

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт ЭНИН

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Кафедра Электроэнергетических систем

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Обоснование и исследование математической модели автоматического регулятора возбуждения сильного действия полупроводникового типа синхронных генераторов

УДК 621.316.7:621.313.322:519.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А3А	Кабалин Дмитрий Андреевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Суворов А.А.	—		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Потехина Н.В.	—		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Дашковский А.Г.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭЭС	Сулайманов А.О.	К.Т.Н., доцент		

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
ПК-1	Использовать информационные технологии, в том числе современные средства компьютерной графики, в своей предметной области
ПК-2	Демонстрировать базовые знания в области естественнонаучных дисциплин и использовать основные законы в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ПК-3	Выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, и привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат
ПК-4	Использовать нормативные правовые документы в своей профессиональной деятельности
ПК-5	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от последствий возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий
ПК-6	Анализировать научно-техническую информацию, изучать отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования
ПК-7	Формировать законченное представление о принятых решениях и полученных результатах в виде отчета с его публикацией (публичной защитой)
Универсальные компетенции	
УК-1	Анализировать технологический процесс как объект управления
УК-2	Обеспечивать соблюдение заданных параметров технологического процесса и качество продукции
УК-3	Использовать правила техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и нормы охраны труда
УК-4	Обеспечивать соблюдение производственной и трудовой дисциплины

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт ЭНИН

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Кафедра ЭЭС

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) _____ (Дата) Сулайманов А.О.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5А3А	Кабалину Дмитрию Андреевичу

Тема работы:

Обоснование и исследование математической модели автоматического регулятора возбуждения сильного действия полупроводникового типа синхронных генераторов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	от 01.02.2017 г. № 497/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.17
--	----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	1. Математическая модель автоматического регулятора возбуждения сильного действия АРВ-СДП1; 2. Эквивалентированная схема ЭЭС Томской области; 3. Параметры: генераторов, трансформаторов, линий электропередачи; 4. Данные по генерируемой и потребляемой мощности в узлах.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Изучить литературу, содержащую информацию об АРВ СД полупроводникового типа синхронных генераторов. Рассмотреть такие вопросы как: назначение и основные задачи регулирования возбуждения синхронных генераторов, виды АРВ, история развития сильного регулирования возбуждения, функции и состав АРВ-СДП1. Изучить функциональные возможности ПВК EUROSTAG и ВМК РВ ЭЭС; 2. Выполнить описание математической модели АРВ-СДП1. Собрать соответствующий ей макроблок в редакторе макроблоков EUROSTAG;

	3.Собрать модель ЭЭС Томской области в ПВК EUROSTAG; 4.Выполнить расчет установившегося режима в программном комплексе EUROSTAG. Сравнить результаты расчета установившегося режима ПВК EUROSTAG с квазиустановившимся режимом ВМК РВ ЭЭС; 5.Провести исследование собранного макроблока АРВ путем моделирования трех тестовых возмущений в ПВК EUROSTAG. Выполнить аналогичные опыты в ВМК РВ ЭЭС. Проанализировать и сравнить полученные результаты.
Перечень графического материала	1.Эквивалентированная схема ЭЭС Томской области; 2.Модель схемы АРВ-СДП1, реализованная в программной среде EUROSTAG.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Потехина Нина Васильевна
Социальная ответственность	Дашковский Анатолий Григорьевич

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.02.2017
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Суворов А.А.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А3А	Кабалин Дмитрий Андреевич		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление подготовки: 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Уровень образования – бакалавриат

Кафедра Электроэнергетических систем

Период выполнения – весенний семестр 2016/2017 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2017
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела
27.02.2017	Поиск источников литературы и нормативных документов по теме исследования; составление плана исследования; изучение функциональных возможностей ПВК EUROSTAG и ВМК РВ ЭЭС, постановка целей исследования	
13.03.2017	Описание математической модели АРВ-СДП1; разработка макроблока АРВ-СДП1 в ПВК EUROSTAG	
17.04.2017	Подготовка исходных данных для проведения расчетов в ПВК EUROSTAG; разработка цифровой эталонной модели энергосистемы в ПВК EUROSTAG	
24.04.2017	Сравнительный анализ результатов расчета установившегося режима ПВК EUROSTAG с квазиустановившимся режимом ВМК РВ ЭЭС	
08. 05.2017	Проведение исследования собранного макроблока АРВ-СДП1 путем моделирования трех тестовых возмущений в ПВК EUROSTAG; проведение аналогичных опытов в ВМК РВ ЭЭС; анализ и сравнение полученных результатов	
15.05.2017	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
22.05.2017	Социальная ответственность	
29.05.2017	Анализ результатов; заключение; оформление работы	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Суворов А.А.	—		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭЭС	Сулайманов А.О.	К.Т.Н.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5А3А	Кабаину Дмитрию Андреевичу

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭЭС
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску. Оклады: – руководителя – 17 000 руб. – инженера – 14 874,45 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Премияльный коэффициент 30%; Коэффициент доплат и надбавок 20%; Коэффициент дополнительной заработной платы 15%; Коэффициент, учитывающий накладные расходы 16%; Районный коэффициент 30%.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент, учитывающий отчисления во внебюджетные фонды 27,1 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала НТИ	Оценка научного уровня исследования
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Формирование плана и графика разработки научного исследования: определение структуры работ, определение трудоемкости работ, разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: материальные затраты, заработная плата (основная и дополнительная), отчисления на социальные цели, накладные расходы, амортизационные отчисления.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой эффективности исследования	Расчет интегрального показателя эффективности научного исследования.

Перечень графического материала:

- Календарный план-график выполнения НТИ
- Оценка ресурсной эффективности научного исследования

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.02.2017
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ст. преподаватель	Потехина Н.В.	—		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А3А	Кабаин Дмитрий Андреевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5А3А	Кабалину Дмитрию Андреевичу

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭЭС
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования)	Рабочее место представляет собой помещение лаборатории, работа в которой производится на ЭВМ.
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность	Факторы: – вредные проявления факторов производственной среды (акустический шум от различных некогерентных источников, электромагнитное поле от дисплея ПЭВМ, микроклимат, освещение лаборатории); – опасные проявления факторов (опасность поражения электрическим током человека).
2. Экологическая безопасность	Выделение токсичных веществ при утилизации, правила утилизации твердых отходов.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	Наиболее вероятной ЧС, которая может возникнуть – это короткое замыкание проводки или пожар. Составление плана эвакуации из помещения.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Правовые нормы трудового законодательства. Основы законодательства Российской Федерации об охране труда

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.02.2017
--	------------

Задание выдал консультант:

Группа	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Дашковский А.Г.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А3А	Кабалин Дмитрий Андреевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа объемом 102 страницы, содержит 8 рисунков, 20 таблиц, 29 использованных источников литературы, 3 приложения.

Ключевые слова: моделирование электроэнергетической системы, математическое моделирование, синхронный генератор, автоматический регулятор возбуждения сильного действия, цифровая модель, макроблок, EUROSTAG, ВМК РВ ЭЭС.

Объектом исследования является математическая модель автоматического регулирования возбуждения сильного действия полупроводникового типа синхронного генератора – АРВ-СДП1.

Цель работы – исследование математической модели отечественного автоматического регуляторов возбуждения сильного действия АРВ-СДП1 в программно-вычислительном комплексе (ПВК) EUROSTAG и моделирующем комплексе ВМК РВ ЭЭС.

В процессе исследования выполнено описание математической модели АРВ-СДП1, на основании которой в редакторе макроблоков EUROSTAG собран макроблок, реализующий логику работы регулятора АРВ-СДП1. Также в ПВК EUROSTAG проводилось создание цифровой модели энергосистемы на базе ЭЭС Томской области, реализованной в ВМК РВ ЭЭС. Проведено сравнение рассчитанного с помощью ПВК EUROSTAG установившегося режима с квазиустановившимся режимом ВМК РВ ЭЭС. Для проверки правильности работы собранной модели АРВ-СДП1 в ПВК EUROSTAG производились необходимые тестовые возмущения, регламентируемые стандартом. Полученные результаты сравнивались с результатами аналогичных опытов, проделанных в моделирующем комплексе ВМК РВ ЭЭС.

