

14
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ им. П.П. ШИРШОВА

На правах рукописи



Темеев Сергей Александрович

**ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА МОДУЛЯ
ПОПЛАВКОВОЙ ВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

Специальность 25.00.28 – «океанология»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

28 ЯНВ 2010

Москва – 2010

Работа выполнена в Институте океанологии им. П.П. Ширшова
Российской Академии Наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук

Амбросимов Альберт Константинович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Московского Государственного Технического Университета им.
Н.Э.Баумана

Северов Станислав Павлович

доктор технических наук, профессор

Московского Государственного Строительного Университета

Волшаник Валерий Валентинович.

Ведущая организация: Московский авиационный институт

(государственный технический университет)

Защита состоится 18 февраля 2010 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д002.239.03 в Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии Наук по адресу: 117997, Москва, Нахимовский пр., 36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН по адресу 117997, Москва, Нахимовский пр., 36.

Автореферат разослан 4 января 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат биологических наук



Хусид Т.А

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Энергетика в значительной степени определяет уровень развития экономики, качество жизни и состояние окружающей среды. Современное энергопроизводство характеризуется доминированием технологий, базирующихся на сжигании угля, нефтепродуктов, газа и лишь 0,4% энергобаланса приходится на возобновляемые энергоресурсы (ВЭР). В России доля использования ВЭР еще меньше. Чем больше производится энергии на основе топливосжигающих технологий, тем более дорогую цену приходится платить за сохранение на Земле условий, необходимых для здоровой и полноценной жизни. Очевидно, что энергетические проблемы следует решать в тесной связи с экологическими, шире используя технологии на базе ВЭР.

Среди ВЭР морские ветровые волны обладают наибольшей удельной мощностью. Использование лишь доли совокупной энергии волн Мирового Океана для преобразования в электроэнергию позволит существенно увеличить современное производство электроэнергии на планете без какого-либо ущерба её экосистеме. Поэтому разработка преобразователей энергии волн в электроэнергию, осуществляемая в настоящее время в различных странах, весьма актуальна.

Одним из перспективных устройств, создаваемых для этой цели, является «Поплавковая Волновая Электростанция» (ПВЭС). Основным конкурентным преимуществом ПВЭС, по сравнению с другими преобразователями энергии волн, является использование колебательного механического привода, что позволяет согласовывать работу устройства с внешним волновым полем и, тем самым, обеспечивать наилучшие условия для отбора энергии.

В диссертационной работе поставлена и рассмотрена актуальная научная задача построения и исследования динамической модели механического преобразователя энергии для модуля ПВЭС.

Разработка, создание и использование ПВЭС будет способствовать решению энергетических, производственно-технических и социально-экономических проблем, как в России, так и за рубежом.

Целями работы являются:

- разработка динамической модели механического привода для модуля ПВЭС, использующего колебательный механизм отбора энергии от волнового поля;
- изучение условий эффективной работы устройства.

Научная новизна работы

Впервые разработана динамическая модель механического привода для модуля ПВЭС – принципиально нового устройства для преобразования энергии волн.

Известно, что моделирование – это целесообразно адекватное информационное отображение реального объекта, например в данной работе, механического привода модуля ПВЭС. Следует заметить, что ПВЭС сложная агрегатированная система и её декомпозиция до определенного уровня, в частности до уровня привода модуля ПВЭС является ответственной исследовательской процедурой, существенно влияющей на конечные результаты. Одному и тому же приводу модуля ПВЭС и всей электростанции в целом могут быть поставлены в соответствие совершенно разные математические и физические модели.

Предполагается, что наилучшим механизмом отбора энергии от волнового поля является колебательный. В соответствии с этим подходом, в качестве одного из основных узлов привода в модуле ПВЭС используется колебательная система. В работе рассмотрена динамическая модель механического привода.

Принято во внимание, что в исходной структурной модели модуля ПВЭС отчетливо прослеживаются действующие на него сосредоточенные, поверхностные и объемные силы, а также факторы различной физической природы. К ним относятся: силы тяжести; гидростатические силы; силы нормального гидродинамического давления; гидродинамические силы трения корпуса о воду; натяжение буй-репа; натяжение вантов сети, удерживающей модули; силы Кориолиса; действие сил поверхностных течений на подводную часть; ветровые нагрузки надводной части; силы трения механизмов; внутреннее трение в конструкционных материалах и др.

Анализ указанного многообразия факторов взаимодействия можно вести двояко.

Можно основываться на дифференциальных принципах векторной силовой механики Ньютона. При этом основная тяжесть моделирования ложится на обеспечение адекватности математических моделей отдельных подсистем преобразователя энергии волн, которых, вообще много, что увеличивает порядок исследуемой системы привода модуля и которые, кроме того, трудно выделить на начальном этапе исследования. Векторно-силовой подход более детально отражает физическую механику взаимодействия разнородных компонентов преобразователя энергии волн, но требует обоснованного задания сил.

Анализ динамики волнового электрогенератора также можно вести на основе обобщенного энергетического подхода аналитической механики Лагранжа. При этом вовлекаются в обращение: работа на возможных перемещениях системы; потенциальная энергия системы (при определенных условиях); кинетическая энергия системы. Используются также понятия

обобщенной силы и обобщенной координаты. При этом обобщенные силы могут иметь вид совершенно не соответствующий известным типам сил различной физической природы. Размерность обобщенной силы и её вид зависят от произвола выбора обобщенной координаты, что делает этот выбор существенно значимым.

В данной работе используется математическая модель привода модуля ПВЭС в виде двухступенной колебательной системы, полученной с использованием уравнений Лагранжа II рода. Предпочтение обобщенного энергетического подхода к составлению уравнений движения волнового электрогенератора, в сопоставлении с векторным силовым подходом, обусловлено функциональным энергетическим предназначением исследуемой системы и стремлением исключить из рассмотрения на начальном этапе синтеза ПВЭС силовые факторы влияния второго порядка малости.

Показано, что достоинством преобразователя энергии волн, в основу работы которого положен колебательный механизм взаимодействия с волной (переменной составляющей силы Архимеда), является его чувствительность по отношению к первопричине движения и способность к взаимодействию с волной даже в случае срыва колебательного процесса в одной из колебательных подсистем. Благодаря указанному принципу действия и устройству, такой преобразователь способен обеспечить наилучшие условия для эффективного отбора энергии путем подстройки и согласования его параметров с параметрами внешнего волнового поля.

Проведенное математическое моделирование динамических процессов в преобразователе позволяет оценивать основные проектные параметры модуля ПВЭС.

Разработана методика и представлен пример расчета основных параметров колебательного привода и модуля ПВЭС в целом.

Для лабораторных исследований динамической модели механического привода модуля ПВЭС был создан действующий макет, позволяющий изучать основные рабочие функции реального устройства. К таким функциям относятся возбуждение и установление вынужденных колебаний груза упругого осциллятора при гармонических колебаниях, а также пондеромоторное возбуждение тока в электрогенераторе за счет энергии осциллятора.

С помощью экспериментального макета были изучены различные режимы возбуждения колебаний осциллятора и способы отбора энергии с помощью различных типов электрогенераторов и нагрузочных устройств. При различных значениях частот и амплитуд возбуждающего воздействия, масс грузов и жесткостей пружин подвески груза в ходе экспериментов определялись амплитудно-частотные характеристики колебаний системы, выходные параметры электрогенераторов и оценивалась эффективность преобразования энергии. Достоверность экспериментальных данных была обеспечена путем применения

апробированных методик измерения и обработки данных, отладки режимов совместной работы узлов и измерительных устройств, а также проведения экспериментов на повторяемость и воспроизводимость результатов измерений.

