Глубоководный буксируемый аппарат "ЛОКСОДРОМИЯ" предназначен для проведения исследовательских и поисковых операций на дне океана на глубинах до 6000 метров.

На аппарате установлена аккумуляторная батарея, работающая в буферном режиме. Электроэнергия подается на БПА по трос-кабелю постоянным током, повышенного напряжения (до 2000 В). Аппарат буксируется судном на этом трос-кабеле. Система энергоснабжения БПА "ЛОКСОДРОМИЯ" предназначена для передачи энергии на постоянном токе с судна-буксировщика по коаксиальному трос-кабелю с одновременной передачей по нему высокочастотной информации.

Блок питания бортовой части (БПБЧ) расположен в отдельном сферическом корпусе радиусом 200 мм., разделенном цилиндрической проставкой высотой 120 мм. В проставке расположен высокочастотный заградитель (ВЧЗ) и конденсаторы связи, а также герморазъемы через которые осуществляется питание систем комплекса и подвод питающего напряжения к БПБЧ.

БПБЧ преобразует постоянное напряжение **600 В ± 5 %** поступавшее в буксируемую часть комплекса с помощью автономного инвертора в ряд напряжений постоянного тока и однофазных напряжений переменного тока прямоугольной формы.

Для уменьшения массы и габаритов подводной части СЭП (особенно устанавливаемой непосредственно на ТПА) электроэнергию следует передавать, во-первых, повышенным напряжением и, во-вторых, на повышенной частоте.

Увеличение напряжения и частоты тока в кабеле ведут к росту реактивного тока, дополнительно нагружающего силовые жилы. Это приводит к дополнительным потерям и уменьшению полезной нагрузки, т. к. величина тока в кабеле ограничена.

Однако, с другой стороны, увеличение напряжения ведет к уменьшению активной составляющей величины тока, определяемого

нагрузками ТПА. Поэтому существует некоторое оптимальное соотношение, связывающее величины напряжения и частоты, при которых масса и габариты СЭП минимальны.

Увеличение частоты питающего напряжения приводит к уменьшению массы и габаритов СЭП по экспоненциальному закону. Наиболее приемлемой оказывается при этом частота питающего напряжения в районе 1000 Гц.

Величина питающего напряжения влияет только на параметры кабеля - его диаметр и никак практически не отражается на массе и габаритах СЭП ТПА.

Мощность же преобразователей пультовой (судовой) части СЭП, преобразующих трехфазное напряжение судовой сети 380/220 В, 50 Гц в напряжение повышенной частоты определяется нагрузками ТПА и потерями в кабеле. Поэтому, масса и габариты их увеличиваются с увеличением величины падения напряжения в кабеле согласно соотношению

$$P_c = P_{ТПА} \frac{U_c}{U_{ТПА}}, \quad (12) \quad \text{где:}$$

P_c - мощность судовой части,

$P_{ТПА}$ - мощность на входе ТПА,

U_c и $U_{ТПА}$ - напряжения на концах кабеля.

Приведенные выше соображения определяли выбор системы энергообеспечения глубоководного телеуправляемого аппарата, разрабатываемого в ФГУП ОКБ ОТ РАН.

В этой разработке автор диссертационной работы принимал активное участие. Анализ параметров СЭП показал, что приемлемые массогабаритные и технико-экономические показатели достигаются при величине линейного напряжения в пределах 2500 - 3000 В и частоте трехфазного напряжения, передаваемого по кабелю - в пределах от 600 до 1000 Гц.

