

ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи



Киевец Антон Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ  
ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
КРАТКОВРЕМЕННОЙ РАЗГРУЗКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА И  
СРЕДСТВ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

2.4.3 – Электроэнергетика

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный руководитель:**

**Гусев Александр Сергеевич**

доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, г. Томск

**Научный руководитель:**

**Рубан Николай Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, г. Томск

**Официальные оппоненты:**

**Суслов Константин Витальевич**

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии, г. Москва

**Русина Анастасия Георгиевна**

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», декан факультета энергетики, г. Новосибирск

Защита состоится «05» апреля 2024 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.17 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru) при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «\_\_\_» февраля 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.17  
кандидат технических наук



А.А. Суворов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Непременное условие нормального электроснабжения потребителей заключается в синхронной параллельной работе генерирующего оборудования электростанций. Данное требование должно также обеспечиваться и при возникновении аварийных процессов различной степени тяжести, в том числе за счет использования противоаварийной автоматики (ПА). В случае, когда в результате аварийного возмущения возникает избыточная кинетическая энергия ротора агрегата, с целью ее компенсации на начальной стадии переходного процесса ПА реализуют управляющие воздействия (УВ): отключение генераторов (ОГ), электрическое торможение (ЭТ), кратковременную разгрузку турбины энергоблока (КРТ), которая в случае необходимости может быть дополнена длительной разгрузкой турбин энергоблоков (ДРТ). Осуществление ОГ в силу особенностей функционирования нередко оказывается избыточным, что может привести к необходимости использования балансирующего отключения нагрузки. В то же время ЭТ обладает ограниченной дискретностью и высокой стоимостью. Таким образом технологически и экономически наиболее эффективным УВ является КРТ, так как позволяет компенсировать любое количество избыточной кинетической энергии ротора, а совместно с ДРТ осуществить разгрузку энергоблока на необходимое значение активной мощности. Однако данные свойства КРТ достигаются заданием оптимальных значений параметров данного УВ, для которого необходимо обладать полной и достоверной информацией о конкретном аварийном процессе и функционировании КРТ. Отсутствие необходимой информации исключает технологически и экономически эффективную настройку УВ КРТ. Это может выражаться в увеличении амплитуды и длительности синхронных качаний в процессе реализации УВ КРТ, а также потенциальной возможности возникновения асинхронного режима вследствие задания усредненных значений параметров УВ КРТ.

Поскольку процессы в разгружаемой турбине энергоблока взаимосвязаны с процессами в ЭЭС, то для выбора оптимальных значений параметров УВ КРТ оказывается необходимым полное и достоверное воспроизведение единого спектра процессов в разгружаемой турбине с учетом влияния ЭЭС. Так как натурные эксперименты в реальной ЭЭС, тем более аварийного характера, недопустимы, а физическое моделирование имеет ряд ограничений, то единственным способом воспроизведения процессов, происходящих в разгружаемой турбине и ЭЭС в целом, является преимущественно математическое моделирование. Между тем многие современные программно-вычислительные комплексы (ПВК) не всегда способны обеспечить (в зависимости от размеров моделируемой ЭЭС) необходимую полноту и достоверность воспроизведения процессов в ЭЭС в связи с применением следующих упрощений и ограничений:

1. Использование декомпозиции режимов и процессов с различными существенными упрощениями математических моделей;
2. Ограничение дифференциального порядка математических моделей оборудования;
3. Ограничение интервала воспроизведения процессов.

Кроме того, всегда неизвестной остается методическая ошибка численного интегрирования дифференциальных уравнений.

В соответствии с комплексным подходом в научно-исследовательской лаборатории «Моделирование электроэнергетических систем» Томского политехнического университета разработаны концепция гибридного моделирования ЭЭС и средства ее реализации, образующие Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС). Комплекс позволяет осуществлять без каких-либо ограничений полное и достоверное воспроизведение нормальных, аварийных и послеаварийных процессов во всех видах электрооборудования ЭЭС в любом масштабе времени. Для выбора оптимальных значений параметров УВ КРТ программно-аппаратный комплекс ВМК РВ ЭЭС частично модернизирован путем синтеза и реализации детализированных математических моделей турбины и ее системы регулирования.

Анализ, обоснование и реализация всех аспектов обозначенной проблематики составляет содержание данной диссертационной работы.

**Степень разработанности темы исследования.** Различным вопросам, связанным с моделированием больших ЭЭС и влиянием аварийной регулировки турбин на переходные процессы в ЭЭС, посвящено множество работ отечественных и зарубежных авторов: Иофьев Б.И., Гуревич Ю.Е., Гусев А.С., Совалов С.А., Семенов В.А., Кошечев Л.А., Глушкин И.З., Александров Г.Н., Аюев Б.И., Веников В.А., Воропай Н.И., Суслов К.В., Жуков А.В., Ковалев В.И., Панин А.В., Беляев А.Н., Портной М.Г., Рабинович Р.С., Kundur P., Patel R. и др. Однако, проблема выбора значений параметров УВ КРТ по-прежнему остается актуальной.

**Целью работы** является повышение точности определения значений параметров УВ КРТ, позволяющих сократить длительность и амплитуду колебаний конкретного аварийного процесса.

Для достижения данной цели в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Анализ УВ, применяемых для ликвидации избыточной кинетической энергии ротора агрегатов с целью сохранения динамической устойчивости генерирующего оборудования электростанций, обоснование сложности осуществления «гибкой» настройки с помощью существующего подхода к моделированию ЭЭС реальной размерности и к выбору УВ КРТ.

2. Модернизация ВМК РВ ЭЭС, необходимая для реализации настройки УВ КРТ, предусматривающая применение более детальной всережимной математической модели турбины и ее системы регулирования.

3. Разработка методики определения оптимальных значений параметров УВ КРТ.

4. Выполнение комплекса экспериментальных исследований, подтверждающих эффективность разработанных средств и методики определения оптимальных значений параметров УВ КРТ.

**Предметом исследования** являются переходные процессы в турбине, ее системе регулирования и ЭЭС в целом.

**Объектом исследования** является детальная модель турбины и ее системы регулирования.

**Научная новизна работы:**

1. Сформулированы положения методики выбора оптимальных значений параметров УВ КРТ по результатам математического моделирования процессов в турбине, ее системе регулирования и ЭЭС в целом, позволяющие формировать импульсные характеристики турбины, соответствующие конкретному аварийному процессу.

2. Основываясь на принципах гибридного подхода к моделированию, разработана структура программно-аппаратной системы для реализации математической модели турбины и ее системы регулирования, осуществляющая воспроизведение процессов с гарантированной инструментальной погрешностью, а также способная работать в комбинации с программно-аппаратным комплексом ВМК РВ ЭЭС.

**Теоретическая значимость работы:**

1. Выявлены и обоснованы основные причины существования проблемы выбора оптимальных значений УВ КРТ, заключающиеся в том, что предоставляемые производителем турбин импульсные характеристики не всегда позволяют получить переходный процесс с минимальным уровнем перерегулирования и амплитудой синхронных качаний при функционировании КРТ.

2. Разработана методика, позволяющая производить гибкую настройку параметров УВ КРТ, а именно: получать импульсные характеристики путем моделирования единого переходного процесса, включающего в себя аварийное возмущение, функционирование УВ КРТ и установление послеаварийного режима, что снимает все ограничения на вариацию значений параметров УВ КРТ и дает возможность для каждого аварийного случая использовать оптимальные значения настроечных параметров УВ КРТ.

**Практическая значимость работы.** Разработанные методика определения оптимальных значений параметров УВ КРТ и средства ее реализации позволяют осуществлять выбор значений параметров УВ КРТ применительно к конкретному энергоблоку и аварийным ситуациям в ЭЭС. В результате процесс разгрузки турбины энергоблока происходит с минимальным перерегулированием и меньшим динамическим воздействием на элементы системы регулирования турбины.

**Методы исследования.** Решение поставленных в диссертационной работе задач выполнялось с использованием теоретических и экспериментальных методов исследования. При проведении экспериментальных исследований применялись положения теории автоматического регулирования и управления, теории электромеханических и электромагнитных переходных процессов, методы математического и физического моделирования. При модернизации ВМК РВ ЭЭС использовались методы математического моделирования ЭЭС, методы схемотехнического анализа.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Основной причиной снижения эффективности применения УВ КРТ для сохранения динамической устойчивости генераторов, является ограниченное количество заранее снятых с работающего оборудования импульсных характеристик.

2. Программно-аппаратная моделирующая система, реализующая неявное непрерывное интегрирование дифференциальных уравнений аналоговым способом, обеспечивает воспроизведение процессов, происходящих в турбине при функционировании УВ КРТ, с гарантированной точностью, определяемой погрешностями компонентов данной системы.

3. Применение разработанной методики определения оптимальных значений параметров УВ КРТ позволяет минимизировать длительность переходного процесса и амплитуду колебаний, в частности, на рассмотренном в рамках диссертации примере удалось сократить длительность переходного процесса на 1,16 секунды, а также снизить амплитуду колебаний на 9 %.

**Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.3 – Электроэнергетика:**

Пункт 14 – «Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем и сетей, включая технико-экономическое обоснование технических решений, разработка методов управления режимами их работы».

Пункт 16 – «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике».