Данные, полученные в ходе экспериментального моделирования в пределах возможностей лабораторного макета, находятся в хорошем соответствии с результатами исследования разрабатываемой в работе динамической модели.

Практическая ценность

Исследования, результаты которых изложены в диссертации, будут использованы для:

- разработки и создания полноразмерных модулей ПВЭС различного назначения;
- разработки технологий изготовления элементов и узлов проектируемых устройств;
- совершенствования аналитических и численных методик расчёта характеристик рабочего процесса и параметров устройств;
- совершенствования лабораторной базы для проведения экспериментальных исследований и определения эксплуатационных характеристик узлов и модулей в целом.

Из результатов патентного поиска и анализа следует, что ПВЭС не имеет мировых аналогов и создание её будет иметь большое прикладное значение. В зависимости от назначения, возможно создание как одномодульных, рассчитанных на мощность до 50 кВт, так и многомодульных установок в виде сетей, которые могут быть собраны из большого количества десяти – пятидесяти киловаттных модулей с суммарной электрической мощностью до десятков мегаватт. Одномодульные устройства могут использоваться в качестве источников электропитания для морских судов, световых и радио маяков, в средствах мониторинга окружающей среды, метеозондирования, навигации, связи, телекоммуникации, в средствах индивидуального жизнеобеспечения и др. Многомодульные устройства могут быть использованы для энергообеспечения прибрежных и островных поселений; для энергообеспечения объектов перерабатывающей промышленности морского и прибрежного базирования, для электролизного производства водорода и кислорода, что будет стимулировать становление экологически безопасной водородной энергетики на Земле.

Результаты диссертации были использованы (внедрены) при выполнении:

- Работы по теме “Разработка компонентов системы, совместимой с окружающей средой, для развития экономики прибрежных районов Арктики на базе использования региональных возобновляемых ресурсов” на основе контракта с Европейской Комиссией № ICA2-СТ-2000-10049;

- Работы по теме “ Co-ordinated Action on Ocean Energy ” на основе контракта с Европейской Комиссии № SES6-502701;
- Работы по теме “Моделирование процессов в Поплавковой Волновой Электростанции” с Федеральным агентством по науке и инновациям РФ на основании контракта № 02.516.11.6108.

Достоверность

Достоверность разработанных в диссертации методов и полученных результатов подтверждается:

- использованием достаточно строгого, обоснованного и апробированного физико-математического подхода к построению и рассмотрению динамической модели;
- непротиворечивостью рассмотренной динамической модели другим моделям поведения колебательных систем, изложенным в литературе, а также соответствием результатов данным, полученным другими авторами;
- соответствием характеристик привода, определяемых расчетом на основе математической модели, и данных, получаемых в ходе экспериментального моделирования.

Личный вклад автора

Конкретное участие автора заключалось в реализации поставленных в работе задач, разработке методов их решения; обработке, анализе, интерпретации получаемых результатов.

Личный вклад автора был определяющим при:

1. обосновании актуальности и целесообразности постановки задачи разработки высокоэффективного преобразователя энергии волн, предназначенного для работы в различных морских акваториях и при различных условиях формирования волн;
2. разработке технической и конструктивной концепции, схемы устройства и принципа действия преобразователя энергии волн поплавкового типа на основе двухступенной колебательной системы, пригодного для эффективной работы в условиях непостоянства амплитуд, фаз и направлений распространения волн в пределах спектров рабочих частот, характерных для морских акваторий; определении и оценке конкурентных преимуществ ПВЭС по сравнению с другими разрабатываемыми для этой цели устройствами;
3. разработке динамической физической и математической модели колебательного привода модуля преобразователя энергии волн на основе двухступенной колебательной системы, позволяющей проводить анализ процессов отбора энергии от волны, адекватных явлению;
4. создании лабораторной установки для экспериментальных исследований динамической модели механического привода модуля ПВЭС, позволяющей изучать основные рабочие

функции устройства, такие как возбуждение и установление вынужденных колебаний груза упругого осциллятора, приведение в движение электрогенератора и пондеромоторное возбуждение тока в нём за счет энергии осциллятора, согласование электрогенератора с нагрузкой.

5. проведении экспериментального моделирования на лабораторном аналоге механического привода для модуля ПВЭС, показавшем, что поведение динамической модели, рассмотренной в данной работе, находятся в хорошем согласии с поведением реальных устройств.

В целом, конкретный вклад автора заключался в реализации поставленных в работе задач, разработке методов решения, обработке, анализе и интерпретации результатов.

Апробация результатов работы.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- IV и V Межведомственных (Международных) симпозиумах «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», (Россия, 1998 и 1999 г.),
- 33 и 34 Международных конференциях по преобразованию энергии (США, 1998 г. и Канада, 1999 г.),
- 5-й Международной конференции по Волновой Энергии (Ирландия, 2003),
- 8-м всемирном конгрессе по возобновляемым источникам энергии (США, 2004),
- 4-м Международном семинаре по скоординированным действиям в области волновой энергии (Португалия, 2006),
- Международной конференции и выставке по возобновляемой энергетике (Япония, 2006),
- Международном семинаре: сотрудничество в области энергетических технологий, глобальные вызовы и согласованные действия (Россия, 2008),
- Российской национальной выставке (Индия, 2008).

На защиту выносятся:

1. Физическая и математическая модели действия колебательного привода для модуля ПВЭС, позволяющие проводить адекватный анализ процессов отбора энергии от волнового поля, а также рассчитывать параметры устройства и условия его эффективной работы;
2. Результаты экспериментального изучения процесса преобразования энергии возвратно-поступательного движения упругого осциллятора в электричество на лабораторной модели.

Публикации

Основные результаты исследований, составляющие основу диссертации, опубликованы в 11 печатных работах и содержатся в 14 технических отчетах ООО «Компани «Прикладные Технологии».

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы. Работа изложена на 142 стр. машинописного текста, содержит 1 таблицу, 65 рисунка; библиография включает 92 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности разрабатываемой проблемы, анализ особенностей и структуры современного мирового энергопроизводства и постановку задачи.

Приведены данные, отображающие развитие современной энергетики России, а также анализ глобальной энергетики в общих чертах. Показано, что энергетические проблемы, возникающие в связи с постоянным ростом мировых объемов производства-потребления продукции, должны решаться в тесной связи с экологическими проблемами, путём использования безопасных технологий на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), сохраняя, при этом, первозданность природы.

Россия, обладая огромными ресурсами ВИЭ, имеет очень малую долю в производстве энергии, поступающей от таких источников. Возобновляемые источники энергии в России могут играть существенную роль в энергообеспечении многих регионов.

В структуре возобновляемых энергоресурсов весьма перспективным энергоносителем являются морские волны. Океаны, по оценкам различных источников, обладают совокупной, доступной для утилизации волновой мощностью порядка 10^{10} кВт. При этом океанские волны способны развивать наибольшую для возобновляемых источников удельную мощность.

В первой главе дается анализ современного состояния разработок и исследований по проблеме создания преобразователей энергии волн.

На протяжении десятилетий ведется разработка устройств, с помощью которых энергия волн может быть преобразована в электроэнергию без какого-либо загрязнения окружающей среды и нарушения процессов в экосистеме Земли.