В результате исследования в программном комплексе EUROSTAG реализована модель автоматического регулятора возбуждения сильного действия полупроводникового типа АРВ-СДП1. Реализованная модель

позволяет достаточно точно проанализировать работу АРВ-СДП1, его влияние на режим работы энергосистемы в целом.

Область применения: проектирование и моделирование различных элементов энергосистем в ПВК EUROSTAG.

Экономическая значимость работы: использование EUROSTAG позволяет осуществлять детальное моделирование элементов энергосистемы, что, в свою очередь, позволяет своевременно выявлять ошибки при проектировании новых объектов электрической сети и принимать меры по их устранению.

В будущем планируется дальнейшее рассмотрение работы данного типа автоматики энергосистем, но с более детальным рассмотрением режимных аспектов энергорайона.

Список используемых сокращений

АРВ – автоматический регулятор возбуждения;

ВМК РВ ЭЭС – всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем;

ЕЭС – Единая энергетическая система;

КЗ – короткое замыкание;

ОМВ – ограничение минимального возбуждения;

ОЭС – Объединенная энергетическая система;

ПВК – программно-вычислительный комплекс;

РПН – регулирование под нагрузкой;

СГ – синхронный генератор;

СД – синхронный двигатель;

СПО – специализированное программное обеспечение;

ШБМ – шины бесконечной мощности;

ЭЭС – электроэнергетическая система;

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина;

КПД – коэффициент полезного действия.

Оглавление

Введение.....	13
1 Обзор литературы	15
1.1 Назначение и основные задачи регулирования возбуждения синхронных генераторов	15
1.2 Виды АРВ	18
1.3 Краткая история развития сильного регулирования возбуждения.....	20
1.4 Назначение и состав АРВ–СДП1	22
1.5 Обзор программно-вычислительного комплекса EUROSTAG.....	27
1.6 Обзор ВМК РВ ЭЭС	29
2 Описание математической модели АРВ-СДП1	32
3 Разработка цифровой эталонной модели энергосистемы в ПВК EUROSTAG	37
3.1 Подготовка исходных данных для проведения расчетов в ПВК EUROSTAG	37
3.1.1 Подготовка исходных данных для расчета установившегося режима	37
3.1.2 Подготовка исходных данных для расчета переходных процессов.....	42
3.2 Сравнительный анализ результатов расчета установившегося режима ПВК EUROSTAG с квазиустановившимся режимом ВМК РВ ЭЭС.....	46
4 Проверка работоспособности цифровой модели АРВ-СДП1	51
4.1 Первое тестовое возмущение.....	51
4.2 Второе тестовое возмущение.....	53
4.3 Третье тестовое возмущение	54
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	56
5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований	57
5.1.1 Оценка научного уровня исследования.....	57
5.2 Планирование научно-исследовательских работ	59
5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	59
5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	60
5.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	61
5.4 Бюджет научно-исследовательской работы.....	65
5.4.1 Расчет материальных затрат	65

5.4.2 Основная заработная плата исполнителей темы	66
5.4.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы	67
5.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды.....	68
5.4.5 Амортизационные отчисления	69
5.4.6 Накладные расходы	69
5.4.7 Формирование бюджета затрат научно-технического исследования ..	70
5.5 Определение ресурсоэффективности исследования	71
6 Социальная ответственность	74
6.1 Производственная безопасность	75
6.1.1 Анализ вредных и опасных факторов.....	75
6.1.2 Акустический шум.....	75
6.1.3 Электромагнитное поле.....	77
6.1.4 Микроклимат.....	80
6.1.5 Освещение	81
6.1.6 Электрический ток.....	82
6.2 Экологическая безопасность.....	85
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	86
6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	90
Заключение	94
Список использованной литературы.....	96
Приложение А	99
Приложение Б	100
Приложение В.....	101

Введение

Электроэнергетическая система представляет собой совокупность электростанций, всего оборудования на них, электрических и тепловых сетей, соединённых между собой и участвующих в непрерывном процессе производства, передачи и потребления электроэнергии. Нарушение работы хотя бы одного из этих устройств может привести к нарушениям в режимах работы других, что может привести к серьёзным последствиям: отключение электричества крупных районов, массовому недоотпуску электроэнергии и нарушению сложного технологического процесса крупных промышленных предприятий. Специфические особенности производства, передачи и распределения электроэнергии обуславливают необходимость и экономическую целесообразность в автоматическом регулировании напряжения и реактивной мощности. Одним из способов автоматического регулирования напряжения и реактивной является автоматическое регулирование возбуждения синхронных машин. Все синхронные генераторы должны быть оборудованы устройствами АРВ, согласно [1].

Применение АРВ приводит к поддержанию заданного значения напряжения на выводах генератора; оптимальному распределению реактивных нагрузок между параллельно работающими генераторами и электростанциями в целях минимизации потерь электроэнергии с учетом необходимости поддержания требуемых уровней напряжения в узловых точках энергосистемы; кратковременному увеличению тока возбуждения синхронных машин до максимального допустимого (потолочного) значения при значительных снижениях напряжения – форсировке возбуждения для повышения устойчивости параллельной работы и ускорения восстановления напряжения в сети после отключения коротких замыканий.

В частности, регулирование возбуждения генераторов оказывает огромное влияние на переходные процессы в энергосистеме при малых и больших возмущениях, поэтому необходимость адекватного моделирование

систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов не вызывает сомнений. Использование полных и достоверных моделей АРВ при анализе переходных процессов и колебательной устойчивости позволяет избежать некорректного ошибочного результата. В связи с этим, в нашей работе и проводились исследование математической модели АРВ-СДП1, одного из распространенных в настоящее время в России.

Рассмотрение такой неотъемлемой части генераторов, как АРВ, является важным вопросом в исследовании автоматики энергосистем, т.к. данный вид устройств применяется на всех электрических станциях Российской Федерации и является обязательным, согласно регламенту, установленному ОАО «Системным оператором Единой энергетической системы» [2].

Использование программы EUROSTAG позволяет осуществлять детальное моделирование элементов энергосистемы, включая автоматические регуляторы возбуждения. Подробное изучение функционирования устройств смоделированной модели АРВ позволяет своевременно выявлять ошибки на этапе проектирования новых объектов регулирования, настройки уже существующих и принимать меры по их устранению.

1 Обзор литературы

1.1 Назначение и основные задачи регулирования возбуждения синхронных генераторов

Одной из важнейших научно-технических задач современной электроэнергетики является автоматическое управление режимами работы электроэнергетических систем и электроэнергетических объектов по напряжению, частоте, реактивной и активной мощности. Решение этой задачи способствует обеспечению надежности, устойчивости и экономичности единого технологического процесса выработки и передачи, а также распределения и потребления электрической энергии как конечного продукта соответствующего качества [3].

Напряжение в ЭЭС является многомерным вектором, т.е. различно по абсолютному значению и по фазе в каждом из электрических узлов ЭЭС. Различие напряжений по фазе необходимо для передачи активной мощности, а различие абсолютных значений напряжений определяется сопровождающими передачу электроэнергии потоками реактивной мощности [4].

От абсолютного значения и фазы напряжения в начале электропередачи зависит статическая устойчивость ЭЭС. При внезапном глубоком снижении напряжения во время КЗ сохранение синхронной работы электростанций зависит от скорости восстановления напряжения в процессе и после отключения КЗ.

В случае наступления асинхронного режима от скорости восстановления и уровней напряжения зависит успешность восстановления синхронной работы электрических станций. Поэтому автоматическое регулирование напряжения и реактивной мощности имеет важное значение для обеспечения статической, динамической и результирующей устойчивости.

