

На правах рукописи



**ЩУКЛИНОВ**  
**Алексей Павлович**

**РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ УЧАСТИЯ АЭС  
В РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ ТОКА СЕТИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛА**

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки,  
включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: **Коваленко Анатолий Николаевич**  
доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
профессор кафедры «Атомная и тепловая энергетика»  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»

Официальные  
оппоненты: **Лебедев Валерий Иванович**  
доктор технических наук, профессор, директор Института  
ядерной энергетике (филиал ФГАОУ ВО «СПбПУ»)  
г. Сосновый Бор

**Кожемякин Вячеслав Вячеславович**  
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой  
энергетики ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный морской технический университет»

Ведущая организация: АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по  
эксплуатации атомных электростанций» (АО «ВНИИАЭС»),  
г. Москва

Защита диссертации состоится 16 мая 2017 г. в 14-00 часов на заседании  
диссертационного совета Д212.229.04 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург,  
ул. Политехническая, 29, ПГК, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-  
Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте  
<http://www.spbstu.ru/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим  
направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812) 535-57-36

E-mail: [m\\_voltchenkova@mail.ru](mailto:m_voltchenkova@mail.ru)

Ученый секретарь  
диссертационного совета



А.В. Митяков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность диссертационного исследования.** В связи с увеличением доли АЭС в общей выработке электроэнергии и большого износа оборудования ТЭС, возникает острая необходимость привлечения АЭС к работе в диспетчерском графике нагрузок и к участию в регулировании частоты тока в сети. На сегодняшний день АЭС работают преимущественно в базовой части графика нагрузок. Это связано с более высокой капитальной составляющей стоимости генерируемой на АЭС электроэнергии, по сравнению с ТЭС, и с низкими маневренными характеристиками активных зон ядерных реакторов.

В настоящее время по Постановлению Правительства РФ №1172 от 27 декабря 2010г. всё генерирующее оборудование (кроме АЭС с реакторами БН и РБМК) должно участвовать в общем первичном регулировании частоты тока в сети.

Работы, выполненные АО «ВНИИАЭС», ОАО «НПО ЦКТИ» и другими организациями, показывают эффективность использования на АЭС с ВВЭР (далее АЭС) при участии энергоблока в диспетчерском графике нагрузок системы аккумулирования тепловой энергии (САТЭ), благодаря чему можно изменять мощность турбоустановки без изменения мощности реактора за счет аккумулирования тепловой энергии. Остается неисследованным вопрос работы АЭС с САТЭ в режиме автоматического изменения мощности по частоте тока сети, который по требуемой скорости изменения мощности и количеству ее изменений существенно превышает аналогичные изменения в диспетчерском графике нагрузок.

**Степень разработанности проблемы.** В основе ранее проведенных, в основном НИЦ «Курчатовский институт», исследований возможности привлечения типовых блоков АЭС к работе в режиме автоматического изменения мощности энергоблока по частоте тока сети лежит способ изменения мощности реактора типа ВВЭР за счет температурного эффекта реактивности. Такой способ регулирования из-за транспортного запаздывания теплоносителя в главном циркуляционном контуре является инерционным. К тому же, маневренные характеристики АЭС в настоящий момент не удовлетворяют требованиям сети при регулировании частоты тока.

**Цель и задачи исследования.** Целью данного исследования является разработка и обоснование способа изменения мощности АЭС с тепловыми аккумуляторами для обеспечения участия в регулировании частоты тока сети без изменения мощности реакторной установки.

Основные задачи данного исследования:

- анализ статических характеристик энергоблока в режимах зарядки и разрядки САТЭ;
- разработка системы автоматического регулирования давления пара в парогенераторе (ПГ) в режиме зарядки САТЭ, системы автоматического изменения мощности турбины и системы автоматического регулирования температуры питательной

воды на входе в ПГ в режиме разрядки САТЭ;

- разработка математической модели динамики исследуемой установки;
- создание компьютерной программы режимов зарядки и разрядки САТЭ;
- обоснование возможности автоматического изменения мощности энергоблока по частоте тока сети в режимах зарядки и разрядки САТЭ в соответствии с требованиями нормативных документов без привлечения реакторной установки.

**Объект и предмет исследования.** В качестве объекта исследования выбран энергоблок типового проекта «АЭС-2006» с ВВЭР-1200 с САТЭ. Предметом исследования являются способы регулирования мощности энергоблока АЭС с САТЭ при режимах зарядки и разрядки соответственно для обоснования возможности работы АЭС в режиме автоматического изменения мощности энергоблока по частоте тока сети без изменения мощности реакторной установки.

**Теоретические и методологические основы исследования.** Методика исследования базируется на математическом моделировании динамики установки, включающей: ПГ, паротурбинную установку с оборудованием САТЭ и системами автоматического регулирования. В основу математических моделей положены уравнения сохранения энергии и массы, уравнения состояния теплообменивающихся сред, законы регулирования. Методика протестирована путем сопоставления с результатами, полученными при исследовании отдельных известных моделей динамики.

**Научная новизна исследования.** Разработан и обоснован новый способ изменения мощности АЭС с САТЭ по частоте тока сети без привлечения реакторной установки, подтвержденный расчетами по разработанной компьютерной программе на основе созданной математической модели динамики исследуемой установки на различных режимах САТЭ, включающей в свой состав:

- для режима зарядки САТЭ: модели конденсационного теплообменника зарядки (ТЗ), ПГ, питательного трубопровода и регулирующей арматуры, автоматических систем регулирования давления пара в ПГ, регулирования расхода масла через ТЗ, регулирования уровня конденсата в ТЗ;
- для режима разрядки САТЭ: модели проточной части турбины, сепаратор-пароперегревателя, регенеративных и масляных теплообменников с примыкающими трубопроводами, регулирующей арматуры, систем автоматического регулирования мощности турбины, температуры питательной воды на входе в ПГ и поддержания давления в деаэратор.

**Основные положения (научные выводы), выносимые на защиту.** На защиту выносятся:

- обоснование возможности участия АЭС с САТЭ в режиме регулирования частоты

тока сети с применением разработанного способа изменения мощности энергоблока в режимах зарядки и разрядки САТЭ без изменения режима работы реакторной установки;

– результаты численного моделирования для апробации способа изменения мощности энергоблока АЭС с САТЭ, полученные с использованием разработанного программного комплекса;

– рекомендации по расширению диапазона изменения мощности АЭС с САТЭ вплоть до диапазона ТЭС.

**Теоретическая и практическая значимость исследования.** Теоретическая значимость исследования заключается в расчетном обосновании на основе созданной математической модели возможности работы АЭС, выполненного на базе типового проекта «АЭС-2006», с САТЭ в режиме автоматического изменения мощности по частоте тока сети без привлечения реакторной установки, что весьма важно для обеспечения ее надежности и безопасности в условиях энергетических систем.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования предложенного способа изменения мощности АЭС с САТЭ как на существующих АЭС с ВВЭР (в рамках модернизации), так и в перспективных проектах АЭС на основе рекомендаций по расширению диапазона изменения мощности АЭС с САТЭ.

**Степень достоверности и апробация результатов исследования.** Достоверность материально-тепловых балансов, математических моделей динамики элементов исследуемой установки подтверждается путем сопоставления динамических результатов исследования со статическими, а также с результатами, полученными при исследовании известных моделей отдельного оборудования энергоблока. Достоверность функциональных схем систем автоматического регулирования и настроек регуляторов подтверждается путем сопоставления с типовыми регуляторами и их настройками. Разработанная программа протестирована на основе известных моделей регуляторов и моделей отдельных элементов исследуемой установки.

Основные результаты работы были представлены на: Неделе науки СПбГПУ, Международной научно-практической конференции, г. Санкт-Петербург, 6-11 декабря 2010 г (2016 г.), IV научно-технической конференции молодых ученых и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА-2012», г. Санкт-Петербург (2012 г., 2013 г., 2015 г.), конференции «Современные методы обеспечения эффективности и надежности в энергетике», г. Санкт-Петербург, 2012 г., конференции «Безопасность Ядерной Энергетики», г. Волгодонск (2012 г., 2013 г.), 63 Международной конференции «ЯДРО 2013» «Фундаментальные проблемы ядерной физики и атомной энергетики», г. Москва, 2013 г.