Несмотря на то, что по всему миру уже запатентованы более двух тысяч устройств, концепции, положенные в основу их работы, могут быть сведены к нескольким признанными базовыми моделям:

- Колеблющийся водяной столб – устройство состоит из частично погруженной под воду конструкции, имеющей открытую часть снизу, вблизи поверхности воды. Внутри корпуса под давлением водяного столба воздух проходит через турбину Вэлса, раскручивая электрогенератор.
- Переливные устройства - набегающая волна поднимается по наклонному каналу, заполняя резервуар. Далее вода пропускается через низконапорную турбину.
- Вертикально колеблющиеся устройства (плавающие на поверхности или погруженные под воду) – возникающие под действием набегающих волн взаимные возвратно-поступательные движения плавающих и прикрепленных ко дну частей преобразуются в движение линейного или роторного электрогенератора.
- Качающиеся устройства - возникающие под действием набегающих волн взаимные угловые перемещения шарнирно-соединенных плавающих модулей используются для прокачки жидкости под высоким давлением через гидродвигатель, который раскручивает электрогенератор.
- Рычажные устройства, использующие энергию горизонтально перемещающихся водных масс для качания вертикально устанавливаемых панелей, передающих усилия на привод электрогенератора.

На базе этих концепций в некоторых странах были созданы экспериментальные образцы преобразователей и подтверждена принципиальная возможность использования энергии морских волн в качестве первичного источника для получения электроэнергии. Однако до настоящего времени устройства, создаваемые на базе известных технических решений, не позволяли достаточно адекватно решить задачу устойчивого преобразования волновой энергии. Эти устройства предназначены для работы в условиях регулярного волнения и, в силу довольно сложного вероятностного характера реального процесса волнообразования, эффективность их действия не может быть высокой.

Основные трудности, с которыми приходится иметь дело разработчикам, исходят из необходимости создания преобразователей волновой энергии, пригодных для эффективной работы в условиях непостоянства амплитуд, фаз, направлений распространения волн и спектра частот возбуждающих сил, характерного для определенной морской акватории. При этом устройства должны обладать совершенными конструктивными, технологическими и эксплуатационными характеристиками, быть надежными, транспортабельными и экономически приемлемыми.

Во второй главе дается описание «Поплавковой Волновой Электростанции» – перспективного устройства, создаваемого для эффективного преобразования энергии волн в электроэнергию, где в качестве одного из основных узлов механического преобразователя, используется колебательная система.

Модуль ПВЭС представляет собой продолговатую осесимметричную капсулу-поплавок, располагающуюся на поверхности моря и ориентированную, в направлении местной вертикали. Принцип действия модуля может быть пояснен с помощью схемы, представленной на рисунке 1. Условно исключены натяжение буй-репа; натяжение вантов сети, удерживающей модули; действие сил поверхностных течений на подводную часть; ветровые нагрузки надводной части.

Основными элементами устройства, находящимися внутри герметичной капсулы, являются механический преобразователь энергии 1, электрогенератор 2 и вспомогательный накопитель энергии 3. Механический преобразователь энергии состоит из упругого маятника, подвешенного к капсуле и привода, сцепленного с грузом маятника посредством резьбового соединения и обеспечивающего пондеромоторное возбуждение тока в электрогенераторе.

Предполагается, что под действием волн капсула и маятник находятся в непрерывном (в определенных акваториях) колебательном движении, а привод обеспечивает раскрутку якоря электрогенератора. На тихой воде, при полном штиле, устройства станции запитываются энергией от накопителей. Груз маятника движется под действием сил упругости и притяжения Земли. На рис. 1 схематично изображена винтовая передача, вал которой раскручивается за счет энергии движения груза маятника сцепленного с валом, который совмещен с валом электрогенератора.

Во всех прототипах волновых электрогенераторов привод, как правило, циклически колебательный. Основным преимуществом, отличающим ПВЭС от других разрабатываемых в мире волноэнергетических преобразователей, является использование своеобразного колебательного привода, позволяющего согласовывать работу устройства с внешним волновым полем, обеспечивая, тем самым, наилучшие условия для отбора энергии.

Применение колебательного привода дает возможность создавать волноэнергетические преобразователи, надежно и эффективно работающие при любых длинах, скоростях, интенсивностях и направлениях распространения морских волн. Использование регулирующих устройств позволит осуществлять подстройку параметров преобразователя под волновые режимы морских акваторий.

В третьей главе содержится описание динамической модели модуля ПВЭС. Разработка динамической модели заключается в рассмотрении колебательного процесса отбора энергии от

волнового поля, анализе условий эффективной работы механического устройства и разработке методики расчета параметров преобразователя.

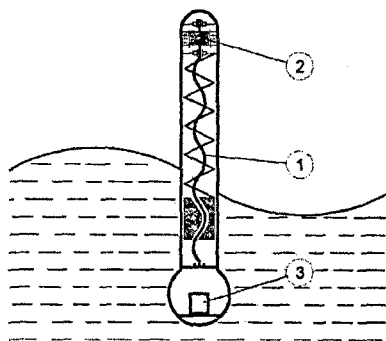


Рис. 1. Модуль «Поплавковой Волновой Электростанции»

3.1. Общее описание модели. Предполагается, что движение поплавка происходит под действием гидростатической подъемной силы (силы Архимеда) и силы притяжения Земли. Динамические процессы, протекающие в системе: Земля - морские волны - поплавок - внутренний упругий маятник - привод с электрогенератором и нагрузкой, априори полагаются достаточно адекватно моделирующимися с помощью двухстепенной априори линейной колебательной модели. Эта модель состоит из двух связанных между собой тел массами m_1 и m_2 , подвешенных на пружинах с коэффициентами жесткости соответственно k_1 и k_2 , как показано на рис. 2.

Масса m_1 соответствует массе капсулы с закрепленным на ней оборудованием m_c и присоединенной массе жидкости $m_f(x,t)$, учитываемой при неравномерном движении тела в жидкости $m_1 = m_c + m_f(x,t)$. Неявно предполагается, что начало отсчета перемещений капсулы x ведется от уровня невозмущенной свободной поверхности акватории, координируемой в системе отсчета, связанной с Землей.

Действие поверхностных волн на капсулу (переменная составляющая силы Архимеда) моделируется возмущающей силой $F \cos \Omega t$, приложенной к телу m_1 . Амплитуда вынуждающей силы равна $F = dSA_0g = k_1A_0$, где d - плотность воды, S - площадь поперечного сечения капсулы, A_0 - амплитуда волны в системе отсчета связанной с Землей, g - ускорение свободного падения. Как видно, коэффициент жесткости k_1 характеризует квазиупругость некоей эквивалентной пружины, моделирующей действие на поплавок силы Архимеда.

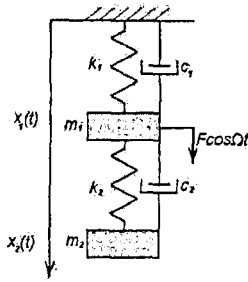


Рис. 2. Динамическая модель модуля ПВЭС.

Масса m_2 соответствует массе груза маятника, подвешенного внутри поплавка на пружине с жесткостью k_2 . Состояние системы в любой момент времени определяется смещениями x_1 и x_2 грузов m_1 и m_2 , отсчитываемыми от положений равновесия груза относительно корпуса и положения корпуса относительно инерциальной системы координат. Коэффициент демпфирования c_1 характеризует гидродинамическое торможение капсулы за счет силы сопротивления жидкости $F_{1c} = -c_1 \dot{x}_1(t)$, где $\dot{x}_1(t)$ – скорость капсулы.