**Достоверность результатов исследования** подтверждается использованием теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, способа непрерывного неявного методически точного интегрирования дифференциальных уравнений, классических положений и законов теоретической электротехники, математики, теории дифференциального и интегрального исчисления, а также теоретически обоснованных и всесторонне апробированных, в том числе независимыми исследованиями, математических моделей, соответствием имеющимся натурным данным.

**Апробация результатов исследований.** Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на Международных и Всероссийских научно-технических конференциях: IX Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Казань: СКФУ, 2018), 14<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (г. Томск: НИ ТПУ, 2019); Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (г. Томск: НИ ТПУ, 2019); XI Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Ставрополь: СКФУ, 2020), XXV Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова (г. Томск: НИ ТПУ, 2021), XII Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Нижний Новгород: НГТУ, 2022).

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в 12 работах, в том числе в 1 статье в рецензируемом издании из перечня ВАК РФ, 8 работах в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, 3 в материалах конференций, а также в 1 свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Представленные в диссертационной работе результаты анализа, выявления и обоснования проблемы настройки УВ КРТ, а также создание методики определения оптимальных значений параметров УВ КРТ и модернизация ВМК РВ ЭЭС, проведенные экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность данной методики и средств ее реализации, выполнены лично автором диссертации.

**Реализация результатов работы.** Актуальность результатов диссертационной работы подтверждена соответствующим актом их использования АО «Институт автоматизации энергетических систем». Кроме этого, внесены дополнения в образовательную программу «Национального исследовательского Томского политехнического университета» по направлению 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника.

Результаты диссертационной работы реализованы при выполнении гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-38-90147 от 23.08.2019 г. «Исследование влияния динамических процессов в электроэнергетической системе с возобновляемыми источниками энергии на функционирование противоаварийной разгрузки турбин энергоблоков и разработка методики её адекватной настройки».

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 108 наименований, содержит 105 страниц, 36 рисунков, а также 2 приложения на 14 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обозначена проблема и обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, приведены выносимые на защиту основные положения, а также сведения о методах исследования и достоверности результатов, апробации и публикациях, реализации результатов, структуре и объеме диссертационной работы.

**В первой главе** описан принцип реализации УВ КРТ, обоснованы необходимые условия для выбора оптимальных значений параметров УВ КРТ (рисунок 1), которое совместно с ДРТ обеспечивает баланс активной мощности в послеаварийном режиме.

Обозначения на рисунке 1 являются параметрами УВ КРТ:

$A_i$  – значение электрического сигнала, подаваемого на электрогидравлическую приставку, нормируемое неравномерностью (значение равно одной неравномерности (н.в.) – это сигнал, подаваемый в систему регулирования турбины, приводящий при длительном воздействии к изменению мощности турбины от номинального значения до нуля). Данное значение

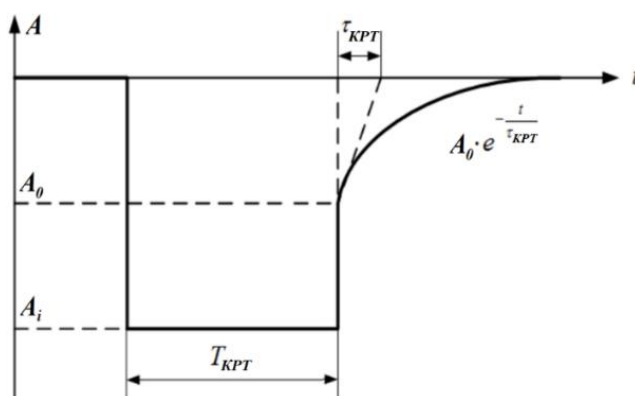


Рисунок 1 – Вид УВ КРТ

определяет скорость разгрузки турбоагрегата. При подаче в систему регулирования турбоагрегата сигнала, превышающего значение  $A_i=1$  н.в., закрываются регулирующие клапаны цилиндра высокого (ЦВД), среднего (ЦСД) и низкого давления (ЦНД) (рисунок 2), в связи с чем процесс уменьшения механического момента турбины существенно ускоряется. В настоящее время для достижения максимальной скорости закрытия регулирующих клапанов используется значение  $A_i$  равное 4 н.в. Однако данное значение не всегда является необходимым, к тому же оказывается чрезмерное динамическое воздействие на систему регулирования турбины и паропровод, что приводит к их ускоренному износу.

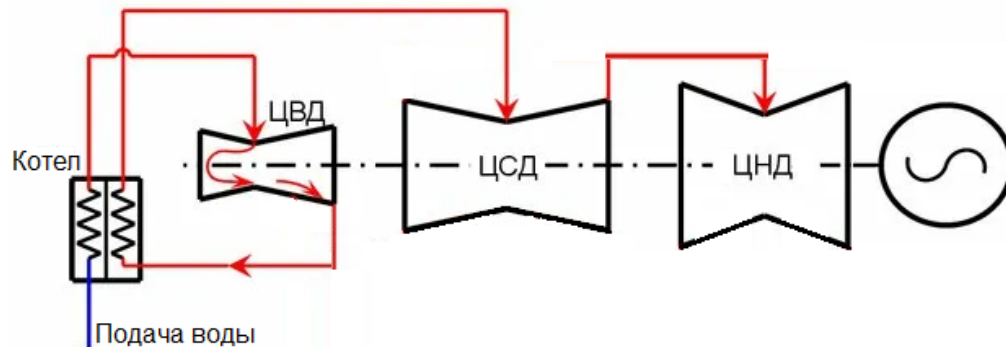


Рисунок 2 – Принципиальная схема турбины энергоблока

$T_{KPT}$  – время удержания значения УВ КРТ на уровне  $A_i$ , которое определяет глубину разгрузки (рисунок 3). В настоящее время  $T_{KPT}$  берут с «запасом», однако получаемая при таких значениях максимальная или близкая к ней глубина разгрузки может оказаться чрезмерной, а полученное переторможение способно привести к нарушению устойчивости во втором и третьем цикле синхронных качаний.

$A_0$  – значение электрического сигнала  $A_i$  после времени удержания  $T_{KPT}$ . Значение  $A_0$  следует задавать равным единице, т.к. это граничное значение положения регулирующих клапанов. При  $A_0 \geq 1$  клапана находятся в закрытом состоянии, а при уменьшении  $A_0$  от 1 до 0 регулирующие клапана открываются. Подача сигнала  $A_0 < 1$  может привести к значительному уровню перерегулирования и большой амплитуде синхронных качаний.

$\tau_{KPT}$  – постоянная времени экспоненциального обнуления УВ КРТ. В качестве меры по предотвращению нарушения устойчивости во втором цикле синхронных качаний используется импульс с пологим задним фронтом, обеспечивающий дополнительное затягивание обнуления УВ КРТ. При этом обеспечивается прохождение не только первого, но и второго-третьего циклов синхронных качаний. Значение  $\tau_{KPT}$  определяет

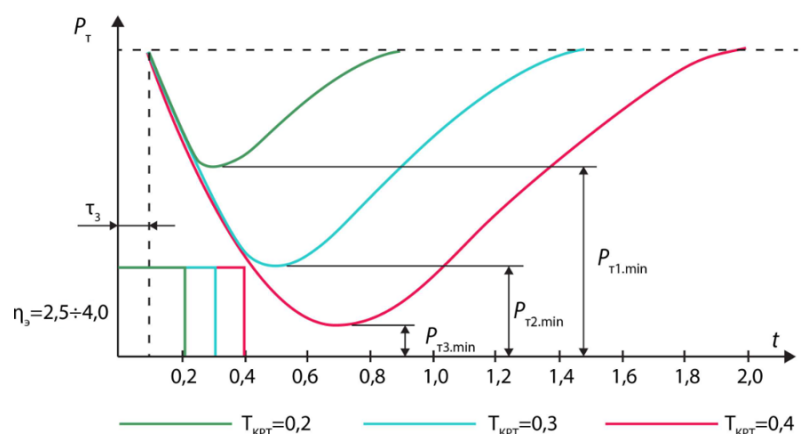


Рисунок 3 – Влияние длительности КРТ на глубину разгрузки



длительность синхронных качаний при установлении послеаварийного уровня генерации активной мощности.

Описанные выше параметры определяют импульсные характеристики каждой отдельно взятой турбины, которые должны удовлетворять требованиям, направленным на обеспечение возможности быстрой, импульсной разгрузки турбины. Импульсные характеристики (рисунок 3) предоставляются владельцами разгружаемого оборудования для дальнейшего их использования при настройке ПА, реализующей УВ КРТ. Однако из-за невозможности предоставления импульсных характеристик турбин, реализующих УВ КРТ, со всеми возможными значениями и сочетаниями настроечных параметров ( $A_i$ ,  $T_{КРТ}$ ,  $A_0$  и  $\tau_{КРТ}$ ) используют ограниченное количество ступеней настройки (обычно три) УВ КРТ с конкретными значениями настроечных параметров. В этом случае задача настройки УВ КРТ заключается в выборе такого УВ КРТ, при котором процесс реализации разгрузки сопровождается переходным процессом с наименьшим уровнем перерегулирования.