Конечной целью выработки и передачи электроэнергии является электроснабжение потребителя, напряжение у которого должно иметь практически номинальное значение вне зависимости от случайных изменений

ситуации в электроэнергетической системе или количества потребляемой электроэнергии. Напряжение – важнейший показатель режима ЭЭС, непосредственно влияющий на качество электроэнергии, надежность электроснабжения потребителей и экономичность работы ЭЭС. Согласно ГОСТ 32144-2013 на нормы качества электрической энергии отклонение напряжения у потребителей должно быть не более $\pm 5\%$ номинального, только в послеаварийных режимах допускается понижение напряжения на 10 %. Указанные нормы могут быть выдержаны только при автоматическом регулировании напряжения.

Указанные задачи автоматического регулирования напряжения и реактивной мощности решаются автоматическим регулированием [4]:

- возбуждения синхронных генераторов;
- возбуждения синхронных компенсаторов и электродвигателей;
- реактивной мощности управляемых статических ее источников;
- коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов.

Наибольшую значимость для регулирования напряжения и реактивной мощности имеет АРВ синхронных генераторов.

Вопросы автоматического регулирования напряжения неразрывно связаны с вопросами регулирования напряжения и реактивной мощности.

Уровень напряжения в каком-либо узле электрической сети, например, на шинах электрической станции или подстанции, в основном определяется балансом реактивной мощности в этом узле, который заключается в следующем: в любой момент времени суммарная генерируемая реактивная мощность должна быть точно равна потребляемой реактивной мощности. Основными, но не единственными источниками реактивной мощности в ЭЭС являются синхронные генераторы электрических станций. При этом значение и знак реактивной мощности генератора зависит от значения тока возбуждения. Основными потребителями реактивной мощности являются трансформаторы и асинхронные двигатели, обладающие индуктивностями намагничивания и

рассеяния обмоток, а также индуктивные сопротивления линий электропередачи.

Если в каком-либо узле произойдет нарушение баланса между генерируемой и потребляемой реактивной мощностью, то напряжение в узле начнет изменяться. Процесс изменения напряжения будет продолжаться до тех пор, пока баланс вновь не восстановится, но уже, как правило, на новом уровне напряжения, несколько отличающемся от исходного значения. Возможность восстановления баланса обусловлена тем, что при изменении напряжения меняются и генерируемая, и потребляемая реактивные мощности. Изменение генерируемой мощности происходит прежде всего за счет действия АРВ, изменяющих ток возбуждения СГ при отклонениях напряжения на выводах от заданного значения. Если генераторы включены на общие шины, то изменение возбуждения одного из них приводит к перераспределению реактивных нагрузок между работающими генераторами. Совместное действие индивидуальных АРВ генераторов электростанции, работающей в системе, определяет напряжение на шинах и значение выдаваемой реактивной мощности.

Также возможны случаи, когда при снижении напряжения в узле новое условие баланса реактивной мощности не создается, например при его значительном нарушении. В этих случаях возникает явление лавины напряжения [3].

Оснащение СГ эффективными АРВ в составе соответствующих систем возбуждения не только способствует стабилизации напряжения в ЭЭС и снижает вероятность возникновения лавины напряжения, но и существенно повышает статическую и динамическую устойчивость параллельной работы генераторов и электрических станций. Кроме того, на АРВ возлагается важная функция автоматического распределения реактивной мощности между параллельно работающими генераторами электрической станции. Повышение устойчивости параллельной работы отдельных генераторов между собой и всей системы в целом достигается путём кратковременного увеличения тока возбуждения до его предельно допустимого (потолочного) значения при значительных снижениях

напряжения — форсировкой возбуждения синхронного генератора. При этом происходит быстрое восстановление напряжения в сети после отключения коротких замыканий, тем самым облегчая самозапуск электродвигателей [5].

В соответствии [1] все синхронные машины (генераторы, компенсаторы, электродвигатели) должны быть оборудованы устройствами АРВ.

1.2 Виды АРВ

В зависимости от конкретных требований режимного характера, связанных с энергосистемой, а также в зависимости от типа применяемой системы возбуждения используется автоматическое регулирование возбуждения [4]:

- пропорционального (П-) действия;
- пропорционально-дифференциального (ПД-) — «сильного» действия (СД);
- пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД-) действия.

Эти виды АРВ отличаются способом формирования параметра регулирования, который зависит от режима работы генератора, и определяет действие системы регулирования. В той и другой системе обязательно используются в качестве основного параметра отклонение напряжения от заданного значения ΔU . По этому параметру замыкается главная обратная связь устройства АРВ. Отличие этих двух систем в том, что в законе регулирования используется различный состав некоторых дополнительных параметров.

При П-регулировании управляющее воздействие определяется отклонением напряжения от заданного значения, током нагрузки генератора и коэффициента мощности. Для вырабатывания регулирующего воздействия при ПД-регулировании «сильного» действия используются производные (первая и вторая) действующего значения напряжения и других режимных параметров, а при ПИД-алгоритме автоматического регулирования формируются сигнал по интегральной функции отклонения амплитуды напряжения (среднего

выпрямленного или действующего его значения) и первая и вторая производные угла электропередачи δ .

Функционирование систем АРВ всех типов отличаются только в переходном режиме. В установившемся режиме их работа подчиняется одинаковым закономерностям.

При ПД- и ПИД-регулировании достигается максимальная пропускная способность электропередачи и соответственно повышается статическая устойчивость электроэнергетической системы.

В настоящее время в ЭЭС применяются в основном АРВ СД. Для различных исполнений используются следующие параметры, характеризующие нарушение нормального режима:

- отклонение напряжения ΔU_G и скорость его изменения U'_G ;
- скорость I'_{CT} и ускорение I''_{CT} изменения тока статора генератора или тока в линии электропередачи;
- отклонение угла $\Delta\delta$ и скорость его изменения δ' ;
- отклонение частоты Δf и скорость ее изменения f' ;
- скорость изменения тока ротора генератора I'_f .

Угол и частота – параметры взаимосвязанные, так как $f \equiv \delta'$, а $f' \equiv \delta''$. Исходя из целесообразности и практических возможностей реализации, в последних конструкциях АРВ СД, как правило, используются ΔU_G , U'_G , Δf , f' , I'_f . Соответственно регуляторы имеют каналы по указанным параметрам. Комбинация этих параметров определяет закон регулирования.

Если рассматривать общую функциональную блок-схему системы регулирования напряжения синхронного генератора в соответствии с требованиями международной электротехнической комиссией, то канал [6]:

ΔU_G , U'_G – регулятор напряжения;

Δf , f' – системный стабилизатор;

I'_f – стабилизатор внутреннего движения.

1.3 Краткая история развития сильного регулирования возбуждения

Первый АРВ сильного действия был создан на электронных лампах в конце 50-х годов для регулирования возбуждения гидрогенераторов Волжской ГЭС им. В.И. Ленина [3]. Его функционирование осуществлялось ПД закону регулирования напряжения. В качестве параметров стабилизации использовались первая и вторая производные тока линии или среднего тока параллельно работающих генераторов. Последовавшие за этим разработки были направлены на совершенствование структуры и конструкции регуляторов, повышение надежности их работы. В последующих разработках, предпочтение было отдано стабилизации по изменению и по первой производной напряжения генератора. Это позволило упростить условия эксплуатации АРВ, в частности сделать его независимым от коммутаций в первичной схеме станции. С целью повышения надежности усилители на электронных лампах были заменены быстродействующими магнитными усилителями [7].