**Личный вклад автора.** Разработка математической модели динамики исследуемой установки для режима зарядки и режима разрядки САТЭ, создание на ее основе расчетной

компьютерной программы и проведение ее верификации, проведение расчетов динамики установки и анализ полученных результатов. Участие в разработке способа изменения мощности АЭС с САТЭ для режимов зарядки и разрядки. Соавторство в заявке на патент на полезную модель «Система автоматического регулирования частоты тока в сети с участием АЭС» (заявка №2016147113 от 30.11.2016).

**Публикации.** По материалам данного исследования опубликовано 11 работ, из них 2 работы в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения и пяти приложений:

1 ГЛАВА – Обзор литературы; 2 ГЛАВА – Описание объекта исследования; 3 ГЛАВА – Постановка задачи; 4 ГЛАВА – Определение основных параметров исследуемого варианта САТЭ; 5 ГЛАВА – Разработка методики расчета элементов энергоблока, участвующих в режиме зарядки; 6 ГЛАВА – Разработка методики расчета элементов энергоблока, участвующих в режиме разрядки; 7 ГЛАВА – Обоснование точности полученных результатов; 8 ГЛАВА – Обоснование возможности участия АЭС с САТЭ в регулировании частоты тока сети в режиме зарядки; 9 ГЛАВА – Обоснование возможности участия АЭС с САТЭ в регулировании частоты тока сети в режиме разрядки.

Приложения 1-3– Теплогидравлические расчеты ТЗ, ТРВД и ТРНД; Приложение 4 – Теплофизические свойства ТЛВ-330; Приложение 5 – Описание программы расчета динамики энергоблока с САТЭ.

Работа изложена на 157 страницах, содержит 24 рисунка и 16 таблиц. Библиографический список включает 90 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассматриваются основные причины необходимости привлечения АЭС к работе в диспетчерском графике нагрузок и в режиме автоматического изменения мощности энергоблока по частоте тока сети, технические, правовые основы проблемы и возможные варианты ее решения, целесообразность использования для решения данной проблемы аккумуляторов тепловой энергии (в частности масляных аккумуляторов), состояние разработок на сегодняшний день, цель настоящей работы.

Основанием для привлечения АЭС к участию в регулировании частоты тока сети является Постановление Правительства РФ №1172 от 27 декабря 2010г. В соответствии с этим развёрнуты работы по привлечению существующих АЭС с ВВЭР-1000 к участию в регулировании частоты тока сети, однако, по сравнению с ТЭС, в очень ограниченном диапазоне допустимого изменения мощности и количества циклов, определяемого возможностями реакторной установки. При этом изменение мощности турбины (как для

АЭС, так и для ТЭС) в любую сторону независимо от величины этого изменения должно по нормативным требованиям проводиться не более чем за 30 с, причем 50% изменения этой мощности должно осуществляться за первые 10-15 с.

Проведенный во АО «ВНИИАЭС» технико-экономический анализ эффективности различных вариантов регулирования нагрузки в соответствии с диспетчерским графиком (создание АЭС с улучшенными маневренными характеристиками активных зон реактора; режимы, в которых АЭС работает в базовой части графика нагрузок, а в переменных частях графика работают другие маневренные станции; создание АЭС с тепловыми аккумуляторами) показал, что применение аккумулирования тепловой энергии на АЭС является экономически выгодным решением в складывающихся на перспективу системно-режимных условиях работы энергетической системы России.

Наряду с участием в диспетчерском графике нагрузок АЭС с САТЭ могут быть столь же эффективны и при работе в режиме автоматического изменения мощности энергоблока по частоте тока сети, позволяя менять мощность энергоблока при постоянной мощности реакторной установки и, следовательно, снимая в принципе ограничения, накладываемые реакторной установкой на маневренные характеристики энергоблока.

Вместе с тем отсутствуют какие-либо работы, посвящённые непосредственно исследованию возможности автоматического изменения мощности АЭС с САТЭ по частоте тока сети с требуемой нормативной документацией скоростью при постоянной мощности реакторной установки.

В **Главе 1** представлен анализ публикаций и документации по тематике проведенной работы, в котором использовано 90 источников, из которых 9 источников относятся к нормативно-руководящей документации, 11 – к научно-исследовательским работам по обоснованию целесообразности работы АЭС без САТЭ в диспетчерском графике нагрузок и участия в регулировании частоты тока; 3 – к работам, посвящённым обоснованию возможности участия АЭС без САТЭ в регулировании частоты тока путём использования температурного эффекта реактивности; 21 – к работам, посвящённым обоснованию целесообразности использования на АЭС аккумулирования тепловой энергии; 18 – к работам по общим вопросам моделирования и расчёта энергетических установок и их систем.

Обращает на себя внимание малое количество работ по исследованию проблемы работы АЭС (без САТЭ) в режиме автоматического изменения мощности по частоте тока сети, несмотря на общее понимание необходимости их участия. При этом все опубликованные работы в этой области посвящены вопросам регулирования путём изменения мощности реактора типа ВВЭР за счёт температурного эффекта реактивности.

В **Главе 2** даётся описание объекта исследования, в качестве которого принят вариант проработки САТЭ с проектом «АЭС-2006» (реактор ВВЭР-1200, турбоустановка

К-1200-6,8/50), что объясняется наличием на момент выполнения исследования необходимых материалов по данному типовому проекту.

Принципиально, в исследовании могут рассматриваться и другие конкретные схемы паротурбинной установки. При этом важно только, чтобы используемые исходные данные были взаимосвязаны, оговорены условия проведения исследования, а также область достоверности и применимости полученных результатов.

На рисунке 1 представлена предложенная принципиальная тепловая схема паротурбинной установки рассматриваемого варианта энергоблока с САТЭ (САТЭ выделена темным контуром).

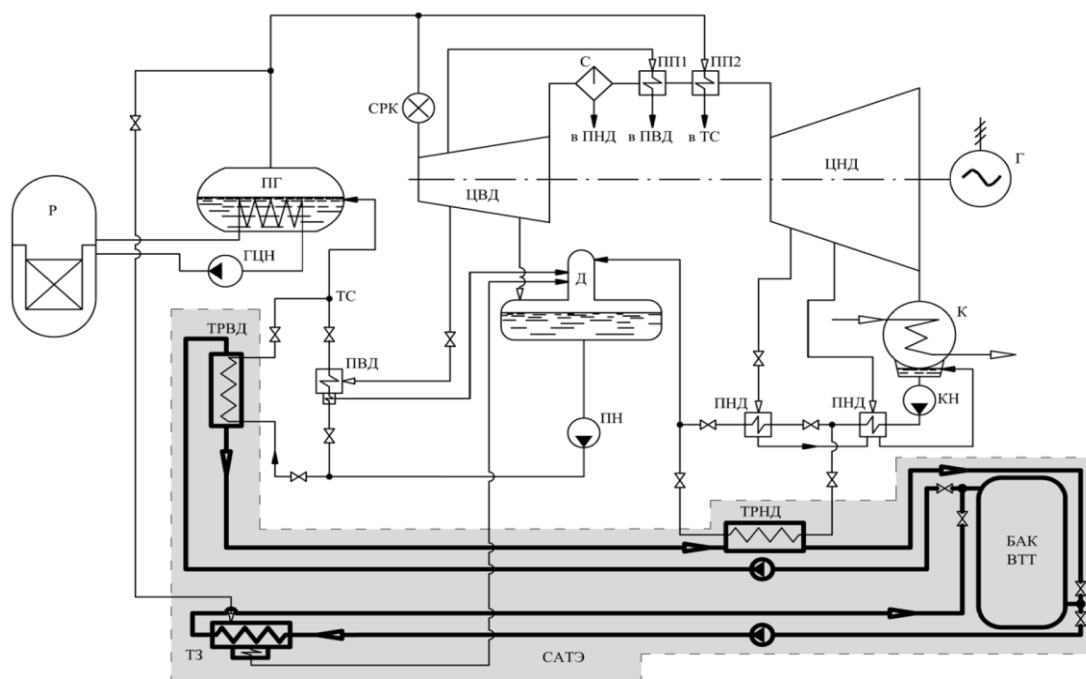


Рисунок 1 – Принципиальная тепловая схема турбоустановки энергоблока АЭС с САТЭ

На рисунке 1 обозначено: Р – реактор, ПГ – парогенератор, ГЦН – главный циркуляционный насос, СРК – стопорно-регулирующий клапан, ЦВД – цилиндр высокого давления, С – сепаратор, ПП – пароперегреватель, ЦНД – цилиндр низкого давления, К – конденсатор, КН – конденсационный насос, ПНД – подогреватель низкого давления, Д – деаэрация, ПН – питательный насос, ПВД – подогреватель высокого давления, ТЭ – теплообменник, ТРВД – теплообменник разрядки высокого давления, ТРНД – теплообменник разрядки низкого давления, БАК ВТТ – бак-аккумулятор высокотемпературного теплоносителя, ТС – точка смешения.

