

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
Кафедра Электрических сетей и электротехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Разработка мероприятий по повышению устойчивости параллельной работы генераторов Богучанской ГЭС с ОЭС Сибири

УДК 621.311.21:621.313.322.004(571.51)

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А2Г	Хорун А.Б.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Бацева Н.Л.	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Грахова Е.А.	ассистент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Амелькович Ю.А.	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭСиЭ	Прохоров А.В.	к.т.н.		

Томск – 2016 г.

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

Институт Энергетический
 Направление подготовки (специальность) 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
 Кафедра Электрические сети и электротехника

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой
 _____ Прохоров А.В.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской выпускной квалификационной работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
5А2Г	Хорун Анастасии Борисовне

Тема работы:

Разработка мероприятий по повышению устойчивости параллельной работы генераторов Богучанской ГЭС с ОЭС Сибири

Утверждена приказом директора (дата, номер)	27.04.2016 г., № 3266/С
---	-------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2016 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	1. Принципиальная схема системообразующей сети 500/220 кВ ОЭС Сибири; 2. Параметры электрооборудования: ЛЭП, генераторов, трансформаторов, автотрансформаторов.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Характеристика состояния электрических сетей ОЭС Сибири; 2. Расчет и анализ динамической устойчивости. Управляющие воздействия, направленные на сохранение и повышение динамической устойчивости; 3. Программный комплекс RUSTab, как инструмент для исследования установившихся и переходных режимов; 4. Моделирование схемы электрической сети. Расчет и анализ установившегося и

	переходных режимов.
Перечень графического материала	1. Принципиальная схема системообразующей сети 500/220 кВ ОЭС Сибири; 2. Схема замещения ЭС.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	ассистент, Грахова Е.А.
Социальная ответственность	к.т.н., Амелькович Ю.А.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	14.11.2015 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Бацева Н.Л.	к.т.н., доцент		14.11.2015 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А2Г	Хорун А.Б.		14.11.2015 г.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа		ФИО	
5А2Г		Хорун Анастасии Борисовне	
Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭСиЭ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

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

1. <i>Стоимость ресурсов научно-технического исследования (НТИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	В НТИ задействованы 2 человека: руководитель и младший научный сотрудник, исходными данными НТИ являются предоставленная схема энергосистемы с известными параметрами, стоимость оборудования и расходы на оплату труда.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	ГОСТ 14.322-83 Нормирование расхода материала. Основные положения; ГОСТ 51541-99 Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. Общие положения.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления по страховым взносам составляют 30% от ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Оценка научного уровня НТИ
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	НТИ выполнено в рамках выпускной квалификационной работы, разработка устава не требуется
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Организация и планирование НТИ, разработка сметы затрат
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Определение интегрального показателя финансовой эффективности

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Перечень работ</i>
2. <i>Линейный график работ</i>
3. <i>Бюджет проекта</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Грахова Елена Александровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А2Г	Хорун Анастасия Борисовна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа		ФИО	
5А2Г		Хорун Анастасии Борисовне	
Институт	Энергетический	Кафедра	ЭСнЭ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования)	Рабочим местом является место работы с ЭВМ в кабинете службы электрических режимов. Вредные факторы: - повышенный уровень шума, параметры микроклимата, недостаток естественного света, недостаточная освещенность рабочего места и электромагнитное излучение Опасные факторы: - повышенный уровень статического электричества, поражение электрическим током, пожар
2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме	ГОСТ 12.003 – 74, ГОСТ 12.1.003 – 83, СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03, СанПиН 2.2.4.548 – 96, ГОСТ 12.1.038–82, ГОСТ 12.1.045–84, ГОСТ Р 22.0.07-95, ГОСТ 12.2.032-78, НПБ 105-03

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность	Шум, микроклимат, производственное освещение, электромагнитное излучение, поражение статическим электричеством, электрическим током
2. Экологическая безопасность	Выделение углекислого газа и токсичных веществ при утилизации
3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	Короткое замыкание провода, пожар. Анализ мероприятий по пожарной безопасности и противопожарной профилактики
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	Рассматриваются специальные правовые нормы трудового законодательства и организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
к.т.н.	Амелькович Ю.А.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А2Г	Хорун А.Б.		

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

Институт Энергетический
 Направление подготовки (специальность) 13.03.02. Электроэнергетика и электротехника
 Уровень образования Бакалавриат
 Кафедра Электрические сети и электротехника
 Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2015/2016 учебного года)

Форма представления работы:

бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2016 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
21.12.2015 г.	<i>Характеристика состояния электрических сетей ОЭС Сибири.</i>	5
08.02.2016 г.	<i>Расчет и анализ динамической устойчивости. Управляющие воздействия, направленные на сохранение и повышение динамической устойчивости.</i>	25
14.03.2016 г.	<i>Программный комплекс RUSTab, как инструмент для исследования установившихся и переходных режимов.</i>	10
09.05.2016 г.	<i>Моделирование схемы электрической сети. Расчет и анализ установившегося и переходного режимов.</i>	40
16.05.2016 г.	<i>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>	10
19.05.2016 г.	<i>Социальная ответственность.</i>	10
<i>Итого</i>		<i>100</i>

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Бацева Н.Л.	к.т.н.. доцент		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭСиЭ	Прохоров А.В.	к.т.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 110 с., 48 рисунков, 25 таблиц, 36 литературных источников, 3 приложения.

Ключевые слова на русском языке: динамическая устойчивость, управляющее воздействие, отключение генераторов, установившийся режим, переходный режим, моделирование схемы, нормативное возмущение, короткое замыкание, автоматика повторного включения.

Ключевые слова на английском языке: dynamic stability, control action, generators dropping, steady-state regime, transient state, circuit simulation, reference incident, short-circuit, automatic reclose.

Объектом исследования являются электрические сети 500/220 кВ Красноярской и Тывинской ЭС.

Цель работы на русском языке: разработать мероприятия по повышению динамической устойчивости параллельной работы генераторов Богучанской ГЭС с ОЭС Сибири.

Цель работы на английском языке: to develop activities for increasing dynamic stability of Boguchanskaya HPS generators with interconnected system in parallel.

Методология проведения работы: В процессе работы: 1) проведено моделирование и расчёт установившихся и переходных режимов ЭС в ПК; 2) произведены расчеты установившихся и переходных режимов при возникновении нормативных возмущений групп I и II; 3) разработаны мероприятия по повышению динамической устойчивости генераторов.

Результаты работы: В качестве мероприятия по повышению динамической устойчивости генераторов Богучанской ГЭС эффективным средством является отключение генераторов.

Области применения: результаты работы могут быть использованы в службах электрических режимов ОДУ, РДУ «СО ЕЭС» для планирования режима работы генераторов Богучанской ГЭС при их параллельной работе с ОЭС Сибири.

Список сокращений

АЭС – Атомная электростанция;

ВЛ – Воздушная линия;

ГЭС – Гидроэлектростанция;

ДРТ – Длительная разгрузка турбин;

ДС – Деление системы;

ЕЭС – Единая энергетическая система;

ИРТ – Импульсная разгрузка турбины;

КЗ – Короткое замыкание;

ЛЭП – Линия электропередачи;

ОДУ – Объединенное диспетчерское управление;

ОГ – Отключение генератора;

ОН – Отключение нагрузки;

ОР – Отключение реактора;

ОЭС – Объединенная энергосистема;

ПА – Противоаварийная автоматика;

ПК – Программный комплекс;

ПС – Подстанция;

РДУ – Региональное диспетчерское управление;

СО – Системный оператор;

ТЭС – Тепловая электростанция;

УВ – Управляющее воздействие;

УР – Установившийся режим;

ФВ – Форсировка возбуждения

ЭС – Энергетическая система;

ЭТ – Электрическое торможение;

ЭЭС – Электроэнергетическая система;

Термины и определения

Асинхронный режим – режим ЭС, характеризующийся устойчивыми глубокими периодическими колебаниями напряжений, токов и мощностей, периодическим изменением взаимного угла ЭДС генераторов электростанций и наличием разности частот между частями синхронной зоны при сохранении электрической связи между ними [4];

Нормативное возмущение – аварийное возмущение, учитываемое в требованиях по обеспечению устойчивости ЭС при их проектировании и эксплуатации [5];

Установившийся режим работы ЭС – режим работы ЭС, при котором параметры режима могут приниматься неизменными [4];

Устойчивость энергосистем – способность сохранить синхронизм между электростанциями, или другими словами - возвращаться к установившемуся режиму после различного рода возмущений [1];

Управляющее воздействие – задание на изменение режима работы или эксплуатационного состояния объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок потребителей электрической энергии, реализуемое по команде ПА [5].

Энергетическая система – совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, соединенных между собой и связанных общностью режима в непрерывном процессе производства, преобразования и распределения электрической энергии и тепла при общем управлении этим режимом [2];

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	13
РАЗДЕЛ 1 ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ОЭС СИБИРИ.....	14
1.1 Общие сведения.....	14
1.2 Генерирующие мощности Красноярской и Тывинской ЭС.....	16
1.3 Формирование исходных данных.....	17
РАЗДЕЛ 2 РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ. УПРАВЛЯЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА СОХРАНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ.....	19
2.1 Характеристическое уравнение и его корни.....	19
2.2 Динамическая устойчивость.....	22
2.3 Способы анализа динамической устойчивости.....	26
2.4 Виды управляющих воздействий.....	28
2.4.1. Отключение генераторов, как мероприятие по сохранению динамической устойчивости.....	30
РАЗДЕЛ 3 ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС RUSTAV, КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ.....	34
3.1 Формирование данных для расчёта динамической устойчивости.....	35
3.1.1 Параметры генераторов.....	35
3.1.2 Параметры регуляторов скорости.....	39
3.1.3 Параметры регуляторов возбуждения.....	40
3.1.4 Параметры возбудителей.....	42
3.1.5 Сохранение данных.....	43
3.2 Автоматика и сценарий расчета.....	44
3.2.1 Пусковые органы.....	45
3.2.2 Элементы и модули логики.....	47
3.2.3 Действия.....	48
3.3 Расчет переходного процесса.....	50
3.3.1 Выбор параметров расчёта.....	50
3.3.2 Выбор контролируемых величин.....	52
3.4 Расчет шунта КЗ.....	54
РАЗДЕЛ 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ. РАСЧЁТ И АНАЛИЗ УСТАНОВИВШЕГОСЯ И ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМОВ.....	56
4.1 Моделирование схемы электрической сети и расчёт установившегося режима.....	56
4.2 Контроль предшествующего (доаварийного) режима.....	63
4.2.1 Анализ напряжений в узлах.....	63
4.2.2 Анализ токов в ветвях схемы.....	63
4.3 Расчёт и анализ динамической устойчивости генераторов Богучанской ГЭС.....	64
4.3.1 Расчёт и анализ ДУ при нормативном возмущении I-ой группы на линии Богучанская ГЭС – Озерная.....	64
4.3.2 Расчет ДУ при нормативном возмущении II группы на линии Богучанская ГЭС – Ангара.....	69
РАЗДЕЛ 5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	74
5.1 Оценка научного уровня НТИ.....	74
5.2 Организация и планирование научно-исследовательских работ.....	75
5.2.1 Структура работ в рамках НТИ.....	75
5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	76

5.2.3	Разработка графика проведения научного исследования	77
5.3	Смета затрат на проведение научных исследований.....	79
5.3.1	Материальные затраты	79
5.3.2	Основная заработная плата исполнителей	79
5.3.3	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	81
5.3.4	Накладные расходы	81
5.3.5	Амортизация основного оборудования	81
5.4	Оценка ресурсоэффективности НТИ	82
РАЗДЕЛ 6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....		85
	Введение	85
6.1	Производственная безопасность	85
6.1.1	Анализ опасных и вредных производственных факторов	85
6.2	Экологическая безопасность.....	90
6.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	91
6.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	93
6.4.1	Специальные правовые нормы трудового законодательства	93
6.4.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.....	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		98
ПРИЛОЖЕНИЕ А		
ПРИЛОЖЕНИЕ Б		
ПРИЛОЖЕНИЕ В		

ВВЕДЕНИЕ

Для современного развития энергетики характерно наличие крупных концентрированных энергосистем, связанных между собой межсистемными связями. В то же время продолжается создание крупных энергообъединений на уровне национальных и транснациональных энергосистем. Происходит внедрение в энергосистемы нового оборудования, оснащенного современными устройствами автоматического регулирования, присоединяются новые энергоемкие потребители. Все это приводит к усложнению динамических свойств энергосистем и увеличению размерности задачи анализа и управления режимами энергосистем и, в частности, оценки их динамической устойчивости.

Особое внимание уделяется разработке решений по повышению эффективности и надежности функционирования ЭС в аварийных режимах, после возникновения возмущений при КЗ и коммутационных переключениях. Решения могут быть приняты только после исследования динамической устойчивости параллельной работы генераторов с ЭС.

Для сохранения и повышения динамической устойчивости применяются следующие виды управляющих воздействий: ОГ, ОН, ДРТ, ОР, ДС, ИРТ, ЭТ, ФВ. Для ГЭС основным и наиболее распространенным видом УВ является ОГ. Способ реализации и эффективность такого решения рассматриваются в работе, поэтому целью выпускной квалификационной работы является разработка мероприятий по повышению динамической устойчивости параллельной работы генераторов Богучанской ГЭС с ОЭС Сибири.

РАЗДЕЛ 1 ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ОЭС СИБИРИ

1.1 Общие сведения

ОЭС Сибири – наиболее территориально протяженное объединение в ЕЭС России, охватывающее территорию от Омской области в Западной Сибири до Забайкальского края. ОЭС Сибири граничит с энергосистемами Урала, Востока, Казахстана, Монголии и является одним из самых крупных энергообъединений ЕЭС России. В составе ОЭС работают энергообъекты, расположенные на территориях Алтайского, Красноярского, Забайкальского краев, Омской, Томской, Новосибирской, Кемеровской, Иркутской областях, республиках Бурятия, Тыва и Хакасия, «Таймырэнерго» работает изолированно. В ОЭС объединены около 96 тыс. километров ВЛ напряжением 1150–110 кВ и более 50 ГВт генерирующих мощностей электростанций, более 50% из которых составляют мощности ГЭС.

В составе ЕЭС России нормальный режим работы ОЭС Сибири достигается за счет перетоков мощности в размере до 2 млн. кВт по транзиту Сибирь — Урал — Центр. Это обеспечивает компенсацию годовой неравномерности энергоотдачи ГЭС за счет резервов единой ЭС, а также делает возможным использование регулировочного диапазона ГЭС ОЭС Сибири для регулирования нагрузки в ЕЭС России.

В составе генерирующего оборудования ЕЭС России находит отражение большой гидроэнергетический потенциал России: на ГЭС приходится 21 % совокупной установленной мощности ЕЭС. Гидрогенерация выполняет важнейшую дополнительную функцию – обеспечивает функционирование системы автоматического регулирования частоты и перетоков мощности в ЕЭС России, необходимой для постоянного поддержания баланса производства и потребления электроэнергии.

Филиал ОАО «СО ЕЭС» «Объединенное диспетчерское управление энергосистемами Сибири» управляет режимами 10-ти энергосистем ОЭС Сибири, расположенных на территории 12-ти субъектов Российской

Федерации: республик Бурятия, Алтай, Хакасия и Тыва; Забайкальского, Алтайского и Красноярского краев; Новосибирской, Омской, Кемеровской Иркутской и Томской областей.

Режимами работы энергосистем Сибири управляют 10 филиалов ОАО «СО ЕЭС» – РДУ: Алтайское, Бурятское, Забайкальское, Иркутское, Красноярское, Новосибирское, Омское, Томское, Хакаское, Кузбасское, при этом в операционные зоны Алтайского РДУ входят энергетические системы Алтайского края и республики Алтай, Красноярского — Красноярского края и республики Тыва.

Электроэнергетический комплекс объединения образуют 105 тепловых и гидравлических электростанций суммарной установленной мощностью 51808,33 МВт (по данным на 01.01.2016). В том числе 102 станции мощностью 5 МВт и выше, с суммарной установленной мощностью 51803,47 МВт. На долю гидроэлектростанций приходится 25276,4 МВт (48,8%), на долю тепловых электростанций – 26516,73 МВт (50,4%), солнечных электростанций – 15,198 МВт (0,03%).

На территории Красноярского края и Республики Тыва расположено «РДУ энергосистемы Красноярского края и Республики Тыва» (Красноярское РДУ), являющееся филиалом ОАО «Системный оператор Единой энергетической системы» и выполняющее функции оперативно-диспетчерского управления объектами электроэнергетики на территории Красноярского края и Республики Тыва.

В управлении и ведении Филиала ОАО «СО ЕЭС» Красноярское РДУ находятся объекты генерации суммарной установленной электрической мощностью порядка 15900 МВт. Наиболее крупными из них являются ПАО Красноярская ГЭС, Березовская ГРЭС ОАО «Э.ОН Россия», Красноярская ГРЭС-2 ОАО «ОГК-2», ОАО «Назаровская ГРЭС» и ОАО «Богучанская ГЭС».

Богучанская ГЭС – четвертая гидравлическая электростанция в каскаде ГЭС на реке Ангара. Расположена на территории Красноярского края, на реке Ангара вблизи города Кодинск. Установленная электрическая мощность

электростанции составляет 2997 МВт (9 гидроагрегатов установленной электрической мощностью 333 МВт). На полную проектную мощность 2997 МВт станция вышла в июле 2015 года после того, как водохранилище заполнилось до отметки 208 метров.

Богучанская ГЭС является станцией сезонного регулирования и выполняет в ОЭС Сибири следующие функции:

- выдача мощности и выработки электроэнергии;
- принятие суточной и недельной неравномерности нагрузки;
- вращающегося нагрузочного резерва для регулирования частоты;
- аварийного резерва ОЭС Сибири по мощности и энергии;
- регулирование частоты и перетоков мощности.

1.2 Генерирующие мощности Красноярской и Тывинской ЭС

ЭС Красноярского края и Республики Тыва включают в себя объекты с высшим классом напряжения 500 (5 ПС и 4 электростанции), 220 и 110 кВ, 2 гидравлических, 8 ТЭЦ и 1 газотурбинную электростанцию с установленной мощностью более 50 МВт. Основные объекты ЭС: ПС 1150 кВ Итатская, ПС 500 кВ Ангара, ПС 500 кВ Енисей, ПС 500 кВ Камала-1, ПС 500 кВ Красноярская, Богучанская ГЭС, Красноярская ГЭС, Березовская ГРЭС, Красноярская ГРЭС-2, Красноярская ТЭЦ-1, Красноярская ТЭЦ-2, Красноярская ТЭЦ-3, Минусинская ТЭЦ, Назаровская ГРЭС, ТЭЦ ОАО «РУСАЛ-Ачинск» (ТЭЦ АГК).

Установленные мощности основных источников энергии Красноярской и Тывинской ЭС более 1000 МВт приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Источники энергии Красноярской и Тывинской ЭС.

Наименование объекта	Установленная мощность, МВт
Богучанская ГЭС	2997
Красноярская ГЭС	6000
Березовская ГРЭС	1600
Красноярская ГРЭС-2	1250
Назаровская ГРЭС	1308

Следует отметить, что в 2016 году крупным потребителем Богучанской ГЭС может стать Богучанский алюминиевый завод мощностью 588 тыс. тонн алюминия в год (до 50% всей выработки ГЭС), поэтому необходимо рассмотреть параллельную работу генераторов Богучанской ГЭС с ОЭС Сибири и разработать мероприятия по повышению динамической устойчивости генераторов Богучанской ГЭС в случае возникновения однофазного и двухфазного КЗ на ВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – Озерная и Богучанская ГЭС – Ангара.

1.3 Формирование исходных данных

Исходные данные по параметрам ЛЭП, генераторам, каталожным данным двухобмоточных трансформаторов и данные по автотрансформаторам приведены соответственно в таблицах 2 – 5.