Коэффициент сопротивления c_2 характеризует действие тормозящих сил Ампера или их моментов, возникающих при работе электрогенератора. Он также учитывает торможение тела массой m_2 во внутренней среде капсулы. Силы Ампера или их моменты совершают полезную работу. Сила сопротивления, действующая на тело массы m_2 , имеет вид: $F_{2c} = -c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$, где $(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$ – скорость движения тела массой m_2 относительно тела массой m_1 .

Наиболее коротким путем включения в анализ энергетических характеристик процессов динамики волнового электрогенератора является использование уравнений Лагранжа II рода, базирующихся на понятиях работы на возможных перемещениях, потенциальной и кинетической энергии.

При этом обобщенные силы могут иметь вид не соответствующий физической природе сил определенного вида, как мере механического взаимодействия тел. Более того, вид обобщенной силы и её размерность зависит от произвола в выборе обобщенных координат.

Алгоритм составления уравнений Лагранжа II второго рода предполагает:

- определение числа степеней свободы;
- выбор обобщенных координат;
- вычисление кинетической энергии в абсолютном движении;

- выражение кинетической энергии через обобщенные координаты и обобщенные скорости;
- вычисление производных от кинетической энергии по обобщенным скоростям и времени;
- определение обобщенных сил, соответствующих выбранным обобщенным координатам;
- подстановку всех вычисленных величин в уравнения Лагранжа II рода.

Выполнив все указанные процедуры, получаем из уравнений Лагранжа систему уравнений движения модуля ПВЭС (два связанных тела со смещениями x_1 и x_2) отсчитываемые от положений равновесия, (относительно корпуса и корпуса относительно инерциальной системы отсчета):

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 = F \cos \Omega t \\ m_2 \ddot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 x_2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

3.2. Свободные колебания системы без демпфирования.

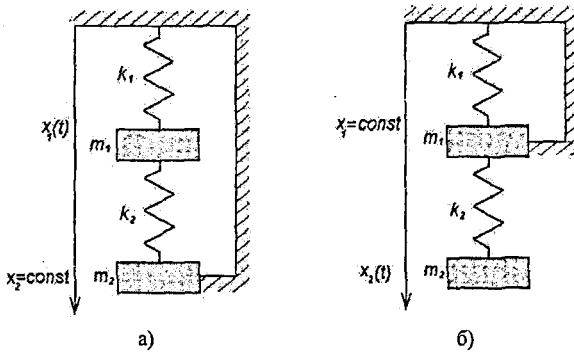


Рис. 2. Схема первой (а) и второй (б) частичных колебательных систем

Положив в системе уравнений (1) $F=0$ и $c_i=0$ ($i=1,2$), получим систему уравнений, описывающих свободные колебания консервативной системы:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + n_1^2 x_1 - \lambda_1 x_2 = 0 \\ \ddot{x}_2 - \lambda_2 x_1 + n_2^2 x_2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где $n_1^2 = \frac{k_1 + k_2}{m_1}$ и $n_2^2 = \frac{k_2}{m_2}$ – квадраты частот колебаний первой (рис. 2-а) и второй (рис. 2-б)

парциальных колебательных систем, $\lambda_1 = \frac{k_2}{m_1}$ и $\lambda_2 = \frac{k_2}{m_2} = n_2^2$.

Решение (2) ищем в виде: $x_1 = A \cos(\omega t + \alpha)$ и $x_2 = B \cos(\omega t + \alpha)$. Подставив эти выражения в (2), получаем систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} (-\omega^2 + n_1^2)A - \lambda_1 B = 0 \\ -\lambda_2 A + (-\omega^2 + n_2^2)B = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Эта система имеет нетривиальное решение при равенстве нулю определителя Δ системы, раскрытие которого приводит к алгебраическому биквадратному уравнению относительно частоты ω :

$$\omega^4 - (n_1^2 + n_2^2)\omega^2 + n_1^2 n_2^2 (1 - \rho) = 0 \quad (4)$$

где $\rho = \frac{\lambda_1}{n_1^2}$ – безразмерный коэффициент связи ($\rho = \frac{k_2}{k_1 + k_2} \leq 1$, равенство имеет место при

$k_2 \rightarrow \infty$, т.е. когда тело m_2 относительно m_1 не смещается).

Так как дискриминант уравнения (4) положителен, то всегда существуют две разные частоты колебаний $\omega_1^2 \neq \omega_2^2 > 0$.

Анализ зависимости ω_1^2 и ω_2^2 от параметров модели ПВЭС (от расстройки $\xi = \frac{n_2^2}{n_1^2}$ и от коэффициента связи ρ) свидетельствует о том, что при любом значении ξ и ρ из интервала $[0...1]$ всегда существуют две различные частоты, называемые нормальными, между значениями которых находятся парциальные частоты n_1 и n_2 (т.е. $\omega_1 < n_1$, $n_2 < \omega_2$). При $\xi \rightarrow 0, \infty$ нормальные и парциальные частоты сближаются. Самое сильное расхождение между этими частотами имеет место в области синхронизма $\xi = 1$. Нормальные частоты могут совпадать с парциальными только при отсутствии связи между подсистемами.

При наличии двух нормальных частот ω_1 и ω_2 общее решение для координат грузов имеет вид:

$$\begin{cases} x_1 = A_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \alpha_2) \\ x_2 = B_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1) + B_2 \cos(\omega_2 t + \alpha_2) \end{cases} \quad (5)$$

Из (3) и (5) можно определить связь отношения амплитуд и характерных частот подсистем:

$$\left(\frac{B}{A}\right)_{1,2} = \frac{n_1^2 - \omega_{1,2}^2}{\lambda_1} = \frac{\lambda_2}{n_2^2 - \omega_{1,2}^2} \equiv \varepsilon_{1,2}, B_1 = \varepsilon_1 A_1 \text{ и } B_2 = \varepsilon_2 A_2, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{1,2}$ - коэффициенты формы колебаний или коэффициенты распределения амплитуд.

Проведенный анализ позволяет сделать ожидаемый вывод о том, что свободные колебания, по определению, нельзя погасить в одном элементе системы, а в другом оставить. Подобное вынуждающее воздействие противоречило бы исходным предпосылкам математической модели свободных колебаний. Влиять можно лишь на начальные условия, которые, в принципе, позволяют выделить нормальное колебание с частотой ω_1 или ω_2 .

3.3. Области оптимальных значений параметров модели

Вообще говоря, двухстепенная колебательная система представляет собой механизм сложную совокупность подсистем, в которой вынужденное устойчивое колебательное движение и передача энергии от одной колебательной подсистемы к другой возможна при различных значениях параметров и соотношениях между ними. Для определения характерных значений параметров колебательной модели применительно к ПЭВС, при которых возможна эффективная трансформация энергии, был выполнен анализ общего решения (5) и исследована зависимость коэффициентов формы колебаний от величины расстройки $\varepsilon(\xi)$.

Анализ показал, что:

- 1). В областях расстройки $0 \leq \xi \ll 1$ и $1 \ll \xi < \infty$ коэффициенты формы ε_1 и ε_2 имеют разные по порядку значения. Это означает, что в этих областях $B_2 \gg A_2$ и $B_1 \ll A_1$ или $B_2 \cong A_2$ и $B_1 \gg A_1$. Система оказывается развязанной или частично развязанной, и обмен энергией между колебательными подсистемами либо практически отсутствует, либо неэффективен.
- 2) В области синхронизма $\xi \cong 1$ коэффициенты формы – одного порядка ($|\varepsilon_1| \cong |\varepsilon_2|$). При $\xi=1$ нормальные частоты равны: $\omega_1^2 = n_1^2(1 + \sqrt{\rho})$, $\omega_2^2 = n_1^2(1 - \sqrt{\rho})$ и колебания представляют собой биения. Коэффициенты формы равны: $\varepsilon_1 = -1/\sqrt{\rho}$ и $\varepsilon_2 = 1/\sqrt{\rho}$. Между подсистемами имеется полная связь и, следовательно, между ними эффективно осуществляется обмен энергией. В этой области получается, что чем больше отличается значение расстройки от единицы, а коэффициенты формы от $\mp \frac{1}{\sqrt{\rho}}$, тем больше отличие B_1 от A_1 и B_2 от A_2 .