В состав САТЭ входит: 4 (по числу парогенераторов) параллельно включённых ТЭ, 4 бака ВТТ, насосы прокачки ВТТ, 4 параллельно включённых ТРВД, и столько же ТРНД, регулирующая и запорная арматура. В качестве аккумулирующей среды используется масло ТЛВ-330. Нагрев масляного теплоносителя проводится в ТЭ теплотой конденсации части свежего пара, отбираемого из основного потока при снижении нагрузки. Отбор пара осуществляется через дроссельно-регулирующие клапаны ТЭ, настроенные на поддержание давления пара в ПГ, что исключает необходимость в изменении мощности реактора. Нагретый масляный теплоноситель накапливается в баках ВТТ и, при необходимости, возвращает теплоту рабочей среде через ТРВД и ТРНД, частично берущие на себя в этот момент функции регенеративных подогревателей. Это позволяет уменьшить величину



регенеративного отбора пара на подогрев основного конденсата и питательной воды и использовать данный пар на увеличение мощности турбины.

Изменение мощности турбины в любую сторону при работе в режиме автоматического изменения мощности энергоблока по частоте тока сети проводится:

- в режиме зарядки САТЭ – изменением расхода пара через СРК турбины с поддержанием постоянного давления пара в ПГ (путём сброса части свежего пара через специальный дроссельно-регулирующий клапан в ТЗ);

- в режиме разрядки САТЭ – изменением расхода пара через проточную часть турбины при постоянном расходе пара через СРК (путём изменения величины отбора пара через специальный дроссельно-регулирующий клапан на один из регенеративных теплообменников).

В **Главе 3** освещаются основные задачи обоснования возможности автоматического изменения мощности АЭС с САТЭ по частоте тока сети в соответствии с нормативными требованиями без привлечения реакторной установки, а именно:

- определение предельной мощности турбогенератора в режиме разрядки САТЭ для выявления максимального диапазона работы АЭС с САТЭ с участием в регулировании частоты тока сети. В исследовании определяется условие достижения предельной мощности турбогенератора – закрытие части регенеративных отборов с учетом минимального гидравлического сопротивления СРК. При этом не принимаются во внимание ограничения по прочности проточной части турбоустановки типового проекта;

- определение значений конструктивных и режимных параметров оборудования САТЭ в объеме эскизного проекта;

- выполнение расчёта и анализа статической характеристики АЭС с САТЭ в режиме разрядки в диапазоне изменения мощности от номинальной до предельно возможной. В случае выявления неудовлетворительной работы исследуемой схемы САТЭ необходимо разработать предложения по её модернизации;

- определение условий, ограничивающих максимально возможный диапазон изменения мощности турбоустановки типового проекта при участии АЭС с САТЭ в регулировании частоты тока, с целью разработки предложений по его расширению, вплоть до значений для ТЭС;

- разработка системы автоматического регулирования давления пара в ПГ для исключения изменения мощности реактора при работе энергоблока в режиме автоматического изменения мощности по частоте тока сети при зарядке САТЭ;

- разработка системы автоматического изменения мощности турбины для участия энергоблока в регулировании частоты тока сети в режиме разрядки САТЭ, удовлетворяющей по скорости срабатывания нормативным требованиям;

– разработка системы автоматического регулирования температуры питательной воды на входе в ПГ для исключения изменения мощности реактора при работе энергоблока в режиме автоматического изменения мощности по частоте тока сети при разрядке САТЭ;

– разработка расчётной программы, моделирующей работу энергоблока в режимах зарядки и разрядки САТЭ, с целью подтверждения работоспособности разработанных систем автоматического регулирования.

В **Главе 4** на основе материально-тепловых балансов определены значения режимных и конструктивных параметров оборудования исследуемого варианта САТЭ, включающие:

– предельное значение мощности турбогенератора при разрядке САТЭ;

– максимальное значение количества теплоты, передаваемого от второго контура энергоблока аккумуляторам тепла при зарядке САТЭ и обратно при разрядке САТЭ, с учетом времени работы энергоблока на предельной мощности (участие в диспетчерском графике нагрузок);

– требуемое значение мощности теплообменников зарядки и разрядки САТЭ;

– значения расходов и температур теплообмениваемых сред на входе и выходе теплообменников зарядки и разрядки САТЭ;

– значения конструктивных параметров теплообменников зарядки и разрядки САТЭ (площади поверхностей теплообмена, количество и длины труб и др.).

В результате выполненных расчетов при закрытии I, II, IV и V регенеративных отборов было определено значение предельной мощности энергоблока в режиме разрядки САТЭ – 117,5 % $N_{ном}$ .

Общее количество тепловой энергии, которая может быть передана от САТЭ во второй контур энергоблока при разрядке САТЭ и, соответственно, получена от второго контура энергоблока при зарядке САТЭ, определяется как произведение суммарной мощности отключённых регенеративных отборов пара (суммарная мощность разрядки САТЭ) и продолжительности разрядки САТЭ:

$$Q_{САТЭ} = \sum_{i=I, II, IV, V} N_{ОТБ i} \cdot \tau_{РАЗР}$$

Продолжительность разрядки САТЭ в исследовании принята 8 часов (2 дневных пика нагрузки, продолжительностью по 4 часа каждый, как показано на рисунке 2).

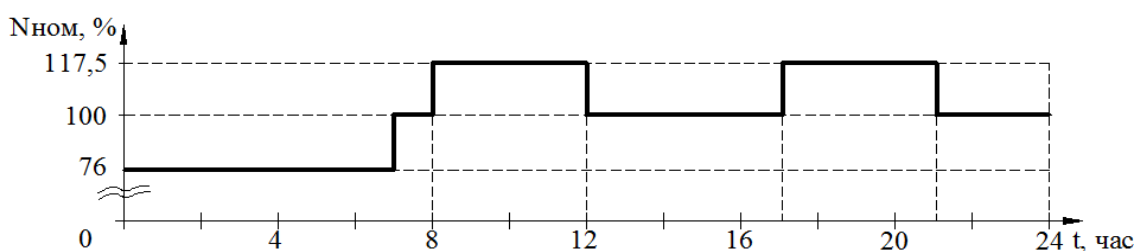


Рисунок 2 – Расчетный вариант диспетчерского графика нагрузок

Требуемая мощность зарядки (равная суммарной мощности ТЗ САТЭ) определяется

через отношение определенного общего количества теплоты к продолжительности ночной разгрузки энергоблока (время зарядки СТАЭ):  $N_{ТЗ}^{СУМ} = Q_{САТЭ} / \tau_{ЗАР}$ .

Общий расход греющего пара на ТЗ САТЭ определяется через отношение требуемой мощности зарядки САТЭ к разности значений энтальпии греющего пара на входе в ТЗ и энтальпии переохлажденного конденсата греющего пара на выходе из ТЗ:

$$G_{ГП}^{ТЗ} = N_{ТЗ}^{СУМ} / (h_{ГП} - h_{КГП}).$$

При температуре греющего пара на входе в ТЗ 282,8 °С в режиме зарядки САТЭ температура масла на выходе из ТЗ (входе в ТРВД) принимается равной 270 °С. При температуре основного конденсата на входе в ТРНД 107,3 °С в режиме разрядки САТЭ температура масла на выходе из ТРНД принимается равной 147 °С. С учетом этого расход масла в режиме разрядки САТЭ определяется как частное от деления суммарной мощности разрядки САТЭ на величину охлаждения масла в масляных теплообменниках разрядки (ТРВД и ТРНД) и удельную теплоёмкость масла при среднем значении его температуры:

$$G_{МТР} = \sum_{i=I, II, IV, V} N_{ОТБ\ i} / [(T_{М\ ТРВД}^{ВХ} - T_{М\ ТРНД}^{ВЫХ}) \cdot C_{P\ М}^{CP}].$$

Учитывая, что общее количество масла перекачиваемого в режимах разрядки и зарядки САТЭ равны, расход масла через ТЗ определяется как:  $G_{МТЗ} = G_{МТР} \cdot \tau_{РАЗР} / \tau_{ЗАР}$ .