Общая структурная схема СЭП БПА "ЛОКСОДРОМИЯ" приведена на рис 7

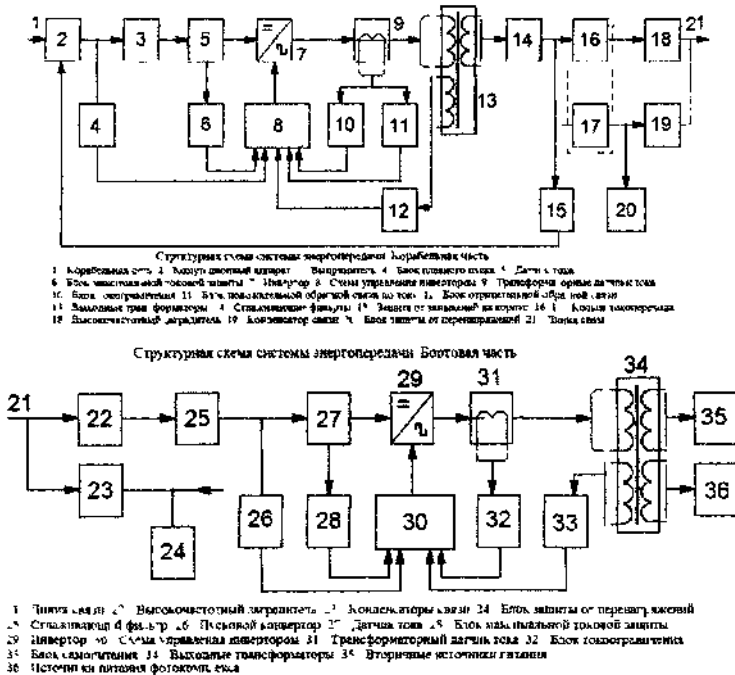


Рис 7. Общая структурная схема СЭП БПА "ЛОКСОДРОМИЯ"

Автономные подводные аппараты имеют автономное бортовое питание от аккумуляторных батарей большой энергоёмкости, обеспечивающей действие АПА по программе в течение нескольких часов (минимум 6 часов)

Структурная схема такого энергообеспечения рассмотрена в главе 2 (схема 6) Питание от аккумуляторной батареи к потребителям передается через вторичные источники питания

По приведенной схеме выполнено питание АПА "СКАТ", АПА "СКАРУС" и автономной модульной системы, созданной в ИО РАН на основе АПА "СКАТ"

АПА "СКАТ" предназначен для картографирования дна путем телевизионной и фотосъёмки больших площадей с отстояний от дна до 15 метров. С этой целью он оборудован импульсной системой освещения мощностью 2000 Джоулей в импульсе. Необходимый запас накопительных конденсаторов расположен в прочном сферическом корпусе диаметром 2 метра. АПА "СКАТ" имеет массу 8000 кг. Автономное питание в виде свинцово-кислотной аккумуляторной батареи на основе аккумуляторов СП-200 имеет ёмкость 35 кВт·час.

Принципиально СЭП АПА "СКАТ" аналогична СЭП обитаемого подводного аппарата "АРГУС".

Для СЭП принят централизованный способ соединения источников тока путем соединения шести аккумуляторных батарей напряжением 27,5 В емкостью 1200 А·ч параллельно на общую шину, чем обеспечивается большая надежность электроснабжения, так как выход из строя одной аккумуляторной батареи не может повлиять на бесперебойность электроснабжения.

Для защиты каждой ветви аккумуляторных батарей от токов короткого замыкания в блоках установлены тугоплавкие предохранители типа ТП-200. Из каждого аккумуляторного блока питание через герметичные электроразъемы и электропроводы подается в прочный корпус, где осуществляется раздельная коммутация каждой из батарей.

Испытания комплекса в море показали высокую эффективность применения робота-модуля, позволяющую существенно экономить энергию и существенно продлить время активных действий всего комплекса. Подобные комплексы чрезвычайно эффективны для проведения детальных исследований, локального поиска и тщательного осмотра дна и донных сооружений, средств, потерпевших аварию.

Для осуществления длительной маршрутной съёмки дна в заданном районе был создан АПА "СКАРУС".