Таблица 2 – Параметры ЛЭП

ВЛ	Марка провода	Длина линии L, км	$R_{л}, \text{ Ом}$	$X_{л}, \text{ Ом}$	$B_{л} \cdot 10^{-6}, \text{ См}$
Богучанская ГЭС – Ангара	АС 400/51	155	3,766	47,43	561,565
Богучанская ГЭС – Озерная		365	8,87	111,69	1322,395
ПС Озерная – Ангара		265,15	6,44	81,13	960,64

Таблица 3 – Параметры генераторов

Тип гидрогенератора – СВ1548/203-66УХЛ4

Параметры	Значение
Номинальная полная мощность, МВА	353
Номинальная активная мощность, МВт	333
Номинальный коэффициент мощности	0,9
Номинальное напряжение, кВ	15,75
Номинальный ток статора, А	13563
Индуктивные сопротивления, о.е.:	
синхронное по продольной оси, X_d	1,1
синхронное по поперечной оси, X_q	0,71

Параметры	Значение
переходное по продольной оси, X_d'	0,35
сверхпереходное по продольной оси, X_d''	0,24

Таблица 4 – Каталожные данные двухобмоточных трансформаторов

ПС	Тип	$S_{\text{ном}}$, МВА	Каталожные данные					Расчетные данные			
			$U_{\text{ном}}$, обмоток, кВ		u_k , %	ΔP_K , кВт	ΔP_X , кВт	I_x , %	R_T , Ом	X_T , Ом	ΔQ_x , квар
			ВН	НН							
Богучанская ГЭС	ТЦ 400000/50 0	400	525	20	13	800	350	0,4	1,4	89,5	1600
	ТЦ 400000/22 0	400	242	15,75	11	880	330	0,4	0,29	16,1	1600

Таблица 5 – Каталожные данные автотрансформаторов

ПС	Тип	$S_{\text{ном}}$, МВА	Каталожные данные						Расчетные данные											
			$U_{\text{ном}}$, обмоток, кВ			u_k , %			ΔP_K , кВт	ΔP_X , кВт	I_x , %	R_T , Ом			X_T , Ом			ΔQ_x , квар		
			ВН	СН	НН	ВС	ВН	СН				ВН	СН	НН	ВН	СН	НН			
Богучанская ГЭС	АОДЦН 167000/500/220	167	$500/\sqrt{3}$						325	125	0,4	0,65	0,65							2004
			$230/\sqrt{3}$																	
			11																	
			35																	
			21,5																	

РАЗДЕЛ 2 РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ. УПРАВЛЯЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА СОХРАНЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

2.1 Характеристическое уравнение и его корни

Изменение любого параметра режима после снятия малого возмущения может быть описано выражением вида:

$$\Delta y(t) = \sum_{i=1}^m C_i e^{\alpha_j t} + \sum_{i=m+1}^m C_i e^{\alpha_j t} \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (1)$$

где Δy – отклонение параметра режима от положения равновесия;

t – время, с;

C_i и φ_i – некоторые константы;

$C_i e^{\alpha_j t}$ – аperiодическая составляющая;

$C_i e^{\alpha_j t} \sin(\omega_i t + \varphi_i)$ – колебательная составляющая.

Присвоим аperiодической и колебательной составляющим номера (2) и (3), соответственно.

На рисунке 1 представлены различные изменения параметров режима после возмущения.

Общий характер движения (1) существенно зависит от знаков коэффициентов α . Если $\alpha < 0$, то составляющая (2) соответствует затухающему экспоненциальному движению (рис. 4,а), а (3) – затухающим колебаниям (рис. 4,б). При $\alpha > 0$ значение Δy по (2) и (3) возрастает и соответственно аperiодически и колебательно (рис. 4,в и г).

Из выражений (1)-(3) следует, что характер движения в целом $\Delta y(t)$ определяется знаками всех коэффициентов α_j ; если все $\alpha_j < 0$, то значение Δy стремится к нулю, т.е. режим возвращается к положению равновесия и, следовательно, устойчив. Если хотя бы одно значение α_j оказывается положительным, то устойчивость нарушается: составляющая движения, у

которых $\alpha_j < 0$, затухнут, а для которых $\alpha_j > 0$, будет неограниченно возрастать.

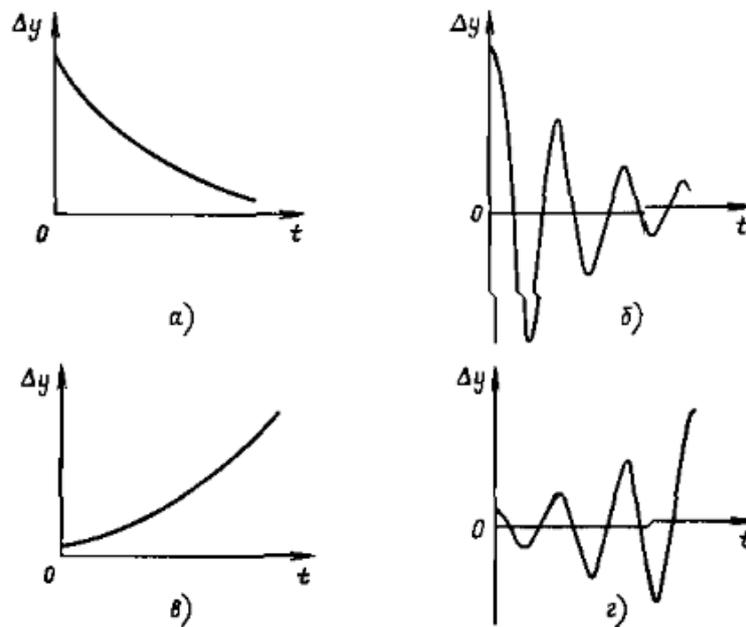


Рисунок 1 – Изменение параметров режима после возмущения
 а, б – затухающие; в, г – нарастающие; а, в – экспоненциальные; б, г –
 колебательные

Переходным процессам соответствует система уравнений:

$$T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_T - P_\Gamma \quad (4)$$

$$s = \frac{d \delta}{dt} \quad (5)$$

$$P_\Gamma = P_{\max} \sin \delta + k_D s \quad (6)$$

Переменными параметрами в (4 – 6) являются угол δ , скольжение s и активная мощность генератора P_Γ . В результате кратковременного возмущения эти параметры отклоняются от исходных значений δ_0 , $s_0=0$, $P_\Gamma = P_T$, соответствующих состоянию равновесия.

I этап анализа устойчивости: линеаризация уравнений в точке рассматриваемого режима и замена исходных переменных их отклонениями от положения равновесия. В случае уравнений (4)–(6) выполняется замена переменных: $\delta = \delta_0 + \Delta \delta_0$, $s = s_0 + \Delta s_0$, $P_\Gamma = P_{\Gamma 0} + \Delta P_\Gamma$:

$$\tau_J \frac{d^2}{dt^2} (\delta_0 + \Delta\delta) = P_T - P_{T0} - \Delta P_T \quad (7)$$

$$\Delta s = \frac{d}{dt} (\delta_0 + \Delta\delta) \quad (8)$$

$$P_{T0} + \Delta P_T = P_{\max} \sin \delta_0 + P_{\max} \cos \delta_0 \Delta\delta + k_D \Delta s \quad (9)$$

II этап: приведение системы линеаризованных уравнений к одному уравнению. путем исключения всех переменных, кроме одного. Если исключить, например, переменные ΔP_T , Δs получим:

$$\tau_J \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + k_D \frac{d \Delta\delta}{dt} + P_{\max} (\cos \delta_0) \Delta\delta = 0 \quad (10)$$

III этап: решение дифференциального уравнения. Осуществляется переход от дифференциального уравнения, содержащего производные переменной величины по времени, к эквивалентному уравнению в операторной форме. Этот переход сводится к замене d/dt на p , d^2/dt^2 на p^2 , где p – оператор. Из (10) следует:

$$(\tau_J p^2 + k_D p + P_{\max} \cos \delta_0) \Delta\delta = 0 \quad (11)$$

Так как рассматривается случай, когда $\Delta\delta \neq 0$, то

$$\tau_J p^2 + k_D p + P_{\max} \cos \delta_0 = 0 \quad (12)$$

Уравнение (12) называется характеристическим. Оно не зависит от того, какая переменная использовалась при его получении. При более сложной системе исходных дифференциальных уравнений повышается степень относительно p :

$$a_0 p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0 \quad (13)$$

Из процедуры получения характеристического уравнения следует, что все его коэффициенты a_0, a_1, \dots, a_n определяются параметрами исследуемой ЭС и ее режима и являются числами.

IV этап: решение алгебраического уравнения ($a_0 p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0$) относительно p .

Искомые значения α_j определяются как действительные части корней p_j ($j=1, 2, \dots, n$) характеристического уравнения. Число уравнений равно порядку n характеристического уравнения.

Корни могут быть действительными: $p=\alpha$, тогда каждому из соответствует составляющая вида (2), или комплексно–сопряженные: $p=\alpha+j\omega$ и $p=\alpha-j\omega$, тогда каждой паре соответствует составляющая вида (3)

В рассматриваемом примере уравнение (12) относительно p является квадратным и его два корня имеют вид:

$$p_{1,2} = \frac{-k_D \pm \sqrt{k_D^2 - 4\tau_J P_{\max} \cos \delta_0}}{2\tau_J} \quad (14)$$

Возможны три случая:

- 1) Оба корня действительны и отрицательны: $\alpha_1 < 0$, $\alpha_2 < 0$, т.е. система устойчива и возвращается к положению равновесия аperiodически, по закону суммы двух экспонент вида (2), показанных на рис. 4, а;
- 2) Корни комплексно-сопряженные, $\alpha < 0$, система устойчива, а затухающие колебания $\Delta\delta$ соответствует рис.4,б;
- 3) Корни действительны, причем $\alpha_1 > 0$, $\alpha_2 > 0$. Система неустойчива, отклонение угла нарастает аperiodически, без колебаний

2.2 Динамическая устойчивость

Динамическая устойчивость – это способность ЭС возвращаться в исходное состояние после больших возмущений.

Различают два вида динамической устойчивости:

- 1) Синхронная устойчивость – сохранение режима при больших колебаниях, но без проворота ($180^0 - 360^0$) ротора генератора.
- 2) Результирующая устойчивость – восстановление режима после кратковременного нарушения (например, при работе генераторов в течение некоторого времени или части ЭС несинхронно), но при восстановлении нормальной синхронной работы после нескольких проворотов ротора. Это восстановление может происходить как самостоятельно в силу внутренних свойств систем, так и под действием специальных устройств системной автоматики.

Любое внезапное нарушение режима ЭС, состоящей из электростанций, ЛЭП и нагрузок, вызывает качания синхронных машин (генераторов, синхронных двигателей и компенсаторов). При неблагоприятных условиях колебания могут стать такими большими, что отдельные машины или группы машин выпадут из синхронизма [4].

Рассмотрим причины возникновения качаний.

1) Аварии в ЭС сопровождаются резким изменением мощности, отдаваемой электростанциями в сеть. Регуляторы первичных двигателей обладают инерцией и реагируют на изменение мощности или, точнее, на изменение частоты вращения машины с запаздыванием. В результате равновесие между мощностью, отдаваемой генераторами, и мощностью, развиваемой первичными двигателями нарушается, на валу машин возникают избыточные моменты, которые вызывают изменение скорости вращения и относительное перемещение роторов.

Значения отдаваемой мощности и избыточных моментов, ускоряющих или замедляющих вращения роторов машин, в каждый момент времени определяются абсолютным значением и фазой ЭДС всех машин системы, изменяющиеся с течением времени. Изменение фаз связано с относительным перемещением роторов и зависит от инерции вращающихся масс, т.е. от механических свойств системы, тогда как изменение абсолютных значений ЭДС определяется преимущественно переходными электромагнитными процессами в машинах и зависит от характеристик автоматических регуляторов возбуждения (АРВ).

2) Внезапное изменение нагрузки, при отключении ЛЭП или трансформатора, при отключении генератора, при коротком замыкании (КЗ).

Из перечисленных видов аварий наиболее опасным возмущением являются КЗ, поэтому расчеты динамической устойчивости проводятся применительно к нарушению установившегося режима, причиной которого являются КЗ.

В требованиях к устойчивости энергосистем, наиболее тяжелые возмущения, называемые нормативными возмущения, подразделены на три группы (таблица 6).

Таблица 6 –Распределение возмущений по группам

Возмущения	Группы нормативных возмущений в сетях с ном напряжением, кВ:			
	110-220	330-500	750	1150
<i>КЗ на сетевом элементе, кроме системы (секции) шин:</i>				
Отключение сетевого элемента основными ¹ защитами при однофазном КЗ с успешным АПВ (для сетей 330 кВ и выше - О АПВ. 110-220 кВ - ТАПВ)	I	I	I	I
То же, но с неуспешным АПВ ²	I	I	I ³ , III	II
Отключение сетевого элемента основными защитами при трехфазном КЗ с успешным и неуспешным АПВ ²	II	-	-	-
Отключение сетевого элемента резервными защитами при однофазном КЗ с успешным и неуспешным АПВ ²	II	-	-	-
Отключение сетевого элемента основными защитами при двухфазном КЗ на землю с неуспешным АПВ ²	-	II	III	III
Отключение сетевого элемента действием УРОВ при однофазном КЗ с отказом одного выключателя ⁴	II	III	III	III
То же. но при двухфазном КЗ на землю	-	III	III	-
То же. но при трехфазном КЗ	III	-	-	-
<i>КЗ на системе (секции) шин:</i>				
Отключение СШ с однофазным КЗ. не связанное с разрывом связей между узлами сети	I	I	II	II
То же. но с разрывом связей	III	III	-	-

1 Или резервными защитами с не меньшим быстродействием

2 При обеспечении автоматического запрета АПВ в случае непогасания дуги неуспешное АПВ может не рассматриваться

3 На связи АЭС с энергосистемой

4 При этом учитываются отключения всех сетевых элементов (включая СШ), связанных с отключением смежных выключателей.

При исследовании динамической устойчивости особое внимание уделяется процессам в генераторах, поскольку именно они определяют характер переходного процесса в системе.

Электромагнитные переходные процессы в синхронных генераторах описываются при использовании системы координат d, q уравнениями, получившими название уравнений Парка – Горева.

$$\begin{aligned}
 U_d &= -r \cdot i_d - \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q - \psi_q\omega_s; \\
 U_q &= -r \cdot i_q - \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d + \psi_d\omega_s; \\
 U_f &= r_f \cdot i_f + \frac{d\psi_f}{dt}; \\
 T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} &= M_M - r_q \cdot \psi_d + r_d \cdot \psi_q;
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

где: U_d , U_q – продольная и поперечная составляющие напряжения в осях d и q ; $r \cdot i_d$ и $r \cdot i_q$ – падения напряжения в продольной и поперечной обмотке статора; $\frac{d\psi_d}{dt}$ и $\frac{d\psi_q}{dt}$ – функции потокосцепления или трансформаторные ЭДС; U_f – напряжение обмотки возбуждения, $r_f \cdot i_f$ – падение напряжения на активном сопротивлении обмотки возбуждения; $\frac{d\psi_f}{dt}$ – ЭДС, индуктируемая в обмотке возбуждения; $\psi_d\omega_s, \psi_q\omega_s$ – ЭДС скольжения; $\psi_d\omega, \psi_q\omega$ – ЭДС синхронного вращения; T_j – механическая постоянная инерции; M_M – вращающий момент.

Первые три выражения – уравнения напряжений синхронной машины в осях d и q и обмотки возбуждения соответственно. Последнее выражение – уравнение движения ротора.

Эти уравнения дают полную характеристику переходных процессов и отражают изменения периодических и аperiodических составляющих токов, а также свободных токов, возникающих в замкнутых контурах машины при появлении скольжения между ротором и полем реакции якоря.

При использовании модели синхронной машины, которая основана на преобразовании Парка-Горева для исследования электромеханических переходных процессов уравнения (15) упрощают, пренебрегая активным сопротивлением обмотки статора, ЭДС скольжения и ЭДС трансформации. Приближенное описание переходных процессов дается упрощенными уравнениями Парка – Горева.

$$\begin{aligned}
 U_d &= -\psi_q \omega; \\
 U_q &= \psi_d \omega; \\
 T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} &= P_{\text{мех}} - P_{\text{эл}}; \\
 \frac{dE'_q}{dt} &= \frac{E_{qe} - E_q}{T_{d0}}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Динамическая устойчивость генераторов оценивается с точки зрения сохранения режима выдачи мощности в сеть (без нарушения синхронизма) в случае внезапного нарушения рабочего режима [9].

Если выпавший из синхронизма генератор не отключается от сети, то и, работая в АР, он выдает в сеть некоторую мощность, а входя в синхронизм путем ресинхронизации (восстановление синхронизма машин в процессе АР), он быстро увеличивает мощность [10].

Если генератор вышел из синхронизма и некоторое время проработал в АР, а затем восстановил свою синхронную работу, близкую к параметрам исходного режима, то такой генератор нельзя в полном смысле считать неустойчивым, его следует рассматривать как генератор, обладающий результирующей устойчивостью, поскольку нарушения электроснабжения потребителей не происходит [9].

2.3 Способы анализа динамической устойчивости

Самыми распространенными способами анализа динамической устойчивости являются:

- 1) правило площадей;
- 2) метод последовательных интервалов.

С помощью правила площадей можно вычислить коэффициент запаса динамической устойчивости [9]. Коэффициент запаса динамической устойчивости – это отношение площади возможного торможения к площади ускорения, является мерой запаса динамической устойчивости системы:

$$k_D = \frac{S_T}{S_Y}
 \tag{17}$$

Помимо коэффициента запаса вычисляют предельный угол отключения $\delta_{отк}$ поврежденного участка, так как быстрая ликвидация аварии может повысить динамическую устойчивость системы.

Значение угла отключения определяется равенством площади ускорения и площади возможного торможения. Однако для практических целей вычисление только угла отключения является недостаточным. Для того чтобы предъявить требования к автоматике в отношении скорости отключения, необходимо знать не только угол $\delta_{отк}$, а еще и промежуток времени, в течение которого ротор успеет достигнуть этого угла, т.е. предельно допустимое время отключения КЗ.

С помощью правила площадей определить время отключения невозможно, поэтому обращаются к методу последовательных интервалов.

Метод последовательных интервалов, представляющий собой способ численного решения дифференциальных уравнений (16), описывающих переходные электромеханические процессы, является основным методом анализа динамической устойчивости сложных систем.

Достоинством метода является то обстоятельство, что он дает картину протекания процесса во времени и, благодаря этому, позволяет ввести в расчет факторы, влияние которых зависит от времени. Например, с помощью метода последовательных интервалов можно установить предельное время отключения КЗ, учесть действие АРВ, изменение реакции якоря во времени. Метод последовательных интервалов лучше применять совместно с правилом площадей: пользуясь правилом площадей, определить угол $\delta_{отк}$, при котором должно произойти отключение КЗ и с помощью метода последовательных интервалов вычислить время, в течение которого ротор достигает этого угла. Найденный промежуток времени и даст предельное время отключения.

Поскольку в случае нескольких электростанций имеется несколько независимых переменных — относительных углов между роторами машин, установить заранее значение предельных углов отключения КЗ для сложных

систем невозможно. Поэтому расчеты динамической устойчивости сложных систем выполняются методом последовательных интервалов для определенного времени отключения КЗ, которым приходится задаваться, и продолжаются не только до момента отключения КЗ, но и после отключения, до тех пор, пока не будет установлено, нарушается устойчивость в данных условиях или нет, о чем можно судить по характеру изменения относительных углов. Признаком неустойчивости является неограниченное возрастание некоторой части относительных углов [11].

Если при изменении относительных углов нарушается устойчивость при принятом в начале расчета времени отключения КЗ, то определяется предельная длительность КЗ, расчете которой повторяют при уменьшенном значении времени отключения поврежденной цепи.

Зависимости углов δ генераторов от времени переходного процесса являются основным показателем сохранения или нарушения динамической устойчивости.

В простых системах достаточно убедиться, что угол δ , достигнув максимального значения, начинает уменьшаться. Это свидетельствует о сохранении динамической устойчивости и позволяет прекратить расчет. В сложных энергосистемах с десятками генераторов возможны нарушения устойчивости после нескольких качаний, поэтому расчеты продолжаются до того, пока не станут явными изменения углов δ всех генераторов.

Таким образом, решение уравнения (16) в форме $\delta=f(t)$ дает картину изменения угла во времени и позволяет установить, остается ли машина в синхронизме [11].