Полученные параметры оборудования САТЭ использованы для конструктивного расчёта масляных теплообменников.

**Глава 5** посвящена вопросам моделирования систем автоматического регулирования и элементов исследуемой установки, определяющих работу АЭС с САТЭ в режиме зарядки.

В п. 5.1 приводится математическая модель динамики ПГ энергоблока АЭС, которая представляет собой систему дифференциальных уравнений, определяющих зависимость изменения исследуемых параметров от времени. Уравнения изменения основных параметров (температуры генерируемого пара на линии насыщения и геометрического уровня пароводяной смеси) представлены ниже:

$$\begin{cases} \frac{dt_s}{d\tau} = \frac{G_{ПВ} \cdot h_{ПВ} - G_{П} \cdot h'' - f_1(t_s) \cdot (G_{ПВ} - G_{П}) + Q}{M \cdot \frac{df_1(t_s)}{dt_s} + V \cdot \left( \frac{df_2(t_s)}{dt_s} - \frac{f_2(t_s)}{t_s + 273} \right)}, \\ \frac{dH_{ГЕОМ}}{d\tau} = \frac{1}{F_{ЗЕР}} \cdot \frac{dV_{УР}}{d\tau} = \frac{1}{F_{ЗЕР}} \cdot \left( \frac{dV'}{d\tau} + \frac{dV''_{УР}}{d\tau} \right) \end{cases}$$

где  $G_{ПВ}$  и  $G_{П}$  – расходы питательной воды и генерируемого пара соответственно, кг/с;  $t_s$  – температура генерируемого пара, °С;  $H_{ГЕОМ}$  – геометрический уровень пароводяной смеси, м;  $h_{ПВ}, h''$  – удельные энтальпии питательной воды и пара на линии насыщения соответственно,

кДж/кг;  $Q$  – мощность, передаваемая пароводяной смеси от первого контура через теплообменную поверхность, кВт;  $M$  – масса пароводяной среды в ПГ, кг;  $V$  – внутренний объем ПГ, м<sup>3</sup>;  $f_1(t_s) = h' - v' \cdot (h'' - h') / (v'' - v')$ ;  $f_2(t_s) = (h'' - h') / (v'' - v')$ ; значения производных  $df_1(t_s)/dt_s = 4 \cdot 10^3$  кДж/(кг·°С) и  $df_2(t_s)/dt_s = 78,4 \cdot 10^4$  кДж/(м<sup>3</sup>·°С) определены для диапазона температур от 285°С до 294°С, в котором значения производных остаются постоянными;  $V', V''_{ур}$  – объемы воды и пара под уровнем соответственно, м<sup>3</sup>.

Уравнение изменения температуры генерируемого пара на линии насыщения во времени выводится из уравнений материального и теплового балансов термодинамически равновесной пароводяной смеси, заполняющей паровой объем ПГ и объёмы паропроводов до СРК. Данные объёмы при моделировании рассматриваются как одноточечная сосредоточенная ёмкость.

Уравнение изменения геометрического уровня пароводяной смеси во времени выводится из уравнения изменения объёма смеси, пренебрегая незначительным изменением площади зеркала испарения  $F_{ЗЕР}$ .

В п. 5.2 представлена разработанная система регулирования давления пара в ПГ путем изменения расхода свежего пара на ТЗ на величину, исключающую выход значения давления пара в ПГ из зоны нечувствительности датчика автоматического регулирования мощности реактора (АРМ). Благодаря этому, исключается изменение мощности реактора в режиме зарядки САТЭ.

Функциональная схема регулирования давления пара в ПГ представлена на рисунке 3.

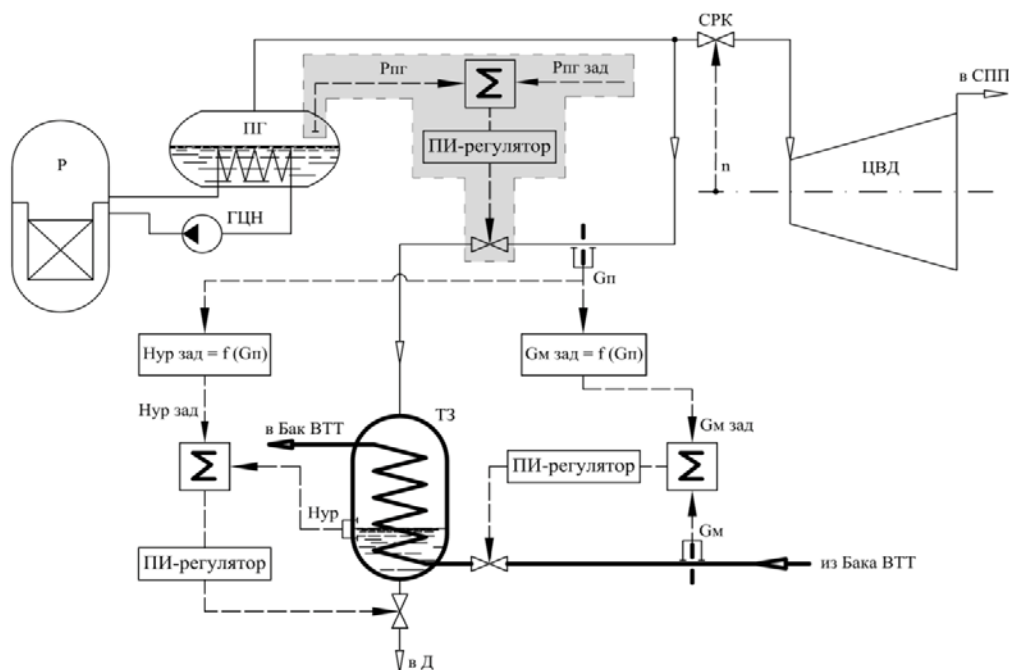


Рисунок 3 – Функциональная схема системы регулирования давления пара в ПГ АЭС с САТЭ

Разница текущего значения давления в ПГ от заданного подается на вход регулятора поддержания давления (на рисунке 3 выделен темным контуром), представляющий собой типовой ПИ-регулятор. Математическая модель регулятора представляет собой систему алгебраических и дифференциальных уравнений. Уравнение управляющего сигнала в модели имеет вид:  $X1 = K1 \cdot (p_{ПГ} - p_{ПГ}^{Зад}) - K_{ОБРСВ} \cdot X_{ОБРСВ}$ , где  $K1$  и  $K_{ОБРСВ}$  – безразмерные коэффициенты усиления сигнала и обратной связи соответственно,  $X_{ОБРСВ}$  – безразмерная величина обратной связи,  $p_{ПГ} - p_{ПГ}^{Зад}$  – разница текущего и заданного значений давления в ПГ, МПа. По значению управляющего сигнала регулятор подает выходной сигнал на перемещение регулирующего клапана с учетом постоянной времени привода, постоянной интегрирования, коэффициента обратной связи и коэффициента усиления, зоны нечувствительности и зоны возврата. Это в свою очередь изменяет величину расхода свежего пара в ТЗ и тем самым предотвращает выход текущего давления пара в ПГ за пределы зоны нечувствительности датчика АРМ. Новое значение расхода пара на ТЗ поступает в задатчик регулятора расхода масла и задатчик регулятора уровня конденсата для приведения текущих значений расхода масла и уровня конденсата в ТЗ в соответствие с требуемыми значениями, определяемыми по разработанной на основе материально-тепловых балансов статической характеристике ТЗ, представленной на рисунке 4.