В начале 70-х годов, был создан унифицированный регулятор АРВ-СД для всех типов синхронных машин (гидрогенераторов, турбогенераторов и синхронных компенсаторов). Стабилизация режима обеспечивалась сигналами изменения и первой производной частоты напряжения статора, а также первой производной тока ротора. Наряду с традиционными функциями поддержания напряжения и обеспечения устойчивости регулирования АРВ-СД выполнен также ряд дополнительных функций по защите генератора и автоматизации технологических процессов, тем самым существенно повышая надежность работы основного оборудования. По объему функций и алгоритмическому обеспечению он превосходил зарубежные разработки того времени. Серийный выпуск его продолжался до 1983 г. Хотя выпуск этих регуляторов давно прекращен, до настоящего времени в эксплуатации находится порядка 10 – 15 % регуляторов на магнитных усилителях типа АРВ-СД различных модификаций от общего числа регуляторов сильного действия [3].

Процесс в области электронной техники позволил изменить элементную базу регуляторов возбуждения сильного действия. В 1977 г. был создан унифицированный полупроводниковый регулятор возбуждения сильного действия АРВ-СДП на базе полупроводниковых элементов и интегральных микросхем. Замена магнитных усилителей на полупроводниковые, а также использование новых принципов выполнения измерительных органов напряжения и частоты позволили существенно повысить быстродействие АРВ-СДП по сравнению с предшествующим АРВ-СД [7].

Последним полупроводниковым регулятором аналогового типа стал регулятор АРВ-СДП1. Данным регулятором с 1982 г. оснащались все синхронные генераторы мощностью выше 63 МВт. По своим характеристикам, этот регулятор намного превосходил предыдущие образцы. По сравнению с предшествующими образцами он выполнял большее количество функций, отличался повышенным качеством поддержания напряжения, увеличенной устойчивостью регулирования и инвариантностью настройки к изменению режима работы генератора и сети [7].

В настоящее время регуляторы АРВ-СДП1, составляют, по приблизительным оценкам, 70–80% от общего числа регуляторов сильного действия, находящихся в эксплуатации в ЕЭС/ОЭС [7].

Чтобы повысить точность регулирования и одновременно обеспечить более высокий уровень колебательной устойчивости системы при значительно меньших величинах коэффициентов усиления каналов стабилизации по сравнению с АРВ-СД и АРВ-СДП1, начали применять ПИД-закон регулирования напряжения [8]. Этот ПИД-закон начал применяться в аналоговых (полупроводниковых) регуляторах АРВ-СДП1М. Однако быстрый прогресс микропроцессорной техники привел к тому, что регуляторы АРВ-СДП1М довольно быстро морально устарели, и им на смену пришли полностью цифровые регуляторы возбуждения, которые используются в составе систем возбуждения вновь вводимых генераторов и в подавляющем большинстве

случаев – при реконструкции систем возбуждения генераторов, находящихся в эксплуатации.

Первый цифровой отечественный регулятор возбуждения АРВ-М был разработан к концу 1990-х годов. Основным отличием АРВ-М от регуляторов предыдущих поколений является расширенный набор выполняемых функций. В нем для регулирования напряжения используется ПИД-закон, который обеспечивает в установившемся режиме поддержание постоянного напряжения в точке регулирования. Для улучшения демпфирования качаний ротора СГ применено автоматическое уменьшение коэффициента передачи по отклонению напряжения в диапазоне частот электромеханических колебаний. Также АРВ-М может работать не только в режиме регулирования напряжения, но и в режиме регулирования реактивной мощности или коэффициента мощности.

1.4 Назначение и состав АРВ–СДП1

Подробное описание основных функций и состав АРВ–СДП1 приведено в [7].

Данный регулятор вместе с быстродействующей системой возбуждения выполняет большое количество разнообразных функций. Условно можно выделить четыре группы функций: системные, технологические, защитные, самоконтроль и диагностика.

Системные функции включают в себя:

1. поддержание напряжения с заданными точностью и статизмом регулирования;
2. обеспечение устойчивости регулирования во всех режимах работы генератора, включая холостой ход, работу в зоне искусственной устойчивости с внешним фазовым углом, приближающимся к 90° , и в режиме недовозбуждения при больших внутренних углах генератора;
3. демпфирование малых колебаний и больших послеаварийных качаний, которые могут возникнуть в энергосистеме;

4. обеспечение высокого уровня динамической устойчивости путем форсирования возбуждения вплоть до предельного значения при коротких замыканиях и набросах нагрузки во внешней электрической сети.

Технологические функции позволяют автоматизировать процессы управления током возбуждения, переходы от одного режима к другому, передачу информации о состоянии генератора и системы возбуждения. К ним относятся:

1. программное начальное возбуждение генератора при пуске;
2. подгонка напряжения генератора к напряжению сети при автоматической точной синхронизации или при самосинхронизации;
3. дистанционное изменение уставки напряжения со щита управления (блочного или общестанционного);
4. обеспечение работы в случае группового регулирования напряжения генераторов электростанции;
5. разгрузка генератора по реактивной мощности и программное развозбуждение при его плановом останове;
6. поддержание по получении команды постоянства тока ротора;
7. постоянная подгонка уставки, обеспечивающая равенство выходных напряжений основного и резервного регуляторов при работе системы возбуждения на резервном АРВ.

Реализация системных и технологических функций может привести к изменению регулирующего сигнала, выводящему режим работы генератора или системы возбуждения за допустимые пределы. В данном случае необходим переход с основного алгоритма работы АРВ на защитный, который обеспечит возврат режима в допустимые границы. В зависимости от характеристик основного оборудования этот возврат может происходить или безынерционно, или с определенной выдержкой времени.

Защитные функции включают в себя:

1. ограничение максимального тока ротора с учетом теплового состояния генератора и числа исправных вентиля преобразователя;

2. ограничение перегрузки по токам ротора и статора в соответствии с заданными тепловыми характеристиками генератора;
3. ограничение минимального возбуждения с уставкой, зависящей от величины активной мощности генератора и обусловленной допустимым нагревом торцевой зоны статора;
4. ограничение максимального напряжения статора при обрыве электропередачи и связанным с ним повышении частоты;
5. пропорциональное уменьшение напряжения статора при сильном снижении частоты;
6. автоматическая разгрузка по индуктивной реактивной мощности генератора при повреждении вентилей преобразователя;
7. ограничение максимального напряжения ротора в бесщеточных системах возбуждения.

Функции самоконтроля и диагностики включают в себя:

1. контроль соответствия величины отклонения напряжения статора и выходного напряжения регулятора;
2. контроль состояния выходного усилителя;
3. контроль исправности источника питания.

На рисунке 1 представлена функциональная схема регулятора возбуждения АРВ-СДП1. В состав регулятора входят 16 блоков.

Блок питания (БП) подключается к трансформатору собственных нужд переменного тока системы возбуждения. Его основное назначение – преобразование входного трехфазного напряжения в стабилизированное напряжение постоянного тока величиной ± 12.6 В, которое питает все блоки регулятора. При отсутствии переменного трехфазного напряжения или в случае отказа БП происходит автоматическое переключение питания АРВ на резервный источник питания ИПР, который подключается к сети постоянного оперативного тока станции.

Блок уставки напряжения (БУН) формирует значение уставки регулируемого напряжения. Управление уставкой осуществляется с помощью

кнопок, расположенных на лицевой панели БУН, или дистанционно от ключа управления на блочном или общестанционном щите управления.