2.4 Виды управляющих воздействий

УВ можно разделить на длительные (не снимающиеся) и кратковременные длительностью от нескольких десятых долей секунды до нескольких секунд.

Воздействия первого вида: ОГ, ОН, ДРТ, ДС, ОР используются преимущественно для обеспечения нормативного запаса устойчивости в

послеаварийных режимах и оказывают воздействие на условия динамической устойчивости.

Второй вид воздействий: ИРТ, ЭТ, ФВ используется для повышения динамической устойчивости.

Охарактеризуем некоторые наиболее важные из перечисленных УВ.

ОГ в основном используется для предотвращения нарушения устойчивости при аварийных возмущениях с отключением сетевых элементов ЭС. ОГ применяется как на ГЭС, так и на ТЭС (большой частью блочных). В блочной схеме генератор-трансформатор воздействие может выполняться путем отключения выключателей со стороны низшего напряжения трансформатора или выключателей с высокой стороны. Задачи повышения динамической устойчивости ГЭС в основном решаются с помощью ОГ [8].

ОН используется для предотвращения нарушения устойчивости, в случае необходимости разгрузки «опасного сечения». ОН следует выполнять в приемной части ЭС. При этом механизм воздействия на ЭС оказывается в значительной степени аналогичным воздействию от ОГ в передающей части.

ИРТ осуществляется подачей дозированного импульса в систему регулирования турбины. В результате быстрого частичного или полного прикрытия регулирующих клапанов при дальнейшем их открытии имеет место кратковременное снижение мощности турбины и торможение ротора агрегата.

ДС осуществляется во время переходного процесса путем отключения ЛЭП, которые связывают отдельные части ЭС, или же отключением междушинных выключателей на электрических станциях и ПС. Для предотвращения распространения асинхронного хода ДС используется в качестве одного из основных УВ в специальной автоматике ликвидации асинхронного хода. При асинхронном ходе большой опасностью является резкое снижение напряжения в отдельных узлах, опасность возникает и при распространении его на другие участки ЭС, т.е. появление трех и более несинхронно работающих частей ЭС.

ЭТ предназначено для гашения избыточной энергии, запасенной роторами генераторов во время КЗ. При кратковременном включении активных нагрузочных – тормозных резисторов – в них превращается в теплоту значительная часть энергии, благодаря чему уменьшается избыточная кинетическая энергия роторов агрегатов. Основной задачей ЭТ является предотвращение выпадения из синхронизма генераторов при увеличении угла δ в первом цикле синхронных качаний.

ЭТ применяется в случае неэффективности использования для предотвращения нарушения динамической устойчивости генерирующего оборудования электростанций КРТ и ОГ на ТЭС, АЭС и ОГ на ГЭС.

В настоящее время практическое использование установок ЭТ генераторов встречается мало из-за высокой стоимости этих установок.

В Российской практике наиболее часто используются такие средства, как ОГ, ДС и ОН. Менее распространено регулирование мощности турбин. Средства с невысокой эффективностью: ФВ, РВ, ОР используются, как правило, в качестве дополнительных к другим более эффективным средствам воздействия на переходные режимы ЭЭС [5].

2.4.1. Отключение генераторов, как мероприятие по сохранению динамической устойчивости

Рассмотрим основной вид УВ, применяемый на ГЭС, – ОГ.

ОГ обеспечивает повышение уровня статической устойчивости в послеаварийных режимах, и оказывает воздействие на условия динамической устойчивости. Преимущество ОГ заключается в высокой эффективности и простоте реализации и осуществляется отключением генераторных или блочных выключателей, с минимально возможным запаздыванием относительно момента возникновения аварийного возмущения [8]. Отключаемые выключатели выбираются с учетом быстродействия и надежности отключения, с учетом количества генераторов, которые отключаются одним выключателем, с учетом схемы первичных соединений электростанции [12, 17].

Возврат в работу отключенных генераторов производится в течение 30 минут после стабилизации режима. При отключении гидрогенераторов существуют вредные последствия, заключающиеся в том, что возникают повышенные нагрузки на подпятник и обмотку возбуждения, и поэтому ресурс по числу включений и отключений у гидрогенераторов ограничен [12].

После возникновения КЗ возникает небаланс между механической мощностью турбины и электрической мощностью генератора, вследствие чего ротор генератора ускоряется. Применение ОГ снижает мощность турбины, тем самым уменьшает имеющийся небаланс мощности. Для системы с электрическими машинами одинаковой номинальной мощностью и нагрузкой эквивалентная механическая мощность при отключении m машин составит:

$$P_{\text{мех}}^{\text{от}} = P_0 \frac{n-m}{n} \quad (18)$$

где n -общее число работающих электрических машин [11].

При применении ОГ по мере увеличения числа отключенных генераторов происходит не только разгрузка электропередачи, но может несколько снижаться предел передаваемой мощности по следующим причинам:

1) Если в блочной схеме автоматического регулятора возбуждения поддерживается неизменным напряжение на выводах генератора и не исчерпан резерв реактивной мощности оставшихся в работе генераторов, то по мере ОГ, возрастает и эквивалентное взаимное сопротивление в результате уменьшения числа параллельно работающих трансформаторных блоков;

2) Если резерв реактивной мощности исчерпан, т.е. ток возбуждения достиг максимальной величины, то напряжение на выводах генератора начнет снижаться, и в результате этого произойдет дальнейшее снижение предела передаваемой мощности. [17].

Поскольку снижение характеристики электрической мощности значительно меньше, чем снижение механической мощности, то отключение синхронных машин приводит к увеличению площадки торможения.

На рисунке 2 показаны угловые характеристики для нормального, аварийного и послеаварийного режимов при ОГ.

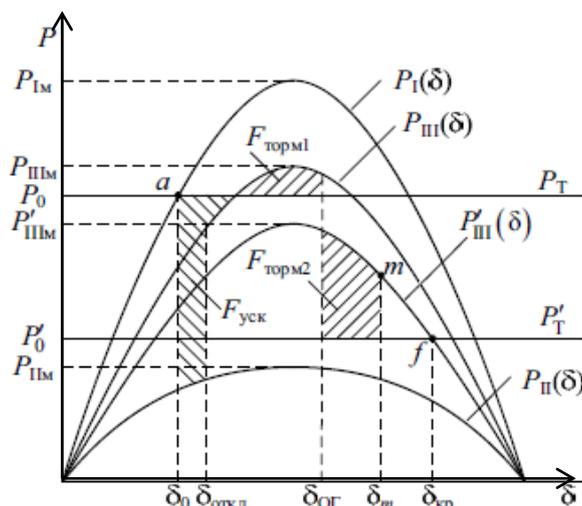


Рисунок 2 – Угловые характеристики при ОГ

Число отключенных генераторов должно быть определено в соответствии с режимом системы (передаваемой мощностью), тяжестью возмущения (величиной сброса нагрузки на генераторах) и условием обеспечения устойчивости [8].

Отключение части генераторов соответствует снижению эквивалентной мощности турбин станции. В результате этого увеличивается площадка торможения, а при быстром отключении уменьшается и площадка ускорения. Всё это позволяет сохранить синхронность параллельной работы оставшихся генераторов с ЭС.

Для начала необходимо обеспечить предотвращение нарушения устойчивости, а именно: определить величину УВ (количество ОГ) и произвести их отключение, при наиболее вероятном сценарии развития аварии.

Далее (после снятия возмущения) необходимо проанализировать послеаварийную ситуацию и, как следствие, осуществить дополнительное ОГ, чтобы обеспечить предотвращение нарушения устойчивости [15].

Таким образом, отключение части генераторов, увеличивая площадку торможения и уменьшая действенную площадку ускорения, приводит к улучшению устойчивости оставшихся в работе синхронных машин. Эффективность отключения может быть повышена путем целенаправленного

распределения реактивной нагрузки между параллельно работающими генераторами [12].

РАЗДЕЛ 3 ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС RUSTAB, КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

Программный комплекс RUSTab разработан для расчета и анализа динамической устойчивости ЭС, но также позволяет производить расчет и анализ установившихся режимов.

Для проведения расчетов следует сформировать исходные данные схемы электрической сети:

- 1) Начертить схему замещения (Приложение Б);
- 2) Все узлы электрической сети пронумеровать, включая промежуточные. Узел в исходных данных программы соответствует электрическим шинам. Номер узла должен быть уникальным положительным числом, сквозная нумерация необязательна;
- 3) Для каждого узла определить номинальное напряжение;
- 4) Для каждого узла нагрузки определить активную и реактивную мощность;
- 5) Для узлов с синхронными машинами (генераторы, компенсаторы) определить активную мощность генерации, пределы регулирования реактивной мощности и заданный модуль напряжения;
- 6) При наличии в узле батареи статических конденсаторов (БСК) или шунтирующих реакторов (ШР) – определить их проводимость;
- 7) Для ЛЭП определить продольное сопротивление и проводимость на землю (проводимость задается в мкСм, емкостная проводимость отображается со знаком минус);
- 8) Для трансформаторов определить сопротивление, приведенное к стороне высокого напряжения, проводимость шунта на землю, и коэффициент трансформации, равный отношению низкого номинального напряжения к высокому (коэффициент трансформации будет меньше единицы);

9) АТ и трехобмоточные трансформаторы представить по схеме звезда с промежуточным узлом и тремя ветвями, две из которых имеют коэффициенты трансформации;

10) Если в электрической сети имеются группы параллельных ЛЭП, следует присвоить свой номер каждой из них в группе;

11) Определиться с конструктивными составляющими генераторов (возбудители, регуляторы возбуждения, регуляторы скорости);

12) Определиться с данными по автоматике и описанием аварийной ситуации.

При импорте данных установившегося режима необходимо загрузить файл в формате rg2 и сохранить его по типу «динамика.rst». Файл дополняется полями, необходимыми для расчета динамики, или просто изменить расширение файла UR из rg2 в rst.

Чтобы упростить ввод данных, следует создать и вести справочник оборудования, где описаны типовые характеристики устройств. Этот справочник хранится в отдельном файле (оборудование.brd), который возможно загрузить с любым файлом динамики.

3.1 Формирование данных для расчёта динамической устойчивости

В начале работы формируется таблица исходных данных. Для этого производят следующие действия: Открыть – Динамика (ИД).

Первым этапом является ввод данных по генераторам, регуляторам скорости, регуляторам возбуждения и возбудителям.

3.1.1 Параметры генераторов

Исходные данные по генераторам последовательно вводятся в таблицу, расположенную по ссылке: Открыть – Динамика (ИД) – Генераторы (ИД) (рисунок 3).

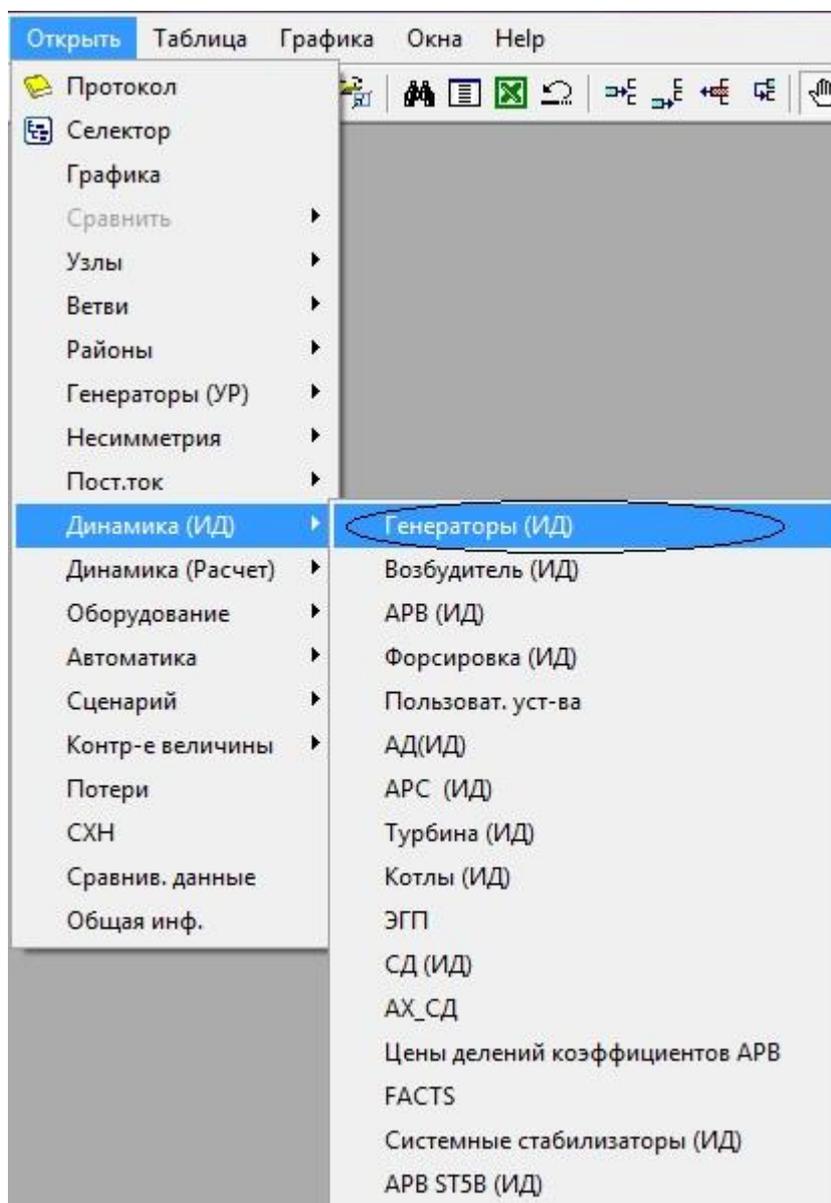


Рисунок 3 – Генераторы (ИД)

Параметры генераторов, вводимые в ПК RUSTab, представлены в таблице 7

Таблица 7 – Параметры генераторов

Параметр	Описание
S	Состояние генератора
Naгр	Номер генератора
Название	Название генератора
Модель	Модель генератора
Марка	Марка генератора
K_ген	Число генераторов одной марки
N_взб	Номер возбуждителя
N_PC	Номер РС
P	Активная мощность генерации
Q	Реактивная мощность генерации
Pном	Номинальная мощность генератора
Uген	Номинальное напряжение генератора

Параметр	Описание
$\cos \varphi$	Номинальный коэффициент мощности
$K_{\text{демп}}$	Коэффициент демпфирования
M_j	Механическая постоянная инерции генератора вместе с турбиной
X'_d	Переходное реактивное сопротивление по продольной оси
X_d	Синхронное реактивное сопротивление по продольной оси
X_q	Синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси
X''_d	Сверхпереходное реактивное сопротивление по продольной оси
X''_q	Сверхпереходное реактивное сопротивление по поперечной оси
T'_{do}	Переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке статора
T''_{do}	Сверхпереходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке статора
T''_{q0}	Сверхпереходная постоянная времени по поперечной оси при разомкнутой обмотке статора
X'_q	Переходное реактивное сопротивление по поперечной оси
X_{-1}	Реактивное сопротивление рассеивания
X_2	Реактивное сопротивление обратной последовательности
X_0	Реактивное сопротивление нулевой последовательности
T'_{do}	Переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке статора.

Поле Марка содержит список названий оборудования из соответствующей таблицы «Оборудование». Данные по оборудованию не привязаны к конкретной схеме и существуют в качестве справочника, сведения из которого могут быть.

Правдоподобная имитация движения энергосистемы ее моделью возможна при условии, что при проведении расчетов для вращающихся машин будут выбраны динамические модели на основе уравнений Парка-Горева [8].

В ПК RUSTab реализованы 7 моделей синхронных машин. Модели генераторов показаны в таблице 8 и расположены в порядке повышения сложности, каждая более сложная дополняет все предыдущие как по исходной информации, так и по результатам расчета.

Таблица 8 – Модели генераторов

№	Название	Описание	Параметры	Умолчания	Расчеты	Внешние
1	ШБМ	Генератор бесконечной мощности	X'_d		P, Q, V, I	
2	Ур. движения	Классическая модель – ЭДС за сопротивлением	$M_j(T_j)$ $K_{\text{демп}}$		δ s	P_T s_u
3	1к- E'_q	Контур обмотки	X_d	$=X'_d$	E'_q	E_{qe}

№	Название	Описание	Параметры	Умолчания	Расчеты	Внешние
		возбуждения (1 контур)	X_q T_{do}	$=X_d$ $=5$	E_q (ток возб)	
4	3к-ЭДС	3-х контурная модель в форме ЭДС	X''_d X''_q T''_{do} T''_{qo}	$=0,1X''_d$ $=X''_d$ $=0,2$ $=0,5$	E''_q E''_d	
5	3к-Mustang	3-х контурная модель Мустанга	-	-	-	-
6	3к-Парк	3-х контурная модель в форме Парка	X_σ	$=0,8X''_d$		
7	4к-Парк	4-х контурная модель в форме Парка	X'_q	$=X_q$	E'_d	

Трехконтурную модель в форме Парка следует применять для учета генераторов наиболее мощных электростанций, чьи переходные процессы могут оказать решающее влияние на результаты расчета, а также для генераторов, вблизи места возмущения. Для остальных генераторов следует рассмотреть возможность их упрощенного описания – постоянной ЭДС E' за сопротивлением x_d' [7].

Пример ввода исходных данных генераторов представлен на рисунке 4.

N узла	Модель	Марка	K_ген	N_взт	N_PC	P	Q	P_ном	J_г_ном	S(Ф)_н	K_демп	Mj	Xd	Xd'	Xq	Xq'	Xq''	Td0	Td0'	Td0''	Xq	Xq'	Xq''	X0	Tq0
1	3к-Парк	СВ 1548/20	1	1	320	333	16	0.9	7	0.35	1.1	0.71	0.24	0.02	8.65	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
2	3к-Парк	СВ 1548/20	2	2	300	333	16	0.9	7	0.35	1.1	0.71	0.24	0.02	8.65	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
3	3к-Парк	СВ 1548/20	3	3	320	333	16	0.9	7	0.35	1.1	0.71	0.24	0.02	8.65	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
4	3к-Парк	СВ 1548/20	4	4	320	333	16	0.9	7	0.35	1.1	0.71	0.24	0.02	8.65	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
5	3к-Парк	СВ 1548/20	5	5	300	333	16	0.9	7	0.35	1.1	0.71	0.24	0.02	8.65	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
6	3к-Парк	СВ 1548/20	6	6	300	333	16	0.9	7	0.35	1.1	0.71	0.24	0.02	8.65	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
7	3к-Парк	СВ 1548/20	7	7	300	333	16	0.9	7	0.35	1.1	0.71	0.24	0.02	8.65	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
8	3к-Парк	СВ 1548/20	8	8	300	333	16	0.9	7	0.35	1.1	0.71	0.24	0.02	8.65	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
9	3к-Парк	СВ 1548/20	9	9	300	333	16	0.9	7	0.35	1.1	0.71	0.24	0.02	8.65	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02

Рисунок 4 – Ввод данных о генераторах

Примечания:

1) Начиная с модели 1, к генератору может быть подключен регулятор скорости, а с модели 2 – возбудитель;

1) Ввод информации о генераторах осуществляется построчно для каждого генератора с занесением числовых значений в соответственные поля.

Если же, в каком-либо поле числовое значение отсутствует, то это значит, что параметр равен нулю;

2) Для нескольких генераторов с однотипными параметрами можно задавать число работающих блоков (число 0, означает, что работает 1 генератор), в этом случае все параметры, за исключением мощности генерации задаются для одного блока;

3) Все параметры исходных данных сгруппированы в таблицу «Генераторы (ИД)», а результаты расчета – в таблицу «Генераторы (Результаты)». Согласно принятому правилу электрические величины, связанные с установившимся режимом, не меняются в ходе расчета динамики. Поэтому мощности генератора в УР (таблица «Генераторы (ИД)» и в ходе расчета динамики «Генераторы (Результаты)») записываются в разные поля базы данных и имеют разные названия.

3.1.2 Параметры регуляторов скорости

Все исходные данные для моделирования автоматических регуляторов скорости (АРС) вносятся в таблицу, расположенную: Открыть – Динамика (ИД) – АРС (ИД) (рисунок 5).