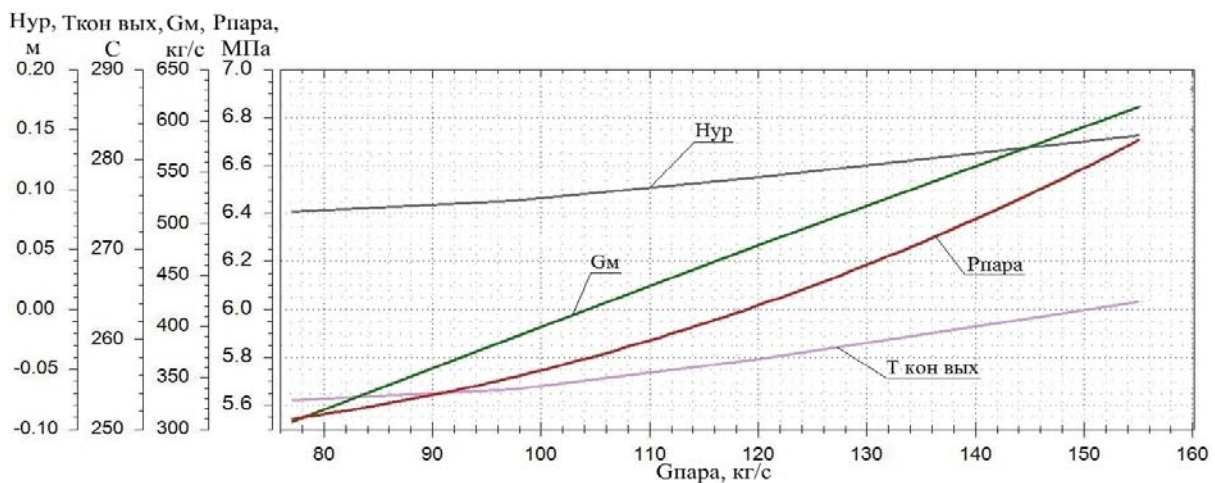


Рисунок 4 – Статическая характеристика ТЗ

На рисунке 4 обозначено:  $G_{П}$  – расход пара,  $G_{М}$  – расход нагреваемого масла,  $P_{П}$  – давление греющего пара,  $H_{ур}$  – положение уровня конденсата греющего пара,  $T_{кон\ вых}$  – температура конденсата на выходе из ТЗ.

**В п. 5.3** приводится разработанная методика расчета изменения расхода питательной воды. В основу методики положены модель гидравлики питательного трубопровода (от Д до ПГ) и модель регулятора уровня пароводяной смеси в ПГ.

Основное уравнение расчета гидравлики трубопровода имеет вид:  $\Delta p_{НАС} = p_{ПГ} - p_{Д} + \Delta p^{TP} + \Delta p^{KL} + \Delta p_{НИВ}$ , где  $\Delta p_{НАС}$  – напор питательного насоса, определяемый по его напорной характеристике, МПа;  $\Delta p_{НИВ}$  – нивелирный подпор, МПа;

$P_{ПГ}, P_{Д}$  – давление в ПГ и Д соответственно, МПа;  $\Delta p^{TP}, \Delta p^{KL}$  – потери давления в питательном трубопроводе без клапана и потери давления на клапане соответственно, МПа.

При проведении исследования системы автоматического регулирования уровня пароводяной смеси в ПГ требовалось определить характер изменения  $\Delta p^{KL}$  в зависимости от положения штока регулирующего клапана. Для этого определялись значения потерь давления в трубопроводе без клапана при нескольких выбранных значениях расхода питательной воды:  $\Delta p_i^{TP} = \Delta p_{НОМ}^{TP} \cdot (g_i)^2$ , где  $g_i = G_{ПВ}^i / G_{ПВ}^{НОМ} = 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0,1$ ;  $G_{ПВ}^{НОМ}$  – заданный номинальный расход питательной воды, кг/с,  $\Delta p_{НОМ}^{TP}$  – потери давления в питательном трубопроводе без регулирующего клапана на номинальном режиме, МПа. В свою очередь искомые величины потерь давления на клапане рассчитывались через разницу значений напора питательного насоса (определяемых по заданной напорной характеристике насоса в соответствии с выбранными значениями расхода питательной воды) и значений потерь давления в трубопроводе без клапана. Для выбранных значений расхода питательной воды принимались соответствующие значения положения штока клапана.

Регулятор уровня в исследовании принят типовой трёхимпульсный (на его вход подаются разница текущего и заданного значений геометрического уровня пароводяной смеси в ПГ  $\Delta H_{ГЕОМ}$  (м), текущие значения питательной воды на входе в ПГ  $G_{ПВ}$  (кг/с) и расхода пара на выходе из ПГ  $G_{П}$  (кг/с)). Уравнение управляющего сигнала в модели имеет вид:

$$X1^{УР\ ПГ} = K1^{УР\ ПГ} \cdot \Delta H_{ГЕОМ} - K_{ОБР\ СВ}^{УР\ ПГ} \cdot X_{ОБР\ СВ}^{УР\ ПГ} - K_{П}^{УР\ ПГ} \cdot G_{П} - K_{ПВ}^{УР\ ПГ} \cdot G_{ПВ}, \quad \text{где}$$

$K1^{УР\ ПГ}, K_{П}^{УР\ ПГ}, K_{ПВ}^{УР\ ПГ}, K_{ОБР\ СВ}^{УР\ ПГ}$  – безразмерные коэффициенты усиления сигналов и обратной связи соответственно. По значению управляющего сигнала регулятор подает выходной сигнал на перемещение положения штока регулирующего клапана с учетом параметров, описанных выше. Это приводит к изменению общего гидравлического сопротивления питательного трубопровода и, соответственно, к расходу питательной воды в ПГ энергоблока АЭС.

**Глава 6** посвящена вопросам моделирования систем автоматического регулирования и элементов исследуемой установки, определяющих работу АЭС с САТЭ в режиме разрядки.

В п. 6.1 представлена разработанная методика расчета динамики процесса расширения пара в проточной части турбины при изменении ее мощности через изменение величины регенеративного отбора в режиме автоматического изменения мощности энергоблока по частоте тока сети при разрядке САТЭ. В основу методики положен расчет процесса расширения пара с хвоста турбины на каждом шаге счета, при котором определяются параметры пара на входе в отсеки по формуле Стодола-Флюгеля:

$$p_i = \sqrt{\frac{(p_{0i}^2 - p_{0i+1}^2) \cdot G_i^2 \cdot t_i \cdot (1 - y_i)}{G_{0i}^2 \cdot t_{0i} \cdot (1 - y_{0i})}} + p_{i+1}^2, \text{ где } p - \text{ давление пара, МПа; } G - \text{ расход пара}$$

через отсек, кг/с;  $t$  – температура пара, °С;  $y$  – влажность пара; значение индексов: «0 i» – значение параметра в начале отсека при номинальном значении расхода  $G_0$ ; «0 i+1» – значение параметра в конце отсека при номинальном значении расхода  $G_0$ ; «i» – значение параметра в начале отсека при новом значении расхода  $G$ ; «i+1» – значение параметра в конце отсека при новом значении расхода  $G$ .

В п. 6.2 представлена разработанная методика расчета динамики теплообменных аппаратов, в основу которой положены математические модели масляных теплообменников, а также модели регенеративных подогревателей и пароперегревателей СПП в принятых в «АЭС-2006» конструктивных исполнениях.

Каждая из математических моделей динамики представляет собой систему дифференциальных уравнений, определяющих зависимость изменения исследуемых параметров от времени. Ниже представлены уравнения изменения основных параметров: давления греющего пара, энтальпии нагреваемой среды и температуры металла теплообменной поверхности:

$$\begin{cases} \frac{dp_{ГП}}{d\tau} = - \frac{(v' - v'') \cdot (G_{ГП}^{BX} \cdot h_{ГП}^{BX} - G_{ГП}^{BЫX} \cdot h' - Q_{ГП} - h''(G_{ГП}^{BX} - G_{ГП}^{BЫX})) + (h'' - h') \cdot v'' \cdot (G_{ГП}^{BX} - G_{ГП}^{BЫX})}{(h'' - h') \cdot M_V - M_H \cdot (v'' - v')} \\ \frac{dh_{НАГ}}{d\tau} = \frac{1}{M_{НАГ}} \cdot (Q_{НАГ} - G_{НАГ} \cdot (h_{BЫX} - h_{BX}) - \frac{dM_{НАГ}}{d\tau} \cdot h) \\ \frac{dT_M}{d\tau} = \frac{1}{M_M \cdot C_{pM}} \cdot (Q_{ГП} - Q_{НАГ}) \end{cases}$$

где  $G$  – расход, кг/с;  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $h$  – удельная энтальпия, кДж/кг;  $v$  – удельный объем, м<sup>3</sup>/кг;  $M$  – масса, кг;  $T_M$  – средняя температура металла трубки, °С;  $C_{pM}$  – теплоемкость металла, соответствующая  $T_M$ , кДж/(кг · °С);  $M_V = M' \cdot \frac{dv'}{dp} + M'' \cdot \frac{dv''}{dp}$ ,

$M_H = M' \cdot \frac{dh'}{dp} + M'' \cdot \frac{dh''}{dp} - V \cdot 10^{-3}$  – коэффициенты, принимаемые для упрощения

зависимостей;  $\frac{dv'}{dp}, \frac{dv''}{dp}$  – производная изменения удельного объема от давления насыщения,

м<sup>3</sup>/(кг·Па);  $\frac{dh'}{dp}, \frac{dh''}{dp}$  – производная изменения удельной энтальпии от давления насыщения,

Дж/(кг·Па); индексы «наг», «гр», «вх», «вых» – нагреваемая и греющая среды, входной параметр, выходной параметр соответственно.