АПА "СКАРУС" предназначен для работ на глубинах до 4000 метров и был создан для выполнения маршрутной фотосъемки на сложных рельефах дна в районе рифтовых зон океана. Его габаритные размеры 3 м x 2,5 м x 1,4 м. Внешне АПА "СКАРУС" имеет плоскую в вертикальной плоскости эллипсоидную форму, что делает его хорошо маневренным в вертикальной плоскости. АПА "СКАРУС" имеет два маршевых движителя с гидромоторами и вертикальный движитель. Для маршрутной съёмки АПА "СКАРУС" оборудован ТВ системой со светильниками и фотокамерой с запасом фотопленки на 3000 кадров.

Электропитание АПА "СКАРУС" обеспечивается от аккумуляторной батареи типа СП-200. Принципиально схема распределения и преобразования энергии аналогична АПА "СКАТ".

Морские испытания АПА "СКАРУС" показали его высокую маневренность в вертикальной плоскости, способность точно отслеживать рельеф дна на отстоянии в пределах от 0,5 до 2,0 метров, что обеспечивает высокое качество фото-видеозаписи дна в условиях меняющейся прозрачности воды и типа донных осадков (выхода коренных пород).

Запас аккумуляторной батареи обеспечивает программное движение АПА "СКАРУС" в течение шести часов.

Созданию комплекса предшествовало программное моделирование АПА "СКАРУС", которое выполнялось к.т.н. А. М. Филатовым с участие автора диссертационной работы.

Моделирование программного и адаптированного поведения робота "СКАТ" и робота-модуля является отдельной и самостоятельной задачей, выходящей за рамки настоящей диссертационной работы.

Тем не менее, необходимо привести результаты такого моделирования, которое предшествовало созданию комплекса, и было вы-

полнено в «Лаборатории телеуправляемых аппаратов и роботов» старшим научным сотрудником к. т. н. А. М. Филатовым.

Было проведено исследование системы управления движением носителя и робота-модуля методом моделирования работы системы совместно с моделями объектов управления и моделью среды.

Моделирование контура глобальной коррекции закона движения проводилось с целью экспериментальной проверки эффективности работы алгоритмов контура, возможности сокращения суммарных энергозатрат на движение до цели. Зависимость отношения скорости v_a аппарата к скорости v_t течения от числа итераций k_n и числа циклов k_u при одинаковой точности определения закона движения на каждом шаге приведена на рис. 8.

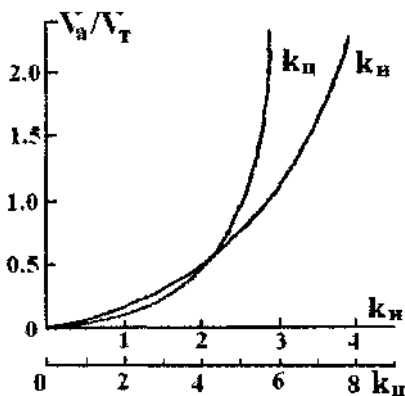


Рис. 8. Зависимость отношения скорости аппарата к скорости течения от числа итераций k_n и числа циклов k_u при одинаковой точности определения закона движения на каждом шаге.

В результате моделирования работы одно-, двух- и трехмерного программных модулей была доказана их работоспособность при выработке программного закона движения с произвольным законом распределения вектора состояния среды в пространстве движения объ-

екта управления. Эта задача может быть полностью решена путем многократного инициирования только трехмерного модуля, однако для сокращения времени определения программного закона движения целесообразно использование также одно- и двумерного программных модулей.

Результаты моделирования движения носителя и робота-модуля по различным законам движения и при различных законах изменения вектора состояния среды приведены в табл. 1. Для сравнения приводятся относительные значения суммарных энергозатрат на движение до цели по гармоническому закону и по закону движения с максимальными упорами по прямой до цели (отношение суммарных энергозатрат на движение до цели к аналогичным суммарным энергозатратам для программного закона движения).

Как видно из табл. 1, контур глобальной коррекции закона движения позволяет многократно уменьшить суммарные энергозатраты на движение до цели в результате вычисления программного закона движения, причем относительная экономия суммарных энергозатрат увеличивается по мере повышения степени неоднородности и сложности среды, показателем чего служит заданный закон изменения вектора состояния среды.