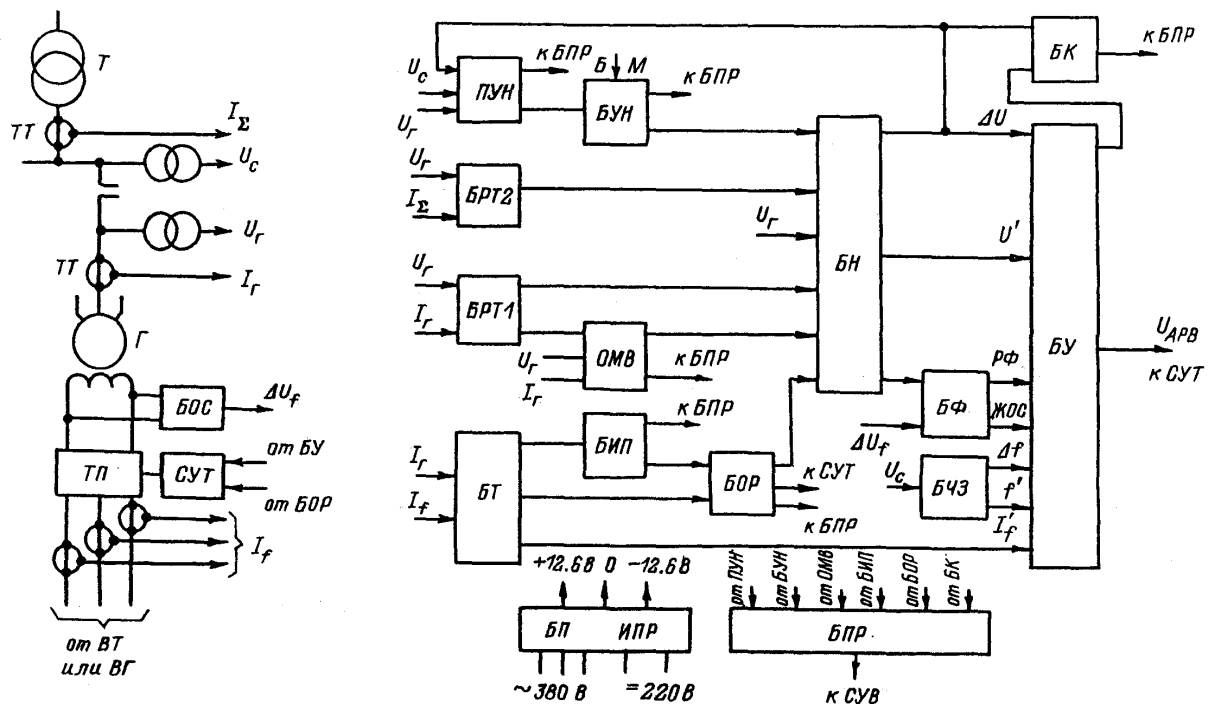


Рисунок 1 – Функциональная схема регулятора возбуждения АРВ-СДП 1

Блок напряжения (БН) предназначен для формирования сигнала отклонения напряжения статора от заданного значения и сигнала первой производной напряжения статора.

Блок реактивного тока БРТ-1 формирует сигнал, пропорциональный реактивной составляющей тока статора генератора для реализации заданного статизма регулирования. При работе генераторов на общие шины статизм регулирования задается отрицательным, а при работе блока «генератор-трансформатор» – положительным. Блок реактивного тока БРТ-2 формирует сигнал, пропорциональный реактивной составляющей группы генераторов, объединенных шиной генераторного напряжения. Данный сигнал позволяет компенсировать падение напряжения в общем повышающем трансформаторе и восстановить требуемый статизм регулирования. В целом блок БРТ-2 позволяет обеспечить устойчивую работу группы генераторов при низком статизме.

Блок токов (БТ) формирует сигналы, пропорциональные токам ротора и статора, которые затем используются для ограничения перегрузок. Также БТ формирует сигнал стабилизации по производной тока ротора.

Тепловые характеристики нагрева заложены в блоке измерения перегрузки (БИП). В зависимости от величины перегрузки БИП отсчитывает допустимую выдержку времени и выдает сигнал о перегреве.

Блок ограничения тока ротора (БОР) осуществляет ограничение максимального тока ротора, воздействуя на систему управления тиристорами, а также уменьшает уставку напряжения при перегреве генератора до допустимого уровня.

Блок форсировки (БФ) обесперчивает форсировку возбуждения при снижении напряжения статора ниже заданной уставки. Благодаря этому обеспечиваются высокие пределы динамической устойчивости.

Блок ограничения минимального возбуждения (ОМВ) осуществляет защиту торцевых зон статора от недопустимого перегрева. В него закладывается граница допустимых режимов в координатах активной и реактивной составляющих тока статора. При выходе режима работы генератора за ее пределы безынерционно увеличивается уставка напряжения статора. Если конструкция генератора исключает перегрев торцевых зон, то граница ОМВ может быть перестроена на ограничение внутреннего угла генератора (ограничение по устойчивости).

Блок частоты и защиты (БЧЗ) формирует сигналы стабилизации, пропорциональные изменению и первой производной частоты напряжения. При одновременном увеличении напряжения статора, частоты и производной частоты, что характерно при обрыве электропередачи, выход БЧЗ блокируется с целью исключения ложного форсирования.

Подгонка напряжения генератора к напряжению сети при автоматической точной синхронизации и самосинхронизации осуществляется блоком подгонки (ПУН). После окончания подгонки ПУН выдает соответствующий сигнал.

Суммирование и усиление сигналов регулирования и стабилизации происходят на блоке усиления (БУ). Его выходной сигнал является выходом АРВ, поэтому БУ осуществляет гальваническую развязку между цепями регулятора и системы управления тиристорным преобразователем.

1.5 Обзор программно-вычислительного комплекса EUROSTAG

Программно-вычислительный комплекс EUROSTAG создан совместно Réseau de Transport d'Electricité (RTE), являющейся системным оператором энергосистемы Франции, и фирмой TRACTEBEL — научно-техническим центром, входящим в концерн SUEZ-TRACTEBEL [9]. Программа предназначена для моделирования и анализа электромеханических переходных процессов в энергосистемах на временных интервалах от долей секунды до часов. При этом точность расчета не зависит от продолжительности моделируемого переходного процесса, поскольку реализованный в EUROSTAG алгоритм интегрирования дифференциальных уравнений автоматически подбирает шаг интегрирования в соответствии с точностью, необходимой пользователю [10].

ПБК EUROSTAG включает в себя следующие функции [10]:

- определение предельного времени отключения короткого замыкания;
- исследование процессов синхронизации энергосистем после крупных аварий;
- определение настроек для систем противоаварийного управления, устройств релейной защиты и автоматики;
- анализ причин возникновения и последствий аварийных возмущений в энергосистеме;
- анализ поведения энергосистемы при различных аварийных возмущениях (лавина напряжения, выпадение из синхронизма крупных электростанций и т.п.);

– разработка и настройка систем управления (регуляторы скорости турбин, АРВ генераторов, РПН трансформаторов и т.п.).

В ПВК EUROSTAG расчетный модуль служит для проведения расчетов установившихся режимов и электромеханических переходных процессов.

Для расчета установившегося режима используется итерационный численный метод Ньютона–Рафсона. Расчет установившегося режима предназначен для определения начальных условия для расчета переходных режимов (динамики).

Для расчета переходных режимов используется расчетный метод интегрирования с переменным шагом, основанный на методе прогноз-коррекции – метод Nordsieck. При расчете переходных процессов программой шаг интегрирования подбирается программой автоматически для удовлетворения требования к точности расчета, заданных пользователем. При этом на каждом шаге интегрирования система алгебраических нелинейных уравнений решается по методу Ньютона–Рафсона.

Одним из преимуществ ПВК EUROSTAG является возможность создания пользовательских моделей с помощью редактора макроблоков. При использовании редактора макроблоков могут быть реализованы модели устройств, определяющих механический момент на валу синхронной машины и напряжение возбуждения генератора, специальные модели нагрузки, СТК, электропередач постоянного тока и многие другие. Этот редактор специально предназначен для создания пользовательских моделей устройств, систем регулирования и управления без долгого и трудоемкого процесса программирования на специализированном языке. Пользователь создает модель устройства, основываясь на его блок схеме, при помощи элементарных блоков, каждый из которых имеет определенную функцию. Созданная при помощи элементарных блоков модель называется «макроблоком».

В данной дипломной работе с помощью редактора макроблоков ПВК EUROSTAG по математической модели отечественного автоматического регуляторов возбуждения сильного действия АРВ-СДП1 был собран макроблок

АРВ-СДП1, который впоследствии испытывался на тестовой модели Томской энергосистемы, собранной в редакторе файлов ПБК EUROSTAG по параметрам оборудования использованных в ВМК РВ ЭЭС.