3.4. Свободные колебания в модели ПЭЭС с демпфированием.

Система уравнений для свободных колебаний с учетом затуханий в обеих подсистемах имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 + \beta_{11}\dot{x}_1 - \beta_{12}\dot{x}_2 + n_1^2 x_1 - \lambda_1 x_2 = 0 \\ \dot{x}_2 - \beta_{21}\dot{x}_1 + \beta_{22}\dot{x}_2 - \lambda_2 x_1 + n_2^2 x_2 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{где } \beta_{11} = \frac{c_1 + c_2}{m_1}, \beta_{12} = \frac{c_2}{m_1}, \beta_{21} = \beta_{22} = \frac{c_2}{m_2}.$$

Решение системы уравнений (6) определяем в виде: $x_1(t) = A_1 e^{\nu t}$ и $x_2(t) = A_2 e^{\nu t}$.

Анализ достаточно громоздкого решения системы позволяет сделать следующие общие выводы (при наличии у подсистем достаточно большой добротности):

- 1). Собственные колебания в связанных системах при малом затухании состоят из двух затухающих колебаний, гармонические сомножители которых имеют частоты ω_1 и ω_2 ; начальные фазы φ_1, φ_2 и амплитуды A и B определяются из начальных условий и для одной частоты в различных координатах они отличаются, находясь в зависимости от коэффициента связи ρ и значения расстройки ξ .
- 2). Коэффициенты затухания на различных частотах различны, и колебания одной и той же частоты затухают одинаково в обеих подсистемах. Коэффициенты затухания системы зависят от обоих коэффициентов затухания отдельных подсистем. Если бы только одна подсистема имела затухание, то собственные колебания системы всё равно были бы затухающими.
- 3). Если парциальные частоты сильно отличаются друг от друга ($\xi \gg 1$) и $\omega_1 < n_1$, $\omega_2 > n_2$, то коэффициенты затухания отдельных подсистем определяются исходя из характеристик колебательного процесса в них. При малой связи ($\rho \rightarrow 0$) затухание данной парциальной подсистемы происходит на частоте, близкой к его парциальной. Коэффициенты распределения в этом случае будут таковы, что в каждой подсистеме будет преобладать колебание на частоте близкой его собственной.

Исследование собственных затухающих колебаний в системе с двумя степенями свободы, применительно к ПЭЭС, также как и для любых других, имеет важное значение для изучения энергетических свойств колебательной системы и неустановившихся движений.

3.5. Вынужденные колебания в модели с демпфированием

Дополнив первое уравнения (4.1) выражением для вынуждающей силы в комплексном виде

$f e^{i\Omega t}$, где $f = \frac{F}{m_1}$, получим систему уравнений для вынужденных колебаний:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + \beta_{11}\dot{x}_1 - \beta_{12}\dot{x}_2 + n_1^2 x_1 - \lambda_1 x_2 = f e^{i\Omega t} \\ \ddot{x}_2 - \beta_{21}\dot{x}_1 + \beta_{22}\dot{x}_2 - \lambda_2 x_1 + n_2^2 x_2 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Решение системы ищем в комплексном виде $x_1 = A_1 e^{i\Omega t}$ и $x_2 = A_2 e^{i\Omega t}$. Подставив эти решения в (7) и вычислив определители системы с учетом прежних обозначений, а также используя обозначения для безразмерной относительной частоты вынуждающей силы $z = \Omega/n_1$ и безразмерных приведенных относительных коэффициентов демпфирования первого и второго тела $\psi_1 = \frac{c_1}{m_1 n_1}$ и $\psi_2 = \frac{c_2}{m_2 n_1}$ в результате преобразований получаем выражения для амплитуд колебаний подсистем $A_1 = A_{10} e^{i\varphi_1}$ и $A_2 = A_{20} e^{i\varphi_2}$, где

$$A_{10} = \frac{f}{n_1^2} \sqrt{\frac{(z^2 - \xi)^2 + \psi_2^2 z^2}{[z^4 - (1 + \xi + \psi_1 \psi_2)z^2 + \xi(1 - \rho)]^2 + z^2 \left[\psi_1 + \psi_2 \left(1 + \frac{\rho}{\xi} \right) \right] - \xi \psi_1 - (1 - \rho) \psi_2]^2}}, \quad (8)$$

$$A_{20} = \frac{f}{n_1^2} \sqrt{\frac{\xi^2 + \psi_2^2 z^2}{[z^4 - (1 + \xi + \psi_1 \psi_2)z^2 + \xi(1 - \rho)]^2 + z^2 \left[\psi_1 + \psi_2 \left(1 + \frac{\rho}{\xi} \right) \right] - \xi \psi_1 - (1 - \rho) \psi_2]^2}}, \quad (9)$$

$$\theta_1 = \frac{\psi_2 z}{\xi - z^2} \quad \theta_2 = \frac{\psi_2 z}{\xi} \quad \nu = \frac{z \left[z^2 \left(\psi_1 + \psi_2 \left(1 + \frac{\rho}{\xi} \right) \right) - \xi \psi_1 - (1 - \rho) \psi_2 \right]}{z^4 - (1 + \xi + \psi_1 \psi_2)z^2 + \xi(1 - \rho)}, \quad (10)$$

$$\varphi_1 = \arctg \theta_1 + \arctg \nu, \quad \varphi_2 = \arctg \theta_2 + \arctg \nu. \quad (11)$$

Как видно из этих соотношений, комплексные амплитуды зависят от двух размерных — f , n_1^2 и пяти безразмерных — ξ , z , ρ , ψ_1 и ψ_2 коэффициентов, определяемых через физические параметры модели. Окончательно решение для координат и скоростей движения для вынужденных колебаний имеет вид соответственно:

$$x_1 = A_{10} e^{i(\Omega t + \varphi_1)}, \quad x_2 = A_{20} e^{i(\Omega t + \varphi_2)},$$

и

$$(12)$$

$$\dot{x}_1 = i\Omega A_{10} e^{i(\Omega t + \varphi_1)}, \quad \dot{x}_2 = i\Omega A_{20} e^{i(\Omega t + \varphi_2)}.$$

3.6. Средние мощности за период колебаний и КПД модуля ПВЭС

Среднее значение мощности $\langle P_1(t) \rangle$, развиваемой вынуждающей силой (действие волны на модуль ПВЭС) за период колебаний определяется выражением:

$$\langle P_1(t) \rangle = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(F e^{i\Omega t} \dot{x}_1^*) = \frac{1}{2} F \Omega A_{10} \sin(-\varphi_1), \quad (13)$$

где \dot{x}_1^* – комплексно сопряженная скорость

Полезная мощность определяется мощностью силы сопротивления, имеющей в комплексном представлении вид: $\overline{F_{2c}^*} = -c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$. Среднее значение полезной мощности равно:

$$\langle P_2(t) \rangle = -\frac{1}{2} \operatorname{Re}\{F_{2ca}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^*\} = \frac{c_2 \Omega^2}{2} A_{10}^2 \left[1 + \left(\frac{A_{20}}{A_{10}} \right)^2 - 2 \frac{A_{20}}{A_{10}} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \right]. \quad (14)$$