Таблица 1. Суммарные энергозатраты на движение носителя и робота-модуля (по результатам моделирования)

Закон движения	Ситуации				
	1	2	3	4	5
Носитель					
Гармонический	1,1	1,3	2,4	2,1	2,2
С максимальными упорами	2,1	2,6	4,1	4,5	3,8
Робот-модуль					
Гармонический	1,01	1,8	2,02	2,1	1,9

С максимальными упорами	1,8	2,3	3,4	4,1	2,8
-------------------------	-----	-----	-----	-----	-----

В Черном море с помощью АПА СКАРУС была проведена маршрутная съемка дна в режиме адаптации АПА к рельефу дна и прозрачности воды. Двигательный комплекс показал хорошее маневрирование, что и обеспечило качество полученных снимков дна.

Испытания БПА «ЗВУК-6» проводились в Черном, Балтийском Море и Атлантическом океане. СЭП, разработанная для этого аппарата, показала свою работоспособность и обеспечивала все системы энергией в самых экстремальных ситуациях.

ТПА «ВИЗИТ» проходил испытания и эксплуатацию в Черном Море в Голубой бухте.

ТПА «МАЛЕК» неоднократно использовался для работ с речными биологами, для освидетельствования корпусов судов для Регистра и для съемки оголенных участков подводных переходов магистральных трубопроводов.

БПА серии «ЗВУК» участвовали в многочисленных экспедициях ИО РАН в Атлантическом и Тихом океанах, Средиземном и Красном морях. С их помощью получены тысячи уникальных фотографий и видеозаписей дна глубокого океана в рифтовых зонах и на подводных вулканах.

ТПА «МАНТА-1500» многократно использовался в исследованиях в Черном, Средиземном и Красном морях, отобрав сотни уникальных образцов коренных пород.

В заключении сформулированы выводы, которые сделаны по выполненной работе.

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Проведенный анализ показал, что характеристики энергетической системы необитаемых подводных аппаратов существенно зависят от структурных особенностей их построения и режимов действий под водой при работе с объектами.

2. Минимизация энергопотребления всеми типами НПА является одной из важнейших задач, решение которой приводит к снижению массогабаритных показателей НПА и всей обеспечивающей инфраструктуры.

3. Энергопотребление автономных и телеуправляемых ПА в существенной степени зависит от алгоритма и программы движения ПА к объекту работ и у донной поверхности и может заметно минимизироваться, если происходит опережающее планирование траектории движения и обхода препятствий.

4. Избыточность движительного комплекса НПА (ТПА, АПА) обеспечивает выбор векторов упоров так, что бы результирующая управляющая сила и момент имели значения, минимизирующие общее потребление энергии.

5. Как показали теоретические и экспериментальные исследования, процесс адаптации автономных и телеуправляемых ПА к параметрам среды и рельефу дна в сочетании с избыточностью движительного комплекса и алгоритмом позволяет сократить расход энергии на движение.

6. Теоретические результаты диссертационной работы подтверждены экспериментальными исследованиями, выполненными в процессе создания и эксплуатации НПА Института океанологии и ОАО «Газпром» «МАНТА-1500», «ЗВУК», «ЛОКСОДРОМИЯ», «СКАТ», «СКАРУС», «ВИЗИТ», «КАЛАН», «ТРИТОН», «ПОМОР», «МАЛЕК»,

