

Инженерная школа энергетика
 Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение электроэнергетики и электротехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Построение модели системы автоматического регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора в MatLab Simulink

УДК 621.313.322:004.42

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А8Г	Ван Ринен Рене		07.06.2022

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Кулешова Е. О.	к. ф.-м. н., доцент		07.06.2022

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Спицына Л. Ю.	к. э. н., доцент		07.06.2022

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель ОДД ШБИП	Черемискина М. С.	-		07.06.2022

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	В.В. Шестакова	к.т.н., доцент		07.06.2022

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в практической деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
УК(У)-10	Способен принимать обоснованные экономические решения в различных областях жизнедеятельности
УК(У)-11	Способен формировать нетерпимое отношение к коррупционному поведению
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности
ОПК(У)-2	Способен разрабатывать алгоритмы и компьютерные программы, пригодные для практического применения
ОПК(У)-3	Способен применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач
ОПК(У)-4	Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин
ОПК(У)-5	Способен использовать свойства конструкционных и электротехнических материалов в расчетах параметров и режимов

	объектов профессиональной деятельности
ОПК(У)-6	Способен проводить измерения электрических и неэлектрических величин применительно к объектам профессиональной деятельности
Профессиональные компетенции	
ПК(У) -1.	Способен проводить сбор и анализ данных для проектирования объектов профессиональной деятельности (ПД)
ПК(У) -2.	Способен составить конкурентноспособные варианты технических решений при проектировании объектов профессиональной деятельности
ПК(У) -3.	Способен проводить проектирование в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных методов
ПК(У) - 4.	Способен контролировать техническое состояние объектов профессиональной деятельности, организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт по имеющейся технической документации
ПК(У) - 5.	Способен осваивать вводимые в эксплуатацию объекты профессиональной деятельности по имеющейся технической документации

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение электроэнергетики и электротехники
 Специализация Электроэнергетические системы и сети

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ В.В.Шестакова
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
5А8Г	Ван Ринен Рене

Тема работы:

Построение модели системы автоматического регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора в MatLab Simulink	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	31.01.2022 г № 31-69/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Срок сдачи студентом выполненной работы:	07.06.2022 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Первое объект исследование является системы автоматического регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора. Используем лабораторный стенд «Модель генерирующего узла интеллектуальной электрической сети с управлением по МЭК-61850» предназначен для проведения лабораторных работ у бакалавров, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, и у магистрантов, обучающихся по направлению 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника.</p> <p>Второй объект исследование является построение модели системы автоматического регулирования частоты и</p>
---	---

	активной мощности синхронного генератора в MatLab Simulink.
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Проведение опытов на лабораторный стенд «Модель генерирующего узла интеллектуальной электрической сети с управлением по МЭК-61850». - Построение модели системы автоматического регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора в MatLab Simulink. - Проведение аналогичных опытов на системы в MatLab Simulink. - Получение статической частичной характеристики генератора на стенде «Модель генерирующего узла интеллектуальной электрической сети с управлением по МЭК-61850» и моделирование в MatLab Simulink.
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	-
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	доцент ОСГН ШБИП, Спицына Л. Ю.
Социальная ответственность	Ст. преподаватель ОДД ШБИП, Черемискина М. С.
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p> <p>нет</p>	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.02.2022 г.
--	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Кулешова Е. О.	к. ф-м. н., доцент		01.02.2022 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А8Г	Ван Ринен Рене		01.02.2022 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
 Уровень образования бакалавриат
 Отделение электроэнергетики и электротехники
 Период выполнения весенний семестр 2021 /2022 учебного года

Форма представления работы:

бакалаврской работы

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	07.06.2022 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15.02.2022 г.	Поиск источников литературы и нормативных документов по теме исследования; составление плана исследования; изучение функциональных возможностей АРЧМ в ЭЭС, постановка целей исследования	10
09.03.2022 г.	Описание лабораторного стенда «Модель генерирующего узла интеллектуальной электрической сети с управлением по МЭК-61850». Проведение несколько опытов на лабораторном стенде.	30
22.03.2022 г.	Описание математической модели АРЧМ; разработка схема АРЧМ в ПВК MatLab Simulink. Подготовка исходных данных для проведения моделирование в ПВК MatLab Simulink. Проведение аналогичных опытов в ПВК MatLab Simulink.	20
13.04.2022 г.	Сравнительный анализ результатов расчета АРЧМ ПВК MatLab Simulink с результатами лабораторного стенда	10
26.04.2022 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	10
04.05.2022 г.	Социальная ответственность	10
23.05.2022 г.	Анализ результатов; заключение; оформление работы	10
07.06.2022 г.		100

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Кулешова Е. О.	к. ф-м. н., доцент		01.02.2022 г.

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	В.В. Шестакова	к.т.н., доцент		01.02.2022 г.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5А8Г	Ван Ринен Рене

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение школы	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	30% премии; 20% надбавки; 16% накладные расходы; 30% районный коэффициент
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30,2 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Анализ и оценка конкурентоспособности НИ.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Формирование плана и графика разработки: определение структуры работ; определение трудоемкости работ; разработка графика Гантта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: материальные затраты; амортизационные отчисления; заработная плата; отчисления на социальные цели; накладные расходы.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	QuaD анализ перспективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Диаграмма Гантта 3. Распределение исполнителей и этапов выполняемых работ 4. Временные показатели проведения научного исследования 5. Бюджет на разработку проекта 6. Оценочная карта QuaD анализа для модели АРЧМ	
--	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.02.2022 г.
---	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Любовь Юрьевна	К.Э.Н.		01.02.2022 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
---------------	------------	----------------	-------------

5А8Г	Ван Ринен Рене	01.02.2022 г.
------	----------------	---------------

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа 5А8Г		ФИО Ван Ринен Рене	
Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение школы	Электроэнергетика и электротехника
Уровень образования	Бакалавриат	Направление	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Тема ВКР:

Построение модели системы автоматического регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора в MatLab Simulink

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения 	<p><i>Объект исследования: <u>система автоматическая регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора</u></i></p> <p><i>Область применения: <u>электроэнергетика</u></i></p> <p><i>Рабочая зона: <u>офис/производственное помещение/открытые площадки на территории электростанции</u></i></p> <p><i>Размеры помещения: <u>13 квадратных метров</u></i></p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны: <u>компьютер, 1 шт</u></i></p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: <u>использование программного комплекса MatLab Stimulink на компьютере для построения модели системы автоматического регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора</u></i></p>
<p>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</p>	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p><i>1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 20.04.2021);</i></p> <p><i>2. ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.</i></p> <p><i>3. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 5. Требования к расположению рабочей станции и осанке оператора.</i></p> <p><i>4. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.</i></p>
<p>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов 	<p>Вредные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Отклонение показателей микроклимата в закрытом помещении - Отсутствие или недостаток естественного света. <p>Опасные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Повышенный уровень электромагнитного излучения. - Повышенное значение напряжения в электрической цепи. - Расположение рабочего места на значительной высоте относительно поверхности земли.

	<p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Отслеживание и регулирование освещенности на рабочем месте - При работе на высоте должны применяться строительные предохранительные пояса. - Обеспечение для работников краткосрочных перерывов в течение рабочей смены - От воздействия электрического тока являются оградительные устройства, устройства автоматического контроля и сигнализации, изолирующие устройства и покрытия, устройства защитного заземления, устройства автоматического отключения, предохранительные устройства.
3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения	<p><i>Воздействие на литосферу: <u>загрязнение почвы бытовыми отходами.</u></i></p> <p><i>Воздействие на гидросферу: <u>загрязнение водоема бытовыми отходами.</u></i></p> <p><i>Воздействие на атмосферу: <u>выделение вредных веществ бытовыми отходами.</u></i></p>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения	<p>Возможные ЧС: <u>пожар, поражение электрическим током, землетрясение.</u></p> <p>Наиболее типичная ЧС: <u>поражение электрическим током</u></p>
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
28.02.2022	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель (ООД, ШБИП)	Черемискина Мария Сергеевна	-		28.02.2022

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А8Г	Ван Ринен Рене		28.02.2022

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 88 с., 17 рис., 20 табл., 21 источников, 1 прил.

Ключевые слова: АРЧВ, регулировка частоты, первичное регулирование частоты, статизм агрегата, электроэнергетика.

Объектом исследования является модель генерирующего узла интеллектуальной электрической сети с управлением по МЭК-61850 и математической модели АРЧМ в программно-вычислительном комплексе (ПК) MatLab Simulink

Цель работы – исследование системы автоматического регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора в электроэнергетических системах с использованием модели генерирующего узла и исследование математической модели АРЧМ в ПК MatLab Simulink.

В процессе исследования проводились опыты по исследованию автоматического регулирования частоты вращения синхронного генератора и также моделировала математической модель в ПК MatLab Simulink.

В результате исследования были разработаны методические указания по работе со стендом.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: лабораторный стенд и персональных компьютеров для взаимодействия со стендом.