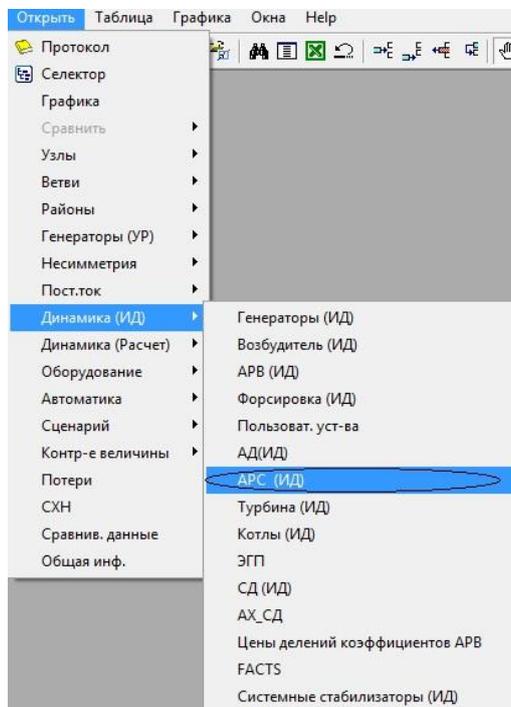
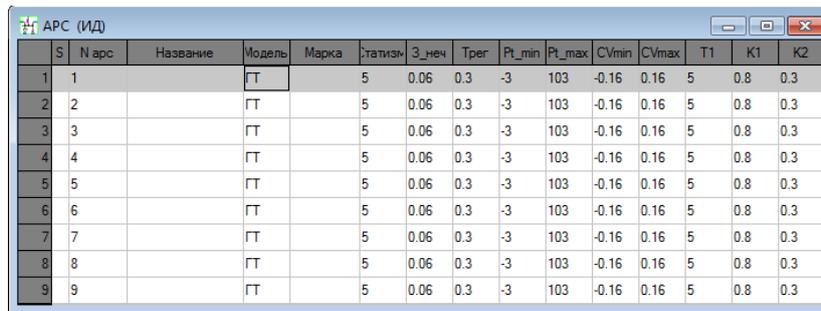


Рисунок 5 – АРС (ИД)

Пример ввода данных по АРС приведены на рисунке 6.



S	N арс	Название	Модель	Марка	Статизм	Э_неч	Трег	Pt_min	Pt_max	CVmin	CVmax	T1	K1	K2
1	1		ГТ		5	0.06	0.3	-3	103	-0.16	0.16	5	0.8	0.3
2	2		ГТ		5	0.06	0.3	-3	103	-0.16	0.16	5	0.8	0.3
3	3		ГТ		5	0.06	0.3	-3	103	-0.16	0.16	5	0.8	0.3
4	4		ГТ		5	0.06	0.3	-3	103	-0.16	0.16	5	0.8	0.3
5	5		ГТ		5	0.06	0.3	-3	103	-0.16	0.16	5	0.8	0.3
6	6		ГТ		5	0.06	0.3	-3	103	-0.16	0.16	5	0.8	0.3
7	7		ГТ		5	0.06	0.3	-3	103	-0.16	0.16	5	0.8	0.3
8	8		ГТ		5	0.06	0.3	-3	103	-0.16	0.16	5	0.8	0.3
9	9		ГТ		5	0.06	0.3	-3	103	-0.16	0.16	5	0.8	0.3

Рисунок 6 – Ввод данных о АРС

Особые замечания:

- 2) Номера РС должны быть уникальными для каждого генератора и возможно их совпадение с его номером;
- 3) Для каждого АРС ввод информации осуществляется построчно с занесением необходимых численных значений в соответствующие поля. Если же, в каком-либо поле числовое значение отсутствует, то это значит, что параметр равен нулю.

3.1.3 Параметры регуляторов возбуждения

Регулирование возбуждения генераторов оказывает существенное влияние на движение ЭС при больших возмущениях и применении УВ [9].

Для моделирования АРВ все исходные данные записываются в таблицу, которая расположена: Открыть – Динамика (ИД) – АРВ (ИД) (рисунок 7).

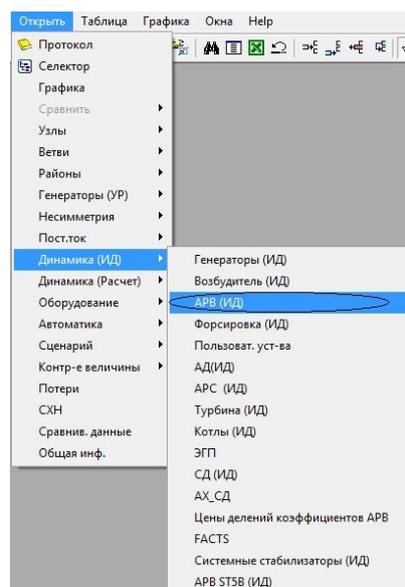


Рисунок 7 – АРВ (ИД)

Описание параметров АРВ представлено в таблице 9.

Таблица 9 – Параметры регуляторов возбуждения

Параметр	Описание
S	Состояние АРВ
Naгр	Номер АРВ
Название	Название АРВ
Модель	Модель АРВ. Элементы перечисления: Автовыбор Выбор Пользов. Упрощенная Полная.
Марка	Марка АРВ
T _{рв}	Постоянная времени регулятора возбуждения [с].
U _{min} , U _{max}	Ограничения входного сигнала РВ [ед.ном.воз.].
K _u	Коэффициент регулирования по отклонению напряжения [(ед. ном. воз.)/(ед. напр.)]
K' _u	Коэффициент регулирования по производной напряжения [делений]
K' _{If}	Коэффициент регулирования по производной тока ротора [делений]
K _f	Коэффициент регулирования по отклонению частоты на шинах генератора от ее предшествующего значения [делений]
K' _f	Коэффициент регулирования по производной частоты [делений]
T _f	Постоянная времени в канале отклонения частоты [с]
ALFA	Коэффициент, позволяющий учесть изменение уставки по напряжению при отклонении частоты в сети [о.е.]

Пример ввода исходных данных АРВ представлен на рисунке 8.

S	Naгр	Название	Модель	Марка	T _{рв}	K _u	K _u '	K' _{If}	K _f	K' _f	T _f	U _{min}	U _{max}
1	1		АвтоВыбор		0.04	50	10.8	6.5	5	0.9	-6	6	
2	2		АвтоВыбор		0.04	50	10.8	6.5	5	0.9	-6	6	
3	3		АвтоВыбор		0.04	50	10.8	6.5	5	0.9	-6	6	
4	4		АвтоВыбор		0.04	50	10.8	6.5	5	0.9	-6	6	
5	5		АвтоВыбор		0.04	50	10.8	6.5	5	0.9	-6	6	
6	6		АвтоВыбор		0.04	50	10.8	6.5	5	0.9	-6	6	
7	7		АвтоВыбор		0.04	50	10.8	6.5	5	0.9	-6	6	
8	8		АвтоВыбор		0.04	50	10.8	6.5	5	0.9	-6	6	
9													

Рисунок 8 – Ввод данных об АРВ

Особые замечания:

1) Номера РВ должны быть уникальными для каждого генератора и возможно их совпадение с номером генератора;

4) Для каждого РВ ввод информации об АРВ осуществляется построчно с занесением необходимых численных значений в соответствующие поля. Если же, в каком-либо поле числовое значение отсутствует, то это значит, что параметр равен нулю.

3.1.4 Параметры возбудителей

Таблица для ввода параметров возбудителей расположена: Открыть – Динамика (ИД) – Возбудитель (ИД) (рисунок 9).

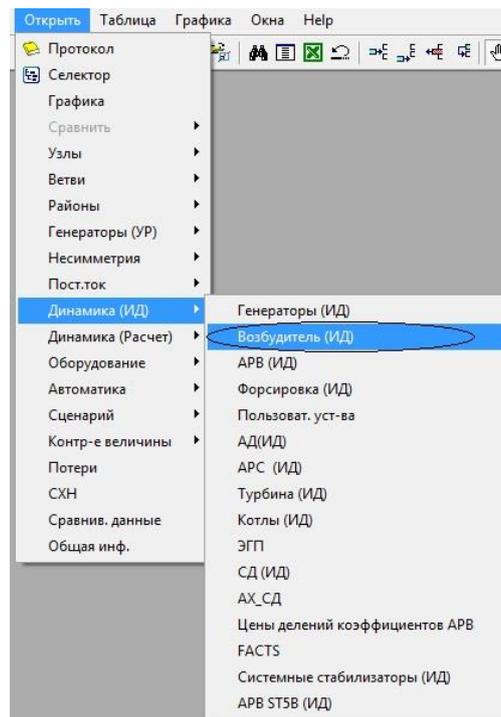


Рисунок 9 – Возбудитель (ИД)

Описание параметров возбудителей представлено в таблице 10.

Таблица 10 – Параметры возбудителей

Параметр	Описание
S	Состояние возбудителя
Naгр	Номер возбудителя
Название	Название возбудителя
Модель	Модель возбудителя. Элементы перечисления: Автовыбор Выбор Пользов. Упрощенная Полная.
Марка	Марка возбудителя
N_APB	Номер узла, соответствующий номеру узла генератора с возбудителем
N форс	Номер форсировки
T_возб	Постоянная времени возбудителя
Uf_min, Uf_max	Максимальное и минимальное значение напряжения возбуждения
Ifmin, Ifmax	Максимальное и минимальное значения тока возбуждения
K_иг	Коэффициент регулирования по отклонению тока статора
K_иф	Коэффициент регулирования по отклонению тока ротора
Тип	Тип возбуждения. Элементы перечисления: Независимое/Зависимое

Пример ввода данных по возбудителям, представлены на рисунке 10.

S	N агр	Название	Модель	Марка	I_APE	N форс	T_возб	K_ir	K_if	Uf_min	Uf_max	If_min	If_max	Тип
1	1		АвтоВь				0.04			-1.6	2	0.6	2	Неза
2	2		АвтоВь				0.04			-1.6	2	0.6	2	Неза
3	3		АвтоВь				0.04			-1.6	2	0.6	2	Неза
4	4		АвтоВь				0.04			-1.6	2	0.6	2	Неза
5	5		АвтоВь				0.04			-1.6	2	0.6	2	Неза
6	6		АвтоВь				0.04			-1.6	2	0.6	2	Неза
7	7		АвтоВь				0.04			-1.6	2	0.6	2	Неза
8	8		АвтоВь				0.04			-1.6	2	0.6	2	Неза
9	9		АвтоВь				0.04			-1.6	2	0.6	2	Неза

Рисунок 10 – Ввод данных о возбудителях

Примечания:

1) Для каждого генератора номер возбудителя должен быть уникальным и может совпадать номером генератора;

2) Ввод данных о возбудителе для каждого возбудителя осуществляется построчно с занесением нужных численных значений в соответственные поля. Если же, в каком-либо поле числовое значение отсутствует, то это значит, что параметр равен нулю.

3.1.5 Сохранение данных

После того, как все таблицы с исходными данными заполнены, следует произвести их сохранение соответственно процедуре: Главное меню – Файлы – Сохранить как (рисунок 11).

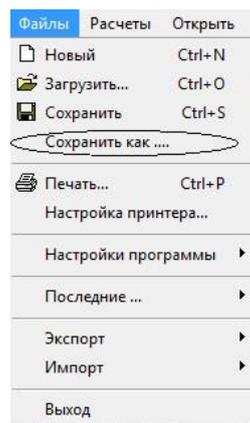


Рисунок 11 – Сохранение данных

Данные о генераторах, АРВ, возбудителях и режим объединяются в один файл и сохраняются как – динамика.rst. (рисунок 12)

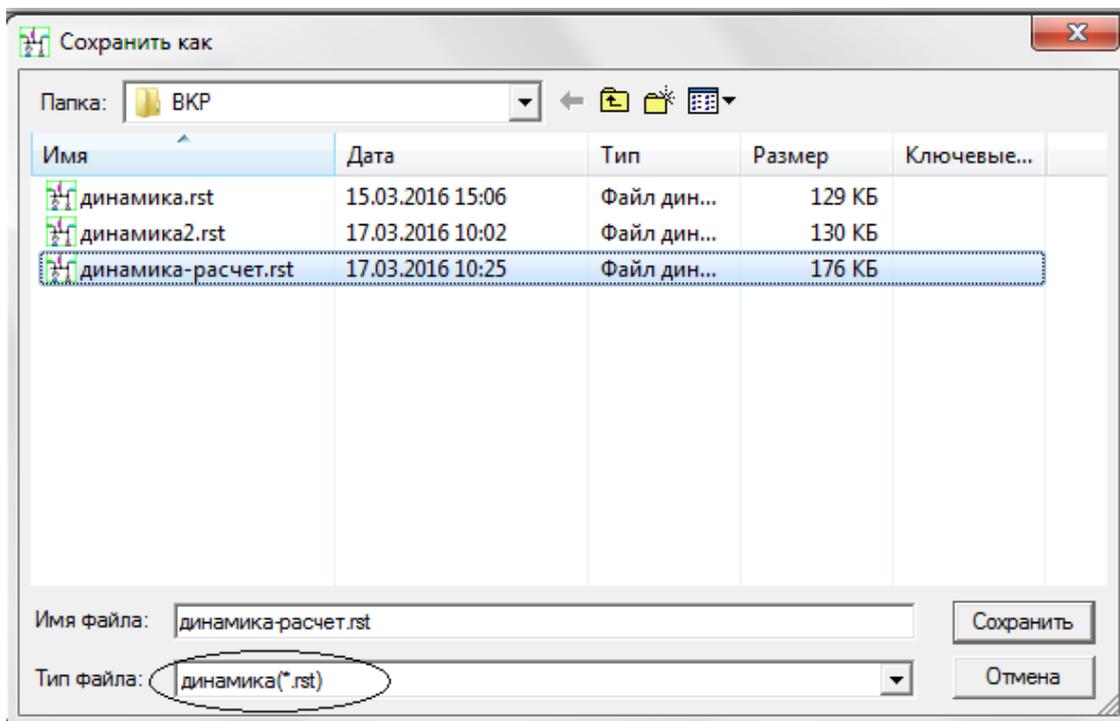


Рисунок 12 – Сохранение данных динамики

3.2 Автоматика и сценарий расчета

В RUSTab существует система моделирования событий, которые происходят в процессе расчета. Такая система объединяет две подсистемы, которые очень близки по смыслу: подсистема моделирования автоматике и подсистема моделирования сценария расчета динамики.

Описание сценариев хранится в шаблоне «сценарий.scn», описание автоматике – «автоматика.dfw». Описание сценария задается в трех таблицах «Открыть/Сценарий», описание автоматике в трех таблицах «Открыть/Автоматика». Для пользователя каждая подсистема представлена в трех однотипных таблицах – «Пусковые органы», «Логика», «Действия». Оперировать с параметрами (токи, мощности, состояние) объектов (генератор N, узел N, Ветвь N1,N2) модели (текущей расчетной схемы) таблиц «Пусковые органы» и «Действия». Для измерения параметров предназначена таблица «Пусковые органы», а для изменения параметров расчетной модели – таблица - «Действие». Для описания логических выражений чтобы активизировать «Действий» на основании значений контролируемых величин, которые задаются в таблице «Пусковые органы» предназначена таблица «Логика»

На рисунке 13 показана общая структура подсистем автоматики и сценария.

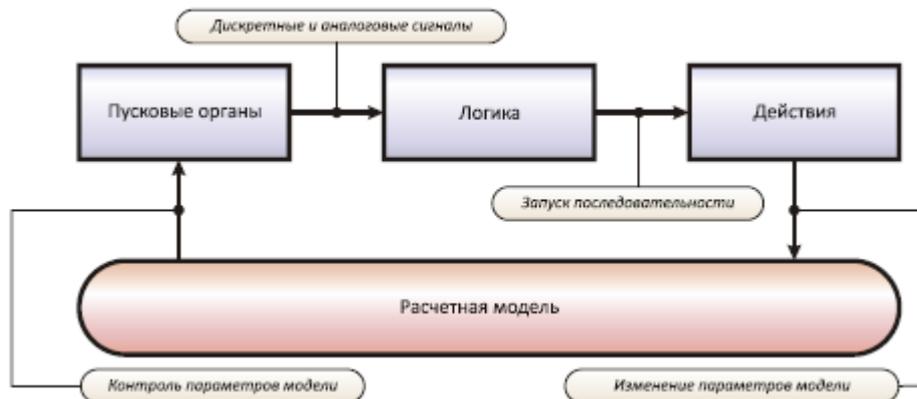


Рисунок 13 – Структура подсистем автоматики и сценария

Все исходные данные по автоматике и сценарию вводятся последовательно в таблицы, которые расположены: **Главное меню - Открыть – Сценарий (Автоматика)** (рисунок 14).

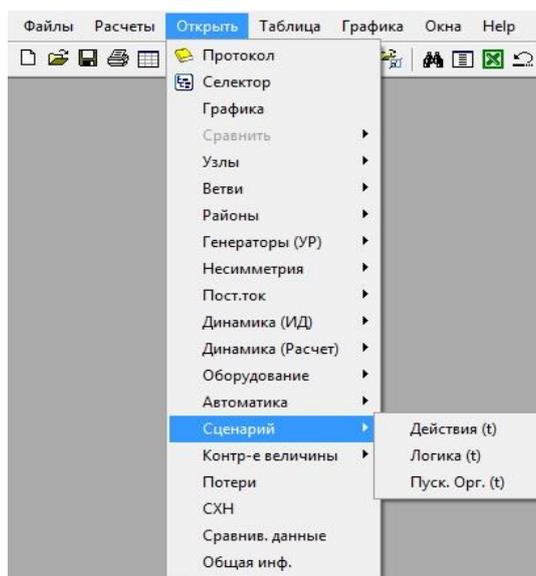


Рисунок 14 – Открытие окна «Сценарий»

Важное примечание: разделение автоматики и сценария произведено для обеспечения независимости описания автоматики от описания событий и возможность, тем самым, получить выполнение разных вариантов расчетов на одной и той же автоматике (или наоборот).

3.2.1 Пусковые органы

Пусковые органы задаются в одноименной таблице (рисунок 15).

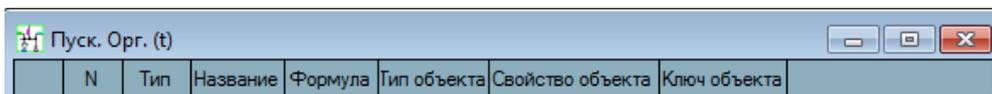


Рисунок 15 – Табличный редактор «Пусковые органы»

Для каждого пускового органа следует применять уникальный номер, который задается в поле **N**. Пусковой орган задается типом, определяющий параметр, его значение поступает в пусковой орган из расчетной модели. В поле **Тип** существуют следующие варианты (таблица 11):

Таблица 11 – Список параметров, поступающих из расчетной модели

Откл	Пусковой орган отключен, на выходе всегда 0.
Объект	Пусковой орган отнесен к объекту модели, который описывается в полях «Тип объекта», «Свойство объекта» и «Ключ объекта».
Время	На выходе пускового органа выдается текущее время расчета в секундах в виде числа с плавающей точкой.
Откл	Пусковой орган вне зависимости от параметров всегда выдает 0
Сост. Узла	На выходе пускового органа состояние узла с номером, заданным в поле «Ключ объекта». Выходное значение «0» соответствует отключенному состоянию, «1» – включенному состоянию узла.
Сост Ветви	На выходе пускового органа состояние ветви, с номерами узлов начала и конца и номером параллельной цепи, заданными через запятую в поле «Ключ объекта». Выходное значение «0» соответствует отключенному состоянию, «1» – включенному состоянию ветви.
Ветвь Инач	Ток в начале ветви в килоамперах.
Ветвь Икон	Ток в конце ветви в килоамперах.
Ветвь Рнач	Поток активной мощности в начале ветви в мегаваттах.
Ветвь Ркон	Поток активной мощности в конце ветви в мегаваттах.
Ветвь Qнач	Поток реактивной мощности в начале ветви в мегаварах.
Ветвь Qкон	Поток реактивной мощности в конце ветви в мегаварах.
Ветвь РНнач	Угол мощности в начале ветви в радианах
Ветвь РНкон	Угол мощности в конце ветви в радианах

В поле **Название** задается произвольное название пускового органа. Значение этого поля в процессе работы автоматики не используется.