1.6 Обзор ВМК РВ ЭЭС

ВМК РВ ЭЭС разработан в Энергетическом институте Томского политехнического университета, представляет собой специализированную многопроцессорную программно-техническую систему гибридного типа, предназначенную для непрерывного воспроизведения в реальном времени и на неограниченном интервале процессов в оборудовании и трехфазной ЭЭС в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы [11].

ВМК РВ ЭЭС применяют для изучения процессов происходящих в сложных электрических сетях, проведения различных расчетов (как установившихся, так и переходных режимов энергосистем), необходимых для решения многих важнейших задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС, в частности [11]:

- расчета, настройки и проверки существующих устройств и систем релейной защиты, противоаварийной автоматики, АРВ, а также систем регулирования котлоагрегатов, турбин и т.д.;
- моделирования и разработки модернизированных и новых средств релейной защиты, технологической и противоаварийной автоматики;
- анализа аварий в ЭЭС;
- исследования динамических свойств ЭЭС;
- анализа возможных условий работы оборудования;
- советчика диспетчера;
- тренажа и обучения персонала.

Схема всережимного моделирования ЭЭС Томской области, реализованная в ВМК РВ, приведена в однолинейном изображении в

Приложении А. На представленной схеме полностью моделируется сеть 110 кВ и 220 кВ ЭЭС, а остальная часть ЭЭС и ее взаимосвязи с соседними энергосистемами моделируется эквивалентной схемой, обеспечивающей всережимную адекватность в ЭЭС [11].

Каждая фаза элементов схемы моделирования: генераторов, трансформаторов и автотрансформаторов, линий электропередачи, синхронных и асинхронных электродвигателей, реакторов, обобщенных эквивалентных нагрузок, содержит два линейных выключателя, позволяющих формировать нужную топологическую схему подстанций. Кроме того, каждый объект содержит короткозамыкатель, который позволяет сформировать любой вид КЗ [12].

Все виды элементов:

- генераторы и их системы возбуждения с различными АРВ, а также первичные двигатели, которые могут содержать гидравлические или паровые турбины с системами регулирования, котлоагрегаты с системами регулирования и др. оборудование;
- синхронные двигатели с их системами возбуждения и АРВ и различными приводимыми механизмами;
- асинхронные двигатели с разнообразными приводимыми механизмами;
- различные трансформаторы и автотрансформаторы с РПН;
- линии электропередачи;
- шунтирующие реакторы, в том числе управляемые;
- обобщенные эквивалентные нагрузки моделируются полными всережимными математическими моделями, универсальными для каждого из этих видов [12].

Электрические машины моделируются в системе координат d, q с преобразованием $d, q \rightarrow A, B, C$ и $A, B, C \rightarrow d, q$.

Все остальные элементы моделируются непосредственно в трех фазной системе координат A, B, C .

Автоматизированное и автоматическое цифровое управление параметрами математических моделей, продольно-поперечными коммутаторами и моделированием в целом, а также разнообразным цифровым представлением и отображением процессов моделирования и его результатов осуществляется с помощью СПО сервера и соответственно клиентов (VmkClient). Клиент соединяется с сервером ВМК РВ ЭЭС через внешнюю компьютерную сеть.

Для управления моделированием и его отображения, а также визуализации процессов моделирования и его результатов в СПО предусмотрены разнообразные программные приборы цифрового, графического, диаграммного, осциллографического типов и различные формы в виде динамических панелей управления и наблюдения, содержащих нужные схемы, программные приборы и командные кнопки [12].

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Основная цель данного раздела заключается в обосновании, экономическом планировании и оценке ресурсоэффективности научно-технического исследования.

Поставлены следующие задачи для комплексного анализа научно-исследовательского проекта:

- оценить научный уровень исследования;
- определить структуру работ в рамках научного исследования;
- разработать график проведения научного исследования;
- сформировать бюджет НТИ;
- определить ресурсоэффективность исследования.

АРВ имеет важное значение для обеспечения статической, динамической и результирующей устойчивости. Ошибочная настройка АРВ может привести к крупномасштабным авариям, обесточиванию населения и значительному материальному ущербу. Поэтому к АРВ сильного действия синхронных генераторов предъявляются определенные требования в рамках системы добровольной сертификации, которые регламентируются стандартом ОАО «Системный оператор Единой энергетической системы» («СО ЕЭС») [2], Согласно стандарту [2], проверка параметров настройки АРВ сильного действия синхронного генератора осуществляется в зависимости от типа и мощности – либо на физической модели энергосистемы, либо на математической модели энергосистемы в программно-аппаратного комплекса моделирования энергосистем в режиме реального времени (ПАК РВ), либо на цифровой модели энергосистемы.

Сертификацией АРВ в России занимается ОАО «НТЦ ЕЭС», при этом для проверки параметров устройств АРВ применяется в качестве ПАК РВ зарубежный комплекс RTDS, технической поддержкой которого занимаются иностранные специалисты RTDS Technologies Inc. (Канада). Поэтому

актуальным является вопрос импортозамещения и разработки отечественного инструмента для проверки параметров, а в дальнейшем и сертификации АРВ.

НТИ посвящено исследованию математической модели отечественного автоматического регуляторов возбуждения сильного действия АРВ-СДП1 в программно-вычислительном комплексе EUROSTAG и моделирующем комплексе ВМК РС ЭЭС. Также при проведении НТИ рассматривается возможность использования ВМК РВ ЭЭС в качестве средства для проведения добровольной сертификации АРВ.

Результаты данной работы необходимы для генерирующих компаний (Росэнергоатом, РусГидро), а также органов добровольной сертификации, осуществляющие сертификацию АРВ для подтверждения их соответствия требованиям стандарта [2].

5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований

5.1.1 Оценка научного уровня исследования

Научная ценность, техническая значимость и эффективность НТИ (проекта) рассчитывается через коэффициент научно-технического уровня.

Данный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{нy}} = \sum_{i=1}^n (K_{\text{дy}i} \cdot d_i),$$

где $K_{\text{нy}}$ – коэффициент научного или научно-технического уровня;

$K_{\text{дy}i}$ – коэффициент достигнутого уровня i -го фактора;

d_i – значимость i -го фактора;

n – количество факторов.

Максимально возможное значение $K_{\text{нy}}$ равно 1,0. Чем ближе оно к 1,0, тем выше научный или научно-технический уровень разработки.

По каждому из факторов экспертным путем устанавливается числовое значение коэффициента значимости d_i . При этом сумма коэффициентов значимости по всем факторам должна быть равна 1,0. Коэффициент достигнутого уровня фактора также устанавливается экспертным путем, а его числовое значение в пределах от 0 до 1 определяется с учетом качества признака фактора и его характеристики.

Результаты расчетов представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Оценка научного уровня исследования

Показатели	Значимость показателя	Достигнутый уровень	Значение i -го фактора
	d_i	$K_{\text{д}i}$	$K_{\text{д}i} \cdot d_i$
1. Новизна полученных результатов	0,3	0,5	0,15
2. Перспективность использования результатов	0,3	0,5	0,15
3. Завершенность полученных результатов	0,2	0,5	0,1
4. Масштаб возможной реализации полученных результатов	0,2	0,6	0,12
Результативность	$K_{\text{ну}} = \sum_{i=1}^n (K_{\text{д}i} \cdot d_i) = 0,52$		

Новизна полученных результатов: данная исследовательская работа не производилась ранее для данных программных комплексов.

Перспективность использования результатов: результаты данной работы будут актуальны в будущем.

Завершенность полученных результатов: полученные результаты требуют проведения дополнительных исследований.

Масштаб возможной реализации полученных результатов: результаты исследования широко востребованы среди большого количества энергетических компаний.