В п. 6.3 представлена разработанная система регулирования мощности турбины энергоблока путем изменения величины расхода пара на регенеративный теплообменник (в

данном случае – ПНД4) с настройками регуляторов, обеспечивающими требуемую нормативной документацией скорость изменения мощности турбины энергоблока при участии в регулировании частоты тока сети.

Функциональная схема разработанной системы регулирования приведена на рисунке 5.

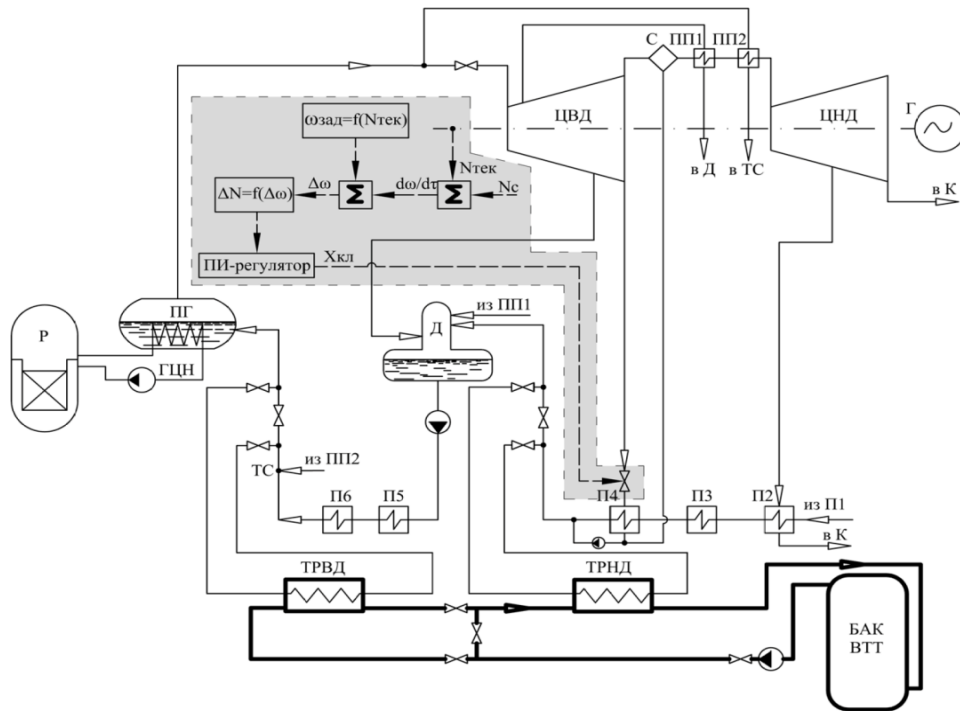


Рисунок 5 – Функциональная схема регулирования мощности турбины энергоблока АЭС с САТЭ

Изменение активной нагрузки в сети приводит к изменению частоты тока в сети (частоты вращения ротора турбины), по которому, используя статическую характеристику турбины, определяется требуемое изменение мощности турбины. Данное изменение мощности в виде входного сигнала подается на регулятор изменения мощности (на рисунке 5 выделен темным контуром). Математическая модель регулятора представляет собой систему алгебраических и дифференциальных уравнений. Уравнение управляющего сигнала в модели имеет вид:  $X1^{TYP} = K1^{TYP} \cdot (-\Delta N_{Tm}) - K_{OBR\ CB}^{TYP} \cdot X_{OBR\ CB}^{TYP}$ , где  $K1^{TYP}$ ,  $K_{OBR\ CB}^{TYP}$ ,  $X_{OBR\ CB}^{TYP}$  – безразмерные коэффициент усиления сигнала, коэффициент обратной связи и величина обратной связи соответственно;  $\Delta N_{Tm}$  – требуемая величина изменения мощности турбины, МВт. По данному значению управляющего сигнала и с учетом параметров, описанных выше, регулятор перемещает регулирующий клапана на отборе. Это влечет за собой изменение расхода пара через данный регенеративный отбор, что, в свою очередь, при постоянном расходе пара через СРК турбины, ведёт к изменению его расхода через проточную часть турбины и, соответственно, к изменению её мощности.

В п. 6.4 представлена разработанная система регулирования температуры питательной воды путем изменения расхода греющего масла через ТРВД. Дополнительно, для упрощения данного регулирования, поддерживается постоянным значение давления пара



в деаэраторе путем изменения расхода греющего пара.

Функциональная схема разработанной системы регулирования приведена на рисунке 6. Сигналы рассогласования текущих значений температуры питательной воды на входе в ПГ и давления пара в деаэраторе от заданных значений (при номинальной мощности энергоблока АЭС) подаются на регуляторы температуры и давления (на рисунке 6 выделены темными контурами), изменяющие положение соответствующих регулирующих клапанов. Математическая модель каждого регулятора представляет собой систему алгебраических и дифференциальных уравнений. Уравнения управляющих сигналов имеют вид:

$$X1^{ПВ} = K1^{ПВ} \cdot (T_{ПВ} - T_{ПВ}^{Зад}) - K_{ОБР СВ}^{ПВ} \cdot X_{ОБР СВ}^{ПВ}, \quad X1^Д = K1^Д \cdot (P_Д - P_Д^{Зад}) - K_{ОБР СВ}^Д \cdot X_{ОБР СВ}^Д,$$

где  $K1^{ПВ}$ ,  $K1^Д$ ,  $K_{ОБР СВ}^{ПВ}$ ,  $K_{ОБР СВ}^Д$  – безразмерные коэффициенты усиления сигнала и коэффициенты обратной связи соответственно;  $T_{ПВ}$ ,  $P_Д$ ,  $T_{ПВ}^{Зад}$ ,  $P_Д^{Зад}$  – текущие и заданные значения температуры питательной воды, °С, и давления пара в Д, МПа, соответственно.

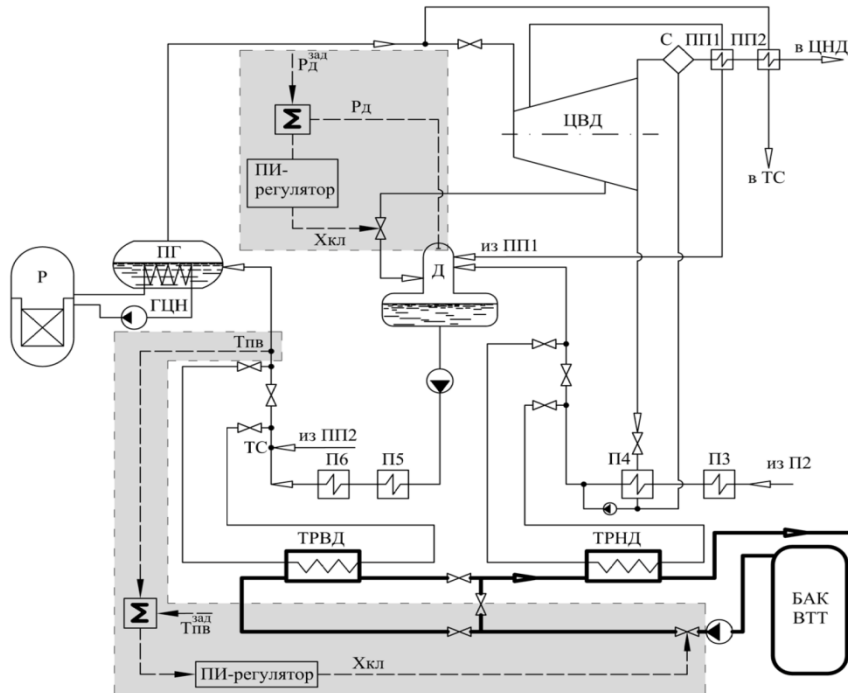


Рисунок 6 – Функциональная схема регулирования температуры питательной воды

В **Главе 7** приводится обоснование принятого численного метода решения систем дифференциальных уравнений динамики.