В поле **Формула** задается расчетное выражение, которое определяет значение, передаваемое на выход. В случае если в поле ничего не задано, на

выход передается значение параметра объекта модели, к которому привязан данный пусковой орган.

Номер узла задается в поле **Ключ объекта**.

Пусковой орган любого типа с любой формулой не может изменить параметры модели, поскольку параметры в пусковом органе доступны только для чтения.

3.2.2 Элементы и модули логики

На рисунке 16 представлен табличный редактор, предназначенный для ввода, коррекции и просмотра информации о логике.

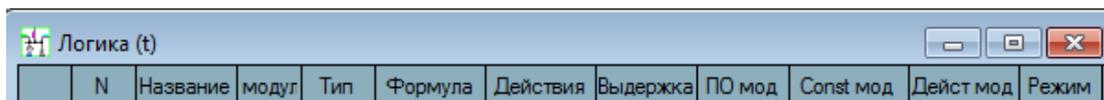


Рисунок 16 – Табличный редактор «Логика»

Определенная строка таблицы отвечает за один элемент логики. Каждый элемент логики присваивается свой уникальный номер, который задается в поле **N**. Для поля **Тип** определены следующие значения (таблица 12).

Таблица 12 – Список наименований типов **Логика**

Откл	Элемент логики отключен, на выходе всегда 0, действия не исполняются
Формула	В элементе логики должна быть задана формула, в соответствии с которой будет рассчитано выходное значение элемента, и если оно будет истинным, будет запущено исполнение действий данного элемента логики
Модуль	В элементе логики производится вызов модуля логики, номер которого должен быть указан в поле «Формула». Через запятую можно указать номер элемента логики выбранного модуля, значение которого будет возвращено вызывающим элементом

Когда расчет по выражению в поле **Формула** дает логическую единицу, следовательно, в поле **Действия** размещаются ссылки на группы действий. Эти группы действий заносятся в виде списка с разделением запятыми. Определенная группа действий исполняется с параметрами. Сразу после того, как формула возвращает единицу, при условии, что в поле **Выдержка** установлено значение ноль, то **Действия** исполняются. Если в поле **Выдержка** указан интервал времени, то действия исполняются по истечении этого

интервала и при условии, что на протяжении всего интервала формула возвращала единицу.

Поле **Режим** реализовывает способ исполнения действий, которые связаны с элементом логики. Если режим в положении «Нормальный» (по умолчанию), то действия исполняются для всех моментов времени, для которых выражение в поле **Формула** дает истину. Если режим находится в положении «Импульс», то действия исполняются при переходе значения выражения в поле Формула в состояние истина из состояния ложь.

Когда результат вычисления определяется как логическая единица, тогда элемент логики запускает выдержку времени, на протяжении которой продолжает контролировать результат вычисления. Если в течение выдержки результат вычисления сохраняет значения логической единицы, тогда элемент логики запустит действия, которые заданы в его списке.

3.2.3 Действия

Действия так же, как и логика представлены в виде табличного редактора (рисунок 17).

N	N группы	Тип	Название	Формула	Тип объекта	Свойство объекта	Ключ объекта	Режим	N сраб
---	----------	-----	----------	---------	-------------	------------------	--------------	-------	--------

Рисунок 17 – Табличный редактор «Действия»

Действие должно иметь собственный уникальный идентификатор в поле **N** и идентификатор группы, в которую оно входит в поле **N группы**. Выполняться могут только действия, входящие в группу.

В поле **Тип** могут быть заданы следующие значения (таблица 13):

Таблица 13 – Параметры объекта

Откл	Действие не производится, все параметры действия игнорируются.
Объект	В полях «Тип объекта», «Свойство объекта» и «Ключ объекта» должен быть адресован параметр объекта модели. В поле «Формула» задается выражение, значение которого будет присвоено выбранному параметру.
Сост узла	Включить или выключить узел, номер которого задан в поле «Ключ объекта». Истинное значение выражения в поле «Формула» соответствует включенному состоянию узла.
Сост ветви	Включить или выключить ветвь, номера узлов начала, конца

	и параллельной цепи которой через запятую заданы в поле «Ключ объекта». Истинное значение выражения в поле «Формула» соответствует включенному состоянию ветви.
Узел G	Установить активную проводимость узла, номер которого задан в поле «Ключ объекта». Значение задается выражением в поле «Формула» в мкСм.
Узел B	Установить реактивную проводимость узла, номер которого задан в поле «Ключ объекта». Значение задается выражением в поле «Формула» в мкСм. Проводимость по умолчанию считается индуктивной, то есть при задании считается, что значение отрицательное. Индуктивная проводимость, таким образом, должна задаваться без знака, а емкостная – со знаком «-». Установленный с помощью этой и предыдущей команды шунт включается параллельно с шунтом, который сформирован по данным схемы замещения.
Узел Rш	Установить активное сопротивление шунта узла, номер которого задан в поле «Ключ объекта». Значение задается выражением в поле «Формула» в Омах.
Узел Xш	Установить реактивное сопротивление шунта узла, номер которого задан в поле «Ключ объекта». Значение задается выражением в поле «Формула» в Омах. Индуктивное сопротивление считается положительным. Установленный с помощью этой и предыдущей команды шунт включается параллельно с шунтом, который сформирован по данным схемы замещения.
Узел Pn	Установить активную мощность узла в мегаваттах. Требуемая мощность в виде выражения задается в поле «Формула».
Узел Qn	Установить реактивную мощность узла в мега-варах. Требуемая мощность в виде выражения задается в поле «Формула».
ЭГП	Электрогидроприставка

В поле **Формула** задается выражение, по которому рассчитывается присваиваемое параметру объекта значение. В выражении могут быть использованы символические ссылки, что позволяет динамически рассчитать нужное значение параметров по каждой комбинации параметров модели.

В поле **Нсраб** указывается допустимое количество срабатываний определенного действия. Допускается одно срабатывание по умолчанию. Действие не будет исполнено, если в поле **Нсраб** установлен ноль.

Важные примечания:

1) Для заданий сложных действий, которые одновременно изменяют параметры нескольких объектов модели, элементы **Действия** объединяются в группы.

2) Ко времени **Действия** не привязаны и могут быть выполнены только по команде от элемента «Логика».

Сохранения всех введенных данных для всех элементов сценария производится по ссылке: **Главное меню – Файлы – Сохранить как– имя файла.scn** (рисунок 18).

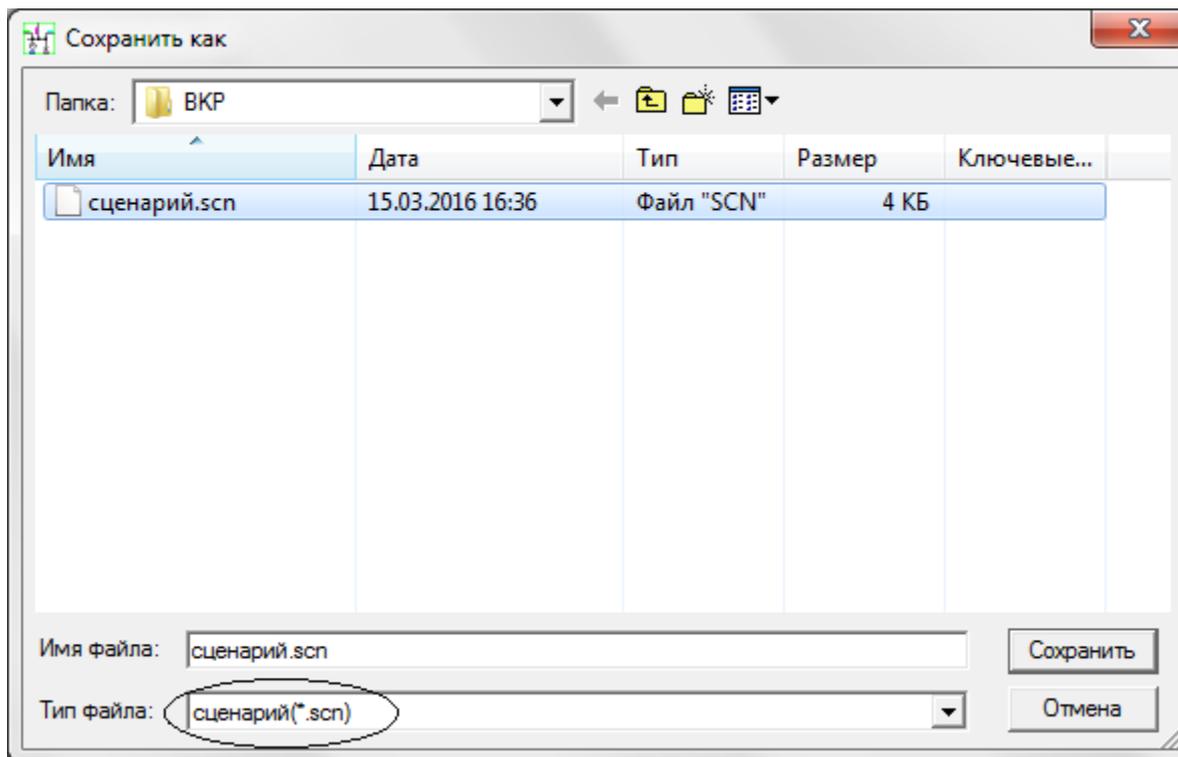


Рисунок 18 – Окно сохранения сценария

3.3 Расчет переходного процесса

Перед расчетом переходного процесса необходимо задать время расчета $T_{\text{расч}}$ и выбрать контролируемые величины, которые будут определяться во время переходного процесса, и отображаться на экране монитора в виде графиков.

3.3.1 Выбор параметров расчёта

Параметры расчета находятся по ссылке: **Расчеты – Параметры – Динамика** (рисунок 19).

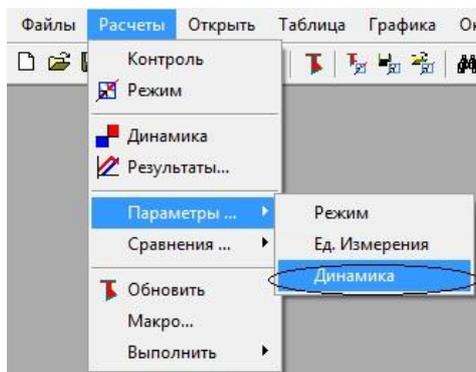


Рисунок 19 – Параметры расчета динамики

В графе «Динамика» (рисунок 20) задаются параметры, описание которых представлено в таблице 14.

№	Название	Значение
1	Время расчета (Т_расч)	10
2	Начальный шаг интегрирования (Н_инт)	0.01
3	Минимальный шаг интегрирования (Н_мин)	0.01
4	Максимальный шаг интегрирования (Н_макс)	0.05
5	Шаг печати (Н_печ)	0.05
6	Основной метод интегрирования (Осн.Метод)	Адамс4
7	Стартовый метод интегрирования (Старт.Метод)	P-K4
8	Точность шага интегрирования (dInt)	
9	Информировать об изменении шага (Выводить шаг)	
10	Постоянная сглаживания угловой скорости (частоты) узла (Тf)	0.04
11	Точность балансировки эдс при учете явнополюсности (dEf)	0.01
12	Макс число пересчетов УР на шаге при учете явнополюсности	30
13	Контроль входных параметров (Контр.)	По умолча
14	Демпфирование в уравнениях движения (Демпф)	S
15	Корректировать Т в парковских моделях (Корр Т)	Да
16	Учет демп. момента в моделях с демп контурами (Уч Демп)	Нет
17	Напряжения перехода с СХН на шунт (V_минСХРН)	10
18	Допустимый небаланс СХН (SXNTol)	
19	Выходной каталог файлов результатов (Кат. результатов)	C:\tmp\
20	Шаблон имени выходного файла (Шаблон имени)	<<count>.sn
21	Автозагрузка последнего результата (Автозагрузка)	<input checked="" type="checkbox"/>
22	Максимальное кол-во файлов результатов (Макс. рез-тов)	6

Рисунок 20 – Описание параметров расчета

Таблица 14 – Описание заданных параметров

Время расчета	Время расчета в секундах.
Начальный шаг интегрирования	Шаг интегрирования для методов с постоянным шагом. Начальный шаг – для методов с переменным шагом.
Минимальный и максимальный шаг интегрирования	Используются для методов интегрирования с переменным шагом.
Шаг печати	Для вывода результатов на график и отображении результатов расчета в режимном файле
Метод интегрирования	Четыре метода интегрирования: 1. Классический метод Рунге-Кутты 4-порядка с постоянным шагом (P-K4). 2. Встроенный метод Кутты-Мерсона с

	<p>переменным шагом (К-М4)</p> <p>3. Метод Адамса 4 порядка с переменным шагом (Адамс4).</p> <p>4. Метод обратного дифференцирования (BDF4) с постоянным шагом.</p>
Точность шага интегрирования.	Параметр предназначен для управления работой методов интегрирования с переменным шагом. В процессе расчета метод такого рода способен оценивать погрешность выполнения шага.
Информировать об изменении шага	Переключатель, который управляет отображением сообщений о смене шага.
Постоянная сглаживания угловой скорости	Постоянная времени реально дифференцирующего звена для вычисления S_u .
Точность балансировки эдс	Используется при учете явнополюсности.
Макс число пересчетов УР на шаге	Ограничивает число решений системы линейных уравнений для учета нелинейности нагрузки и явнополюсности.
Контроль входных параметров	Выполняется либо «Строго», когда расчет не начинается при неверно заданных параметрах (например,), либо «По умолчанию» – в этом случае неверно заданные параметры заменяются на заданные по умолчанию.
Демпфирование в уравнениях движения	Коэффициент демпфирования умножается либо на S (скольжение генератора), либо на $S-S_u$ (разность скольжений узла и генератора).
Корректировать T в парковских моделях	Определяет способ расчета постоянных времени
Учет демп. момента при в моделях с демпферными контурами	Определяет учитывать или нет заданный коэффициент демпфирования в моделях генератора, имеющих демпферные контуры – по умолчанию Нет
Напряжение перехода	Минимальное напряжение в о.е с заданной статической характеристикой на шунт
Выходной каталог файлов результатов	Путь к каталогу, в котором сохраняются файлы результатов расчетов.
Шаблон имени выходного файла	Строка, определяющая наименование файла результатов.
Максимальное кол-во файлов результатов	Максимальное количество файлов результатов, которые могут быть автоматически загружены в элемент управления «Файлы расчетов».

3.3.2 Выбор контролируемых величин

Выбор контролируемых величин производится по следующему алгоритму:

1) По ссылке: **Открыть – Контролируемые величины (КВ)** (рисунок 21), выбрать строку **Описание** и внести в таблицу описание контролируемого параметра (рисунок 22).

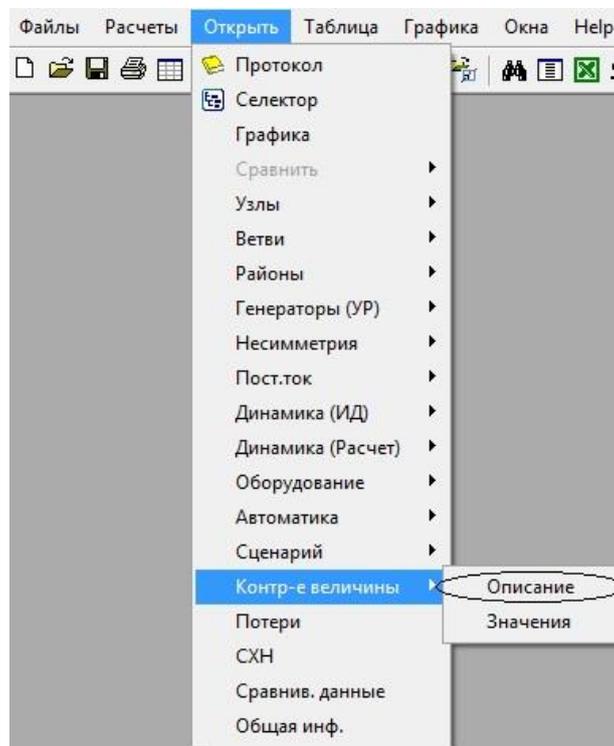


Рисунок 21 – Меню «Контролируемые величины»

	Отм	Номер	Имя	Тип	Таблица	Выборка	Формула	точности	
1	✓	1	S_1	Значени	Generator	Num=1	S	2	100
2	✓	2	Угол_1	Значени	Generator	Num=1	Delta	2	57

Рисунок 22 – Команда «Контролируемые величины - Описание»

2) Вызвать локальное меню табличного редактора правой кнопкой мыши, предварительно направив курсор на нужный параметр и левой кнопкой выбрать команду «Добавить в КВ» (рисунок 23).

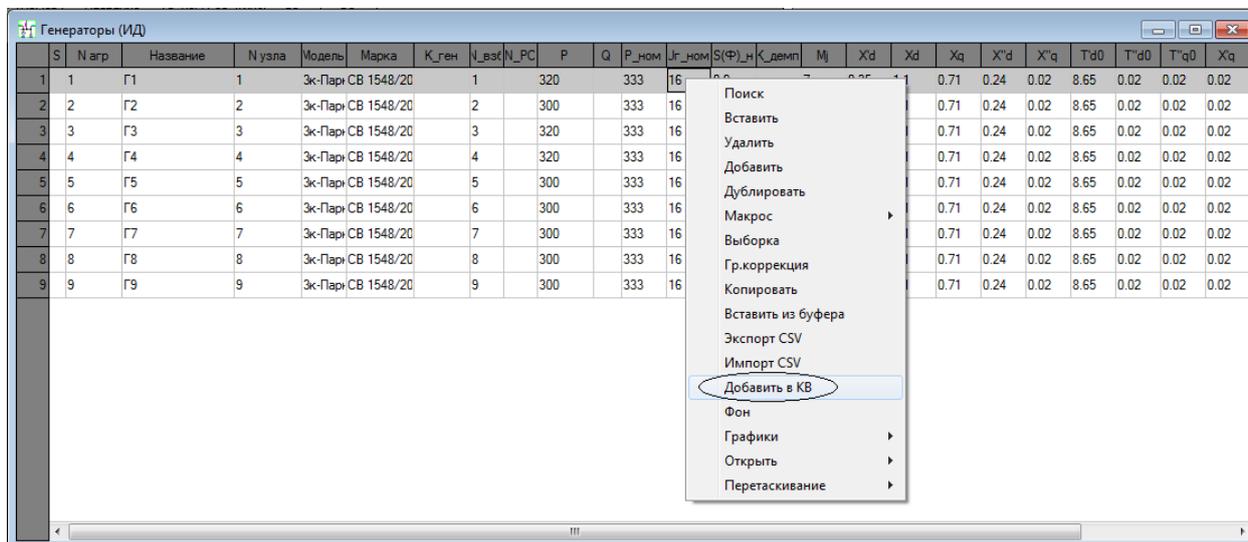


Рисунок 23 – Команда «Добавить КВ»

После формирования описаний КВ, данные о них можно сохранить, используя тип файла контр-е величины.krg (рисунок 24).

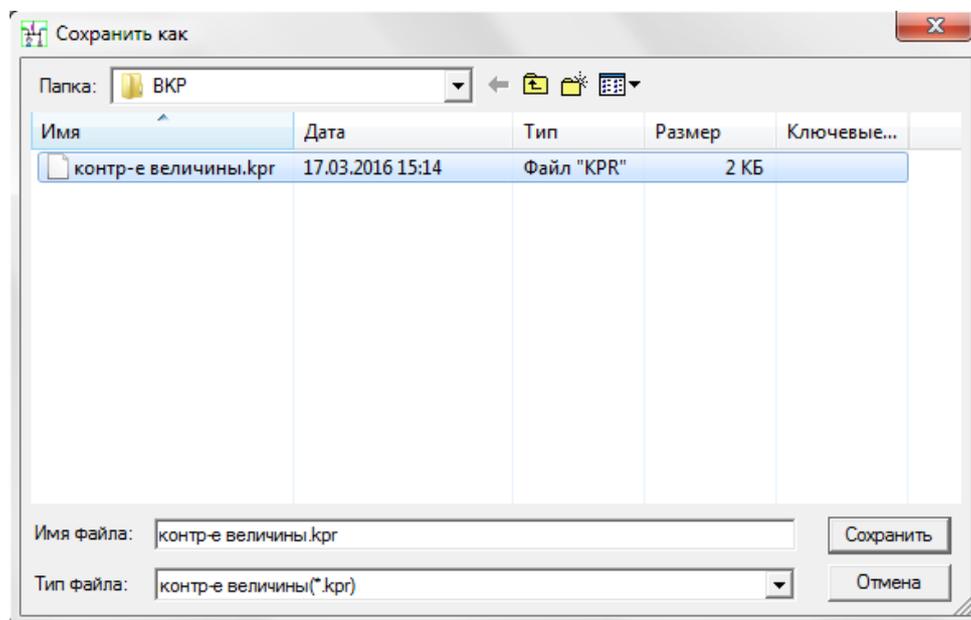


Рисунок 24 – Сохранение КВ

3.4 Расчет шунта КЗ

В расчетах динамической устойчивости большинство нормативных возмущений связано с отключением элементов схемы при несимметричных КЗ. Расчет переходного процесса с корректным моделированием поперечной несимметрии требует усложнение алгоритма и программы расчета. При использовании метода симметричных составляющих, для расчетов несимметричных КЗ, необходимо реализовать обработку схем замещения

обратной и нулевой последовательностей [9]. Для этого в точке КЗ включается индуктивный шунт, определяемый видом возмущения.