5.2 Планирование научно-исследовательских работ

5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения данного научного исследования формируется рабочая группа, в состав которой входит руководитель проекта (преподаватель) и инженер (студент-бакалавр). Затем по каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей. Информация о необходимом перечне этапов и работ в рамках проведения исследования, а также о распределении исполнителей по видам работ, представлена в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов и нормативных документов	Инженер
	3	Выбор направления исследований	Руководитель
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Анализ исходных данных	Инженер
	6	Работа с принципиальной схемой Томского энергорайона	Инженер
	7	Разработка цифровой эталонной модели энергосистемы в ПВК EUROSTAG и расчет установившегося режима	Инженер
	8	Сравнение расчета установившегося режима EUROSTAG с ВМК РВ ЭЭС	Инженер
	9	Разработка макроблока АРВ-СДП1	Инженер
	10	Создание файла данных динамики для расчета переходных процессов в ПВК EUROSTAG	Инженер

Продолжение таблицы 5.3

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
	11	Моделирование возмущений и аварийных ситуаций для проверки функционирования собранной модели АРВ- СДП1	Инженер
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
Разработка документации проекта	13	Социальная ответственность	Инженер
	14	Финансовый менеджмент	Инженер
	15	Составление пояснительной записки	Инженер

Как видно из приведенной таблицы 5.2, научно-исследовательская работа будет производиться в 15 последовательных этапов. После этого перейдем к определению времени и трудоемкости проведения тех или иных работ.

5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожи}$ используется следующая формула:

$$t_{ожи} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

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

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

$t_{\max i}$ – 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 несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i},$$

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

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

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

Пример расчета:

– Руководитель – составление и утверждение технического задания:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8 \text{ чел.-дн.}$$

$$T_p = \frac{t_{ож}}{Ч} = \frac{2,8}{1} = 2,8 \text{ дн.}$$

– Инженер – подбор и изучение материалов и нормативных документов:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5} = \frac{3 \cdot 4 + 2 \cdot 6}{5} = 4,8 \text{ чел.-дн.}$$

$$T_p = \frac{t_{ож}}{Ч} = \frac{4,8}{1} = 4,8 \text{ дн.}$$

5.3 Разработка графика проведения научного исследования

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

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

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

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

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

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

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

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

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

В соответствии с производственным календарем на 2017 год, суммарное количество выходных и праздничных дней в 2017 году составляет:

- при шестидневной рабочей неделе – 66 дней;
- при пятидневной рабочей неделе – 118 дней.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе $T_{ки}$ необходимо округлить до целого числа. Допускается, что руководитель работает по шестидневной рабочей неделе, а инженер – по пятидневной.

Пример расчета:

- Руководитель – составление и утверждение технического задания:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 66} = 1,22;$$

$$T_{к} = T_{р} \cdot k_{кал} = 2,8 \cdot 1,22 = 3,42 \approx 3 \text{ дн.}$$

- Инженер – подбор и изучение материалов и нормативных документов:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,48;$$

$$T_{к} = T_{р} \cdot k_{кал} = 4,8 \cdot 1,48 = 7,1 \approx 7 \text{ дн.}$$

Все рассчитанные значения сведены в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Временные показатели проведения научного исследования

№ раб.	Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
		t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожі}$, чел-дни					
		Руковод.	Инженер	Руковод.	Инженер	Руковод.	Инженер	Руковод.	Инженер	Руковод.	Инженер
1	Составление и утверждение технического задания	2		4		2,8		3		3	
2	Подбор и изучение материалов и нормативных документов		4		6		4,8		5		7
3	Выбор направления исследований	2		3		2,4		2		3	
4	Календарное планирование работ по теме	1		2		1,4		1		2	
5	Анализ исходных данных		4		6		4,8		5		7
6	Работа с принципиальной схемой Томского энергорайона		3		5		3,8		4		6
7	Разработка цифровой эталонной модели энергосистемы в ПВК EUROSTAG и расчет установившегося режима		8		10		8,8		9		13
8	Сравнение расчета установившегося режима EUROSTAG с ВМК РВ ЭЭС		5		7		5,8		6		9
9	Разработка макроблока АРВ- СДП1		6		8		6,8		7		10
10	Создание файла данных динамики для расчета переходных процессов в ПВК EUROSTAG		4		6		4,8		5		7
11	Моделирование возмущений и аварийных ситуаций для проверки функционирования собранной модели АРВ-СДП1		8		10		8,8		9		13
12	Оценка эффективности полученных результатов	8		10		8,8		9		11	
13	Социальная ответственность		2		4		2,8		3		4

Продолжение таблицы 5.3

14	Финансовый менеджмент		2		4		2,8		3		4
15	Составление пояснительной записки		7		10		8,2		8		12
Итого	Общее количество дней для выполнения выпускной работы						календарных		111		
							рабочих		79		
	Общее количество дней, в течение которых работал инженер						календарных		92		
							рабочих		64		
	Общее количество дней, в течение которых работал руководитель						календарных		19		
							рабочих		15		

На основании таблицы 5.3 построен календарный план-график, представленный на рисунке 5.1.

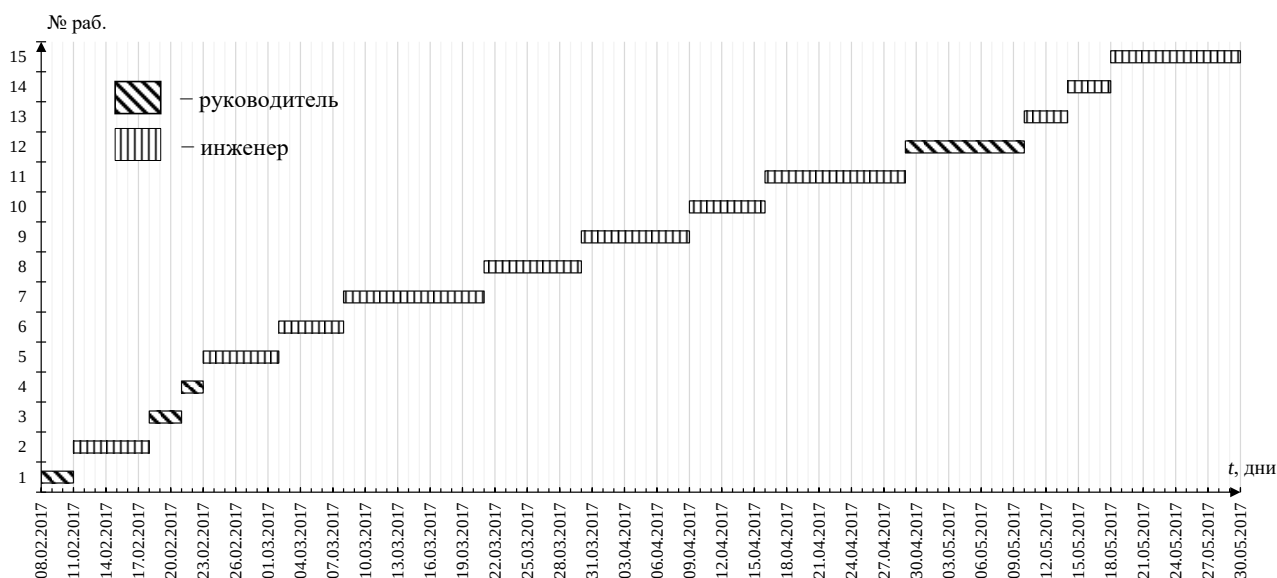


Рисунок 5.1 – Календарный план-график выполнения НТИ

Календарная продолжительность выполнения НТИ составит 111 дней. Руководитель при этом задействован в течение 19 календарных дней, инженер в течение 92 календарных дней. При этом общее количество рабочих дней руководителя составляет 15, инженера – 64. Начало работ запланировано на 8 февраля 2017 г, окончание работ запланировано на 30 мая 2017 г. Учитывая вероятностный характер оценки трудоемкости, реальная продолжительность работ может быть, как меньше (при благоприятном стечении обстоятельств), так и несколько превысить указанную продолжительность (при неблагоприятном стечении обстоятельств).