Область применения: лабораторные работы для бакалавров по направлению подготовки 13.03.02- Энергоэнергетика и электротехника и магистров по направлению подготовки 13.04.02- Энергоэнергетика и электротехника.

В будущем планируется проведение лабораторных работ по методическим указаниям, разработанным в данной работе.

Принятые сокращения

АРЧМ	- автоматическое регулирование частоты и перетоков активной мощности;
АРЧВ	- автоматический регулятор частоты вращения турбины;
АРВ	- автоматический регулятор возбуждения;
ЕЭС России	- Единая энергетическая система России;
ЭЭС	- электроэнергетические системы;
НПРЧ	- нормированное первичное регулирование частоты;
ОПРЧ	- общее первичное регулирование частоты;
ПТД	- программной траектории движения

Содержание

Введение.....	14
Глава 1. Предметная область и задачи исследования	16
1.1 Частота и её роль в энергосистемах	16
1.2 Статическая и астатическая характеристики регулирования.....	17
1.3 Теоретические сведения о регулировании частоты и перетоков активной мощности в энергосистемах РФ	19
1.4 Концепция автоматического первичного регулирования частоты и перетоков активной мощности (АРЧМ)	21
Глава 2. Теоретические основы построения систем автоматического регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора на основе принципа управления по программным траекториям движения технических объектов	27
2.1 Основы общей теории управления движением технических объектов	27
2.2 Основы построения программных траекторий движения генераторов и подсистем электроэнергетических систем	28
2.3 Расчет управлений при автоматическом регулировании частоте и активной мощности синхронного генератора.....	32
2.4 Применение принципа адаптивности для решения задач автоматического регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора	35
Глава 3. Общие принципы построения систем автоматического регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора	37
3.1. Описание лабораторного стенда.....	37
3.1.1. Назначение.....	37
3.1.2. Состав модулей стенда	38
3.1.3. Структура стенда.....	40
3.2. Лабораторная работа «Автоматическое регулирование частоты вращения синхронного генератора»	43
3.2.1. Цель работы	43
3.2.2. Общие сведения:.....	43
3.2.3. Порядок выполнения работы	44
Глава 4. Моделирование процесса автоматического регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора.....	52

4.1 Описание элементов моделируемых схем.....	52
4.2 Моделирование процесса автоматического регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора.....	53
Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	57
5.1. Предпроектный анализ.....	57
5.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	57
5.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	58
5.2. Распределение исполнителей и этапов выполняемых работ.....	59
5.3. Определение трудоемкости выполнения работ.....	60
5.4. Разработка графика проведения научного исследования.....	61
5.5 Определение бюджета проекта.....	65
5.6 Технология QuaD.....	71
5.7. Заключение по главе 5.....	73
Глава 6. Социальная ответственность.....	74
6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	74
6.2. Производственная безопасность.....	76
6.3. Экологическая безопасность.....	80
6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	81
6.5. Выводы по разделу.....	82
Заключение.....	84
Приложение А.....	88

Введение

Все вращающиеся механизмы в синхронно работающих частях энергосистемы (турбины, генераторы, двигатели и т. д.) имеют номинальные проектные обороты, пропорциональные номинальной частоте в сети.

Номинальный режим работы всех вращающихся механизмов является наиболее эффективным с точки зрения их экономичности, надежности и долговечности. Частота является не только показателем качества электроэнергии, но и важнейшим параметром режима энергосистем, характеризующим соответствие между процессом производства и потребления электрической энергии [16]. Поэтому вопрос поддержания частоты на номинальном уровне трудно назвать неактуальным.

Процессы, связанные с изменением частоты, неизбежно охватывают энергосистему целиком. В современном виде энергосистема представляет собой довольно сложный объект, состоящий из множества разнообразных элементов. Точное рассмотрение процессов в таком объекте хоть и возможно с применением современных средств моделирования, однако вряд ли может дать какие-либо практически значимые результаты. Поэтому в данной работе рассматривается ряд частных случаев, которые с определенными допущениями соответствуют реальным объектам.

При малых отклонениях режимных параметров вследствие относительно небольших возмущений в энергосистеме, с которыми справляются системы автоматического регулирования, для изучения процессов автоматического регулирования частоты и мощности используется линеаризованная модель энергосистемы [16]. В рамках данной модели переменными являются не сами

режимные параметры, а их относительные отклонения от значений в нормальном режиме.

Целью работы является исследование процесса регулирования частоты синхронного генератора и активной мощности. Объект данного исследования – лабораторный стенд «Модель генерирующего узла интеллектуальной электрической сети с управлением по МЭК-61850» и модели АРЧМ в ППК MatLab Simulink. В ходе выполнения работы будут рассматриваться следующие задачи:

- Построение статическая характеристика регулирование,
- исследование влияния состава моделируемой энергосистемы на качество первичного регулирования частоты.

Также работа системы автоматической регулировки частоты и мощности будет рассмотрена с позиции социальной безопасности (экологическая безопасность, безопасность в чрезвычайных ситуациях и так далее) и финансового менеджмента (оценка стоимости работы по созданию модели, анализ перспективности проекта).

В качестве среды моделирования был выбран программный комплекс MatLab с приложением Simulink, которое позволяет создавать динамические модели и решать соответствующие им уравнения с достаточной для данной работы точностью.

Глава 1. Предметная область и задачи исследования

1.1 Частота и её роль в энергосистемах

В настоящее время всё производство, практически все распределение и большая часть потребления электроэнергии в энергосистемах выполняются на переменном токе. Поэтому параметры переменного тока – частота, величина и форма кривой напряжения – приобрели значение унифицированных параметров, в соответствии с которыми конструируются все источники, средства передачи и приемники электрической энергии.

Практически в мире сохранилось лишь два стандартных значения частоты для систем электроснабжения общего назначения – 50 Гц (Россия, Европа и др.) и 60 Гц (США, Канада).

В процессе эксплуатации все параметры переменного тока могут изменяться. Чем ближе они поддерживаются к расчетным для оборудования значениям, тем ближе режим к оптимальному. Таким образом частота, величина и форма кривой напряжения приобретают значение показателей, характеризующих качество продукции энергетической промышленности. Строгие требования, предъявляемые к частоте, могут объясняются тем, что этот показатель в сети переменного тока напрямую связан с частотой вращения установок, преобразующих электрическую и механическую энергию. Отклонение величины частоты от номинального значения в ту или иную сторону существенно влияет на режим работы вращающегося механизма и приводит к нежелательным эффектам в работе оборудования электростанций и потребителей, снижению экономичности и надежности.

Регулирование частоты электрического тока в ЕЭС России осуществляется в соответствии с требованиями, установленными Стандартом ОАО «СО ЕЭС» СТО 59012820.27.100.003-2012 «Регулирование частоты и перетоков активной мощности в ЕЭС России. Нормы и требования» (в редакции от 29.07.2014) и национальным стандартом Российской Федерации

ГОСТ Р 55890-2013 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Регулирование частоты и потоков активной мощности. Нормы и требования» [17].

1.2 Статическая и астатическая характеристики регулирования

Статическая характеристика – зависимость установившихся выходных значений величины от величины на входе системы [18].

В данной работе рассматривается зависимость регулируемого параметра (частоты вращения ω) от нагрузки генератора (P):

$$\omega + s \cdot P = 0 \quad (1.1)$$

где s – коэффициент статизма.

Статизм представляет собой параметр, которой характеризует изменение частоты при изменении нагрузки или генерирующей мощности, то есть характеризует реакцию системы

На рисунке 1.1 представлены астатическая (I) и статическая (II) характеристики регулятора частоты вращения.

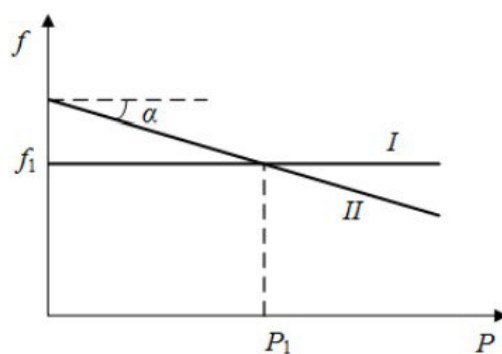


Рисунок 1.1. Астатическая и статическая характеристики регулятора

Настройка регулятора на астатическую характеристику позволяет поддерживать частоту вращения агрегата постоянной независимо от величины нагрузки. Однако, возникает проблема, связанная с распределением нагрузки между агрегатами, при их включении на параллельную работу. В случае статической характеристики, нагрузка влияет на частоту вращения (возрастание нагрузки ведет к снижению частоты и наоборот). Для решения задачи

распределения нагрузки между параллельно работающими агрегатами регулятор настраивают на статическую характеристику. Коэффициент статизма определяется как:

$$s = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta P} \quad (1.2)$$

или

$$s = \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (1.3)$$

Для удобства, статизм выражается в относительных единицах к номинальным значениям:

$$s^* = \frac{\Delta f \cdot P_{\text{НОМ}}}{f_{\text{НОМ}} \cdot \Delta P} = \frac{\Delta f^*}{\Delta P^*} \quad (1.4)$$

Если принять $\Delta P^* = 1$, то получим $\Delta s^* = \Delta f^*$ (величина статизма равна относительному изменению частоты при изменении нагрузки от холостого хода до номинального значения).