Для расчета величины шунта необходимо открыть таблицу «Несимметрия-Узлы», и запустить контекстный макрос на узле, для которого необходим расчет шунта (рисунок 25).

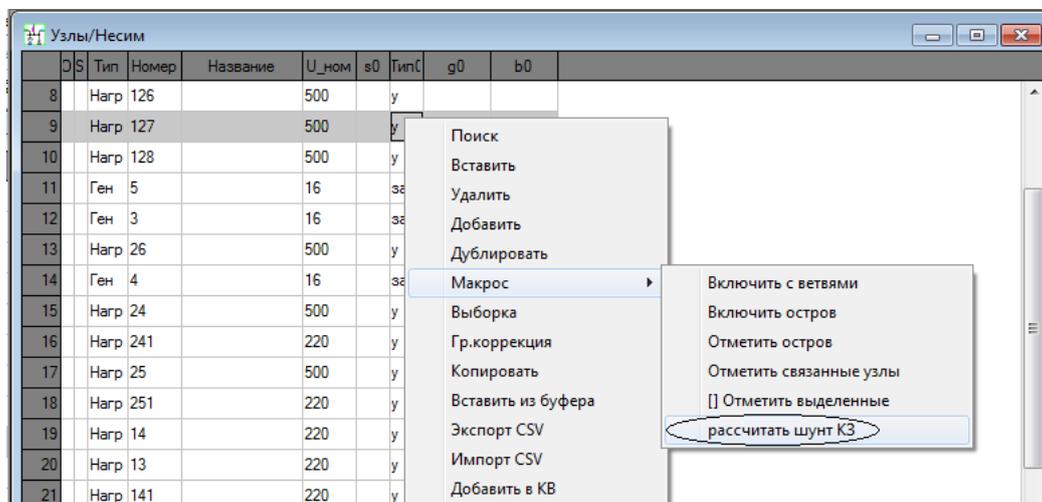


Рисунок 25 – Пример расчета шунта КЗ

Появится окно диалога (рисунок 26), в котором необходимо выбрать вид КЗ.

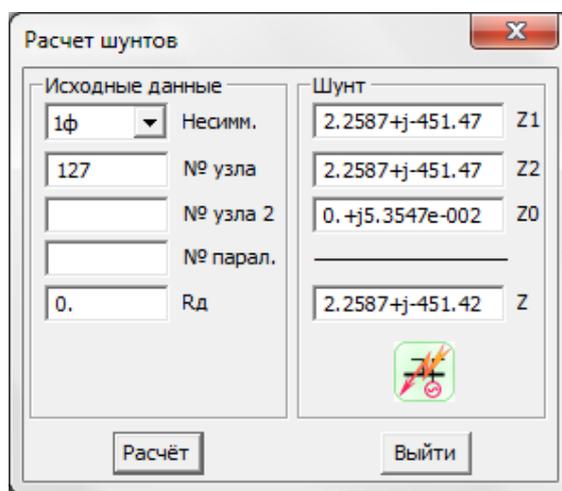


Рисунок 26 – Пример расчета шунта КЗ.

РАЗДЕЛ 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ. РАСЧЁТ И АНАЛИЗ УСТАНОВИВШЕГОСЯ И ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМОВ

4.1 Моделирование схемы электрической сети и расчёт установившегося режима

Модель – это совокупность таблиц для расчета режимов, содержащая параметры узлов, ветвей, шунтов, нагрузок и генерирующих источников.

Модель электрической сети 500/220 кВ ОЭС Сибири, используемая для расчетов в ПК RUSTab, составлена по данным замеров активных и реактивных мощностей нагрузочных и генераторных узлов, а также по параметрам трансформаторов, ВЛ и АТ.

На рисунке 27 приведен фрагмент исходных данных по узлам.

DS	Тип	Номер	Название	U_ном	_сх	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	U_min	U_max	В_ш	V
1	База	12	БоГЭС-2СШ	510					-1986.5	111.5	509					1306	509
2	Нагр	11	БоГЭС-1СШ	510													509
3	Нагр	121	выкл	500													509
4	Нагр	122	выкл	500													509
5	Нагр	123	выкл	500													509.01
6	Нагр	124	выкл	500													509
7	Нагр	125	выкл	500													509
8	Нагр	126	выкл	500													509
9	Нагр	127	выкл	500													509
10	Нагр	128	выкл	500													509
11	Ген	5	Генератор 5	16			0.1	0.1	300	18.5	15.3	180					15.3
12	Ген	3	Генератор 3	16			0.1	0.1	320	21	15.3	168.5					15.3
13	Нагр	26	Ген3+Ген4	500													509
14	Ген	4	Генератор 4	16			0.1	0.1	320	20.7	15.3	168.5					15.3
15	Нагр	24	АТ1-ВН	500													510.94
16	Нагр	241	АТ1-СН-НН	220													237.11
17	Нагр	25	АТ2-ВН	500													510.94
18	Нагр	251	АТ2-СН-НН	220													237.11
19	Нагр	14	БоГЭС220-2СШ	220													237.12
20	Нагр	13	БоГЭС220-1СШ	220													237.12

Рисунок 27 – Фрагмент исходных данных по узлам

По рисунку 27 слева направо:

- 1) Тип – нагрузка или генерация. Один из узлов должен быть назначен базисным (балансирующим), для чего в меню **Тип** этого узла, надо выбрать опцию **База**.
- 2) Номер узла (N) – любое целое число от 1 до 1000000000, кроме нуля;

- 3) Наименование узла. Не более 20 символов и вводится произвольно.
- 4) Уровень напряжения в узле – номинальный , кВ;
- 5) Активная мощность в узле нагрузки, МВт;
- 6) Реактивная мощность в узле нагрузки, МВАр;
- 7) Активная мощность генератора, МВт;
- 8) Реактивная мощность генератора, МВАр;
- 9) $V_{зд}$ – фиксированный модуль напряжения, который будет выдержан, если позволят пределы регулирования по реактивной мощности;
- 10) Ограничения по реактивной мощности в узле генерации (Q_{min} , Q_{max}), МВАр.

Типы узлов (Нагрузка, Генератор), ветви (ЛЭП, Тр-р) выбираются программой автоматически при расчете режима.

Для подготовки информации по генераторам существует форма: Открыть – Генераторы (УР) (рисунок 28).

	N агр	Название	N узла	P	Q	Pmin	Pmax	Qmin	Qmax	V_зд
1	1	Г1	1	320					200	
2	2	Г2	2	300					200	
3	3	Г3	3	320					168.5	
4	4	Г4	4	320					168.5	
5	5	Г5	5	300					180	
6	6	Г6	6	300					200	
7	7	Г7	7	300					200	
8	8	Г8	8	300					200	
9	9	Г9	9	300					200	

Рисунок 28 – Фрагмент исходных данных для генераторов

По рисунку 28 слева направо:

- 1) S – состояние генератора (включен/отключен);
- 2) Название – название генератора;
- 3) N узла – номер узла, в который присоединен генератор;
- 4) P– активная мощность генерации, МВт;
- 5) Q_{min} , Q_{max} – минимальная/максимальная реактивная генерация, Мвар.

Шунтирующие реакторы моделируются посредством включения в соответствующие узлы системы индуктивных проводимостей (рисунок 29).

№	S	Тип	Номер	Название	U_ном	S	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	U_min	U_max	V_ш	V
1		База	12	БоГЭС-2СШ	510					-1986.5	111.5	509					1306	509
2		Нагр	11	БоГЭС-1СШ	510													509
3		Нагр	121	выкл	500													509

Рисунок 29 – Фрагмент исходных данных для ШР

Следует отметить, что индуктивная проводимость Y вводится со знаком «+» и вычисляется по формуле:

$$Y_{\text{шр}} = \frac{S_{\text{шр}}}{U_{\text{ном}}^2} 10^6 \quad (19)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение реактора, кВ;

$S_{\text{шр}}$ – номинальная мощность реактора, Мвар.

Для ветвей задаются: названия узлов начала и конца связи, номера узлов, номера параллельности, названия связи, активные и реактивные сопротивления связи, проводимости связи и коэффициент трансформации для трансформаторов и автотрансформаторов (рисунок 30).

№	S	Тип	N_нач	N_кон	N_г	Название	R	X	B	Kт/г	P_нач	Q_нач	N_г
1		ЛЭП	12	121		БоГЭС-2СШ - выкл	0.01				642	151	
2		ЛЭП	121	122		выкл - выкл	0.01				642	78	
3		ЛЭП	122	123		выкл - выкл	0.01				642	78	
4		ЛЭП	123	11		выкл - БоГЭС-1СШ	0.01				-318	-87	
5		ЛЭП	12	124		БоГЭС-2СШ - выкл	0.01				978	54	
6		ЛЭП	124	125		выкл - выкл	0.01				636	53	
7		ЛЭП	125	126		выкл - выкл	0.01				-3	93	
8		ЛЭП	126	11		выкл - БоГЭС-1СШ	0.01				-3	20	
9		ЛЭП	12	127		БоГЭС-2СШ - выкл	0.01				367	21	
10		ЛЭП	127	128		выкл - выкл	0.01				920	132	
11		ЛЭП	128	11		выкл - БоГЭС-1СШ	0.01				321	67	
12		Тр-р	27	5		Г5+Г6 - Генератор 5	1.47	102.67		0.03	299	-17	
13		Тр-р	26	3		Ген3+Ген4 - Генерат	1.45	103.36		0.03	319	-20	
14		Тр-р	26	4		Ген3+Ген4 - Генерат	1.48	102.67		0.03	319	-20	
15		Выкл	125	26		выкл - Ген3+Ген4					639	-40	
16		Тр-р	123	24		выкл - АТ1-ВН	0.65	51.1	8	1	342	1	
17		Тр-р	24	241	1	АТ1-ВН - АТ1-СН-НН	0.65	113.5		0.46	171	13	
18		Тр-р	24	241	2	АТ1-ВН - АТ1-СН-НН	0.65	113.5		0.46	171	13	
19		Тр-р	124	25		выкл - АТ2-ВН	0.65	51.1	8	1	342	1	
20		Тр-р	25	251	1	АТ2-ВН - АТ2-СН-НН	0.65	113.5		0.46	171	13	

Рисунок 30 – Фрагмент исходных данных по ветвям

По рисунку 30 слева направо:

- 1) Тип ветви – присваивается автоматически;
- 2) Номера узлов, ограничивающие заданную ветвь ($N_{\text{нач}}$, $N_{\text{кон}}$);

- 3) $N_{г}$ – номер ветви в группе параллельных ветвей;
- 4) Названия узлов, ограничивающих заданную ветвь (автоматически переносятся из таблицы узлов);
- 5) Сопротивления связи (R, X) – активное и реактивное сопротивления связи, Ом;
- 6) Проводимости связи (B), мкСм;
- 7) Коэффициент трансформации задается отношением $U_{ВН}/U_{НН}$ трансформатора.

Трансформаторы и АТ задаются значениями активного R и реактивного X сопротивлений обмоток, а также значением коэффициента трансформации (рисунок 31). Параметры должны быть приведены к напряжению стороны высокого напряжения.

№	S	Тип	N_нач	N_кон	N_групп	Название	R	X	B	Кт/г	P_нач	Q_нач	№
16		Тр-р	123	24		выкл - АТ1-ВН	0.65	51.1	8	1	342	1	
17		Тр-р	24	241	1	АТ1-ВН - АТ1-СН-НН	0.65	113.5		0.46	171	13	
18		Тр-р	24	241	2	АТ1-ВН - АТ1-СН-НН	0.65	113.5		0.46	171	13	
19		Тр-р	124	25		выкл - АТ2-ВН	0.65	51.1	8	1	342	1	
20		Тр-р	25	251	1	АТ2-ВН - АТ2-СН-НН	0.65	113.5		0.46	171	13	
21		Тр-р	25	251	2	АТ2-ВН - АТ2-СН-НН	0.65	113.5		0.46	171	13	

Рисунок 31 – Фрагмент исходных данных для АТ

ЛЭП задаются активным R и индуктивным X сопротивлениями линии и ее емкостной проводимостью B (рисунок 32).

№	S	Тип	N_нач	N_кон	N_групп	Название	R	X	B	Кт/г	P_нач	Q_нач	№
49		ЛЭП	126	185		выкл - выкл	3.77	47.43	-561.6		-0	73	
50		ЛЭП	121	181		выкл - выкл	3.77	47.43	-561.6		-0	73	
51		ЛЭП	16	161		Озерная-2СШ - выкл	0.01				-110	-11	

Рисунок 32 – Фрагмент исходных данных для ЛЭП

Для выполнения расчета УР нужно перейти в меню «Расчет» и выбрать команду «Режим».

Алгоритм расчёта УР электрической сети основан на использовании уравнения узловых напряжений (УУН).

Имеем линейную систему (20):

$$YU = I + Y_{i\bar{o}}U_{\bar{o}}, \quad (20)$$

где Y – проводимость узла;

U – напряжение узла;

$U_{\bar{o}}$ – напряжение базисного узла;

I – задающий ток.

Комплексные переменные уравнения (20) в алгебраической форме:

$$\underline{Y} = G - jB, \quad \dot{U} = U' + jU'', \quad \dot{I} = I' + jI'' \quad (21)$$

Следовательно, запишем уравнение (20) в новой форме:

$$(G - jB)(U' + jU'') = I' + jI'' + (G_{i\bar{o}} - jB_{i\bar{o}})U_{\bar{o}} \quad (22)$$

Перемножая двучлены и приравнявая отдельно вещественные и мнимые части уравнения (22), получаем два матричных уравнения с вещественными переменными:

$$\begin{aligned} GU' + BU'' &= I' + G_{i\bar{o}}U_{\bar{o}}, \\ -BU' + GU'' &= I'' - B_{i\bar{o}}U_{\bar{o}} \end{aligned} \quad (23)$$

Совмещая два матричных уравнения в одно, имеем:

$$\begin{pmatrix} G & B \\ -B & G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U' \\ U'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I' + G_{i\bar{o}}U_{\bar{o}} \\ I'' - B_{i\bar{o}}U_{\bar{o}} \end{pmatrix}, \quad (24)$$

Матричное уравнение (24) представляет УУН с вещественными переменными в форме баланса токов.

С учетом того, что подматрицы G и $G_{i\bar{o}}$ являются нулевыми при наличии в схеме только реактивной составляющей, из (24) имеем:

$$BU'' = I'(U), \quad BU' = -I''(U) + B_{i\bar{o}}U_{\bar{o}}, \quad (25)$$

Запишем (24) в развернутой форме для каждого узла i :

$$\begin{aligned} g_{ii}U_i' - \sum_{j=1}^{n-1} g_{ij}U_j' + b_{ii}U_i'' - \sum_{j=1}^{n-1} b_{ij}U_j'' &= I_i' + g_{i\bar{o}}U_{\bar{o}} \\ -b_{ii}U_i' + \sum_{j=1}^{n-1} b_{ij}U_j' + g_{ii}U_i'' - \sum_{j=1}^{n-1} g_{ij}U_j'' &= I_i'' + b_{i\bar{o}}U_{\bar{o}} \end{aligned}, \quad (26)$$

Система УУН решается методом Ньютона. Рассмотрим решение УУН на примере кольцевой схемы с 3-мя узлами, где узел 3 – балансирующий узел.

При отсутствии активного сопротивления, согласно (25), имеем:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & -b_{12} \\ -b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U'_1 \\ U'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -I''_1 \\ -I''_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{13} \\ b_{23} \end{pmatrix} U_3, \quad \begin{pmatrix} b_{11} & -b_{12} \\ -b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U''_1 \\ U''_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I'_1 \\ I'_2 \end{pmatrix} \quad (27)$$

Перемножая матрицы, перенося все слагаемые в левую часть, получаем:

$$\left. \begin{aligned} I''_{1\Sigma}(U'_1, U'_2) &= b_{11}U'_1 - b_{12}U'_2 + I''_1(U'_1) - b_{13}U_3 = 0; \\ I''_{2\Sigma}(U'_1, U'_2) &= -b_{21}U'_1 + b_{22}U'_2 + I''_2(U'_2) - b_{23}U_3 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

$$\left. \begin{aligned} I'_{1\Sigma}(U''_1, U''_2) &= b_{11}U''_1 - b_{12}U''_2 + I'_1(U''_1) - b_{13}U_3 = 0; \\ I'_{2\Sigma}(U''_1, U''_2) &= -b_{21}U''_1 + b_{22}U''_2 + I'_2(U''_2) - b_{23}U_3 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

По методу Ньютона нелинейные уравнения (28), (29) заменяем эквивалентными линейными и получаем в развернутой форме:

$$\left. \begin{aligned} (b_{11} + \frac{\partial I''_1}{\partial U'_1})\Delta U'_1 - b_{12}\Delta U'_2 &= -I''_{1\Sigma}; \\ -b_{22}\Delta U'_1 + (b_{22} + \frac{\partial I''_2}{\partial U'_2})\Delta U'_2 &= -I''_{2\Sigma}. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

$$\left. \begin{aligned} (b_{11} - \frac{\partial I'_1}{\partial U''_1})\Delta U''_1 - b_{12}\Delta U''_2 &= -I'_{1\Sigma}; \\ -b_{22}\Delta U''_1 + (b_{22} - \frac{\partial I'_2}{\partial U''_2})\Delta U''_2 &= -I'_{2\Sigma}. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Далее производится итерационный процесс относительно поправок $\Delta U'_i$ и $\Delta U''_i$. Составляющие искомым напряжений:

$$\begin{aligned} (U'_i)^{(k+1)} &= (U'_i)^{(k)} + (\Delta U'_i)^{(k)}; \\ (U''_i)^{(k+1)} &= (U''_i)^{(k)} + (\Delta U''_i)^{(k)}. \end{aligned} \quad (32)$$

Метод Ньютона сложен в реализации, но имеет малое число итераций и обладает высокой сходимостью.

Для анализа режимов в RUSTab существуют формы представления результатов. Основная форма – «Узлы+Ветви». Таблица имеет вид, приведенный на рисунке 33.

№	D S		Номер	Название	V	Delta	P _н	Q _н	P _г	Q _г	V _{зд}	Q _{min}	Q _{max}	Q _ш
	D S	№	Название	V ₂	dDelta	P _л	Q _л	dP	dQ	I _л	P _ш	Q _ш		
1		12	БогЭС-2СШ	509					-1986.5	110.8	509			338
2		121	выкл	509	0	642	151		0.02	748				
3		124	выкл	509	0	978	55		0.04	1111				
4		127	выкл	509	0	367	22		0.01	417				
5		11	БогЭС-1СШ	509	0									
6		123	выкл	509	0	318	87		0	375				
7		126	выкл	509	0	3	-20		0	23				
8		128	выкл	509	-0	-321	-67		0	372				
9		121	выкл	509	0									
10		12	БогЭС-2СШ	509	-0	-642	-151		0.02	748				
11		122	выкл	509	0	642	79		0.02	734				
12		181	выкл	509	-0	-0	73	0	0	82			-145.5	
13		122	выкл	509	0									
14		121	выкл	509	-0	-642	-79		0.02	734				
15		123	выкл	509	0	642	79		0.02	734				
16		123	выкл	509.01	0									
17		122	выкл	509	-0	-642	-79		0.02	734				

Рисунок 33 – Фрагмент представления результатов в форме «Узлы+Ветви»

Каждая выделенная цветом строка содержит параметры узла, последующие – параметры присоединенных к нему линий и трансформаторов.