Коэффициент полезного действия для модели ПВЭС определяется выражением:

$$\eta = \frac{\langle P_2(t) \rangle}{\langle P_1(t) \rangle} = \frac{c_2 \Omega \bar{A}_{10}}{m_1 n_1^2 \sin(-\varphi_1)} \left[1 + \left(\frac{A_{20}}{A_{10}} \right)^2 - 2 \frac{A_{20}}{A_{10}} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \right]. \quad (15)$$

Используя выражения (8) - (12), после преобразований получаем окончательную формулу для КПД модели ПВЭС:

$$\eta = \psi_2 z \frac{\rho}{\xi} \sqrt{\frac{(z^2 - \xi)^2 + \psi_2^2 z^2}{[(1 - z^2)(\xi - z^2) - \psi_1 \psi_2 z^2 - \xi \rho]^2 + z^2 [z^2 (\psi_1 + \psi_2 (1 + \rho/\xi)) - \xi \psi_1 - (1 - \rho) \psi_2]^2}} \times \\ \times \frac{1 + \frac{\xi^2 + \psi_2^2 z^2}{(z^2 - \xi)^2 + \psi_2^2 z^2} - 2 \sqrt{\frac{\xi^2 + \psi_2^2 z^2}{(z^2 - \xi)^2 + \psi_2^2 z^2}} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}{\sin(-\varphi_1)}. \quad (16)$$

Из выражения (16) видно, что КПД зависит от пяти безразмерных коэффициентов z , ρ , ξ , ψ_1 , ψ_2 , определяемых через физические параметры модели m_1 , m_2 , k_1 , k_2 , c_1 , c_2 , и Ω .

Чтобы значение мощности $\langle P_1(t) \rangle$ в (6.1) и КПД в (6.4) было положительным, необходимо, чтобы фазовый угол $-\varphi_1$ находился в пределах $\pi > -\varphi_1 > 0$. Для выяснения условий выполнения этого неравенства с помощью формул (10) и (11) проведена оценка значений слагаемых, определяющих этот угол. Оценка показывает, что областями частот вынуждающей силы, обеспечивающих преобразование энергии в модели, являются

$$0 < z \leq z_{2\infty} \text{ и } \sqrt{\xi} \leq z \leq z_{3\infty}. \quad (17)$$

Анализ зависимости модуля амплитуды колебаний капсулы A_{10} и отношения A_{20}/A_{10} от расстройки ξ показывают, что они имеют максимальные значения при $z^2 \cong \xi$. Наиболее предпочтительная область частот для функционирования модели определяется исходя из второго неравенства (17) для $\xi \geq \frac{1}{1+2m_2/m_1}$, так как в этом случае $\sin(-\varphi_1) < 1$ принимает меньшие значения в достаточно широкой области частот, что очень важно с учетом естественных вариаций частоты вынуждающей силы. Эти выводы подтверждаются численными расчетами КПД $\eta_{0,6}, \eta_{1+0}, \eta_{1,2}$ соответственно для $z = 0,6; z = 1+0; z = 1,2$ и значений остальных параметров: $\xi = 1; \rho = \frac{m_2}{m_1} \xi = 0,25; \psi_1 = 0,2; \psi_2 = 0,4$. Значения КПД оказываются равными $\eta_{0,6} = 0,139; \eta_{1+0} = 0,475; \eta_{1,2} = 0,435$. Расчеты говорят о том, что в области $\sqrt{\xi} \leq z \leq z_{3\infty}$ для $\xi \geq \frac{1}{1+2m_2/m_1}$ КПД практически не (или слабо) зависит от z (частоты вынуждающей силы).

Проведенное ранее исследование зависимости коэффициента формы колебаний $\varepsilon(\xi)$ и нормальных частот $y_{1,2}(\xi)$ от расстройки ξ показал, что наиболее эффективный энергообмен между колебательными подсистемами модуля ПВЭС имеют место в области резонанса, т.е. при $\xi \approx 1$. Этим и определяется выбор числовых значений параметров при расчете КПД.

3.7. Оптимизация и оценка энергетических показателей модуля ПВЭС

Согласно выводам, сделанным в пункте 3.6, максимальная эффективность преобразователя достигается при значениях относительных частот z , удовлетворяющих соотношениям (17). Особенно явно это проявляется в достаточно малой окрестности точки $z = [\xi(1+\varepsilon)]^2$, где $0 < |\varepsilon| < 1$. Это обстоятельство позволяет существенным образом упростить выражения для амплитуд, мощностей и КПД (см. пункты 3.5 и 3.6), получив, тем самым, инженерные формулы для расчета конструктивных параметров модуля ПВЭС.

Для этого полагаем $z^2 = \xi$, а в точках полюсов функций считаем $z^2 \rightarrow \xi$ со стороны больших значений. Из выражений (8) и (9) вычисляем амплитуды колебаний и коэффициент распределения амплитуд колебаний подсистем

$$A_{10} = \frac{A_0 \psi_2 (1 - \mu \xi)}{\sqrt{\xi(\psi_1 \psi_2 + \mu \xi)^2 + \psi_2^2 [1 - (1 + 2\mu)\xi]^2}}, \text{ где } \mu = \frac{m_2}{m_1}; \quad (18)$$

$$\varepsilon = \frac{A_{20}}{A_{10}} = \sqrt{\frac{\xi + \psi_2^2}{\psi_2^2}}. \quad (19)$$

Используя формулы (13), (14) и (15) находим соотношения для расчета мощности вынуждающей силы, полезной мощности и КПД преобразователя:

$$\langle P_1(t) \rangle = \frac{\pi d g D_c^2 H^2 \Omega \psi_2}{32} \frac{(1 - \mu \xi) \sqrt{\xi} (\psi_1 \psi_2 + \mu \xi)}{\xi (\psi_1 \psi_2 + \mu \xi)^2 + \psi_2^2 [1 - (1 + 2\mu) \xi]^2}, \quad (20)$$

$$\langle P_2(t) \rangle = \frac{\pi i g D_c^2 H^2 \Omega \psi_2 \mu}{32} \frac{\xi^{1.5} (1 - \mu \xi)}{\xi (\psi_1 \psi_2 + \mu \xi)^2 + \psi_2^2 [1 - (1 + 2\mu) \xi]^2}, \quad (21)$$

$$\eta = \frac{\mu \xi}{\psi_1 \psi_2 + \mu \xi}, \quad (22)$$

где d – плотность воды, D_c – диаметр капсулы, H – высота волны, T – период волны.