Астатическая характеристика – это частный случай статической, при условии:

$$s = 0 \quad (1.5)$$

Можно заметить, что для поддержания заданной частоты вращения агрегата необходимо настраивать регулятор астатически, но это не обеспечит однозначного распределения нагрузок. Поэтому настройку ведут по статическому закону [19].

Далее рассматривается случай с двумя параллельно работающими на общую нагрузку $P_{\text{Н}}$ агрегатами, и находится распределение нагрузки между ними.

Пусть

$$s_1 = \frac{\Delta f_1}{\Delta P_1}; \quad (1.6)$$

$$s_2 = \frac{\Delta f_2}{\Delta P_2}. \quad (1.7)$$

В системе выявляется изменение нагрузки $\Delta P_{\text{Н}}$. В силу параллельности работы агрегатов:

$$\Delta f = \Delta f_1 = \Delta f_2 \quad (1.8)$$

Тогда доля каждой станции в покрытия выявленной нагрузки:

$$\Delta P_1 = \frac{s}{s_1} \Delta P_H; \quad (1.9)$$

$$\Delta P_2 = \frac{s}{s_2} \Delta P_H; \quad (1.10)$$

где s – статизм данной системы.

Отсюда следует обратная пропорциональность статизма характеристики регулирования агрегата и нагрузки. Стоит также заметить, что система, с хотя бы одним агрегатом, имеющим астатическую характеристику, будет астатической, и, независимо от колебаний нагрузки, частота будет оставаться постоянной. Агрегаты, настроенные на статический закон регулирования, будут работать с постоянной нагрузкой, а возникающие изменения нагрузки системы будут восприниматься астатической машиной.

В случае системы более чем с одним астатическим агрегатом, распределение нагрузки будет носить неопределенный характер, что недопустимо.

Таким образом, регуляторы агрегатов должны быть настроены по статическому закону.

1.3 Теоретические сведения о регулировании частоты и перетоков активной мощности в энергосистемах РФ

Требования к регулированию частоты и активной мощности приведены в ГОСТ Р 55890-2013 «Регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования» [20]. Регулирование режима работы энергосистемы по частоте и активной мощности сводится к постоянному поддержанию баланса мощности между генераторами и потребителями при номинальной частоте. Практически регулирование режима по частоте и активной мощности обеспечивается регулированием мощности генераторов электростанций в соответствии с плановыми и внеплановыми нагрузками.

Согласно [20] выделяются следующие основные требования к регулированию режима по частоте и активной мощности:

1. Частота электрического тока в нормальном режиме работы должна быть номинальной – 50 Гц с отклонениями не более $\pm 0,05$ Гц (нормально допустимые) и кратковременно не более $\pm 0,2$ Гц (максимально допустимые). При этом восстановление отклонений частоты до нормально допустимых должно обеспечиваться за время не более 15 минут;

2. Перетоки мощности в основной сети ЕЭС не должны выходить за пределы установленных допустимых перетоков;

3. Суммарные обменные мощности между отдельными энергосистемами (сальдо перетоков мощности по внешним связям) при номинальной частоте должны соответствовать заданным с необходимой точностью, а внутри отдельных энергосистем мощности электростанций должны соответствовать заданным;

4. Функции поддержания заданного значения частоты в синхронной зоне, регулирования внешних перетоков областей регулирования, ограничения перетоков активной мощности в контролируемых сечениях должно выполнять вторичное регулирование;

5. Поддержание заданного значения частоты должно осуществляться путем регулирования частоты в синхронной зоне и/или регулирования внешних перетоков областей регулирования с коррекцией по частоте;

6. Ограничение перетоков активной мощности в контролируемых сечениях должно являться приоритетным по отношению к поддержанию заданного значения частоты или внешнего перетока области регулирования.

Выполнение этих требований обеспечивается комплексом технических и организационных мероприятий, среди которых принято выделять три вида регулирования: первичное регулирование, вторичное регулирование, третичное регулирование.

Первичное регулирование - процесс мобилизации первичной регулирующей мощности электростанций и энергосистем при возникновении небаланса мощности, заканчивающийся установлением неуравновешенного баланса мощности при новой частоте.

Вторичное регулирование - процесс восстановления планового баланса мощности путем использования вторичной регулирующей мощности для компенсации возникшего небаланса мощности, ликвидации перегрузки транзитных связей, восстановления частоты и потраченных при действии первичного регулирования резервов первичной регулирующей мощности. Вторичное регулирование может осуществляться автоматически либо оперативно вручную.

Третичное регулирование – оперативное регулирование мощности специально выделенных электростанций третичного регулирования в целях восстановления вторичного резерва по мере его исчерпания, а также для осуществления оперативной коррекции режима в иных целях. Для третичного регулирования используются пуск-останов гидроагрегатов, эпизодическое изменение мощности энергоблоков ТЭС и АЭС, перевод агрегатов ГАЭС в двигательный или генераторный режим.

В данной дипломной работе было рассмотрено первичное регулирование АРЧМ.

1.4 Концепция автоматического первичного регулирования частоты и потоков активной мощности (АРЧМ)

На рисунке 1.2. представлен процесс первичного регулирования частоты, детализирующий I стадию процесса регулирования частоты.

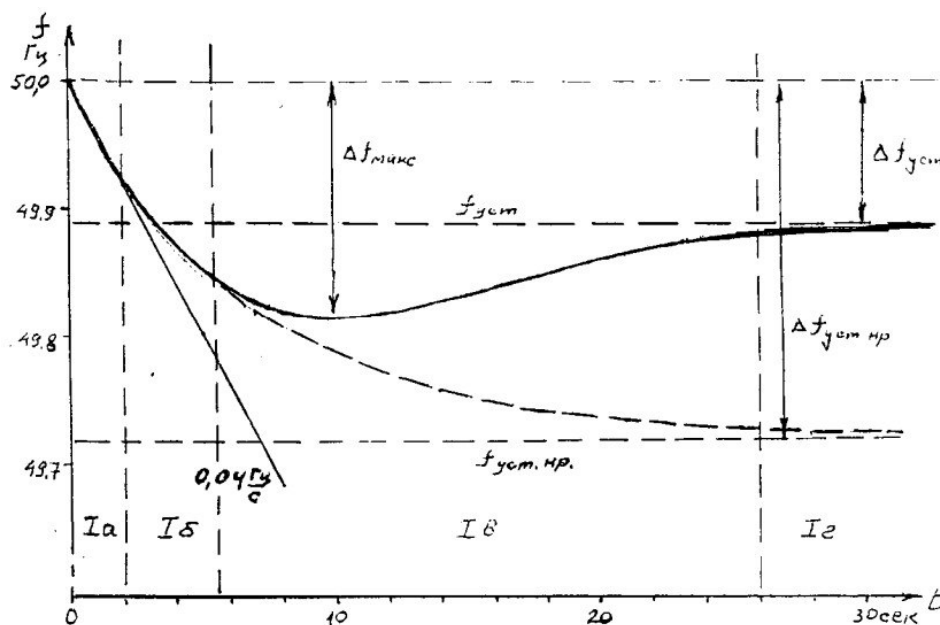


Рисунок 1.2. Начальный период первичного регулирования частоты

Обозначения: I_a – электромеханический процесс; I_6 – первичное регулирование осуществляемое потребителями; I_B – первичное регулирование осуществляемое совместно потребителями и электростанциями; I_B – установившийся режим первичного регулирования; $\Delta f_{уст.}$ – установившееся (квазистационарное) значение частоты на стадии первичного регулирования; $\Delta f_{уст.нр}$ – установившееся (квазистационарное) отклонение частоты на стадии первичного регулирования; $f_{уст.нр}$ – установившееся значение частоты до проявления влияния электростанций; $\Delta f_{уст.нр}$ – установившееся отклонение частоты при отсутствии влияния электростанций; $\Delta f_{дин.}$ – динамическое отклонение частоты.

Примечание: Процесс, представленный на рисунке, идеализирован и отражает потребности ЕЭС.

В начале (I_a – первый период) скорость снижения частоты определяется величиной относительного дефицита и постоянной механической инерции энергообъединения и не зависит от регулирующего эффекта потребителей и электростанций. Дефицит мощности компенсируется расходом запаса кинетической энергии вращающихся масс в процессе их торможения. Скорость снижения частоты на этой стадии:

$$\left. \frac{df}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\Delta P / P_{г.ном}}{T_j} f_0 \quad (1.11)$$

Если принять $\Delta P / P_{г.ном}$ (относительный дефицит) равным 1% (0.01), что в условиях ЕЭС России соответствует аварийному отключению энергоблока АЭС мощностью 1000 МВт, а постоянную механической инерции T_j крупного энергообъединения с мощными энергоблоками ГРЭС и АЭС равной 12 с, то скорость снижения частоты составит 0.04 Гц/с.