В параметрах узлов отображается номер, название, расчетный модуль (V) и фаза напряжения, нагрузка (P_н, Q_н), активная генерация (P_г), расчетная реактивная генерация (Q_г), заданные модуль напряжения (V_{зд}) и пределы изменения реактивной генерации (Q_{min}, Q_{max}), мощность шунта (Q_ш).

В строке параметров ветви, связанной с узлом, отображаются номер и название противоположного узла ветви, падение модуля и угла напряжения (V₂, dDelta), переток мощности (P_л, Q_л), входящий в узел, продольные потери (dP, dQ), модуль тока (I_л), мощности (P_ш, Q_ш) шунта ветви.

Команда, связанная с расчетом тока в линии, находится в меню «Открыть-Ветви-Токовая загрузка ЛЭП». Таблица имеет вид, приведенный на рисунке 34.

	N_нач	N_кон	Название	I_нач	I_кон	Место	инт.	N_l(t)	Tс	доп_25	доп_
39	126	185	выкл - выкл	82	83	ВН				825	
40	121	181	выкл - выкл	82	83	ВН				825	
41	16	161	Озерная-2СШ - выкл	126	126	ВН				825	
42	161	162	выкл - выкл	61	61	ВН				825	
43	162	15	выкл - Озерная-1СШ	61	61	ВН				825	
44	16	163	Озерная-2СШ - выкл	76	76	ВН				825	

Рисунок 34 –Фрагмент представления результатов по токовой загрузке ЛЭП

4.2 Контроль предшествующего (доаварийного) режима

Контроль предшествующего режима выполнялся для:

- 1) Проверки соответствия уровней напряжения в узлах требованиям [16];
- 2) Определения необходимости установки регулирующих устройств;
- 3) Расчета переходных режимов, с последующим выбором управляющих воздействий.

4.2.1 Анализ напряжений в узлах

Существенной характеристикой эффективности режима высоковольтных электрических сетей является соблюдение уровней напряжения согласно требованиям [16].

Результаты расчета УР представлены в Приложении В.

По результатам УР электрической сети можно сделать вывод о том, что все напряжения входят в предел допустимых значений и удовлетворяют требованиям [16].

4.2.2 Анализ токов в ветвях схемы

Помимо обсуждения вопроса качества электрической энергии по напряжению, необходимо проанализировать полученные значения токов, передаваемых по воздушным линиям в нормальном режиме.

Выбранное сечение провода должно быть проверено по допустимой токовой нагрузке по нагреву $I_{\text{доп}}$ [9]:

$$I_{\text{р.н.}} \leq I_{\text{доп}}, \quad (33)$$

где $I_{\text{р.н.}}$ – расчетный ток для проверки проводов по нагреву (средняя токовая нагрузка за полчаса).

В таблице 15 приведены значения рассчитанных и допустимых токов.

Таблица 15 – Результаты расчетов по ветвям

Начало ветви - i	Конец ветви - j	№ цепи	I_{ij} , кА	$I_{доп.}$, кА
Выкл-БоГЭС(1)	Выкл-ПС Ангара	1	83	825
Выкл-БоГЭС(2)	Выкл-ПС Ангара	2	83	825
Выкл-БоГЭС	Выкл-ПС Озерная		640	825
Выкл-ПС Озерная	Выкл- ПС Ангара	2	111	825

По результатам, представленным в таблице 15, видно, что значения токов в ветвях находятся в допустимых пределах.

4.3 Расчёт и анализ динамической устойчивости генераторов Богучанской ГЭС

Расчет и анализ ДУ проводились применительно к нарушению установившегося режима, причиной которого являлись: нормативное возмущение I группы – отключение одной цепи ВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – Озерная основными защитами при однофазном КЗ с неуспешным АПВ и наиболее тяжелое нормативное возмущение группы II – отключение одной цепи ВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – Озерная при двухфазном КЗ на землю вблизи шин 500 кВ Богучанской ГЭС.

4.3.1 Расчёт и анализ ДУ при нормативном возмущении I-ой группы на линии Богучанская ГЭС – Озерная

Расчеты ДУ были выполнены с учетом установки на всех элементах быстродействующих защит ($T_3=0,12$ с), время срабатывания АПВ – 2 с. Выдержка выбирается по условию отстройки от времени погасания дуги и деионизации среды в месте КЗ. Режим соответствует загрузке Богучанской ГЭС на 3000 МВт (в работе 9 генераторов).

Сценарий событий, которые будут происходить в процессе расчета переходного процесса задан с помощью таблиц «Действия» и «Логика» (рисунок 35, 36).

Действия (t)										
	N	N группы	Тип	Название	Формула	Тип объекта	ство об	юч объект	Режим	N сраб
1	1	1	Узел Rш	RшунтКЗ	3.0778			116		1
2	2	1	Узел Xш	XшунтКЗ	153.18			116		1
3	3	2	Сост ветви	откл	0			127,116		1
4	4	2	Сост ветви	откл	0			116,165		1
5	5	3	Сост ветви	АПВ	1			127,116		1
6	6	3	Сост ветви	АПВ	1			116,165		1

Рисунок 35 – Таблица «Действия»

Логика (t)											
	N	Название	модул	Тип	Формула	Действия	Выдержка	ПО мод	Const мод	Дейст мод	Режим
1	1			Формула	1	A1	1				Нормалы
2	2			Формула	LT1	A2	0.12				Нормалы
3	3			Формула	LT2	A3	2				Нормалы

Рисунок 36 – Таблица «Логика»

В результате расчета были получены зависимости, изображенные на рисунке 37.

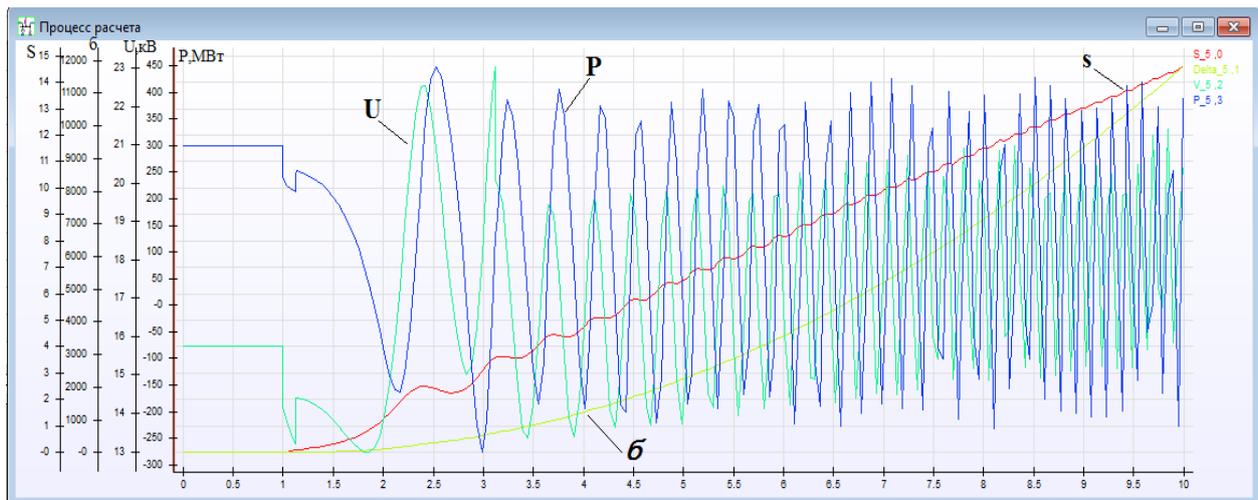


Рисунок 37 – Режим однофазного КЗ на линии Богучанская ГЭС – Озерная, время срабатывания защиты - 0,12 с, ОАПВ неуспешное, рабочая мощность – 2760 МВт

В момент КЗ активная мощность генераторов уменьшается до 240 МВт, затем еще снижаться до 215 МВт, напряжение уменьшается до 14,15 кВ. После срабатывания релейной защиты и отключения поврежденной линии Богучанская ГЭС – Озерная, активная мощность достигает значения 255 МВт, затем уменьшается и колеблется. Напряжение возрастает до 14,5 кВ, затем

уменьшается до 13 кВ. Во время срабатывания АПВ, напряжение возрастает до 22,5 кВ, далее происходят колебания в диапазоне от 13,5 кВ до 19,4 кВ, достижение нормального режима не происходит. В момент КЗ происходит возрастание угла ротора генератора, на 3,12 с от начала расчета происходит первый проворот генератора, далее на ротор начинает действовать увеличивающийся избыточный момент, обусловленный разностью мощности турбины и мощностью генератора, что приводит к дальнейшему увеличению угла.

При увеличении скорости ротора больше синхронной появляется скольжение s , растущее с увеличением разности угловых скоростей ротора и магнитного поля статора.

Длительный асинхронный ход станции является недопустимым. Чтобы обеспечить втягивание генераторов в синхронизм сразу после первого проворота, необходима разгрузка станции, обеспечиваемая, например, отключением генераторов.

Сценарий событий, которые будут происходить в процессе расчета переходного процесса, задан с помощью таблиц «Действия» и «Логика» (рисунок 38, 39).

Действия (t)										
	N	N группы	Тип	Название	Формула	объ	во о	Ключ объекта	эжи	N сраб
1	1	1	Узел Rш	RшунтКЗ	3.0778			116		1
2	2	1	Узел Xш	XшунтКЗ	153.18			116		1
3	3	2	Сост ветви	откл	0			127,116		1
4	4	2	Сост ветви	откл	0			116,165		1
5	5	3	Сост ветви	АПВ	1			127,116		1
6	6	3	Сост ветви	АПВ	1			116,165		1
7	7	4	Сост узла	ОГ	0			3		1
8	8	4	Сост узла	ОГ	0			4		1
9	9	5	Узел Bш	Реактор	1531.25			127		1

Рисунок 38 – Таблица «Действия»

Логика (t)											
	N	Название	N модуля	Тип	Формула	Действия	Выдержка	ПО мод	Const мод	Дейст мод	Режим
1	1			Формула	1	A1	1				Нормальный
2	2			Формула	LT1	A2	0.12				Нормальный
3	3			Формула	LT2	A3	2				Нормальный
4	4			Формула	L3	A4					Нормальный
5	5			Формула	L4	A5					Нормальный

Рисунок 39 – Таблица «Логика»

В результате расчета были получены зависимости, изображенные на рисунке 40.

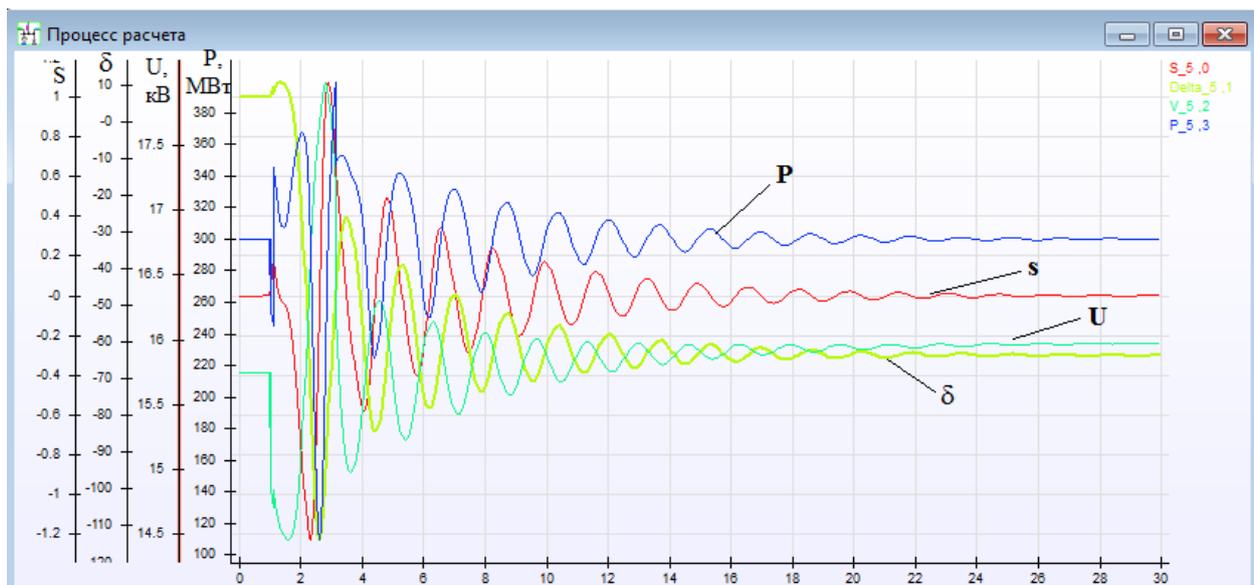


Рисунок 40 – Режим однофазного КЗ на линии Богучанская ГЭС – Озерная, время срабатывания защиты - 0,12 с, успешное ОАПВ , ОГ – 2, рабочая мощность – 2760 МВт

В момент КЗ активная мощность генераторов уменьшается до 245 МВт, затем начинает возрастать, напряжение уменьшается до 14,8 кВ. При увеличении скорости ротора больше синхронной появляется скольжение s . При срабатывании защиты и отключении поврежденной одной цепи линии Богучанская ГЭС – Озерная происходит наброс активной мощности, напряжение возрастает до 16,5 кВ. Для ограничения повышения напряжения на линии Богучанская ГЭС – Озерная был включен шунтирующий реактор на 3 фазы, который скомпенсировал избыточную реактивную мощность линии.

После первого проворота, в момент 3,12 с происходит отключение генераторов 3 и 4, тем самым уменьшается имеющийся небаланс мощности,

амплитуда качаний генератора после отключения части генераторов уменьшается и на 26-ой секунде от начала расчета переходный процесс фактически завершается, переход скольжения через нуль, свидетельствует о сохранении устойчивости.

В зависимости от удаления возникновения однофазного КЗ от шин Богучанской ГЭС на линии Богучанская ГЭС – Озерная, была построена зависимость напряжения генератора от места возникновения КЗ после действия УВ и для каждой точки КЗ было определено количество отключаемых генераторов (рисунок 41).

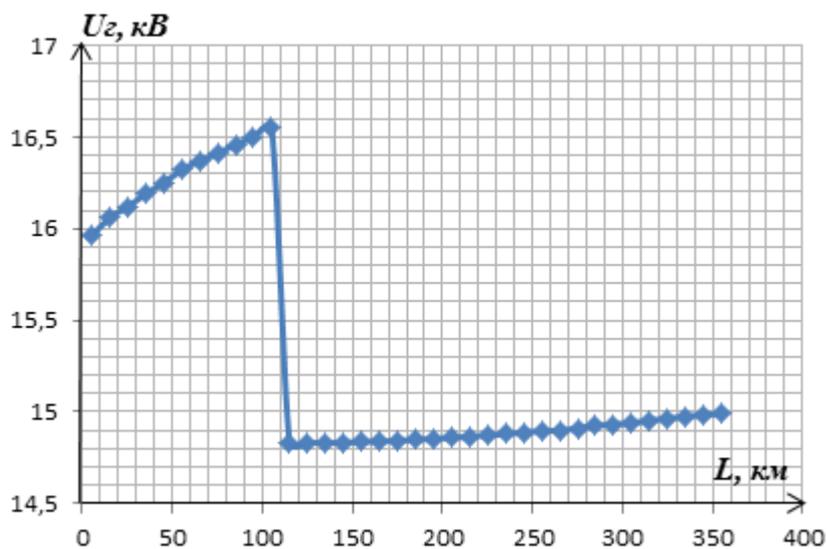


Рисунок 41 – Зависимость напряжения генератора от места возникновения КЗ после действия УВ на линии Богучанская ГЭС – Озерная

По полученной зависимости было установлено, что при возникновении однофазного КЗ на линии Богучанская ГЭС – Озерная на расстоянии от 5 до 105 км от шин Богучанской ГЭС требуемое количество генераторов составляет 2, а именно генератор № 3 и № 4. При дальнейшем увеличении расстояния с отключением двух генераторов напряжение на генераторе нового установившегося режима является недопустимым. Следовательно, для повышения динамической устойчивости генераторов необходимо 4 ОГ, а именно отключение генераторов № 3,4,2 и 1.

На рисунке 42 изображена зависимость напряжения на генераторе от места возникновения КЗ после УВ на линии Богучанская ГЭС – Ангара.

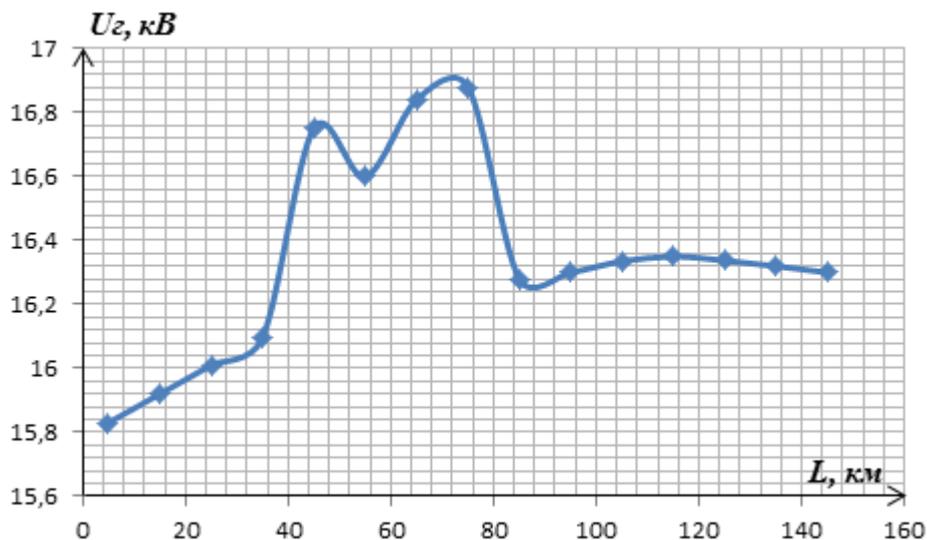


Рисунок 42 – Зависимость напряжения генератора от места возникновения КЗ после действия УВ на линии Богучанская ГЭС – Ангара

В результате проведенных экспериментов при однофазном КЗ на расстоянии от 5 до 35 км, от 85 до 145 км от шин Богучанской ГЭС количество отключаемых генераторов составляет 2 генератора, а именно генераторы под № 5 и 6. При расстоянии от 45 до 75 км от шин Богучанской ГЭС требуемое количество генераторов составило 3 генератора № 5,6 и 7 для повышения динамической устойчивости.

В результате полученных зависимостей, можно сделать вывод о том, что при отключении генераторов обеспечивается устойчивость параллельной работы генераторов Богучанской ГЭС с ОЭС Сибири.

4.3.2 Расчет ДУ при нормативном возмущении II группы на линии Богучанская ГЭС – Ангара

Проведем расчет и анализ динамической устойчивости применительно к возмущению группы II – отключение одной цепи ВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – Ангара основными защитами при двухфазном КЗ на землю.

Сценарий событий, которые будут происходить в процессе расчета переходного процесса, задан с помощью таблиц «Действия» и «Логика» (рисунок 42, 43).

Действия (t)										
	N	N группы	Тип	Название	Формула	Тип объекта	во о	Ключ объекта	Режим	N сраб
1	1	1	Узел Rш	RшунтКЗ	2.2664			116		1
2	2	1	Узел Xш	XшунтКЗ	451.35			116		1
3	3	2	Сост ветви	откл	0			126,116		1
4	4	2	Сост ветви	откл	0			116,185		1
5	5	3	Сост ветви	АПВ	1			126,116		1
6	6	3	Сост ветви	АПВ	1			116,185		1

Рисунок 42 – Таблица «Действия»

Логика (t)											
	N	Название	N модуля	Тип	Формула	Действия	Выдержка	ПО мод	Const мод	Дейст мод	Режим
1	1			Формула	1	A1	1				Нормальный
2	2			Формула	LT1	A2	0.12				Нормальный
3	3			Формула	LT2	A3	2				Нормальный

Рисунок 43 – Таблица «Логика»

В результате расчета были получены зависимости, изображенные на рисунке 44.