Помимо этого, в главе 1 выявлены и обоснованы, отмеченные в разделе «Актуальность темы исследования», причины проблемы настройки УВ КРТ, а также причины ее существования в рамках существующего подхода к математическому моделированию ЭЭС. С целью исключения подобной «грубой» настройки предлагается получать импульсные характеристики путем моделирования единого переходного процесса, включающего в себя аварийное возмущение, функционирование УВ КРТ и установление послеаварийного режима, что снимает все ограничения на вариацию значений параметров УВ КРТ и дает возможность для каждого аварийного случая использовать оптимальные значения настроечных параметров УВ КРТ.

Учитывая проблематику получения полной и достоверной информации о процессах, особенно аварийного характера в ЭЭС, сформированы положения концепции гибридного моделирования турбины и ее системы регулирования с ЭЭС. В результате обоснована необходимость модернизации ВМК РВ ЭЭС, ориентированная на реализацию УВ КРТ и заключающаяся в детализировании математической модели паровой турбины и ее системы регулирования.

С целью демонстрации возможностей ВМК РВ ЭЭС была проведена верификация установившегося режима Томской ЭЭС. Полученные с помощью ВМК РВ ЭЭС данные сравнивались с имеющимися записями оперативно-информационного комплекса. Кроме того, представлены результаты сравнения моделирования однофазного короткого замыкания с данными с регистраторов аварийных событий.

Результаты моделирования переходных процессов с помощью ВМК РВ ЭЭС содержат незначительные ( $\leq 9\%$ ) отличия от натуральных осциллограмм. Данная погрешность определяется в основном точностью параметров нулевой последовательности линий электропередачи, связанной с некоторой неопределенностью исходных данных и погрешностью регистраторов аварийных событий, формируемой измерительными трансформаторами тока и напряжения.

**Во второй главе** на основе анализа опубликованных исследований видов, типов, режимов работы паровых турбин и их систем регулирования произведена детализация

используемых в настоящее время в ВМК РВ ЭЭС моделей. В результате синтезирована универсальная математическая модель турбины (рисунок 4).

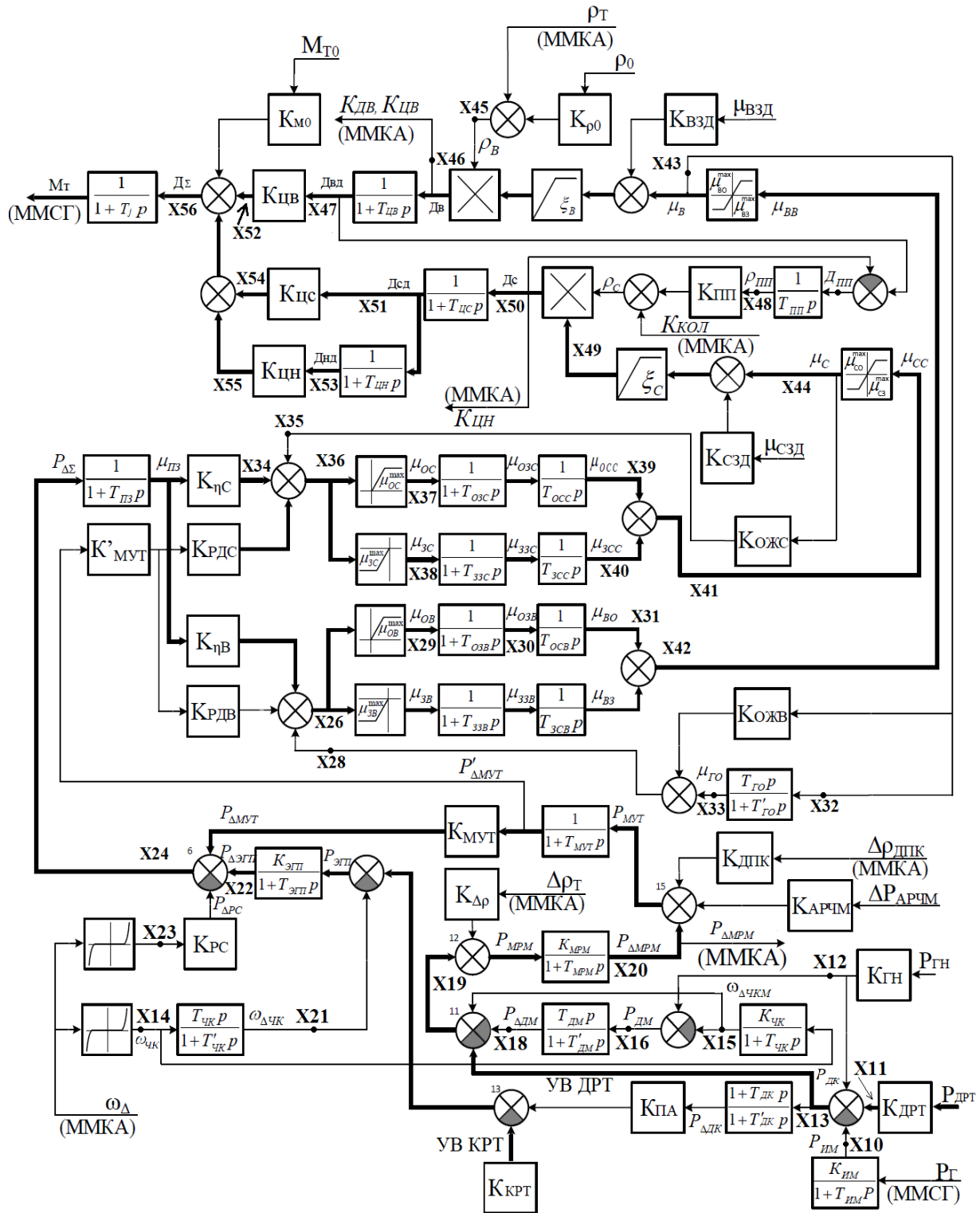
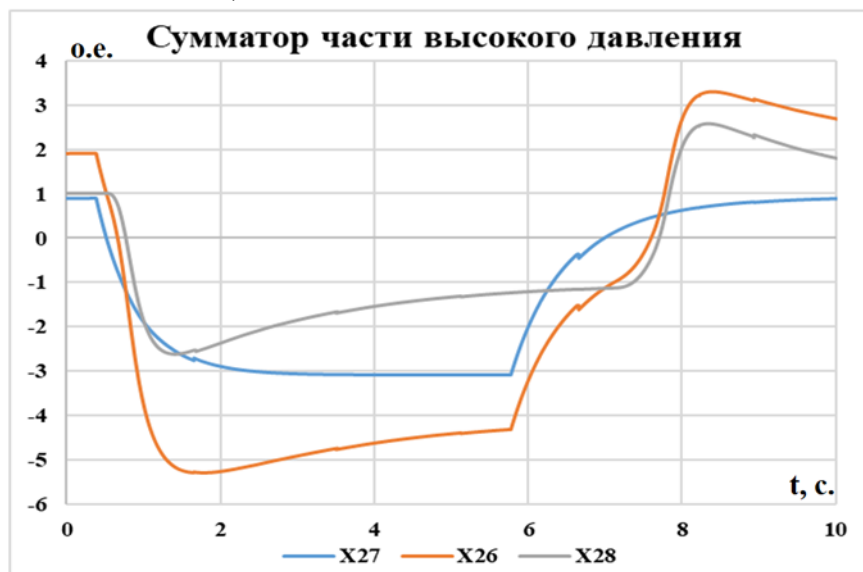


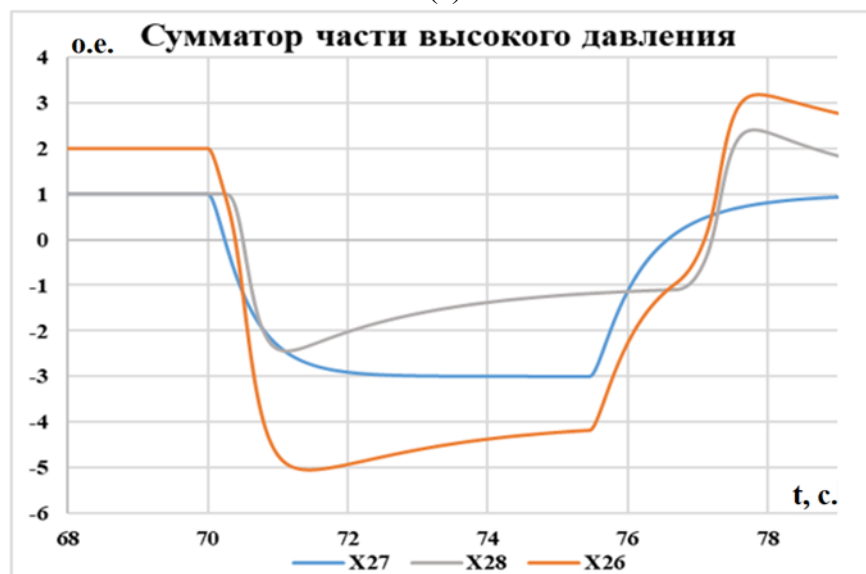
Рисунок 4 – Функциональная схема универсальной всережимной математической модели турбины и ее системы регулирования

Синтезированная математическая модель состоит из набора элементарных блоков: интегрирующих звеньев с ограничениями, аperiodических звеньев, дифференцирующих звеньев и т.д.