Исследуя на максимум выражение (22) как функцию аргумента ξ , получаем оптимальное значение параметра расстройки парциальных частот:

$$\xi_1 = \xi_0 - \frac{h}{l} + \sqrt{\frac{h^2}{l^2} + \frac{\sigma}{\xi}}, \quad (23)$$

$$\text{где } \xi_0 = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 3ac}}{3a}, \quad a = \mu^2, \quad b = \psi_2 [2\mu\psi_1 + \psi_2(1 + 2\mu)^2], \quad c = \psi_2^2 [2(1 + 2\mu) - \psi_1^2],$$

$$h = \xi_0^{1.5} - \mu \xi_0^{2.5}, \quad l = 1,5 \xi_0^{1/2} - 2,5 \mu \xi_0^{1.5}, \quad \sigma = a \xi_0^3 + b \xi_0^2 - c \xi_0 + \psi_2^2, \quad \zeta = \sqrt{b^2 + 9ac}.$$

Используя реальные параметры волн типа зыби и вычислив значение потока энергии на единицу длины фронта волны $\langle P_0 \rangle$, можно оценить необходимый диаметр поплавкового устройства D_c :

$$\langle P_1(t) \rangle_{\xi=\xi_1} = \langle P_0 \rangle D_c \quad (24)$$

Отсюда, определив общепринятым путем значение $\langle P_0 \rangle$ (полагая $A_{10} = H$) и воспользовавшись формулой (20) при оптимальном значении расстройки ξ_1 , получаем формулу для оценки диаметра капсулы:

$$D_c = \frac{8\Omega F}{\pi g \psi_2} \frac{\xi_1 (\psi_1 \psi_2 + \mu \xi_1)^2 + \psi_2^2 [1 - (1 + 2\mu) \xi_1]^2}{\sqrt{\xi_1 (1 - \mu \xi_1) (\psi_1 \psi_2 + \mu \xi_1)}} H. \quad (25)$$

В заключение рассмотрен пример расчёта основных параметров модуля ПВЭС для волны с периодом $T = 5$ с ($\Omega = 1,2566$ рад/с), длиной $\lambda = 39$ м и высотой $H = 1$ м. Выбираем для обеспечения вертикальной устойчивости устройства значение $\mu = m_2/m_1 = 0,25$, а значения коэффициентов демпфирования принимаем равными $\psi_1 = 0,2$ и $\psi_2 = 0,4$. Имея в виду, что $k_1 = \pi D_c^2 dg/4$, $m_1 = k_1 \xi_1 / \Omega^2 (1 - \mu \xi_1)$, $m_2 = \mu m_1$ и $k_2 = \Omega^2 m_2$, с помощью формул (18), (19), (20), (21), (23) и (25) находим значения соответственно для коэффициента оптимальной расстройки $\xi_1 = 0,583$, амплитуд $A_{10} = 0,952$ м, $A_{20} = 2,15$ м, диаметра капсулы $D_c = 1,37$ м, а также мощностей $\langle P_1(t) \rangle = 4,23$ кВт и $\langle P_2(t) \rangle = 2,73$ кВт.

Для КПД использования энергии волны получаем $\eta = \frac{\langle P_2(t) \rangle}{\langle P_1(t) \rangle} = 0,645$.

Для проведения численных оценок энергетических параметров и эффективности модели привода была разработана программа на базе системы MATLAB.

Изложенная методика позволяет вычислить параметры механического преобразователя энергии волн и тем самым сформулировать требования к преобразователю механической энергии в электрическую в виде значения коэффициента сопротивления c_2 и гидродинамическим характеристикам капсулы, обеспечивающим её движение в жидкости с коэффициентом сопротивления c_1 .

В четвертой главе содержится описание разработанной модели взаимодействия колеблющейся капсулы с водой, испытательного стенда, методики и результатов проведения эксперимента.

Разработка модели взаимодействия колеблющейся капсулы с водой проводилась путем анализа решения системы дифференциальных уравнений для вертикальных и угловых колебаний буя. Целью исследования было определение:

- способов минимизации гидродинамического сопротивления при колебательном движении капсулы модуля ПВЭС в воде;
- значений присоединенной массы, сил жидкого трения и смачивания, других параметров взаимодействия;
- зависимости амплитуды колебаний буя от высоты, диаметра, осадки, формы подводной части и других параметров взаимодействия.
- параметров малоразмерной модели для проведения масштабно – подобных испытаний.

Расчеты были проведены для различных значений кривизны днища корпуса буя. Предварительный анализ решений показал, что на значения гидродинамических параметров,

таких как, присоединенная масса и связанное с ней дополнительное сопротивление, форма днища корпуса оказывает большее влияние, чем вынуждающая сила или резонансная частота.

Для исследований динамической модели поплавковой электростанции в лабораторных условиях был создан маломасштабный лабораторный стенд, имитирующий некоторые функции реальной станции. К таким функциям относятся колебания груза, подвешенного на пружине, и отбор энергии колебаний груза. Цель имитации – исследование режимов работы макета и нахождение оптимальных режимов, т.е. таких, при которых, с одной стороны, колебания груза не затухают, а с другой – отбирается максимально возможное количество энергии на нагрузку.

Основными узлами стенда являются: неподвижная станина 1, подвижный суппорт 2, экспериментальный макет 3, закрепленный на подвижном суппорте, и электромеханический привод 4 (рис. 3-а и 3-б). Электромеханический привод приводит в движение суппорт, перемещение которого вдоль станины ограничено направляющими 5. На подвижный суппорт прикреплен направляющая труба, вдоль которой может перемещаться груз маятника 6, подвешенный на пружине 7. Верхний конец пружины закреплен на подвижном суппорте. Для измерения положения груза используется шкала 8 и индикаторная стрелка 9, прикрепленная к грузу.

Возвратно-поступательное колебательное движение груза преобразуется во вращательное движение вала генератора с помощью ленточной передачи. Лента 10 посредством шкивов переходных и ремня 11 приводит во вращение вал генератора 12. Генератор выведен на электрическую нагрузку 13.

При колебательном воздействии со стороны привода подвижный суппорт совершает периодическое возвратно-поступательное движение, раскачивая тем самым упругий маятник. Груз маятника сцеплен с ленточным приводом, который, в свою очередь, раскручивает электрогенератор. Последний соединен с электрической нагрузкой, сопротивление которой может меняться вплоть до десятков Ом.

В ходе экспериментов при заданных значениях частоты и амплитуды колебаний подвижного суппорта добиваются установления устойчивых колебаний груза, после чего измеряют их амплитуду. Одновременно с помощью осциллографа фиксируются мгновенные значения напряжения на нагрузке (рис. 4). Затем изменяют частоту колебаний подвижного суппорта и снова производят измерения.

В табл. 1 приведены значения резонансных частот и соответствующих им амплитуд колебаний маятника при массе груза 18,5 кг и различных амплитудах возбуждающего

воздействия. По этим экспериментальным данным были построены амплитудно-частотные характеристики (рис. 5).

Эксперименты показали, что при использовании электрогенератора синхронного магнитоэлектрического типа при колебаниях вблизи резонанса на частоте 0,43 Гц с амплитудой качания суппорта 15 см, при массе груза 18,5 кг, его амплитуде 59 см и нагрузке 19 Ом снимаемая мощность равнялась 4,6 Вт. При этом мгновенная максимальная мощность составляет 6,4 Вт, а минимальная - 2,9 Вт. Потери на выпрямление переменного напряжения составляют 1,5 В, или в среднем 0,71 Вт (от 0,56 до 0,87 Вт), что соответствует 15% от снимаемой мощности.

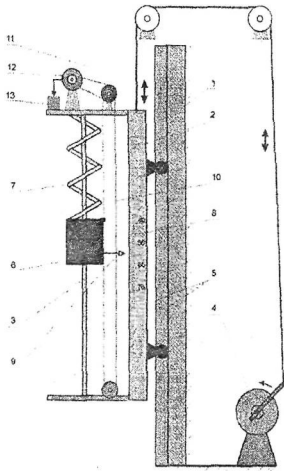


Рис. 3, а. Устройство стенда

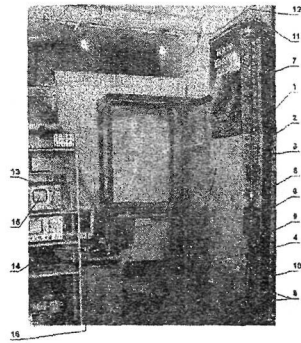


Рис. 3, б. Общий вид стенда

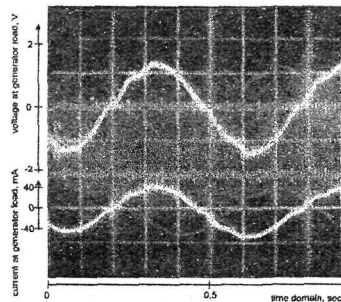


Рис. 4. Типичные осциллограммы тока и напряжения в цепи электрогенератора

Таблица 1.