Далее (I_6 – второй период) по мере нарастания отклонения частоты начинает сказываться регулирующий эффект (саморазгрузка) потребителей;

скорость снижения частоты падает; процесс продолжается по экспоненциальному закону. Если бы не вмешательство в первичное регулирование электростанций (I_B), то постоянная времени этого процесса (постоянная времени нерегулируемой энергосистемы) составила бы:

$$\tau = \frac{T_j}{\frac{\Delta P}{P_{г.ном}} K_{II}} \quad (1.12)$$

Если коэффициент загрузки электростанций $\frac{P_0}{P_{г.ном}}$ принять 0.9, а регулирующий эффект нагрузки K_{II} равным 2, то постоянная времени энергосистемы составит около 7 секунд, а частота установится через 30 секунд. Установившееся отклонение частоты $\Delta f_{уст.}$, к которому стремится процесс до проявления влияния электростанций, определяется выражением:

$$\Delta f_{уст.} = \frac{1}{K_{II}} f_0 \frac{\Delta P}{P_0 T_j} \quad (1.13)$$

При принятых ранее значениях отклонение частоты в конце процесса установилось бы 0.28 Гц (штриховая кривая на рисунок 1.2.).

С определенной задержкой, обусловленной наличием зоны нечувствительности, люфтов в системе регулирования, инерционности сервопривода и паровых объемов начинает сказываться (I_B - третий период) действие регуляторов скорости вращения турбоагрегатов. Электростанции подключаются к участию в первичном регулировании. В рассматриваемых условиях этого можно ожидать (с учетом малой величины отклонения частоты) на 5-ой, 6-ой секундах. Снижение частоты замедляется, приостанавливается (максимальное динамическое отклонение частоты $\Delta f_{макс.}$) и частота начинает повышаться.

Третий период I_B закончится, когда участвующие в первичном регулировании электростанции возьмут на себя всю положенную часть дополнительной нагрузки, выдадут требуемую первичную мощность. Доли участия потребителей и электростанций в этих условиях пропорциональны их

регулирующим эффектам. Установившееся отклонение частоты по окончании третьего периода определяется выражением:

$$\Delta f_{уст.} = -\frac{1}{K_{II}} f_0 \frac{\Delta P}{P_{г.ном}} = -S_c f_0 \frac{\Delta P}{P_{г.ном}} \quad (1.14)$$

Если принять регулирующий эффект энергообъединения (совместно потребителей и электростанций) K_C равным минус 5 (статизм $S_c = 20\%$), что примерно соответствует его значению в ЕЭС России, установившееся отклонение частоты составит 0.11 Гц. Процесс первичного регулирования должен завершиться через 30 секунд. Следовательно, отклонение частоты через 30 - 40 секунд составит 0.11 Гц (вместо 0.28 Гц без участия электростанций).

Наступающий затем четвертый ($I_{Г}$) период первичного регулирования – установившийся режим характеризуется ожиданием начала восстановления частоты либо вследствие самоустранения первопричины (нерегулярные колебания баланса, например), либо вследствие вторичного регулирования. В любом случае вплоть до нормализации частоты первичное регулирование должно удерживать устойчивую выдачу первичной мощности, соответствующую текущему отклонению частоты. Поскольку потребители этому условию в общем случае удовлетворяют, особое внимание должно быть обращено на выдачу мощности электростанциями (с учетом заданного им статизма).

Если из-за отсутствия поддержки со стороны системы регулирования котла, реактора электростанции в этот период начнут снижать выдаваемую первичную мощность, частота начнет снижаться. При полном возврате всех электростанций к исходной нагрузке из-за неуправляемости котлов, реакторов частота на четвертом этапе понизится до уровня, определяемого потребителями. В нашем случае отклонение частоты с 0.11 возрастет до 0.28 Гц.

Характер изменения частоты на третьем ($I_{В}$) периоде сильно зависит от быстродействия первичного регулирования на электростанциях. Увеличение зоны нечувствительности и задержек в системе регулирования увеличивает

максимальное динамическое отклонение частоты $\Delta f_{\text{макс.}}$, которое в нашем случае составляет 0.18 Гц. При отсутствии нечувствительности и максимальном быстродействии провал в частоте можно было бы существенно снизить. При увеличении зоны нечувствительности и задержек провал может достигнуть величины $\Delta f_{\text{уст.нр}}$, в нашем случае 0.28 Гц, если электростанции задержатся на 25 секунд и более.

Таким образом, максимальное динамическое отклонение частоты $\Delta f_{\text{макс.}}$, в зависимости от быстродействия и чувствительности первичного регулирования, в нашем примере может изменяться от 0.11 до 0.28 Гц, т.е. в 2.5 раза. Поскольку продолжительность провала частоты при первичном регулировании может составить 4 - 6 секунд и более, он небезопасен с точки зрения функционирования АЧР и другой автоматики, в том числе на АЭС, при разделении ЕЭС.

Для достижения этого гарантированного уровня из всех электростанций, участвующих в общем первичном регулировании (ОПРЧ), отбираются выделенные энергоблоки и станции нормированного первичного регулирования (НПРЧ), в которых планируется и постоянно поддерживается первичный резерв. В России в 2011 и 2012 уже отобрано 43 и 53 энергоблока, обеспечивающие ± 707.5 МВт и ± 897.5 МВт нормированного первичного резерва соответственно [8–10], хотя требуемый объем составлял ± 1226 МВт [11–13]. В дальнейшем планируется увеличить число модернизированных блоков до 100 единиц, увеличив нормированный первичный резерв до величины ± 1950 МВт, который с запасом может компенсировать расчетный аварийный небаланс мощности ЕЭС России, равный потере энергоблока с мощностью 1200 МВт и обеспечить конкурентный отбор между участниками рынка [14]. При характерных отклонениях частоты в ЕЭС России реакция электростанций, участвующих в ОПРЧ, имеет непостоянный характер. При возникновении крупных небалансов (более 500 МВт) общая крутизна частотной характеристики для всей системы нестабильна (изменяется в диапазоне $10000 \div 30000$ МВт/Гц). Среднее значение этой величины при потере генерации

равно 22700 МВт/Гц. Введение нормированного первичного резерва стабилизирует это значение, так как способно мобилизовать свой резерв в течение 30 секунд при отклонениях частоты до 200 мГц.

Таким образом, первичное регулирование, и в первую очередь НПРЧ, в ЕЭС России рассматривается как “подушка безопасности” на случай резких изменений частоты, обеспечивающая ее стабильность.

Глава 2. Теоретические основы построения систем автоматического регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора на основе принципа управления по программным траекториям движения технических объектов

2.1 Основы общей теории управления движением технических объектов

В основе принципа управления лежит воздействие на управляемый объект с целью обеспечения в процессе движения требуемых от него свойств по заданному системой управления (СУ) закону. Существует два различных вида управления: программное, которое задается конкретной программой и не подразумевает коррекции движения, и управление с обратной связью, отличающееся изменением движения объекта в зависимости от его состояния. Преимуществом последнего способа управления является самокоррекция в процессе управления. Коррекция движения приводит к снижению воздействия параметрических возмущений.

Решение задач управления основывается на изменении систем управления для соответствия условиям функционирования управляемого объекта. Адаптивная СУ изменяет свои параметры в процессе работы согласно текущему состоянию объекта, чтобы обеспечивать выполнение цели управления за конечное время [21].

Расчет программной траектории движения (ПТД), управлений и управляющих воздействий (УВ) основывается на принципах построения адаптивных систем управления программной траекторией движения (СУПД) управляемых объектов.

Следующая система дифференциальных уравнений определяет состояние управляемого объекта в данный момент времени:

$$\dot{x}(t) = F[x(t), u(t), \theta] + \pi(t); x(t_0) = x_0; t \in [t_0, t_T] \quad (2.1)$$

где $u(t)$ – m -мерная вектор-функция, называемая управлением;

θ – m -мерный вектор параметров;

$\pi(t)$ – m -мерная функция внешних возмущений;

x_0 – состояние в начальный момент времени;

$T = t_T - t_0$ – конечное или бесконечное время движения

ПТД – это закон изменения состояния объекта во времени по заданным свойствам, являющийся решением уравнения (2.1) и представляемый векторфункцией $x_p(t_0); t \in [t_0, t_T]$. Программным управлением называют допустимое управление $u_p(t)$, порождающее ПТД $x_p(t_0)$.

При известных θ и $\pi(t)$ движение объекта согласно (2.1) осуществляется программным управлением.

В случае, когда θ и $\pi(t)$ неизвестны, возможно изменение положения объекта нежелательном направлении, поэтому следует применять управление с обратной связью, которое будет учитывать дополнительную информацию в СУ при движении. В каждый момент времени t определяется управление $u[t, x(t)]$, на основании информации о текущем состоянии $x(t)$ объекта (2.1).