Осуществлена проверка (рисунок 5, б) корректности работы каждого отдельного звена математической модели турбины и ее систем регулирования путем сравнения сигналов в контрольных точках, обозначенных на рисунке 4 X1 – X56, полученных с помощью ВМК РВ ЭЭС и ПМК PSCAD (широко применяемый в мире для воспроизведения электромагнитных и электромеханических процессов программный комплекс, обладающий достаточной точностью при воспроизведении небольших по объему электроэнергетических систем).



(а)



(б)

Рисунок 5 – Оциллограммы сигналов, полученных с помощью: а – ВМК РВ ЭЭС; б – ПМК PSCAD при тестировании сумматора части высокого давления

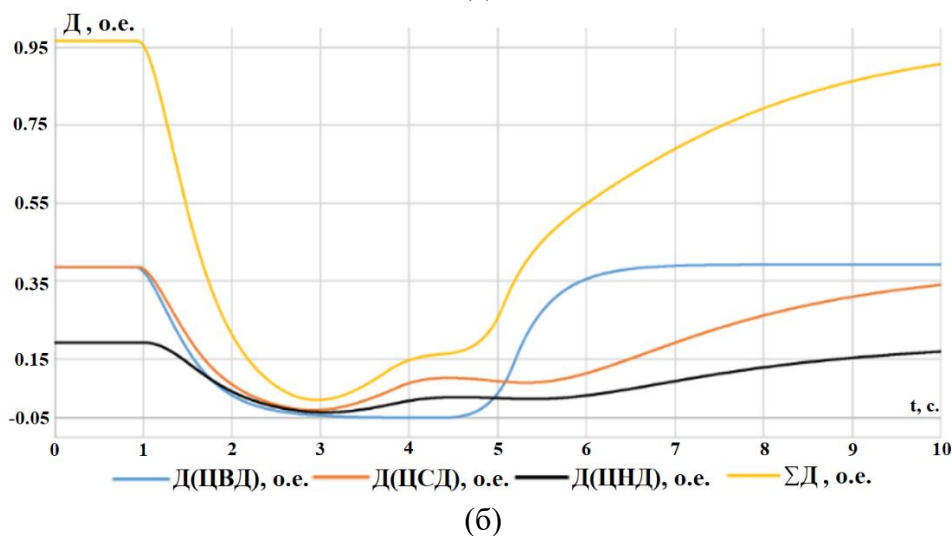
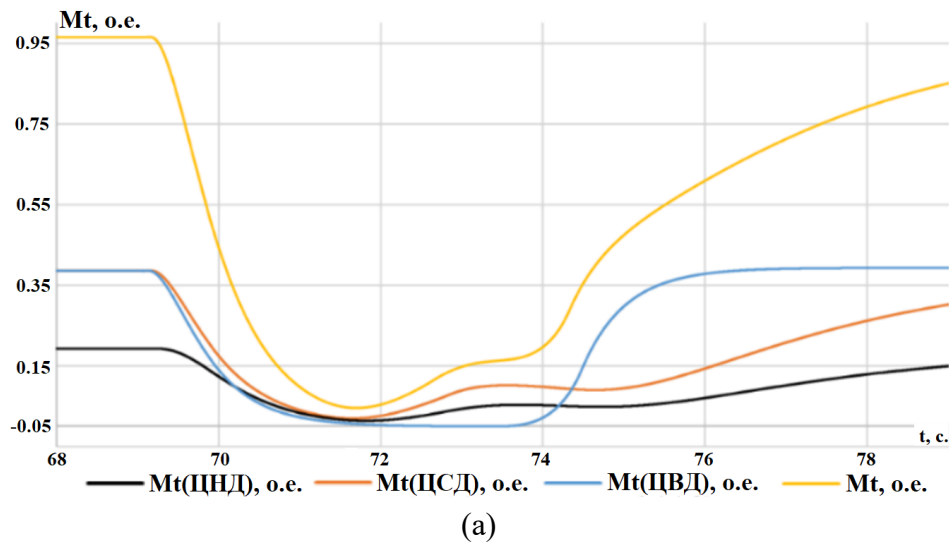


Рисунок 6 – Осциллограммы сигналов, полученные с помощью ВМК РВ ЭЭС при тестировании канала сумматора частот мощности ЦВД, ЦСД и ЦНД; а – ВМК РВ ЭЭС; б – ПВК PSCAD, где  $M_t$  – момент турбины;  $D$  – количество пара.

Результаты тестирования всех звеньев синтезированной математической модели полностью подтвердили адекватность ее функционирования с задаваемыми параметрами. Максимальная относительная погрешность при выполнении всех операций составляет менее 1%. Представленная математическая модель реализована в программно-аппаратном виде. Программная часть выполнена на языке программирования кода Assembler и в сочетании с аппаратной частью может быть использована в качестве программно-аппаратной системы, на вход которой подаются параметры текущего механического момента ротора агрегата, частота вращения ротора, значения параметров КРТ и, в случае необходимости, ДРТ, а на выходе вычисляется измененный за счет действия разгрузки механический момент ротора агрегата.

**В третьей главе** представлена методика выбора оптимальных значений параметров УВ КРТ, основные положения которой заключаются в следующем:

1. В исследуемой ЭЭС выбирается электростанция, в состав которой входит выделенный под разгрузку энергоблок.

2. Определяются перетоки мощности по отходящим от станции линиям во всех установившихся схемно-режимных (летний максимум, зимний максимум, ремонтный и т.д.) состояниях ЭЭС.

3. Используя средство моделирования, которое может реализовать детальные модели основного и вспомогательного оборудования ЭЭС, предварительно моделируются аварийные возмущения согласно методическим указаниям по устойчивости энергосистем.

4. Из полученных в п. 3 переходных процессов выбираются те, при которых наблюдается нарушение динамической устойчивости генерирующего оборудования рассматриваемой станции, и определяется необходимая величина сброса активной мощности.

5. Для каждого конкретного аварийного процесса, связанного с возникновением аварийного избытка кинетической энергии ротора, определяются численные значения параметров УВ КРТ:

1)  $A_i$  назначается, исходя из компенсации постоянных времени: электрогидравлической приставки, золотников, сервомоторов цилиндра высокого, среднего и низкого давления, а также паровых объемов в цилиндрах турбины. Задается значение  $A_i$ , при увеличении которого ( $A_{i+1}$ ) скорость изменения момента турбины не возрастает.

2)  $T_{КРТ}$  принимается в соответствии с требуемой глубиной разгрузки.

3) Значения параметра  $\tau_{КРТ}$  выбирается такое, при котором достигается минимальный уровень синхронных качаний при установлении послеаварийного режима.

6. При необходимости предотвращения нарушения статической устойчивости задействуется ДРТ с учетом максимально допустимого перетока (МДП) и аварийно допустимого перетока (АДП) активной мощности.

После разработки методики определения оптимальных параметров УВ КРТ необходима ее экспериментальная проверка на тестовой модели ЭЭС. На рисунке 7 представлена реализуемая ЭЭС, включающая в себя электрические сети класса напряжений 500, 220 и 110 кВ с трансформаторами различной мощности, а также основные электростанции энергорайона с детальным воспроизведением каждого энергоблока. В модели ЭЭС также учитываются детализированные математические модели всех элементов ЭЭС.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований, выполненных согласно разработанной методике определения оптимальных значений параметров УВ КРТ и ДРТ.

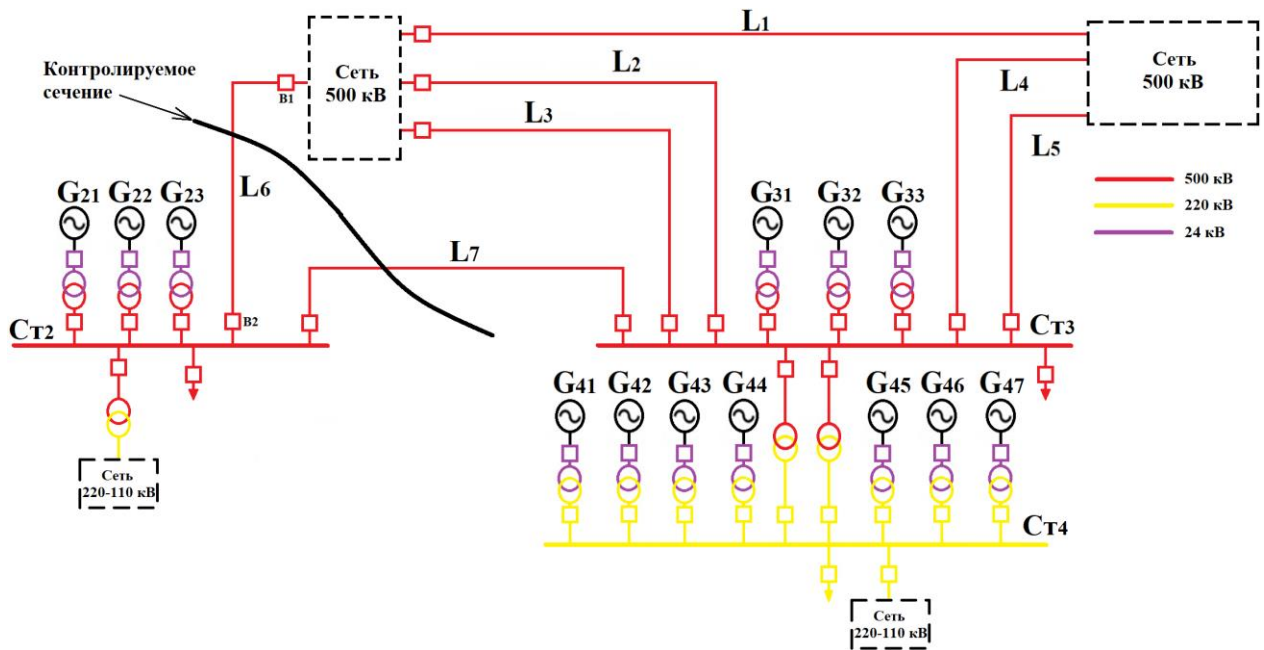


Рисунок 7 – Однолинейная схема фрагмента тестовой ЭЭС

На приведенной на рисунке 7 реализованной в ВМК РВ ЭЭС схеме ЭЭС был проведен комплекс экспериментальных исследований при отключении сетевого элемента основной защитой при однофазном коротком замыкании (КЗ) на линии  $L_6$  с отказом одного выключателя. Осциллограммы угла ротора генератора, активной мощности и частоты во время переходного процесса представлены на рисунке 8.