5.4 Бюджет научно-исследовательской работы

В данном разделе будет производиться отражение всех видов расходов, связанных с выполнением научно-исследовательской работы. Основными пунктами определения бюджета НИР являются затраты по статьям:

- материальные затраты;
- основная заработная плата исполнителей;
- дополнительная заработная плата исполнителей;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- амортизационные отчисления;
- накладные расходы.

5.4.1 Расчет материальных затрат

К материальным затратам относится стоимость приобретаемого сырья и материалов, запасные части для ремонта оборудования и другие быстроизнашивающиеся предметы, которые необходимы при проведении исследовательской работы.

Материальные затраты сведены в таблицу 5.4.

Таблица 5.4 – Материальные затраты

№ п/п	Наименование изделия	Кол-во единиц	Цена единицы, руб.	Общая стоимость, руб.
1	карандаши	5	24	120
2	ручки	5	40	200
3	бумага для печати	3	250	750
	картридж для принтера	1	1000	1000
Итого:				2070

5.4.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В данной статье учитывается основная заработная плата научных работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина этих расходов определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИР (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{зн} = З_{осн} + З_{доп},$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата;

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12 – 20 % от $З_{осн}$).

Основная заработная плата ($З_{осн}$) руководителя от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{одн} \cdot T_p,$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 5.3);

$З_{одн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{одн} = \frac{З_m \cdot M}{F_{\phi}} = \frac{33150,00 \cdot 10,4}{248} = 1390,16 \text{ руб.},$$

где $З_m$ – месячный должностной оклад работника, руб.:

$$З_m = З_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_{\phi}) \cdot k_p = 17000,00 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150,00 \text{ руб.},$$

где $З_{мс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

k_{np} – премиальный коэффициент, равный 0,3;

k_{ϕ} – коэффициент доплат и надбавок составляет 0,2;

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

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 24 раб. дня – $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;
- при отпуске в 48 раб. дней – $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_0 – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 5.5). Расчет основной заработной платы приведен в таблице 5.6.

Таблица 5.5 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней: – выходные дни и праздничные дни	66	118
Потери рабочего времени: – отпуск и невыходы по болезни	51	28
Действительный годовой фонд рабочего времени	248	219

Таблица 5.6 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{мс}$, руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	17 000,00	0,3	0,2	1,3	33150,00	1390,16	15	20852,42
Инженер	14 874,45	0,3	0,2	1,3	29005,18	1483,37	64	94935,67
Итого:								115788,09

5.4.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Чтобы учесть величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.), рассчитываем затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы.

Расчет дополнительной заработной платы производится по следующей формуле:

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн} = 0,15 \cdot 20852,42 = 3127,86 \text{ руб.};$$

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн} = 0,15 \cdot 94935,67 = 14240,35 \text{ руб.},$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15).

5.4.4 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.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) = 0,271 \cdot (20852,42 + 3127,86) = 6498,66 \text{ руб.};$$

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) = 0,271 \cdot (94935,67 + 14240,35) = 29586,70 \text{ руб.},$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На основании пункта 1 ст. 58 закона № 212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность вводится пониженная ставка на размер страховых взносов – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Отчисления во внебюджетные фонды
Руководитель проекта	20 852,42	3 127,83	6 498,66
Инженер	94 935,67	14 240,35	29 586,70
Итого	115 788,09	17 368,21	36 085,36

5.4.5 Амортизационные отчисления

Данные отчисления производятся для возмещения износа оборудования, приобретенного университетом для пользования. В данную статью включаются все затраты, не связанные с приобретением специального оборудования необходимого для проведения работ по конкретной теме, причем учитывается только оборудование или программное обеспечение стоимостью от 40 тысяч рублей.

Стоимость необходимого программного обеспечения и оборудования приведена в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Стоимость необходимого программного обеспечения и оборудования

№ п/п	Наименование	Кол-во единиц	Цена единицы, руб.	Общая стоимость, руб.
1	Программный комплекс EUROSTAG	1	70 000	70 000
Итого:				70 000

В связи с длительностью использования, учитывается данная стоимость с помощью амортизации:

$$A = \frac{C \cdot N_{\text{дн.исп.}}}{\Gamma_{\text{ср.служ.}} \cdot 365} = \frac{70000 \cdot 52}{5 \cdot 365} = 1994,52 \text{ руб.}$$

где $C = 70000$ руб. – стоимость необходимого программного обеспечения;

$N_{\text{дн.исп.}} = 52$ кал.дн. – количество дней использования ПО;

$\Gamma_{\text{ср.служ.}}$ – срок полезного использования в количествах лет.

5.4.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование

материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{нр}} = (Z_{\text{мат}} + Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + Z_{\text{внеб}} + Z_{\text{амор}}) \cdot 0,16 = \\ = (2070 + 115788,09 + 17368,21 + 36085,36 + 1994,52) \cdot 0,16 = 27728,99 \text{ руб.},$$

где $k_{\text{нр}} = 16 \%$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

5.4.7 Формирование бюджета затрат научно-технического исследования

Рассчитанная величина затрат НТИ 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-исследовательскую работу по каждому варианту исполнения приведен в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	%
1. Материальные затраты	2070,00	1,03
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей	115 788,09	57,60
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей	17 368,21	8,64
4. Отчисления во внебюджетные фонды	36 085,36	17,95
5. Амортизационные отчисления	1 994,52	0,99
6. Накладные расходы	27 728,99	13,79
Бюджет затрат НТИ	201 035,17	100

5.5 Определение ресурсоэффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности. В данном разделе произведена оценка ресурсоэффективности научной разработки, т.к. определение финансовой эффективности не представляется возможным.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения модели исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i,$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Для нормального функционирования данного проекта необходимо принять ряд критериев. В данном случае выбираем следующие:

1. надежность – соответствие расчетов реальным моделям, рассматриваемым при расчете режимов и проведении сертификации АРВ;

2. гибкость – способность проекта реагировать на изменение условий, в данном случае проект допускает изменение структуры расчетных комплексов;

3. адаптивность – возможность использовать данный проект под другие модели энергосистем, другие опыты и т.д.

4. простота эксплуатации – проект должен быть выполнен с наглядной информацией и рационально представленными данными, с целью создания условий для работы с проектом персонала средней квалификации;

5. экономичность – проект должен быть выполнен таким образом, чтобы затраты на его создание, эксплуатацию и развитие были минимальными при условии соблюдения требований гибкости, безопасности и надежности.

Выбранные критерии оцениваются по 5-и бальной шкале. По данным оценкам рассчитывается интегральный показатель. По величине интегрального показателя производится анализ эффективности использования технического проекта.

Оценочные критерии для расчета интегрального показателя ресурсоэффективности приведены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Оценочные критерии проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки
1. Надежность	0,25	5
2. Гибкость	0,25	4
3. Адаптивность	0,10	4
4. Простота эксплуатации	0,15	5
5. Экономичность	0,25	3
Итого:	1,00	4,15

Расчет величины интегрального показателя показал, что технический проект является ресурсоэффективным.

В результате выполнения поставленных задач, можно сделать следующие выводы:

1. Оценка научного уровня исследования показала, что проект является весьма актуальным и востребованным.

2. Результат планирования показал, что общая продолжительность проекта составила 111 календарных дней.

3. Общая сумма проекта составила 201 035,17 руб. Данный проект можно считать экономически эффективным, так как сумма затрат подобных исследований является намного более дорогостоящей.

4. Интегральный критерий ресурсоэффективности составил 4,15. По данному значению можно судить о проекте, как о ресурсоэффективном.

Таким образом, произведенное научно-техническое исследование можно считать значимым. Была доказана его значимость и конкурентоспособность. Данное исследование произведено на базе ТПУ с использованием оборудования и программного обеспечения университета, что даёт возможность большей экономии по сравнению с подобными проектами.