Решение систем осуществляется численным методом Эйлера по причине его простоты и поэтому высокой скорости счета. Для определения устойчивости и точности счета данного метода был выбран требуемый шаг интегрирования в зависимости от наименьшего из значений постоянных времени всех элементов исследуемой установки. Проверка проводилась путем сопоставления с результатами, полученными при исследовании с использованием численных методов повышенной точности (например, методов Рунге-Кутты).

**Глава 8** посвящена обоснованию участия АЭС с САТЭ в регулировании частоты тока сети при зарядке тепловых аккумуляторов на основании расчета динамики исследуемой установки по разработанной компьютерной программе, алгоритм которой представлен в диссертации. В ходе исследования определялась возможность поддержания давления генерируемого в ПГ пара в зоне нечувствительности датчика АРМ при изменении мощности турбины в режиме автоматического изменения мощности энергоблока по частоте тока сети со скоростями, удовлетворяющими нормативным требованиям.

Для настройки регуляторов уровня конденсата и расхода масла в ТЗ использовалась разработанная статическая характеристика ТЗ, представленная ранее на рисунке 4.

Результаты расчёта представлены на рисунке 7 графиками изменяющихся во времени основных параметров, характеризующих данный режим при скачкообразных изменениях мощности сети  $\pm 10\% N_{\text{НОМ}}$  и постоянной мощности реактора. Среди выполненных расчетов данного режима, проведенных для широкого диапазона изменений мощности в сети, здесь представлены результаты для максимальных изменений мощности ( $\pm 10\% N_{\text{НОМ}}$ ) по нормативными требованиями для ТЭС.

На графиках видно, что отклонение давления пара в ПГ от заданного значения 7,2 МПа на протяжении всего исследуемого процесса регулирования не превышает  $\pm 0,03$  МПа, что не выходит за пределы зоны нечувствительности датчика АРМ –  $\pm 0,05$  МПа и тем самым исключает из процесса регулирования реакторную установку.

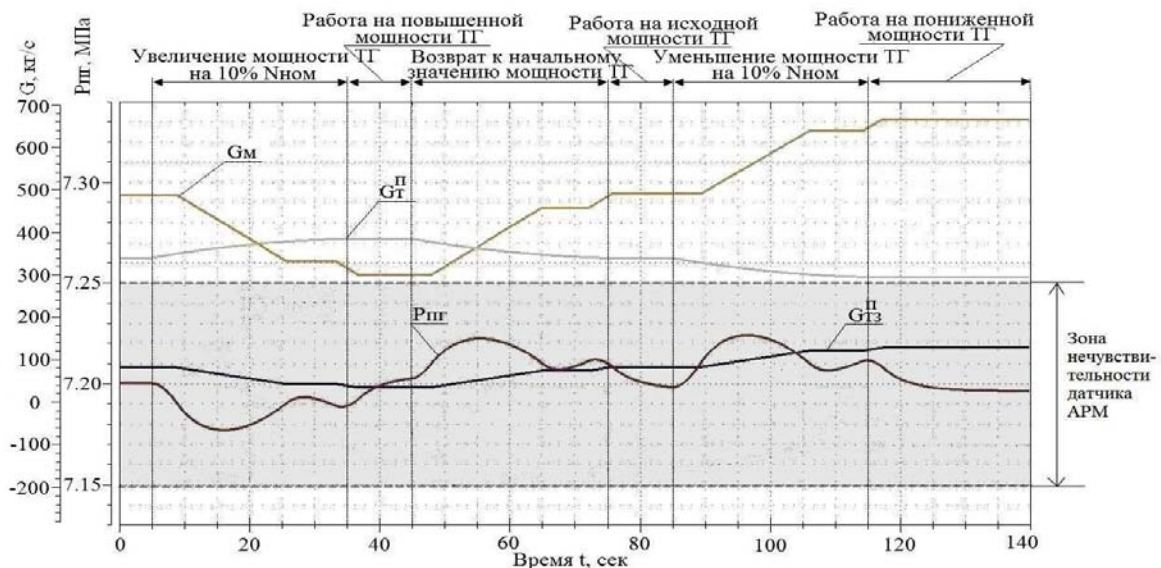


Рисунок 7 – Графики изменения во времени исследуемых параметров энергоблока АЭС при его участии в режиме регулирования частоты тока при зарядке САТЭ

На рисунке 7 обозначено: расход пара на турбину –  $G_{тП}$  и в ТЗ –  $G_{тЗП}$ , давление пара в ПГ –  $P_{пг}$ , расход нагреваемого масла –  $G_m$ .

**Глава 9** посвящена обоснованию участия АЭС с САТЭ в регулировании частоты тока сети при разрядке тепловых аккумуляторов. С этой целью был выполнен статический расчет исследуемой установки для всего диапазона разрядки САТЭ ( $100-117,5\% N_{\text{НОМ}}$ ) и расчет

динамики исследуемой установки по разработанной компьютерной программе, алгоритм которой представлен в диссертации.

По результатам статического расчета были определены:

– давление пара за СРК (на входе в проточную часть турбины), ограничивающее значение предельно возможной мощности турбины при разрядке САТЭ ( $p = 6,78$  МПа). Данное значение определяется по разности значений постоянного (номинального) давления пара перед СРК и минимально допустимых потерь давления на самом СРК (для исследуемой турбины типового проекта – 0,15МПа);

– последовательность закрытия регенеративных отборов турбины при разрядке САТЭ, используемых для достижения предельно возможной мощности турбины, – чередование отборов к подогревателям высокого и низкого давлений. Данная последовательность (для проекта «АЭС-2006» последовательность отборов: II, V, I, IV) обеспечивает устойчивую работу установки (равномерное охлаждение масляного теплоносителя относительно конденсатно-питательного тракта, постоянное поддержание температуры питательной воды на входе в ПГ);

– условия выбора регенеративного отбора пара, обеспечивающего наибольший диапазон изменения мощности турбины при ее участии в регулировании частоты тока, а также отсутствие влияния на температуру питательной воды, для упрощения схемы ее поддержания на входе в ПГ. При этих условиях для проекта «АЭС-2006» был выбран IV отбор, позволяющий изменять мощность турбины в максимальном диапазоне для этого проекта –  $\pm 2\% N_{ном}$ . Для увеличения данного диапазона необходимо увеличить величину IV отбора и, соответственно, поверхность теплообмена ПНД4;

– целесообразность перехода на постоянное давление пара в деаэраторе, по сравнению с применяемым в проекте «АЭС-2006» скользящим давлением. Поддержание постоянного давления (температуры питательной воды на выходе из деаэратора) значительно упрощает схему регулирования температуры питательной воды на входе в ПГ.

Возможность автоматического изменения мощности турбины энергоблока по частоте тока сети с удовлетворяющей нормативным требованиям скоростью при исследовании динамики определялась расчётным путём при поддержании постоянной температуры питательной воды на входе в ПГ и постоянного (номинального) давления пара перед СРК для исключения изменения мощности реакторной установки во всём диапазоне разрядки САТЭ. Поддержание постоянного давления пара осуществляется СРК турбины стандартным способом.

Исследование проводилось для максимально возможной мощности турбины  $115\% N_{ном}$ , при которой исследуемый энергоблок может работать в режиме автоматического изменения мощности по частоте тока сети, учитывая максимальный (номинальный) расход

пара в выбранном регулирующем отборе. Результаты расчета представлены на рисунке 8 графиками изменения основных параметров турбины энергоблока АЭС, характеризующих данный режим.