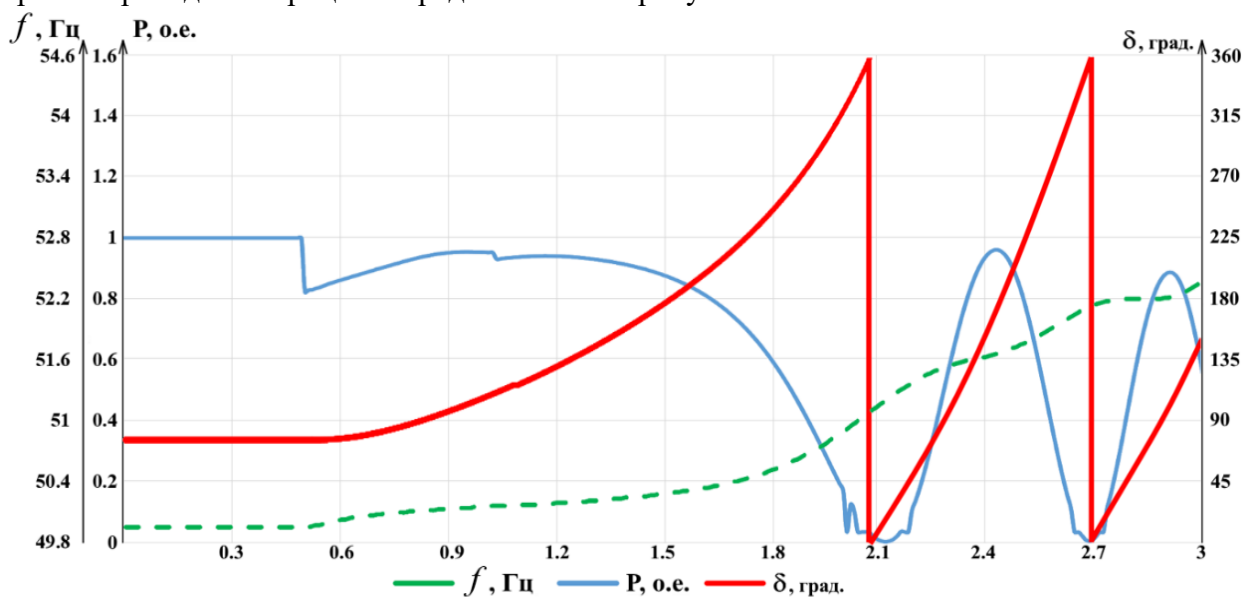


Рисунок 8 – Аварийный процесс при однофазном КЗ на линии  $L_6$  с отказом выключателя

Для обеспечения динамической устойчивости необходимо использовать УВ КРТ трех генераторов на станции 2 (рисунок 7). Уставка по послеаварийному значению генерируемой активной мощности задается в ДРТ согласно избытку активной мощности, в послеаварийном режиме с учетом обеспечения допустимого перетока активной мощности по критерию обеспечения (8%) коэффициента запаса статической аperiodической устойчивости по активной мощности по линии  $L_7$ . Допустимый переток активной мощности

в послеаварийном режиме по контролируемому сечению равен 951 МВт. Разгрузка за счет УВ ДРТ равна 580,7 МВт, что соответствует 194 МВт (0,25 о.е.) для каждого синхронного генератора станции 2.

В соответствии с описанной методикой, значение  $A_i$ , при котором достигается максимальная скорость закрытия регулирующих клапанов, было определено экспериментальным путем посредством тестирования различных значений  $A_i$  (рисунки 9–11).

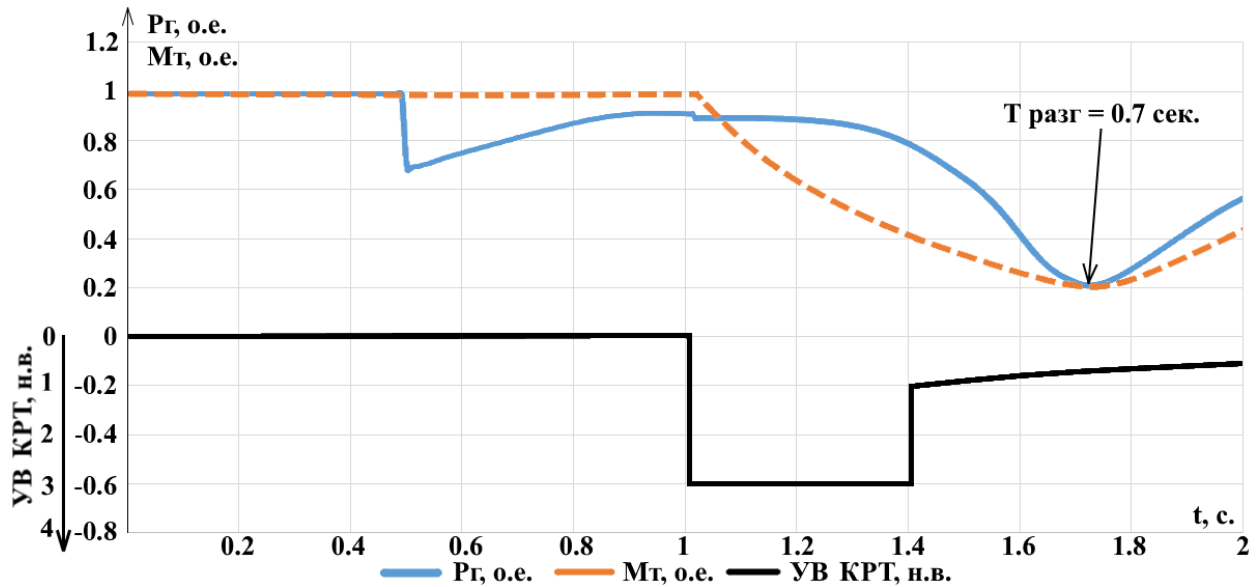


Рисунок 9 – Осциллограмма генерируемой активной мощности генераторов и момента турбин разгружаемых агрегатов при использовании УВ КРТ при  $A_i=3$  н.в.

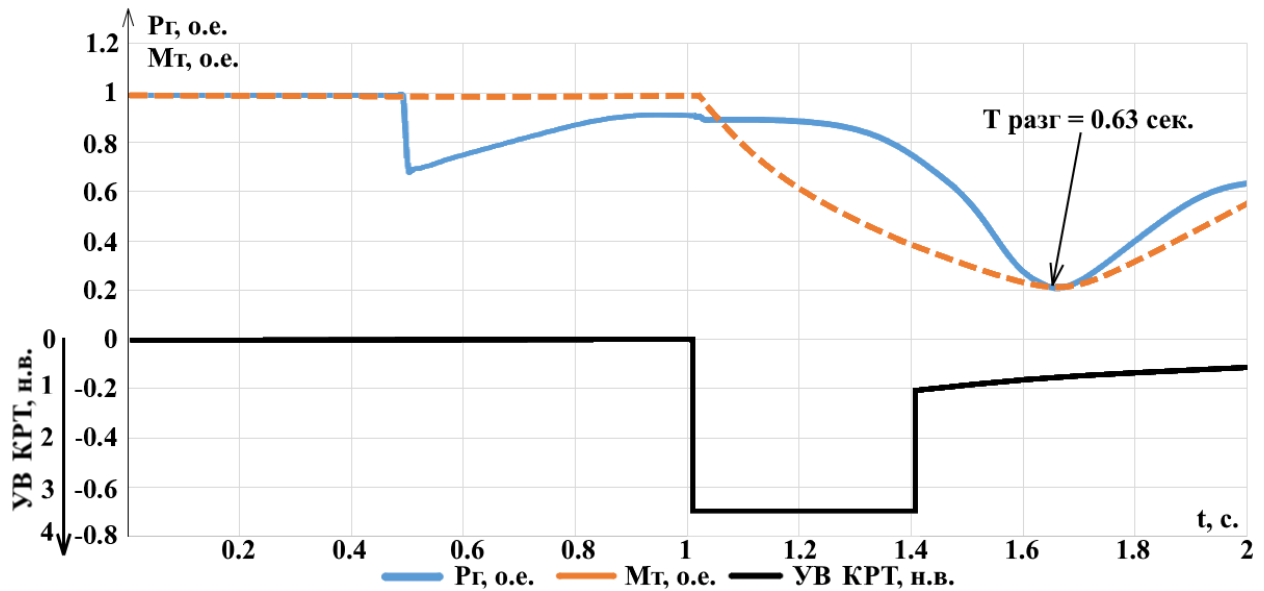


Рисунок 10 - Осциллограмма генерируемой активной мощности генераторов и момента турбин разгружаемых агрегатов при использовании УВ КРТ при  $A_i=3,5$  н.в.