2.2 Основы построения программных траекторий движения генераторов и подсистем электроэнергетических систем

Первым этапом при проектировании СУ программным движением является построение ПТД. Траектория движения ЭЭС в переходном режиме – это совокупность зависимостей параметров режима от времени, в математической теории трактуемая как траектория движения изображающей точки в многомерном вещественном пространстве. Координатами этой точки являются время и фазовые переменные (параметры режима), определяющие состояние ЭЭС.

При рассмотрении траектории движения отдельной части ЭЭС, например синхронного генератора, она будет выражена в виде подгруппы фазовых координат, изменяющихся во времени. Совокупность координат $x_y(t)$ рассматривается как подмножество управляемых параметров, для которого строится ПТД $x_p(t)$, используемая для расчета (или аппаратной реализации) противоаварийных управлений $u(t)$.

Все множество $x(t)$ параметров режима, отражающих движение ЭЭС, включает как управляемые $x_y(t)$ параметры, отражающие движение управляемого объекта, так и неуправляемые $x_c(t)$.

Часть $x_c(t)$ выражает параметрическое описание динамической среды, в которой происходит управление объектом. При этом управление $u(t)$ воздействует на движение управляемого объекта и на динамическую среду через управляемый объект. Соответственно, управление формируется как объектом через ПТД, так и средой, через взаимосвязи с объектом и управляющим устройством (УУ).

В итоге, зависимости $x_p(t)$ выражаются табличным или аналитическом виде и приводят управляемые координаты к конечным условиям, что является результатом построения ПТД. При формировании этих зависимостей заданным необходимо учитывать специфику среды с тем, чтобы неуправляемые машины не теряли устойчивость во время динамического перехода ЭЭС.

При реализации обозначенных условий ПТД строится методом нахождения допустимого пути перевода точки, изображающей управляемый объект, из положения с координатами начала управления $x_{y1} = x_y(t_1)$ в окончательное положение $x_{yT} = x_y(t_T)$.

На рисунке 2.1. изображена ПТД для синхронного генератора.

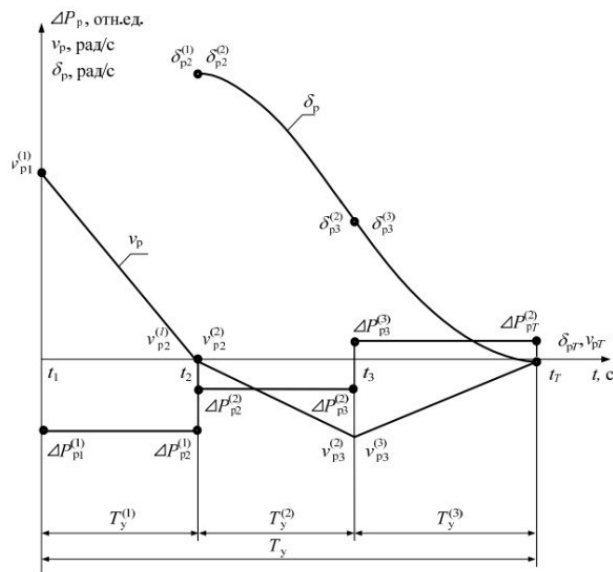


Рисунок 2.1. ПТД для синхронного генератора

Момент времени t_1 является началом управления, интервал $[t_1, t_T]$ – интервалом управления с длительностью $T_y = t_T - t_1$. Цель управления – привести выбранный объект к нулевой потенциальной и кинетической энергии в конце интервала управления.

К параметрам процесса синхронизации относится небаланс мощностей на валу $\Delta P_y(t)$, угол вылета $\delta_y(t)$ и относительная скорость $v_y(t)$ ротора генератора с постоянной инерции T_j . Следующая подсистема дифференциальных уравнений определяет связь между управляемыми параметрами [21]:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_y(t) = v_y(t); \\ \dot{v}_y(t) = \frac{\omega_0}{T_j} \cdot \Delta P_y(t). \end{cases} \quad (2.2)$$

Размерности управляемых параметров:

$$t \text{ [с]}, T_j \text{ [с]}, \delta_y(t) \text{ [рад]}, v_y(t) \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right], \Delta P_y(t) \text{ [отн. ед.]}$$

Объектом управления является изображающая точка $x_y = \text{colon}[t, \Delta P_y, v_y, \delta_y]$, которой управлением $u(t)$ регулируется перемещение по ПТД $x_p = \text{colon}[t, \Delta P_p, v_p, \delta_p]$ на интервалах управления. Для построения ПТД можно использовать систему (2.2), так как $x_p(t)$ – это одна из траекторий движения объекта.

На трех подынтервалах достигаются различные цели. На первом – $[t_1, t_T]$ кинетическая энергия ротора генератора уменьшается до нуля. В конце этого подынтервала относительная скорость ротора становится нулевой ($v_{p2}^{(1)} = 0$), а относительный угол принимает произвольное значение $\delta_{p2}^{(1)}$. На втором $[t_2, t_3]$ и третьем $[t_3, t_T]$ подынтервалах относительный угол вылета ротора генератора уменьшается до нулевого значения. При управлении $u(t)$ в конце второго подынтервала достигается некоторая относительная скорость ($v_{p3}^{(2)} = \text{extr}$), которая уменьшается до нуля к концу третьего подынтервала ($v_{p4}^{(3)} = 0$), то

есть к конечному моменту $t_T = t_4$ общего интервала управления. В этот же момент времени управление $u(t_T) = \Delta P_{(t_T)} = 0$ снимается.

В итоге к концу интервала граничные значения всех параметров ПТД $x_y = colon[t_T, \Delta P_{yT}, v_{yT}, \delta_{yT}] = colon[t_T, 0, 0, 0]$, выполняются и удовлетворяют требованиям подключения генератора к электрической сети.

В таблице 2.1. приведены расчетные формулы для определения граничных и текущих значений параметров ПТД $\Delta P_y(t)$, $\delta_y(t)$, $v_y(t)$, полученные в результате решения подсистемы уравнений при заданных конечных значениях ПТД.

Таблица 2.1. Расчетные формулы для определения параметров ПТД генератора

№	Подынтервалы управления и небалансы мощностей	Текущие и конечные значения угла на подынтервалах	Текущие и конечные значения относительной скорости на подынтервалах
1	<p>Дано $T_y^{(1)}, t_1$;</p> <p>Определяются:</p> $t_2 = t_1 + T_y^{(1)}$ $\Delta P_{p1}^{(1)} = -\frac{T_j \cdot v_{p1}^{(1)}}{\omega_0 \cdot T_y^{(1)}}$	<p>В конце первого подынтервала управления измеряется реальное значение угла</p>	$v_p = v_{p1}^{(1)} - K\Delta P_{p1}^{(1)}(t - t_1)$ $v_{p2}^{(2)} = v_{p1}^{(1)} - K\Delta P_{p1}^{(1)}T_y^{(1)}$
2	<p>Дано $T_y^{(2)}$;</p> <p>Определяются:</p> $t_3 = t_2 + T_y^{(2)}$ $\Delta P_{p2}^{(2)} = -\frac{\delta_{pT} - \delta_{p2}^{(2)}}{0,5KT_y^{(2)}(T_y - T_y^{(1)})}$	$\delta_p = \delta_{p2}^{(2)} + v_{p2}^{(2)}(t - t_2) + 0,5K\Delta P_{p2}^{(2)}(t - t_2)^2$ $\delta_{p3}^{(3)} = \delta_{p2}^{(2)} + v_{p2}^{(2)}T_y^{(2)} + 0,5K\Delta P_{p2}^{(2)}T_y^{(2)2}$	$v_p = v_{p2}^{(2)} - K\Delta P_{p2}^{(2)}(t - t_2)$ $v_{p3}^{(3)} = v_{p2}^{(2)} - K\Delta P_{p2}^{(2)}T_y^{(2)}$
3	<p>Определяются:</p> $T_y^{(3)} = T_y - T_y^{(1)} - T_y^{(2)}$ $\Delta P_{p3}^{(3)} = -\frac{\Delta P_{p2}^{(2)} \cdot T_y^{(2)}}{T_y^{(3)}}$	$\delta_p = \delta_{p3}^{(3)} + v_{p3}^{(3)}(t - t_3) + 0,5K\Delta P_{p3}^{(3)}(t - t_3)^2$	$v_p = v_{p3}^{(3)} - K\Delta P_{p3}^{(3)}(t - t_3)$ $v_{pT} = v_{p3}^{(3)} - K\Delta P_{p3}^{(3)}T_y^{(3)}$

		$\delta_{p3T}^{(3)}$ $= \delta_{p3}^{(3)} + v_{p3}^{(3)} T_y^{(3)}$ $+ 0,5K\Delta P_{p3}^{(3)} T_y^{(3)}$	
--	--	---	--

Обозначения: $K = \frac{\omega_0}{T_j}$, ω_0 (рад/с²) – синхронная частота, T_j (с) – постоянная инерции ротора, t_1, t_2, t_3, t_4 (с) – граничные моменты времени подынтервалов управления, T_y^i (с) – промежутки времени подынтервалов управления, ΔP_{01} (о. е.) – небаланс мощностей на интервале возмущения; $\Delta P_{pi}^{(i)}, \Delta P_{pi+1}^{(i)}$ – небалансы мощностей в граничные моменты времени подынтервалов управления, $v_p^{(i)}(t), v_{pi}^{(i)}, v_{pi+1}^{(i)}, \delta_{pi}^{(i)}, \delta_{pi+1}^{(i)}$ – текущие и граничные значения относительной скорости и угла на подынтервалах управления.