Амплитуда колебаний суппорта, см	Величина нагрузки генератора, Ом	Частота резонанса, Гц	Изменение частоты резонанса	Амплитуда на частоте резонанса, см
15	∞	0,421	-	
15	19	0,430	+ 2,1 %	53
11,2	∞	0,421	-	68
11,2	19	0,445	+ 5,7%	26,5
7,5	∞	0,419	-	32,5
7,5	19	0,447	+ 6,7 %	12
3,5	∞	0,434		18

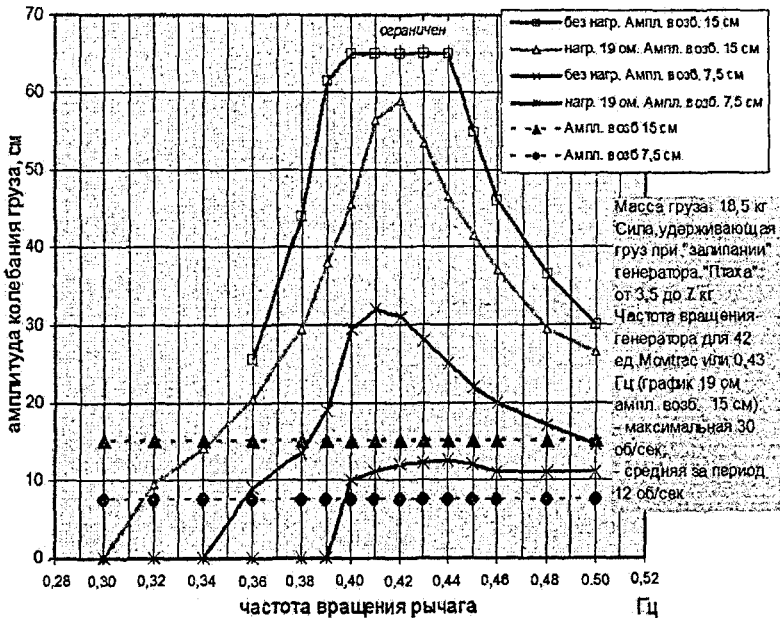


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики пружинного макета с электрогенератором 14В,

20Вт.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Анализ литературных источников по проблеме использования энергии морских волн показал, что в настоящее время не существует достаточно эффективного преобразователя волновой энергии в электрическую. Особенно остро эта проблема стоит в задачах питания автономных океанологических систем, установленных в открытом море на длительный срок.

2. Разработана физико-математическая модель колебательного привода механо-электрического преобразователя энергии волн для модуля ПВЭС на основе двухступенной колебательной системы. Показано, что преимуществом работы устройства с таким приводом является его потенциальная активность и способность адаптировать реакцию на первопричину движения, даже в случае срыва колебательного процесса в одной из подсистем. Модель позволяет проводить анализ процессов отбора энергии от волнового поля, достаточно адекватный явлению, а также рассчитывать параметры устройства и условия его эффективной работы.

3. Разработана методика и представлен пример расчета основных проектных параметров колебательного привода и модуля ПВЭС в целом.

4. Экспериментальное моделирование на лабораторном аналоге механического привода для модуля ПВЭС показало, что положения и выводы динамической модели, рассмотренной в данной работе, находятся в хорошем согласии с поведением реальных устройств. Характеристики привода, определяемые расчетным путем на основе искомой динамической модели, соответствуют данным, полученным в ходе экспериментального моделирования. Это позволяет проводить расчеты и проектирование мощных полноразмерных модулей ПВЭС, опираясь на динамическую модель, и экономить на экспериментальной отработке дорогостоящих узлов.

5. Механический привод, основным элементом которого является колебательная система, может быть с успехом использован для приведения в движение электрогенератора в преобразователе волновой энергии поплавкового типа. Проведенные экспериментально-теоретические исследования модели показывают, что ПВЭС является многообещающим устройством для преобразования энергии волн в электроэнергию, способным занять достойное место среди преобразователей энергии возобновляемых ресурсов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Антуфьев Б.А., Темеев А.А., Темеев С.А., Построение приближенной динамической модели колебательной системы Поплавковой Волновой Электростанции. // Материалы IV Международного Симпозиума Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред, 16-20 февраля, 1998, Ярополец.

2. Temeev S.A. Temeev A.A., Kvasnikov L.A., Ecologically Safe Power System Based On Wave Energy Conversion. // Proceedings of the 33-th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1195, August 2-6, 1998, Colorado Springs, USA.
3. Антуфьев Б.А., Темеев А.А., Темеев С.А., Динамические модели незатухающих процессов в колебательной системе Поплавковой Волновой Электростанции // Материалы V Международного Симпозиума Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред, 15-19 февраля, 1999, Ярополец.
4. Temeev A.A., Kvasnikov L.A., Matoushevsky G.V., Temeev S.A. A Natural-Arificial Power-Industrial System Based On Wave Energy Conversion. // Proceedings of the 34-th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, paper 1999-01-2556, August 2-5, 1999, Vancouver, B.C., Canada.
5. Temeev A.A., Farmakovskaya A. A., Matoushevskiy G.V., Sevruk S.D., and Temeev S.A. Power-Industrial System Concept Based On Wave Energy Conversion, World Renewable Energy Congress VI, Proceedings, Editor: A.A.M. Sayigh, Part IV, p. 1623-1626, 1-7 July 2000, Brighton, UK.
6. Temeev A.A., Antufyev B.A., Temeev S.A.; Simulation of oscillatory drive for float wave energy converter. // Proceedings of the 5-th European Wave Energy Conference, September 16-21, 2003, Cork, Ireland.
7. Temeev A.A., Belokopitov V.P., Temeev S.A.. Floating Wave Energy Converter and Electrolytic Hydrogen Production Integrated System. Proceedings of the World Renewable Energy Congress VIII, 29 August – 3 September, 2004. Denver, Colorado, USA.
8. Temeev A.A., Belokopytov V.P., Temeev S.A. An Integrated System of Floating Wave Energy Converter and Electrolytic Hydrogen Producer. Renewable Energy 31 (2006) 225-239.
9. Temeev S.A. Float Wave Electric Power Station. // Proceedings of the 4-th Coordinated Action on Ocean Energy workshop: Performance Monitoring of Ocean Energy Systems, 2006, Lisbon, Portugal.
10. Alexander Temeev, Oleg Sladkov, Sergey Temeev. Dynamic model of oscillatory drive for Floating Wave Energy Converter. Proceedings of the tenth World Renewable Energy Congress, 19-25 July 2008, Glasgow, Scotland
11. Темеев А.А., Сладков О.С., Темеев С.А. Динамическая модель поплавкового преобразователя энергии волн // Теплоэнергетика РАН, № 12, 2008.

19

Подписано в печать: 25.12.2009

Заказ № 3232 Тираж - 100 экз.

Печать трафаретная.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

www.autoreferat.ru