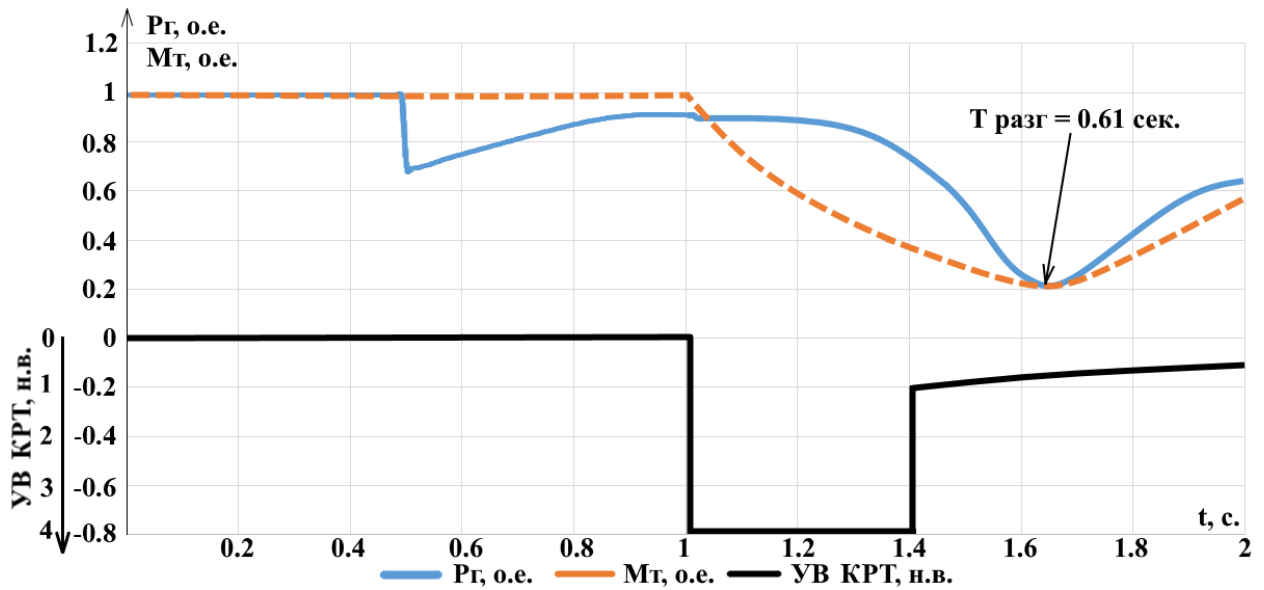


Рисунок 11 – Осциллограмма генерируемой активной мощности генераторов и момента турбин разгружаемых агрегатов при использовании УВ КРТ при  $A_i = 4$  н.в.

В соответствии с осциллограммами оптимальное значение  $A_i$  равно 3,5 н.в. При данном значении разгрузка происходит на 11,1% быстрее, чем при  $A_i = 3$  н.в., и лишь на 3,2% медленнее, чем при  $A_i = 4$  н.в. При увеличении значения  $A_i$  с 3,5 до 4 н.в. (на 14%) прирост скорости разгрузки равен 3,2 % что, при учете повышенного динамического воздействия на регулирующие клапана, не целесообразно.

Определяемое значение  $T_{КРТ}$  должно обеспечивать необходимый уровень разгрузки турбогенератора с целью сохранения динамической устойчивости (рисунки 12–14).

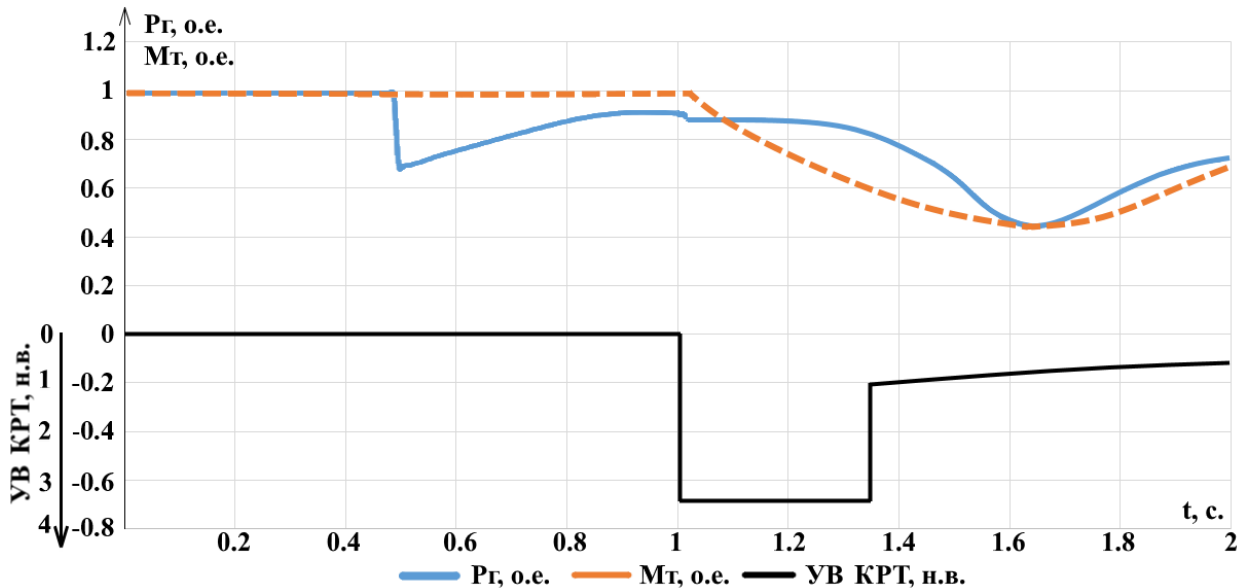


Рисунок 12 – Осциллограммы генерируемой активной мощности и момента  $G_2$  при использовании УВ КРТ  $A_i = 3,5$  н.в.,  $T_{крт} = 0,35$  с



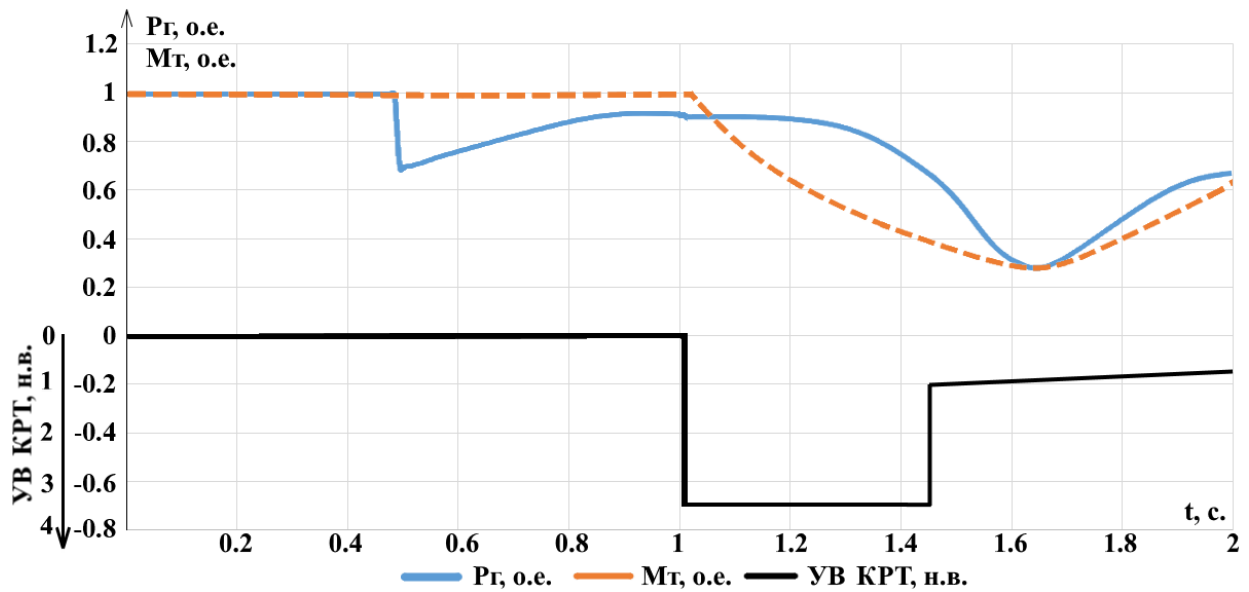


Рисунок 13 – Осциллограммы генерируемой активной мощности и момента  $G_2$  при использовании УВ КРТ  $A_i=3,5$  н.в.,  $T_{крт}=0,45$  с