Данные расчетные формулы можно использовать для уточнения граничных значений параметров ПТД с целью вычисления желаемых значений угла и относительной скорости ротора генератора.

2.3 Расчет управлений при автоматическом регулировании частоте и активной мощности синхронного генератора

При построении системы адаптивной синхронизации в первую очередь определяются генераторы, которые будут выступать в роли управляемых объектов ЭЭС. Для рассматриваемой энергосистемы рассчитываются установившиеся режимы и управляющие динамические переходы, определяются исходное и финальное состояние, вид траекторий движения $x_y = colon[t, \Delta P_y, v_y, \delta_y]$ управляемых генераторов и подбираются согласующиеся с этими траекториями ПТД $x_p = colon[t, \Delta P_p, v_p, \delta_p]$. Количественные показатели параметров ПТД определяются при расчетах управлений в пять этапов [21].

Первый шаг заключается в определении движения энергосистемы до начала управления. Он необходим по причине наличия задержки ввода управляющего устройства в работу. За это время происходит изменение

управляемых параметров от значений в начальный момент времени переходного режима $x_{y0} = x_y(t_0)$, до величин $x_{y1} = x_y(t_1)$, соответствующих начальному моменту управления. На этом этапе осуществляется интегрирование уравнений возмущенного движения.

Второй предполагает создание траектории движения $x_p(t)$ генераторов, подлежащих управлению, на основе определенных заранее динамических свойств ЭЭС и технических характеристик средств управления. Третий этап включает в себя расчет кусочно-непрерывных управлений $u(t)$, обеспечивающих движение управляемых генераторов по ПТД.

На четвертом этапе проводится аппроксимация полученных на третьем этапе уравнений в зависимости от типа используемых управляющих устройств.

Последнее действие предполагает расчет переходного режима энергосистемы по рассчитанным управлениям. Если управления, определенные до четвертого этапа, являются плавными, то пятый этап пропускается, так как такие управления находятся при интегрировании уравнений переходного режима.

Таким образом, вычисление кусочно-непрерывных управлений $u(t)$ происходит на третьем этапе при решении уравнений движения ЭЭС, в которых параметры $x_y = colon[t, \Delta P_y, v_y, \delta_y]$ изменяются по предписанным программным траекториям движения $x_p = colon[t, \Delta P_p, v_p, \delta_p]$ [9].

Второй способ управления ЭЭС заключается в применении реактивного управляющего устройства поперечного включения. На всем интервале управления их режимные состояния определяются значениями активных и реактивных мощностей $P_{ui}(t), Q_{ui}(t), i = \bar{1}, \bar{l}$, а также значениями углов $\delta_{ui}(t)$ и напряжений $U_{ui}(t), i = \bar{1}, \bar{l}$ соответствующих узлов. Множество данных параметров можно обозначить как управление $u = colon[P_u, Q_u, U_u, \delta_u]$, с помощью которого достигается перемещение генераторов, требующих управления по сформированным на втором этапе программным траекториям.

Компоненты $P_u(t), Q_u(t), U_u(t), \delta_u(t)$ управления $u(t)$ являются l -мерными вектор-функциями управляющих параметров, где l – это количество управляющих узлов. Вектор-функции проводимостей $b_u(t), g_u(t)$ или сопротивлений $r_u(t), x_u(t)$, определяемых для управляющих устройств через компоненты вектор-функций $P_u(t), Q_u(t), U_u(t), \delta_u(t)$, также рассматриваются в качестве вектор-функций управляющих параметров.

Рассмотрим случай, когда ПТД формируется для одного генератора и управление $x_{u1} = E'_{u1}$ вычисляется для одного УУ ЭЭС ($l=1$).

Тогда система:

$$\psi_1(x_{ui}) = 0, i = \bar{1}, \bar{l} \quad (2.3)$$

в явном виде пишется как

$$\psi_1 = H_1(x_{u1}^2 + A_b^2 - 2A_b B_g x_{u1} + B_g^2 x_{u1}^2) + C_1' x_{u1} + C_1''(A_b - B_g x_{u1}) = 0, \quad (2.4)$$

где $H_1 = b_{1+n,1+n} - g_{1+n,1+n} \operatorname{tg} \varphi_{ui}$, $A_b = J''^{-1} J'$,

$$C_1' = \operatorname{tg} \varphi_{ui} \left(\sum_{j=1}^n I'_{1+n,j} + \sum_{j=n_l+1}^m I'_{1+n,j} \right) + \left(\sum_{j=1}^n I''_{1+n,j} + \sum_{j=n_l+1}^m I''_{1+n,j} \right),$$

$$C_1'' = \operatorname{tg} \varphi_{ui} \left(\sum_{j=1}^n I''_{1+n,j} + \sum_{j=n_l+1}^m I''_{1+n,j} \right) + \left(\sum_{j=1}^n I'_{1+n,j} + \sum_{j=n_l+1}^m I'_{1+n,j} \right),$$

При этом A, J', J'' – квадратные матрицы, а C_1', C_1'' – вектора-функции.

Обозначив

$$a = H_1(1 + B_g^2), \quad (2.5)$$

$$b = C_1' - 2H_1 A_b B_g - C_1'' B_g, \quad (2.6)$$

$$c = H_1 A_b^2 + C_1'' A_b \quad (2.7)$$

Квадратное уравнение (2.4) в стандартной форме выражается как:

$$\psi_1 = a x_{ui}^2 + b x_{ui} + c = 0, \quad (2.8)$$

В случаях, когда $\det J'' \leq \varepsilon$, расчеты выполняются по уравнению

$$x_u = A_b' - B_g' u_u \quad (2.9)$$

Подставив (2.9) в выражение (2.4), после преобразований получим в явном виде квадратное уравнение:

$$\psi'_1 = a' y_{ui}^2 + b' y_{ui} + c' = 0, \quad (2.10)$$

$$\text{где} \quad a' = H_1(1 + B_g'^2), \quad (2.11)$$

$$b' = C_1'' - 2H_1 A_b' B_g' - C_1' B_g', \quad (2.12)$$

$$c' = H_1 A_b'^2 + C_1' A_b' \quad (2.13)$$

При этом $A_b' = J'^{-1}A$, $B_g' = J''^{-1}W''$.

Уравнения (2.4) и (2.10) подходят для вычисления управления в виде функций $E_u(t)$ в узлах присоединения устройств управления при помощи итерационных и аналитических расчетов.

В одномашинной энергосистеме параметры управляющего устройства по ПТД вычисляются без сложных расчётов, так как решение дифференциальных уравнений и итерационном расчете управлений не требуется, что облегчает проведение исследования [21].

2.4 Применение принципа адаптивности для решения задач автоматического регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора

Целью управления объектом является осуществление его движения по желаемому (заданному) закону изменения параметров, которому соответствует заданная траектория. Современный подход к решению подобных задач основан на принципе адаптации СУ к заранее неизвестным свойствам конкретного объекта и условиям его функционирования. Если СУ адаптивна, то процесс управления объектом является самокорректирующимся. Коррекция движения в этом случае осуществляется по каналам обратной связи, что позволяет значительно снизить влияние возмущений [9].

В ходе работы адаптивной СУ происходит ее приспособление к фактическим условиям и свойствам объекта, которое проявляется в перестройке параметров или структуры СУ в таком направлении, чтобы она к

моменту завершения переходного процесса адаптации обеспечила достижение цели управления [21].

Одним из вариантов адаптивных систем управления является система с эталонной моделью. Для решения задачи синхронизации подсистем по программным траекториям движения в качестве эталонной модели применяется сама ПТД. В качестве цели управления принимаются условия точной синхронизации, а в качестве алгоритмов управления – алгоритмы синхронизации по ПТД.

Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В рамках данной выпускной квалификационной работы разрабатывается концепция построения модели системы автоматического регулирования частоты и активной мощности синхронного генератора.

Целью данного раздела является оценка процесса разработки модели системы АРЧМ синхронного генератора с точки зрения экономической эффективности и перспективности, а также ресурсоэффективности проекта.

Для правильной разработки, а также определения трудоемкости выполнения НИР необходимо разбить ее на этапы. Структура данной НИР:

1. Подготовительный этап. Выбор темы, изучение и анализ информации по выбранной теме. Определение рабочей группы, в состав которой могут входить научные сотрудники, преподаватели и лаборанты.

2. Формирование теоретической части.

3. Проведение экспериментальных работ по теоретическим разделам.

4. Обработка полученных результатов экспериментов.