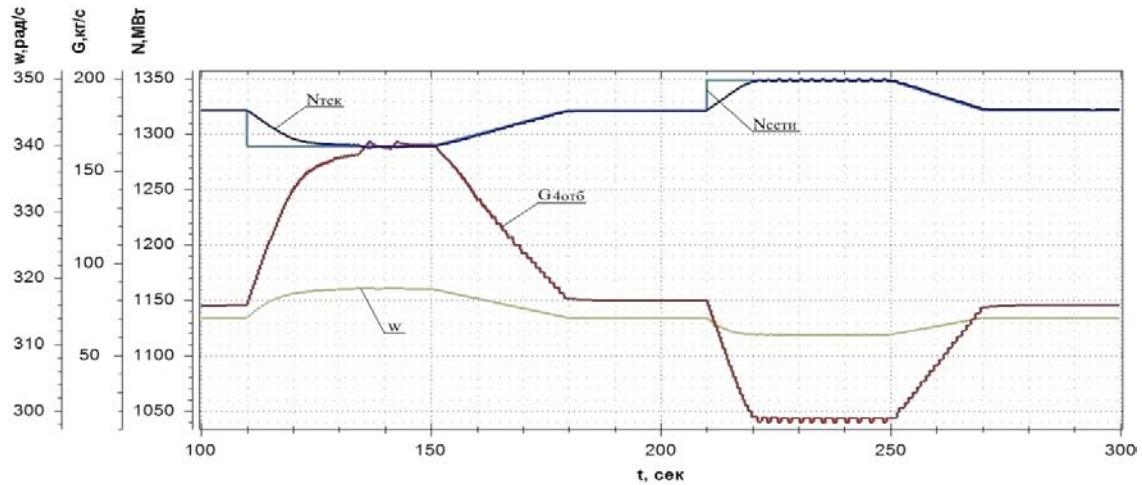


Рисунок 8 – Графики изменения основных параметров турбины энергоблока АЭС при участии в регулировании частоты тока сети при мощности разрядки 115%  $N_{НОМ}$

На рисунке 8 обозначено:  $N_{сети}$  - нагрузка сети,  $N_{тек}$  – текущая мощность турбины,  $G_{4отб}$  – расход пара через регулирующий отбор,  $w$  – частота вращения ротора турбины.

В качестве возмущения принималось скачкообразное изменение частоты тока в сети –  $\pm 0,05$  Гц. Данный диапазон принят в соответствии с нормативными требованиями к статической характеристике паровых турбин, участвующих в регулировании частоты тока, и с учетом возможной величины изменения мощности турбины, определяемой, как указывалось выше, расходом пара в регулирующем отборе.

Как следует из представленных графиков, система регулирования мощности турбины при скачкообразном изменении частоты тока сети в режиме разрядки САТЭ обеспечивает изменение мощности турбины с требуемой по нормативам скоростью.

В **заключении** сформулированы основные выводы по проведенному расчётному исследованию участия АЭС с САТЭ в регулировании частоты тока сети:

1) обоснована возможность участия энергоблока АЭС с тепловыми аккумуляторами в регулировании частоты тока сети в соответствии с требованиями нормативной документации на основе предложенного способа изменения мощности энергоблока АЭС без привлечения реакторной установки;

2) разработаны системы автоматического регулирования давления пара в парогенераторе, температуры питательной воды на входе в парогенератор, система автоматического изменения мощности паротурбинной установки энергоблока АЭС;

3) создана математическая модель динамики исследуемой установки и на ее основе компьютерная программа для режима зарядки и разрядки САТЭ;

4) даны рекомендации по модернизации схемы и отдельных элементов теплообменного и регулирующего оборудования второго контура энергоблока АЭС при совместной работе с

САТЭ в целях увеличения диапазона изменения мощности турбины и устойчивой работы установки при работе в режиме автоматического изменения мощности, а именно предлагается:

– последовательная схема подключения масляных подогревателей САТЭ по отношению к регенеративной системе для исключения сложной задачи автоматического управления распределением расхода воды между ними;

– работа деаэратора с постоянным давлением греющего пара в целях упрощения поддержания постоянного значения температуры питательной воды на входе в ПГ энергоблока;

– увеличение теплообменной поверхности регенеративного теплообменника, выбранного для регулирования частоты тока в сети в режиме разрядки САТЭ, позволяющее увеличить расход пара на данный теплообменник, по сравнению с расходом на номинальном режиме. Это приведет к увеличению диапазона изменения мощности турбины энергоблока АЭС при его участии в регулировании частоты тока в сети;

– на номинальной мощности энергоблока принять среднее положение штока регулирующего клапана на отборе к регенеративному теплообменнику, выбранному для участия энергоблока АЭС в регулировании частоты тока сети при разрядке САТЭ. Это обеспечит возможность изменения мощности турбины в любую сторону при мощностях энергоблока АЭС, близких к номинальной, только за счет данного клапана на отборе (вместо необходимости в противном случае комбинированного использования либо клапана со сбросом пара в ТЗ для уменьшения мощности энергоблока, либо клапана на отборе пара турбины – для увеличения мощности) и позволит увеличить диапазон изменения мощности турбины энергоблока АЭС в данном режиме.

Материалы данного исследования представлены в следующих публикациях:

1. Бажанов, В.В. Исследование возможности использования на АЭС аккумуляторов тепловой энергии при регулировании частоты тока в сети / В.В. Бажанов, И.И. Лощаков, А.П. Щуклинов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – М., 2013. – №4. – С. 29-36 (**перечень ВАК**);
2. Бажанов, В.В. Исследование работы АЭС с аккумуляторами тепловой энергии при регулировании мощности турбины в режиме разрядки / В.В. Бажанов, И.И. Лощаков, А.П. Щуклинов // НТВ СПбГПУ. – СПб., 2015. – №4(231). – С.47-58 (**перечень ВАК**);
3. Бажанов, В.В. Анализ возможности участия АЭС с аккумуляторами тепловой энергии в регулировании частоты и мощности энергосистемы / В.В. Бажанов, А.П. Щуклинов // Материалы XXXIX международной научно-практической конференции. Неделя науки СПбГПУ: сб. тезисов. – СПб., 2010. – Часть III. – С. 127-128;
4. Бажанов, В.В. К вопросу участия АЭС в регулировании частоты тока и мощности

энергосистемы / В.В. Бажанов, И.И. Лошаков, А.П. Щуклинов // Научно-практический журнал «Глобальная ядерная безопасность». – Волгодонск: Изд-во МИФИ, 2012. –№2-3 (4). –С.105-108;

5. Бажанов, В.В. Исследование возможности участия АЭС в первичном регулировании частоты и мощности энергосети / В.В. Бажанов, И.И. Лошаков, А.П. Щуклинов // Всероссийская конференция с международным участием «Современные методы обеспечения эффективности и надежности в энергетике»: сб. тр. – СПб., 2012. –С.297-303;

6. Щуклинов, А.П. К вопросу регулирования давления пара в парогенераторах АЭС с аккумуляторами тепловой энергии / А.П. Щуклинов, В.В. Бажанов, И.И. Лошаков // IV Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли КОМАНДА-2012: сб. тезисов. –СПб., 2012. –С.15-16;

7. Бажанов, В.В. Принципы регулирования АЭС с аккумуляторами тепловой энергии при изменении нагрузки энергоблока / В.В. Бажанов, И.И. Лошаков, А.П. Щуклинов // Научно-практический журнал «Глобальная ядерная безопасность». –Волгодонск: Изд-во МИФИ, 2013. –№1. –С.53-57;

8. Щуклинов, А.П. Способы регулирования АЭС с аккумуляторами тепловой энергии при участии энергоблока в регулировании частоты тока в сети / А.П. Щуклинов, В.В. Бажанов, И.И. Лошаков // V Международная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли КОМАНДА-2013: сб. тезисов. –СПб., 2013. –С.96-98;

9. Щуклинов, А.П. К вопросу о возможности использования на АЭС аккумуляторов тепловой энергии при регулировании частоты тока в сети / А.П. Щуклинов, В.В. Бажанов, И.И. Лошаков // 63 Международная конференция «ЯДРО 2013. Фундаментальные проблемы ядерной физики и атомной энергетики»: сб. тезисов. – М., 2013. –С.265;

10. Щуклинов, А.П. Исследование способа регулирования АЭС с системой аккумуляции тепловой энергии при участии энергоблока в регулировании частоты тока в сети в режиме разрядки аккумуляторов тепловой энергии / А.П. Щуклинов, В.В. Бажанов, И.И. Лошаков // Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли КОМАНДА-2015: сб. тезисов. –СПб., 2015. –С.144-146;

11. Щуклинов, А.П. Расчетное обоснование участие АЭС с аккумуляторами тепловой энергии в регулировании частоты тока энергосети / А.П. Щуклинов, А.Н. Коваленко // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем: сб. тезисов. –СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. –Ч.1. –С.60-62;

12. Заявка 2016147113 от 30.11.2016 Российская Федерация: МПК G 21 D 3/08 Система автоматического регулирования частоты тока в сети с участием АЭС / Бажанов В.В., Коваленко А.Н., Сергеев В.В., Щуклинов А.П.; заявитель ФГАОУ ВО СПбПУ – 23с.