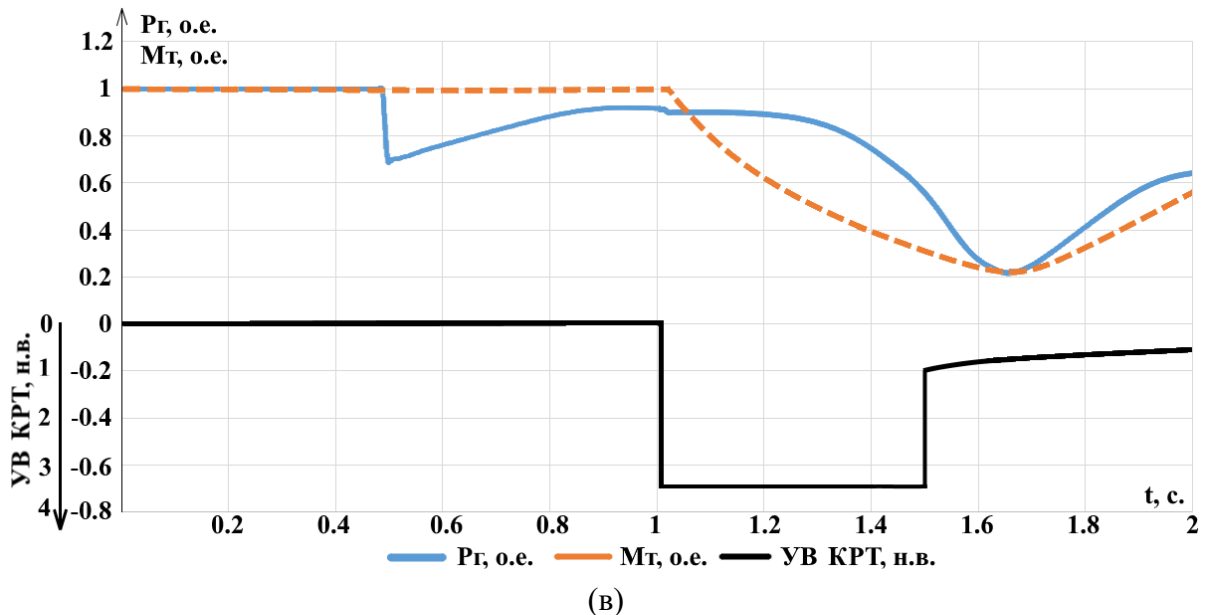


Рисунок 14 – Осциллограммы генерируемой активной мощности и момента  $G_2$  при использовании УВ КРТ  $A_i=3,5$  н.в.,  $T_{крт}=0,5$  с

Из представленных осциллограмм можно сделать вывод, что при  $T_{крт} = 0,5$  секунды снижение слишком велико для данной аварии, а при  $T_{крт} = 0,35$  секунды – снижение механического момента недостаточно, т.к. в ходе дальнейшего переходного процесса нарушается динамическая устойчивость. Таким образом оптимальным является значение  $T_{крт}$  равное 0,45 секунды.

Значения  $A_0$  и  $\tau_{крт}$  должны обеспечивать минимальный уровень перерегулирования, а также минимизацию длительности и амплитуды синхронных качаний при обнулении УВ КРТ. Были проведены экспериментальные исследования с целью определения значений данных параметров (рисунки 15–17).

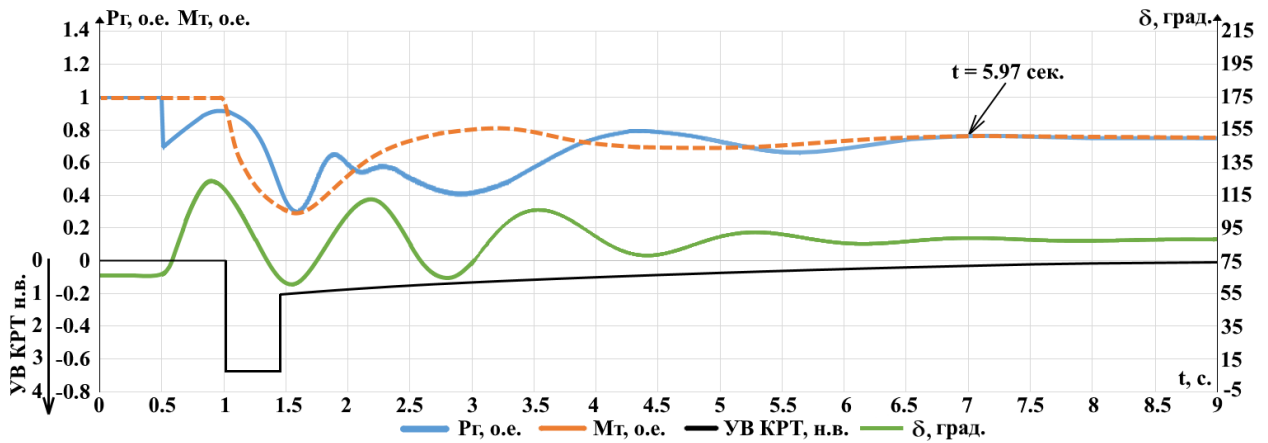


Рисунок 15 – Осциллограммы генерируемой активной мощности и момента  $G_2$  при использовании УВ КРТ  $A_i=3,5$  н.в.,  $T_{крт}=0,45$  с,  $A_0=1$  н.в.,  $\tau_{крт}=3$  с

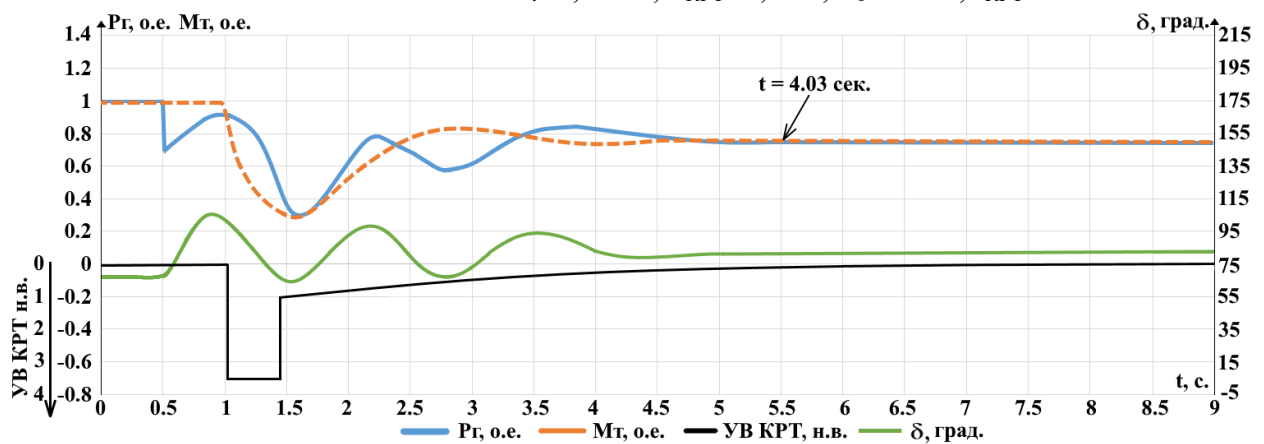


Рисунок 16 – Осциллограммы генерируемой активной мощности и момента  $G_2$  при использовании УВ КРТ  $A_i=3,5$  н.в.,  $T_{крт}=0,45$  с,  $A_0=1$  н.в.,  $\tau_{крт}=1,5$  с

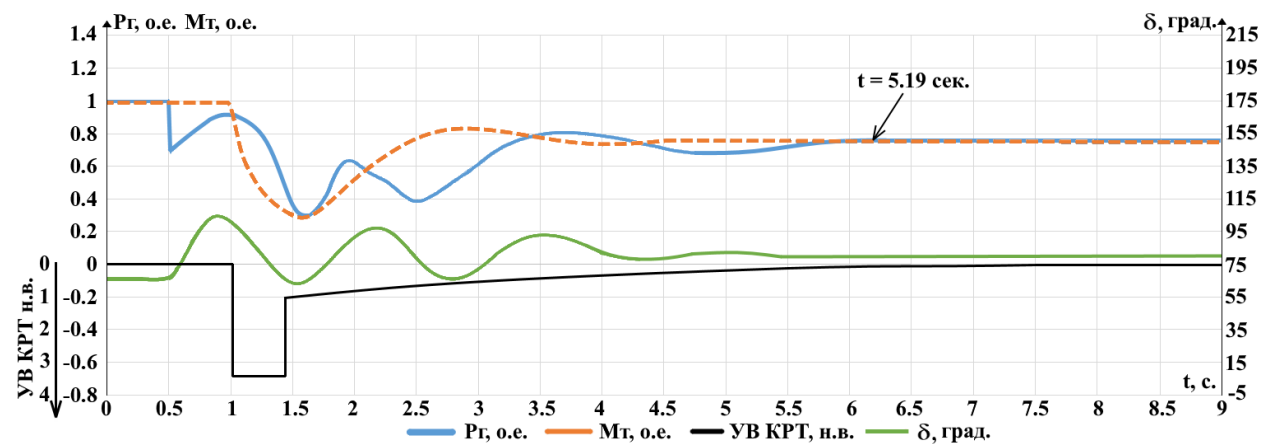


Рисунок 17 – Осциллограммы генерируемой активной мощности и момента  $G_2$  при использовании УВ КРТ  $A_i=3,5$  н.в.,  $T_{крт}=0,45$  с,  $A_0=1$  н.в.,  $\tau_{крт}=2$  с

Из представленных выше осциллограмм видно, что при  $\tau_{крт}=2$  секунды процесс разгрузки занимает длительное время, а синхронные качания прекращаются через 5,97 секунды. При  $\tau_{крт}=1,5$  секунды переходный процесс занимает лишь 4,03 секунды.