5. Выводы и предложения по теме, обобщение результатов разработки.

Составление технологического отчета.

6. Завершающий этап. Утверждение результатов работы. Подготовка отчетной документации.

5.1. Предпроектный анализ

5.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Основным потребителем построенной системы являются диспетчерские центры АО «Системный оператор Единой энергетической системы», которые обеспечивают выполнение задачи автоматического регулирования частоты в энергосистеме.

Разрабатываемый систем решает задачу регулирования на основе современного и перспективного направления в теории автоматического управления.

5.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Целесообразно проводить анализ конкурентных технических решений с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 5.1.

Оценка будет происходить по 5-ти бальной шкале, где 5 – наиболее сильная, а 1 – наиболее слабая позиция. Вес показателей в сумме должен составлять 1.

Таблица 5.1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _с	Б _р	К _с	К _р
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Повышение производительности труда пользователя	0,15	5	1	0,75	1,15
2. Удобство в эксплуатации	0,05	5	1	0,25	0,05
3. Энергоэкономичность	0,1	5	1	0,5	0,1
4. Надёжность	0,2	5	5	1	1
5. Уровень шума	0,1	1	5	0,1	0,5
6. Потребность в ресурсах памяти	0,05	1	5	0,05	0,25
7. Простота эксплуатации	0,05	5	5	0,25	0,25
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Уровень проникновения на рынок	0,1	4	2	0,4	0,2
2. Цена	0,1	5	5	0,5	0,5
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	5	0,25	0,15
4. Финансирование научной	0,05	3	3	0,15	0,15

разработки					
Итого	1	44	38	4,2	3,9

Где B_s – приводится оценка расчетов моделирования в ПК «Simulink»;

B_p – приводится оценка расчетов моделирования ручной.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \times B_i \quad (5.1)$$

где K – конкурентоспособность вида;

B_i – вес критерия (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

По данным таблицы можно сделать вывод о том, что программный комплекс «Simulink» более подходящий для исследования с точки зрения технических и экономических критериев.

5.2. Распределение исполнителей и этапов выполняемых работ

Для выполнения научных исследований сформирована рабочая группа, в состав которой входит руководитель и инженер.

В данном разделе составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и проведено распределение исполнителей по видам работ. Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Распределение исполнителей и этапы выполняемых работ

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического решения	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, инженер
	3	Выбор направления исследований	Руководитель
Теоретические и экспериментальны	4	Теоретическое описание элементов модели энергосистемы	Инженер

е исследования	5	Создание виртуальной модели энергосистемы	Инженер
	6	Определение оптимальных параметров устройств регулирования	Инженер
Обсуждение результатов	7	Обработка полученных результатов	Инженер
	8	Научное обоснование результатов и выводы	Инженер, руководитель
Составление отчета	9	Разработка плана по оформлению НИР	Руководитель, инженер
	10	Оформление отчета НИР	Инженер
Защита отчета	11	Подготовка к защите	Инженер

5.3. Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования. Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, так как зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения, ожидаемого значения трудоемкости используется следующая формула:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{минi} + 2t_{маxi}}{5} \quad (5.2)$$

где $t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{минi}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{маxi}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.;

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ по нескольким исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{ч_i}, \quad (5.3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

5.4. Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (5.4)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$K_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - (T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}})} = \frac{365}{365 - 91 - 27} = 1,48 \quad (5.5)$$

Предполагается, что и руководитель, и инженер работают по 6-дневной рабочей неделе. По производственному календарю на 2022 год суммарное количество выходных и праздничных дней составляет: при шестидневной рабочей неделе – 118 дней.

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Временные показатели проведения данного научного исследования представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3. Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	T_{min} , чел–дни		T_{max} , чел–дни		$T_{ож}$, чел–дни			Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2					
1. Составление и утверждение технического задания	1	-	3	-	2	-	Научный руководитель	2	-	3	-
2. Подбор и изучение материалов по теме	3	20	5	40	4	28	Научный руководитель, студент	2	13	3	15
3. Выбор направления исследований	1	-	1	-	1	-	Научный руководитель	1	-	1	-
4. Теоретическое описание элементов модели энергосистемы	-	10	-	15	-	12	Студент	-	12	-	15
5. Создание виртуальной модели энергосистемы	-	10	-	17	-	13	Студент	-	12	-	14
6. Определение оптимальных параметров устройств регулирования	-	17	-	23	-	20	Студент	-	18	-	23
7. Обработка полученных результатов	-	2	-	4	-	3	Студент	-	3	-	4
8. Научное обоснование результатов и выводы	2	2	5	5	3	3	Научный руководитель, студент	1,5	1,5	2	2

9. Разработка плана по оформлению НИР	2	2	4	5	3	3	Научный руководитель, студент	1,5	1,5	2	2
10. Оформление отчета НИР	-	10	-	15	-	12	Студент	-	11	-	14
11. Защита выпускной квалификационной работы	-	1	-	1	-	1	Студент	-	1	-	1

Составлен план научного исследования, в котором разработан календарный план выполнения работ. Для построения таблицы временных показателей проведения НИ был рассчитан коэффициент календарности. С помощью показателей в таблица 5.4. был разработан календарный план-график проведения НИ по теме.

Таблица 5.4. Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	$T_{ки}$, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																	
				Дек.		Янв.		Февр.			Март			Апрель			Май			Июнь	
				2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель	3	█																	
2	Подбор и изучение материалов по теме	Научный руководитель, студент	3 17		█	█															
3	Выбор направления исследований	Научный руководитель	1			█															
4	Теоретическое	Студент	15				█	█													

	описание элементов модели энергосистемы																		
5	Создание виртуальной модели энергосистемы	Студент	13																
6	Определение оптимальных параметров устройств регулирования	Студент	25																
7	Обработка полученных результатов	Студент	4																
8	Научное обоснование результатов и выводы	Научный руководитель, студент	2 2																
9	Разработка плана по оформлению НИР	Научный руководитель, студент	2 2																
10	Оформление отчета НИР	Студент	15																
11	Защита выпускной квалификационной работы	Студент	1																

5.5 Определение бюджета проекта

В процессе планирования бюджета проекта необходимо обеспечить полное и достоверное отражение всех видов расходов, которые связаны с его выполнением. Ниже представлена группировка затрат по статьям расходов, используемая при формировании бюджета проекта:

- материальные затраты проекта;
- амортизационные отчисления;
- основная заработная плата участников;
- дополнительная заработная плата участников;
- страховые отчисления;
- накладные расходы.

5.5.1. Расчет материальных затрат на разработку проекта

Стоимость материалов, используемых при разработке данного проекта, приведена в таблице 5.5.

Таблица 5.5. Материальные затраты на разработку проекта

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Z_m), руб.
Комплект канцелярских принадлежностей	штук	1	350	350
Бумага для принтера	упаковка	1	600	600
Скоросшиватель	штук	1	120	120
Тетрадь 48 листов	штук	2	50	100
Итого:				1170

Исходя из данных, представленных в таблице 5.5, материальные затраты на выполнение проекта составили 1170 рублей.

5.5.2. Амортизационные отчисления

В данный раздел входят затраты, которые связаны с приобретением специального оборудования, которое необходимо для работ по данной теме, а именно приборов, устройств и механизмов, контрольно-измерительной аппаратуры и т.д. Стоимость спецоборудования в ряде случаев берется по

договорной цене или по действующим прейскурантам. Затраты, рассчитанные в данном разделе занесены в таблицу 5.6.

Таблица 5.6. Амортизационные отчисления на оборудование и программные комплексы

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во оборудования, ед	Стоимость ед. оборудования, руб.	Амортизация, руб.
1	Персональный компьютер	1	42000	2071,2
2	Принтер	1	14000	115,07
3	Лицензия на программное обеспечение <i>Matlab Simulink</i>	1	2250	554,79
Итого				2741,06

Так как данное оборудование используется длительно, необходимо учесть стоимость амортизационных отчислений для данного оборудования:

$$A_{\text{ПК}} = \frac{S \cdot N}{H \cdot 365} \quad (5.6)$$

где: A_i – амортизационные отчисления;

S – стоимость оборудования и программного обеспечения;

N – количество дней использования при проектировании;

H – предполагаемый срок службы оборудования и программного обеспечения.

Расчет показателей амортизации, результаты представлены в таблице 5.5.:

$$A_{\text{ПК}} = \frac{42000 \cdot 90}{5 \cdot 365} = 2071,2 \text{ руб.};$$

$$A_{\text{принтер}} = \frac{14000 \cdot 15}{5 \cdot 365} = 115,07 \text{ руб.};$$

$$A_{\text{Matlab}} = \frac{2250 \cdot 90}{1 \cdot 365} = 554,79 \text{ руб.};$$

Таким образом были определены амортизационные отчисления на разработку проекта, которые составили 2741,06 руб.

5.5.3. Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по проекту. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Зарботная плата работников представляет собой сумму двух составляющих: основная и дополнительная заработная плата.

В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 25 % от тарифа или оклада.