Список опубликованных научных трудов

1. Сравнительный анализ движительных комплексов ПТА. В сб. "Подводные аппараты и роботы". Москва. ИОАН СССР 1977 г.
2. Модернизация системы энергоснабжения ПТА "МАНТА-1500". Всесоюзная конференция в Геленджике. Апрель 1979 г.
3. Подводный телеуправляемый аппарат "МАНТА-1500", назначение и устройство. В соавт. А. Д. Никитин, Г. А. Стефанов. Всесоюзная конференция в Геленджике. Апрель 1979 г.
4. Сравнительный обзор схем движительных комплексов на примере ПТА "МАНТА -1500". Доклад на конференции молодых ученых ИОАН 1979 г.
5. Модернизация движителей ПТА "МАНТА-1500". В соавт. Г. А. Стефанов. Всесоюзная конференция в Геленджике. Апрель 1980 г.
6. Источники энергии для глубоководных аппаратов. В сб. "Элементная база подводных аппаратов и роботов". Москва. Наука 1980 г.
7. Перспективная система энергоснабжения подводных буксируемых и телеуправляемых необитаемых аппаратов. Труды конференции молодых ученых ИОАН 1981 г.
8. К вопросу о выборе кабель-троса для глубоководных аппаратов. Всесоюзная конференция в Геленджике. Апрель 1982 г.
9. Принципы организации электроэнергетических систем подводных аппаратов. В соавт. А. А. Горлов Труды II Всесоюзного съезда океанологов. 1982 г.
10. Модернизация глубоководного телеуправляемого аппарата "МАНТА-1500". Всесоюзная конференция в Геленджике. Апрель 1983 г.
11. Тенденции развития флота глубоководных необитаемых аппаратов. Всесоюзная конференция в Геленджике. 1983 г.
12. Движительные комплексы глубоководных аппаратов. В соавт. А. А. Горлов. Всесоюзная конференция в Геленджике 1983 г.

13. Системы электропитания подводных буксируемых комплексов. В соавт. В. П. Лайер и др. Всесоюзная конференция в Геленджике. 1985 г.
14. К вопросу применения газоразрядных ламп для подводного телевидения. В соавт. В. П. Лайер и др. Всесоюзная конференция в Геленджике. 1985 г.
15. Система энергопередачи. Глава отчета по теме 11-78.
16. Переоборудование ГиСу "ЗОДИАК" в специализированное судно - буксировщик. Глава отчета по теме 11-78.
17. Система энергоснабжения с объединенным энергетическим и информационным каналом. В соавт. В. П. Лайер и др. Тезисы докладов III -его Всесоюзного научно-технического совещания "Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей", ч. II стр. 19. 1987
18. Бортовой источник питания подводного телеуправляемого аппарата. В соавт. В. П. Лайер и др. Тезисы докладов Всесоюзной школы "технические средства и методы исследования мирового океана". Москва 1987 г.
19. Подавление импульсных помех в системе электропитания буксируемого аппарата. В соавт. Лапин Б. А. Тезисы докладов Всесоюзной школы "технические средства и методы исследования мирового океана". Москва 1987 г.
20. Об использовании трехфазных асинхронных двигателей в качестве привода движителей подводных аппаратов. В соавт. А. Д. Никитин Всесоюзная школа по техническим средствам изучения океана. Геленджик апрель 1989 г.
21. Анализ разработки и внедрения приборных методов контроля, их метрологическая аттестация В соавт. Шалагин В. Н. Материалы совещания «Пути обеспечения надежности и безопасности под-

водных переходов магистральных газопроводов РАО «ГАЗПРОМ». Самара, март, 1997 г.

22. Бриллиантов А.Н., Ломоносов Ю.И., Копейкин В.П. «Методики и приборы для диагностики подводных переходов магистральных нефтегазопроводов через водные преграды». Доклад на VIII Международной научно-технической конференции "Современные методы и средства океанологических исследований" Москва ИО РАН 2003 г.
23. Бриллиантов А.Н. «Движительно-рулевой комплекс ПТА» Доклад на VIII Международной научно-технической конференции "Современные методы и средства океанологических исследований" Москва ИО РАН 2003 г.
24. Бриллиантов А.Н. «Системы энергообеспечения НПА» Доклад на VIII Международной научно-технической конференции "Современные методы и средства океанологических исследований" Москва ИО РАН 2003 г.

25.00

Подписано в печать 24.01.05
Тираж 100 экз. Заказ № 412
Отпечатано в ООО «Альянс ДокументЦентр»
Москва, Нахимовский пр-т, 32
Тел. 332-48-42, 332-48-43

22 МАР 2005



24