В результате выполненного комплекса экспериментальных исследований определены оптимальные значения параметров УВ КРТ при отключении  $L_6$ :  $A_i=3,5$  н.в.;  $T_{KPT}=0,45$  с.;  $A_i=1$  н.в.;  $\tau_{KPT}=1,5$  с., при которых сохраняется динамическая устойчивость с минимальным уровнем переупругования.

Для второго схемно-режимного состояния был произведен комплекс экспериментальных исследований при отключении сетевого элемента при однофазном КЗ и неуспешном АПВ на линии  $L_6$  с последующим нарушением динамической устойчивости, для обеспечения которой необходимо использовать УВ КРТ (рисунок 18).

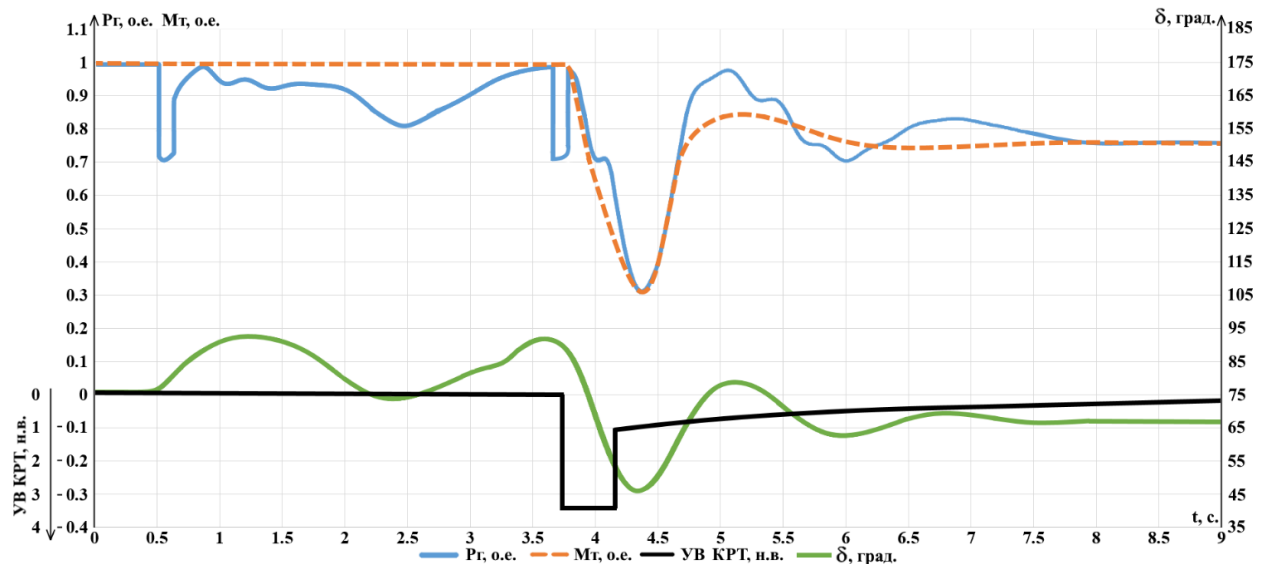


Рисунок 18 – Оциллограмма генерируемой активной мощности и момента турбин разгружаемых агрегатов при использовании УВ КРТ с  $A_i=3,4$  н.в.,  $T_{KPT}=0,44$  с,  $A_0=1$  н.в.,  $\tau_{KPT}=3$  с

В результате выполненного комплекса экспериментальных исследований определены оптимальные значения параметров УВ КРТ при отключении  $L_6$ :  $A_i=3,4$  н.в.;  $T_{KPT}=0,44$  с;  $A_i=1$  н.в.;  $\tau_{KPT}=3$  с, при которых сохраняется динамическая устойчивость с минимальными перерегулированием, величиной и длительностью синхронных качаний.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ существующих средств ПА для сохранения устойчивости ЭЭС при возникновении аварийного избытка кинетической энергии ротора и выявлены преимущества УВ КРТ.

2. Рассмотрен численный подход к получению информации о режимах и процессах в ЭЭС, который позволил выявить и обосновать причины, затрудняющие осуществление настройки УВ КРТ, соответствующей реальным условиям, выполняемой с помощью доминирующих в настоящее время многочисленных цифровых ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС.

3. Для получения необходимой информации использован комплексный подход, в рамках которого была проведена модернизация ВМК РВ ЭЭС необходимая для реализации УВ КРТ, предусматривающая применение более детальной всережимной математической модели турбины и ее системы регулирования.

4. Для полного и достоверного воспроизведения процессов в разгружаемом оборудовании разработана математическая модель, включающая в себя паровую турбину и ее систему регулирования. Выполнен комплекс тестовых экспериментов с целью проверки синтезированной математической модели.

5. Разработана методика, позволяющая производить гибкую настройку параметров УВ КРТ, а именно: получать импульсные характеристики путем моделирования единого переходного процесса, включающего в себя аварийное возмущение, функционирование УВ КРТ и установление послеаварийного режима, что снимает все ограничения на вариацию значений параметров УВ КРТ и дает возможность для каждого аварийного случая использовать оптимальные значения настроечных параметров УВ КРТ.

6. Выполнен комплекс экспериментальных исследований, подтверждающих осуществимость и эффективность сформулированной методики определения оптимальных значений параметров УВ КРТ.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Киевец А.В.** Проблема численного моделирования цифровой релейной защиты и её аналого-цифровое (гибридное) решение / М.В. Андреев, А.А. Суворов, А.Б. Аскарлов, А.В. Киевец // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2018. – Т. 61. – № 6. – С. 77–83.

### Публикации в изданиях, входящих в реферативные базы Scopus и Web of Science:

1. **Kievets A.** The use of HRTSim to optimize the control parameters of fast turbine valving control / A. Kievets, A. Suvorov, A. Askarov, V. Rudnik, G. Aleksander, B. Yuly // Electrical Engineering. – 2021. – Vol. 103 (2). – P. 1105–1113.

2. **Kievets A.** Turbine Fast Valving Setting Method Based on the Hybrid Simulation Approach / Kievets A., Ruban N., Andreev M., Suvorov, A // Energies – 2023. – Vol. 16 (4)

3. **Kievets A.** Fast valving automation setting using HRTSim / Kievets A., A. Gusev, Y. Bay // International Journal of Emerging Electric Power Systems. – 2022. – Vol. 23 (2). – P. 233–239.

4. **Kievets A.** Fast valving automation prospects / A. Kievets, A. Suvorov, I. Razzhivin // AIP Conference Proceedings. – 2020. – 2212.

5. **Kievets A.** The problem of numerical simulation of digital protective relay and its analog–digital (hybrid) solution / A. Suvorov, M. Andreev, A. Askarov, A. Kievets // Electrical Engineering. – 2020. – Vol. 102 (1). – P. 167–186.

6. **Kievets A.** Comprehensive validation of transient stability calculations in electric power systems and hardware–software tool for its implementation / A.A. Suvorov, A.A.Z. Diab, A.S. Gusev, M.V. Andreev, N.Y. Ruban, A.B. Askarov, R.A. Ufa, I.A. Razzhivin, A.V. Kievets, Y.D. Bay, V.E. Rudnik, R. Aboelsaud, A. Ibrahim, A.S. Al-Sumaiti // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 136071–136091.

7. **Kievets A.** Researching of a setting emergency unloading technique of turbo-generator / A. Kievets, V. Rudnik, N. Kachalov // AIP Conference Proceedings. – 2019. – 2135.

8. **Kievets A.** Novel Method for Numerical Transformer Differential Protection Setting Up Using Its Detailed Mathematical Model / M. Andreev, A. Suvorov, N. Ruban, R. Ufa, A. Gusev, I. Razzhivin, Y. Bay, A. Kievets, A. Askarov, V. Rudnik // Proceedings of 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe. – 2019. – P. 1–5.

#### **Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:**

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663453. Математическое моделирования первичного двигателя с каналом управляющего воздействия противоаварийной разгрузки турбогенератора. Заявка № 2021662490 / А.В. Киевец, М.В. Андреев, А.С. Гусев // Дата публикации: 17.08.2021, заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

#### **Публикации в сборниках статей и трудах конференций:**

1. **Киевец А.В.** Настройка противоаварийной разгрузки турбогенератора с помощью ВМК РВ ЭЭС / Киевец А.В., А.С. Гусев // Возобновляемые источники энергии: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием и XII научной молодежной школы, Москва. – 2020. – С. 242–247.

2. **Киевец А.В.** Оптимизация параметров кратковременной разгрузки турбогенераторов с помощью ВМК РВ ЭЭС / Киевец А.В., А.С. Гусев, А.А. Суворов // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, Томск, 05–09 апреля 2021 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. – С. 169–171.

3. **Киевец А.В.** Применение ВМК РВ ЭЭС для оптимизации параметров управляющего воздействия автоматической импульсной разгрузки / Киевец А.В., Ю.Д. Бай, А.А. Суворов, А.Б. Аскараров // Электроэнергетика глазами молодежи – 2020: материалы XI Международной научно-технической конференции. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет. – 2020. – С. 279–282.