Формула расчета заработной платы представлена ниже:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (5.7)$$

где: $Z_{зп}$ – заработная плата;

$Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Расчет основной заработной платы выполняем по формуле, представленной ниже:

$$Z_{осн} = Z_{дн} T_p \quad (5.8)$$

где: $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.;

T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.

Расчет среднедневной заработной платы выполняем по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} \quad (5.9)$$

где: Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 48 раб.дней $M=10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени персонала, раб. дн.

Таблица 5.7. Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	118	118
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	48 0	72 0
Действительный годовой фонд рабочего времени	199	175

Месячный должностной оклад работника (руководителя):

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p \quad (5.10)$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30 процентов от $Z_{тс}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

1) Расчёт заработной платы

$$Z_{м.рук} = 40000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 78000 \text{ руб.};$$

$$Z_{м.инж} = 23000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 44850 \text{ руб.};$$

2) Расчет среднедневной заработной платы:

$$Z_{дн.рук} = \frac{78000 \cdot 10,4}{182} = 4457,1 \text{ руб.}; \quad (5.11)$$

$$Z_{дн.инж} = \frac{44850 \cdot 10,4}{182} = 2771,4 \text{ руб.};$$

3) Расчёт основной заработной платы:

$$Z_{осн.рук} = 4457,1 \cdot 11 = 49028,1 \text{ руб.}; \quad (5.12)$$

$$Z_{осн.инж} = 2771,4 \cdot 90 = 249426 \text{ руб.};$$

Результат расчетов представлен в таблице 5.8.

Таблица 5.8. Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{ТС}$, руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_M , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	40000	0,3	0,2	1,3	78000	4457,1	11	49028,1
Инженер	23000	0,3	0,2	1,3	44850	2771,4	90	249426
Затраты по основной заработной плате, руб.	298454,1							

В результате вычислений затраты на заработную плату руководителю составляют 49028,1 руб., а инженера – 249426 руб. Итоговые затраты на заработную плату исполнителей проекта составили 298454,1 руб.

5.5.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} Z_{осн} \quad (5.13)$$

где: $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,13).

$$Z_{доп.рук} = k_{доп} Z_{осн.рук} = 0,13 \cdot 49028,1 = 6373,653 \text{ руб.};$$

$$Z_{доп.инж} = k_{доп} Z_{осн.инж} = 0,13 \cdot 249426 = 32425,38 \text{ руб.};$$

$$Z_{доп} = Z_{доп.рук} + Z_{доп.инж} = 6373,653 + 32425,38 = 38799,033 \text{ руб.} \quad (5.14)$$

5.5.5. Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Ставка отчислений во внебюджетные фонды для учреждений, осуществляющих научную и образовательную деятельность, на 2022 год составляет 30,2%.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб.}} = k_{\text{внеб.}}(Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (5.15)$$

где: $k_{\text{внеб.}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды:

$$Z_{\text{внеб.рук}} = 0,302 \cdot (49028,1 + 6373,653) = 16731,33 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{внеб.инж}} = 0,302 \cdot (249426 + 32425,38) = 85119,12 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{внеб.}} = Z_{\text{внеб.инж}} + Z_{\text{внеб.рук}} = 16731,33 + 85119,12 = 101850,45 \text{ руб.}; \quad (5.16)$$

5.5.6. Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты, не вошедшие в предыдущие статьи, такие как ксерокопирование и печать материалов исследования, размножение материалов, оплата электроэнергии, услуг связи, телеграфные, почтовые расходы и т.д.

Величина накладных расходов определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (Z_{\text{канц}} + Z_{\text{аморт}} + Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + Z_{\text{внеб.}})k_{\text{нр}}, \quad (5.17)$$

где: $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величина коэффициента накладных расходов принимается равной 16%.

$$\begin{aligned} Z_{\text{накл}} &= (1170 + 2741,06 + 298454,1 + 3879,03 + 101850,45) \cdot 0,16 = \\ &= 65241,89 \text{ руб.}; \end{aligned}$$

5.5.7. Формирование бюджета затрат проекта

Рассчитанная величина затрат работ по разработке проекта является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при

формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 5.9.

Таблица 5.9. – Расчет бюджета затрат на разработку проекта

Наименование статьи	Сумма, руб.	%
1. Материальные затраты	1170	0,23
2. Амортизация оборудования и программных комплексов	2741,06	0,54
3. Затраты по основной заработной плате	298454,10	58,72
4. Затраты по дополнительной заработной плате	38799,03	7,63
5. Отчисления во внебюджетные фонды	101850,45	20,04
6. Накладные расходы	65241,89	12,84
Бюджет затрат проекта	508256,53	100

Таким образом были определены затраты на разработку проекта. Сумма необходимая на его реализацию составила 508256,53 рублей.

Основные расходы пришлось на статью затрат по заработной плате сотрудников – 58,72% от общего бюджета проекта.

5.6 Технология QuaD

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект [13]. В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по стобалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная.

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i \cdot B_i \quad (5.18)$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Результаты проведенного расчета приведены в таблице 5.10. Значение P_{cp} позволяет говорить о перспективах разработки и качестве проведенного исследования. Если значение показателя P_{cp} получилось от 100 до 80, то такая разработка считается перспективной. Если от 79 до 60 – то перспективность выше среднего. Если от 69 до 40 – то перспективность средняя. Если от 39 до 20 – то перспективность ниже среднего. Если 19 и ниже – то перспективность крайне низкая [13].

Таблица 5.10. Оценочная карта QuaD анализа для модели АРЧМ

Критерии оценки	Вес	Баллы	Отн. значение	Ср. взвешенное значение
1. Практическая применимость	0,10	90	0,90	9,00
2. Точность математического описания	0,20	60	0,60	12,00
3. Актуальность	0,15	80	0,80	12,00
4. Унифицированность	0,05	100	1,00	5,00
5. Потребность в ресурсах памяти	0,05	30	0,30	1,50
6. Устойчивость системы управления	0,30	70	0,70	21,00
7. Чувствительность к малым возмущениям частоты	0,05	97	0,97	4,85
8. Качество графического интерфейса	0,05	50	0,50	2,50
9. Простота эксплуатации	0,05	70	0,70	3,50
Итого	1,00	647	6,47	73,35

Таким образом, исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что исследовательская работа по созданию модели автоматической регулировки частоты и мощности обладает перспективностью выше среднего.

5.7. Заключение по главе 5

1. Для выполнения НИ сформирована рабочая группа, в составе руководителя и инженера. Составлен перечень этапов и работ в рамках проведения НИ и проведено распределение исполнителей по видам работ. Распределение исполнителей по видам работ представлено в таблице 5.1.

2. Было установлено, что в календарных днях длительность работ для руководителя составляет 11 дней, а для инженера – 90 дней. На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график, по которому можно увидеть, что самая продолжительная по времени работа – это определение оптимальных параметров устройств регулирования.

3. После формирования бюджета затрат на проектирование суммарные капиталовложения составили 508256,53 рублей. Таким образом, капиталовложения в размере 508256,53 рублей позволят реализовать разработанный проект.

4. Также были определены показатели перспективности, и исследовательская работа по созданию модели автоматической регулировки частоты и мощности обладает перспективностью выше среднего.

5. На данном этапе работы проектировка системы АРЧМ может показаться неэффективной из-за высоких материальных затрат и недостаточный показателей перспективности. Однако учитывая возможность дальнейшей разработки модели, уточнение математического описания и более практически ориентированное ее применение, позволяет использовать модель в качестве тестовой системы при настройке АРЧМ.

Заключение

Процесс производства и передачи электроэнергии является столь динамичным и постоянно подверженным возмущающим воздействиям, что без автоматического управления его полноценное функционирование невозможно.

Процесс производства и передачи электроэнергии является столь динамичным и постоянно подверженным возмущающим воздействиям, что без автоматического управления его полноценное функционирование невозможно. Удерживать частоту в требуемых пределах в условиях работы турбо- и гидрогенераторов при непрерывно и случайно изменяющейся нагрузке электроэнергетической системы, возможно только посредством использования системы автоматического управления частотой турбины.

В ходе выполнения данной работы были изучены и смоделированы принципиальные составляющие системы АРЧМ. В первой главе рассматривается определение частоты и различных шагов, а также типов регулирования, далее было рассмотрено основная задача формирования ПТД. В третьей главе исследована автоматическое регулирование частоты вращения синхронного генератора. Далее в программном комплексе Matlab Simulink была смоделирована работа похожая схема, исследована влияние различных параметров.

Также были рассмотрены вредные и опасные факторы, возникающие при настройке системы АРЧМ, и предложены основные способы снижения влияния данных факторов. Далее была подсчитана приблизительная стоимость разработки данного проекта, которая составила 508256,53 руб. В результате анализа с помощью технологии QuaD было определено, что данный проект обладает перспективностью выше среднего.

Следующей частью исследования в этом направлении будет рассмотрение таких вопросов как:

- влияние мощности связи на процесс вторичного регулирования в ОЭС;

- влияние структуры энергообъединения на регулирование.