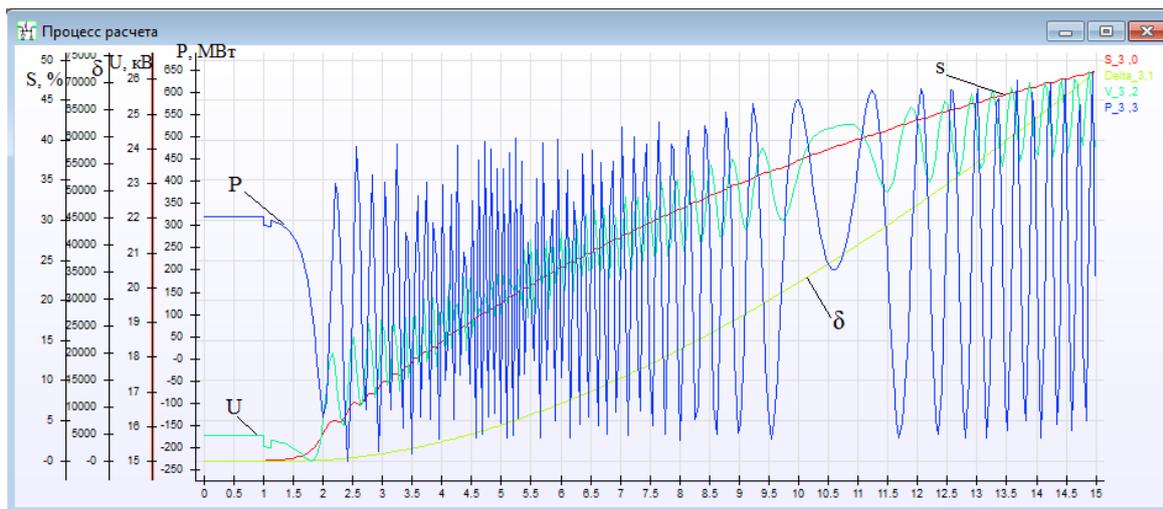


Рисунок 44 – Режим двухфазного КЗ на линии Богучанская ГЭС – Ангара, время срабатывания защиты - 0,12 с, ОАПВ неуспешное, рабочая мощность – 2760 МВт

В момент КЗ активная мощность генераторов уменьшается до 297 МВт, затем еще снижаться до 295 МВт, напряжение уменьшается до 15,4 кВ. После срабатывания релейной защиты и отключения поврежденной линии Богучанская ГЭС – Ангара, активная мощность достигает значения 310 МВт, затем уменьшается и колеблется. Напряжение возрастает до 15,6 кВ, затем

уменьшается до 15 кВ. Во время срабатывания АПВ, напряжение возрастает до 18 кВ, достижение нормального режима не происходит. В момент КЗ угол ротора генератора возрастает, на 3,5 с от начала расчета происходит первый проворот генератора, далее на ротор начинает действовать увеличивающийся избыточный момент, обусловленный разностью мощности турбины и мощностью генератора, что приводит к дальнейшему увеличению угла.

При увеличении скорости ротора больше синхронной появляется скольжение s , растущее с увеличением разности угловых скоростей ротора и магнитного поля статора.

Чтобы обеспечить втягивание генераторов в синхронизм сразу после первого проворота, необходима разгрузка станции применением отключения генераторов.

Сценарий событий, которые будут происходить в процессе расчета переходного процесса, задан с помощью таблиц «Действия» и «Логика» (рисунок 45, 46).

Действия (t)										
	N	N группы	Тип	Название	Формула	объ	во о	Ключ объекта	Режим	N сраб
1	1	1	Узел Rш	RшунтКЗ	2.2664			116		1
2	2	1	Узел Xш	XшунтКЗ	451.35			116		1
3	3	2	Сост ветви	откл	0			126,116		1
4	4	2	Сост ветви	откл	0			116,185		1
5	5	3	Сост ветви	АПВ	1			126,116		1
6	6	3	Сост ветви	АПВ	1			116,185		1
7	7	4	Сост узла	ОГ	0			5		1
8	8	4	Сост узла	ОГ	0			6		1
9	9	5	Узел Вш	Реактор	1531.25			126		1
10	10	5	Узел Вш	Реактор	1531.25			121		1
11	11	5	Узел Вш	Реактор	1531.25			127		1

Рисунок 45 – Таблица «Действия»

Логика (t)											
	N	Название	код	Тип	Формула	Действия	Выдержка	ПО мод	Const мод	Дейст мод	Режим
1	1			Формула	1	A1	1				Нормальный
2	2			Формула	LT1	A2	0.12				Нормальный
3	3			Формула	LT2	A3	2				Нормальный
4	4			Формула	L3	A4					Нормальный
5	5			Формула	LT4	A5	3				Нормальный

Рисунок 46 – Таблица «Логика»

В результате расчета были получены зависимости, изображенные на рисунке 47.

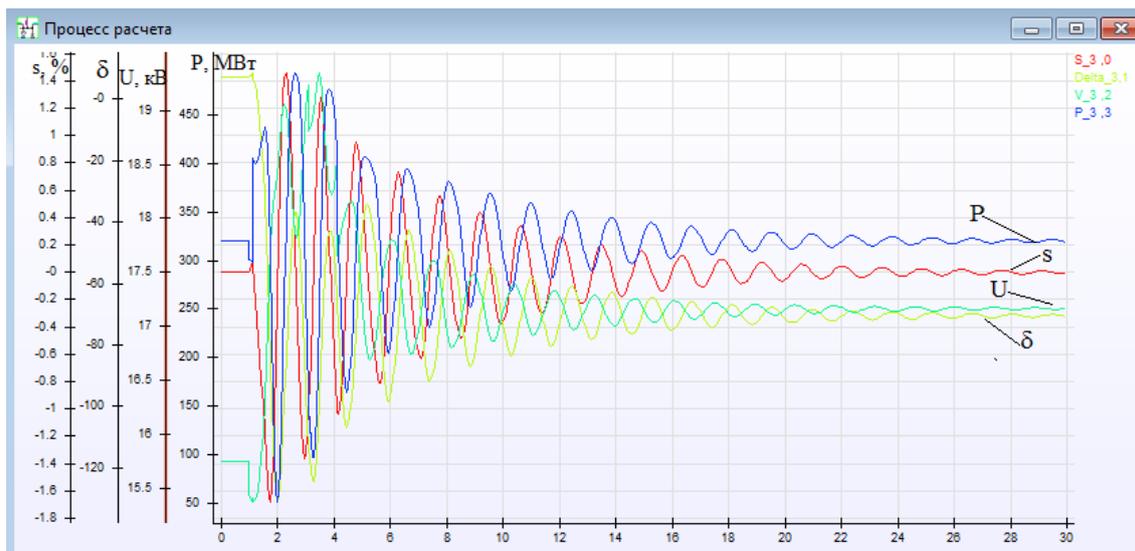


Рисунок 47 – Режим двухфазного КЗ на линии Богучанская ГЭС – Ангара, время срабатывания защиты - 0,12 с, успешное ОАПВ, ОГ – 2, рабочая мощность – 2760 МВт

В момент КЗ активная мощность генераторов уменьшается до 300 МВт, затем начинает возрастать, напряжение уменьшается до 15,4 кВ. Угол ротора генератора возрастает. При увеличении скорости ротора больше синхронной появляется скольжение s . Для ограничения и поддержания напряжения на нормальном допустимом уровне потребовалось включение трех шунтирующих реакторов на 3 фазы на линиях Богучанская ГЭС – Ангара (№1, №2), Богучанская ГЭС – Озерная с выдержкой времени в 3 с.

К моменту срабатывания резервных защит мощность уменьшается до 60 МВт; напряжение возрастает до 19 кВ.

При срабатывании защиты и отключении поврежденной одной цепи линии Богучанская ГЭС – Ангара происходит наброс активной мощности далее происходят колебания, напряжение уменьшается.

Во время срабатывания АПВ амплитуда колебаний мощности уменьшается, напряжение возрастает до 19,3 кВ.

После первого проворота, в момент 3,5 с происходит отключение 2 генераторов, тем самым уменьшается имеющийся небаланс мощности, амплитуда качаний генератора после отключения части генераторов уменьшается и на 24-ой секунде от начала расчета переходный процесс фактически завершается, переход скольжения через нуль, свидетельствует о сохранении устойчивости.

В отличии от однофазного КЗ, при двухфазном КЗ, количество отключаемых генераторов остается равным 2, то есть напряжение генераторов нового установившегося режима не зависит от места возникновения КЗ, так как было включено 3 шунтирующих реактора, которые скомпенсировали избыточную реактивную мощность.

При двухфазном КЗ на землю на линии Богучанская ГЭС – Ангара благодаря отключению 2-х генераторов и включению 3-х шунтирующих реакторов обеспечивается устойчивость параллельной работы генераторов Богучанской ГЭС с ОЭС Сибири.

РАЗДЕЛ 5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе целью является разработка мероприятий по повышению динамической устойчивости параллельной работы генераторов Богучанской ГЭС с ОЭС Сибири. Для разработки мероприятий были проведены ряд расчетов установившихся и переходных режимов при помощи ПК. Выбранное мероприятие, а именно отключение генераторов, было смоделировано также в ПК и показало эффективность работы при возмущениях I и II группы.

Целью данного раздела является оценить эффективность проведенного научно-технического исследования (далее НТИ) с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Для этого потребуется решить ряд задач:

1. Оценка научного уровня НТИ;
2. Организация и планирование научно-исследовательских работ;
3. Расчет затрат на проведение НТИ;
4. Оценка ресурсоэффективности НТИ.

Проведенное НТИ может успешно быть использовано специалистами «СО ЕЭС» в службе электрических режимов, релейной защите и противоаварийной автоматике, а также в службе оперативного планирования режимов.

5.1 Оценка научного уровня НТИ

Количественная оценка научного или научно-технического уровня может быть произведена путем расчета результативности участников разработки по формуле (34) [19]:

$$K_{\text{ну}} = \sum_{i=1}^n (K_{\text{дуй}} \cdot d_i) \quad (34)$$

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

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

d_i – значимость i -го фактора;

n – количество факторов.

Результаты расчета сведены в таблицу 16.

Таблица 16 – Оценка научного уровня НТИ

Показатели	Значимость показателя	Достигнутый уровень	Значение i -го фактора
	d_i	$K_{дyi}$	$K_{дyi} \cdot d_i$
1. Новизна полученных или предполагаемых результатов	0,3	0,5	0,15
2. Перспективность использования результатов	0,3	0,2	0,06
3. Завершенность полученных результатов	0,2	1	0,2
4. Масштаб возможной реализации полученных результатов	0,2	0,5	0,1
Результативность	$K_{ны} = \sum(K_{дyi} \cdot d_i) = 0,51$		

Новизна полученных или предполагаемых результатов: проведенное НТИ не производилась ранее для аналогичного участка электрической сети.

Перспективность использования результатов: результаты работы возможно использовать специалистам службы электрических режимов и специалистам службы перспективного планирования режимов для расчета электрических режимов, планирования и повышения динамической устойчивости параллельной работы генераторов Богучанской ГЭС с ОЭС Сибири.

Завершенность полученных результатов: полученные результаты не требуют доработки и усовершенствований.

Масштаб возможной реализации полученных результатов: результаты работы возможно применить на более обширную ЭС.

5.2 Организация и планирование научно-исследовательских работ

5.2.1 Структура работ в рамках НТИ

Для выполнения научных исследований была сформирована рабочая группа, в состав которой входят руководитель и младший научный сотрудник (далее м.н.с.). На каждый вид запланированных работ установлена соответствующая должность исполнителей.

В этом разделе проводится планирование и перечисление работ в рамках проведения НТИ. Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 17.

Таблица 17 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Этапы	№ раб	Содержание работы	Исполнитель
Разработка технического задания	1	Получение технического задания, постановка задачи	Руководитель м.н.с.
Теоретические исследования	2	Исследование и анализ энергосистемы	м.н.с.
Практический и расчетный этап	3	Подготовка цифровой модели исследуемой энергосистемы	м.н.с.
	4	Расчет электрических режимов	м.н.с.
	5	Выбор мероприятий по повышению динамической устойчивости генераторов	м.н.с.
Обобщение и оценка результатов	6	Анализ полученных результатов и оформление отчета	Руководитель м.н.с.

5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения НТИ оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула (35) [19]:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} \quad (35)$$

где: $t_{ожі}$ – 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 по формуле (36) [19]. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы.

$$T_{p_i} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} \quad (36)$$

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.

5.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Для более удобного и наглядного представления графика проведения НТИ, представим в форме диаграммы Ганта.

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

Для построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней переведем в календарные дни по формуле (37) [19]:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} \quad (37)$$

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 формуле (38) [19]:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \quad (38)$$

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.

Все рассчитанные значения сведены в таблицу 18.

Таблица 18 – Временные показатели проведения НТИ

№		Трудоёмкость работ	Длительность	Длительность
---	--	--------------------	--------------	--------------

работ	Название работы	t_{\min} , чел-дни		t_{\max} , чел-дни		$t_{\text{ож}}i$, чел-дни		работ в рабочих днях T_{ri}		работ в календарных днях T_{ki}	
		Руководитель	М.Н.С.	Руководитель	М.Н.С.	Руководитель	М.Н.С.	Руководитель	М.Н.С.	Руководитель	М.Н.С.
1	Получение технического задания, постановка задачи	2	2	4	4	3	3	3	3	4	4
5	Исследование и анализ энергосистемы		7		12		9		9		10
8	Подготовка цифровой модели исследуемой энергосистемы		3		5		4		4		6
9	Расчет электрических режимов		5		7		6		6		8
10	Выбор мероприятий по повышению динамической устойчивости генераторов		3		5		4		4		6
11	Анализ полученных результатов и оформление отчета	1	3	3	5	2	4	2	4	2	5

На основе таблицы 18 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках НТИ на основе таблицы 18 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени проведения НТИ.

Таблица 19 – Календарный план-график проведения НТИ

№	Исполнители	T_{ki} кал. дн	Продолжительность выполнения работ													
			фев		март			апрель			май			июнь		
			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Руководитель	4	■													
	М.Н.С.	4	▨													
2	М.Н.С.	10	▨	▨												
3	М.Н.С.	6		▨	▨											
4	М.Н.С.	8			▨	▨										
5	М.Н.С.	6				▨	▨									
6	Руководитель	2					■									
	М.Н.С.	5				▨										

Итого длительность работ в календарных днях для руководителя – 6 дней, а для м.н.с. – 39 дня.

5.3 Смета затрат на проведение научных исследований

5.3.1 Материальные затраты

К материальным затратам относятся: приобретаемые со стороны сырье, покупные материалы, а также запасные части для ремонта оборудования, приборов, лабораторного оборудования и других средств труда, не относимых к основным средствам, износ спецодежды и других малоценных и быстроизнашивающихся предметов [19].

В материальные затраты, помимо вышеуказанных, включаются дополнительно затраты на канцелярские принадлежности, диски, картриджи и т.п.[19].

Таблица 20 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
Компьютер	Штука	1	30000	30000
Принтер лазерный	Штука	1	4500	4500
Бумага	Пачка	1	150	150
Ручка	Штука	2	45	90
Картридж для принтера	Штука	1	1200	1200
Карандаш механический	Штука	1	40	40
Итого				35980

В таблице 20 указан перечень материальных затрат и их стоимость. ПК RUSTab был получен бесплатно путем скачивания с официального сайта RastWin. В итоге материальные затраты составили 35980 рублей.

5.3.2 Основная заработная плата исполнителей

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада [19].

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \text{ тыс. руб.} \quad (39)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата, тыс.руб;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{осн}$), тыс.руб.

Основная заработная плата формируется согласно следующему выражению (40) [19]:

$$Z_{осн} = Z_{раб.дн.} + \text{Допл} + \text{Прем} + \text{р.к.}, \text{ тыс. руб.} \quad (40)$$

где $Z_{раб.дн}$ – тарифная заработная плата с учетом количества отработанных дней, тыс.руб.;

Допл – доплаты, тыс.руб.(15%);

Прем – премии, тыс.руб.(12%);

р.к. – коэффициент, учитывающий районное регулирование заработной платы, тыс.руб., составляет 30% от суммы всех начислений.

Расчет заработной платы приведен в таблицу 21.

Таблица 21 – Расчет заработной платы

№	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудо-емкость, чел.-дн.	З/п, приходящаяся на один чел.-дн., руб.	Всего з/п по тарифу (окладам),руб
1	Получение технического задания, постановка задачи	Руководитель	4	1000	5824
		м.н.с.	4	300	1747
2	Исследование и анализ энергосистемы	м.н.с.	10	300	4368
3	Подготовка цифровой модели исследуемой энергосистемы	м.н.с.	6	300	2621
4	Расчет электрических режимов	м.н.с.	8	300	3494
5	Выбор мероприятий по повышению динамической устойчивости генераторов	м.н.с.	6	300	2621
6	Анализ полученных результатов и оформление отчета	Руководитель	2	1000	2912
		м.н.с.	5	300	2184
Руководитель					8736
М.н.с.					17035
Итого:					25771

5.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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 (41) [19]:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot З_{\text{зп}}, \quad (41)$$

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

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%.

$$З_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot 25771 = 7731,3 \text{ тыс.руб.}$$

5.3.4 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 (42):

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 3) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (42)$$

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

Величину коэффициента накладных расходов берем в размере 16%.

$$З_{\text{накл}} = 69482,3 \cdot 0,16 = 11117,2 \text{ тыс. руб.}$$

5.3.5 Амортизация основного оборудования

Амортизация рассчитана по формуле (43) [19]:

$$H_a = \frac{1}{T_a} \frac{T_{\text{раб}}}{365} K_{\text{ком.}}, \quad (43)$$

где H_a – величина амортизации, руб.

T_a – время амортизации, год. Для компьютерной техники 5 лет.

$T_{\text{раб}}$ – продолжительность всех работ, день.

$K_{\text{ком}}$ – стоимость всех видов компьютерной техники $K_{\text{ком}}=34500$ руб

$$\text{Тогда } H_a = \frac{1}{T_a} \frac{T_{\text{раб}}}{365} K_{\text{ком}} = \frac{1}{5} \cdot \frac{39}{365} \cdot 34500 = 737,3 \text{руб.}$$

Все вычисления сведены в таблицу 22.

Таблица 22 – Смета затрат на НТИ

Затраты	Сумма, руб
Материальные затраты	35980
Расходы на оплату труда	25771
Отчисление во внебюджетные фонды	7731,3
Накладные расходы	11117,2
Амортизация	737,3
Итого:	81337

5.4 Оценка ресурсоэффективности НТИ

Определение ресурсоэффективности НТИ оценивается с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности [22]:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (44)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

b_i – балльная оценка разработки, устанавливаем экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

Для расчета интегрального показателя необходимо принять ряд критериев:

- надежность – обеспечение сохранения динамической устойчивости генераторов при различных возмущениях;
- безопасность – применение отключения генераторов в соответствии с нормативными документами;
- простота эксплуатации – разработка доступных и эффективных мероприятий для повышения динамической устойчивости генераторов;

- экономичность – применение разработанных мероприятий по повышению устойчивости генераторов с минимальными затратами денежных средств.

Далее необходимо оценить выбранные критерии по 5-и балльной шкале и определить интегральный показатель, с помощью которого и определяется эффективность использования НТИ.

Критерии оценивания НТИ для расчета интегрального показателя ресурсоэффективности приведены в таблице 23.

Таблица 23 – Критерии оценивания НТИ

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка НТИ
1. Надежность	0,35	5
3. Безопасность	0,15	4
4. Простота эксплуатации	0,25	4
5. Экономичность	0,25	5
Итого:	1,00	

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = 0,35 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 = 4,6$$

В результате расчета можно сделать вывод о том что, по 5-балльной шкале показатель ресурсоэффективности проекта составляет высокое значение, что говорит об эффективности НТИ.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» было произведено:

1. Оценка научного уровня НТИ;
2. Организация и планирование научно-исследовательских работ: был построен график Ганта: продолжительность работ для руководителя составила 6 календарных дней, для м.н.с. 39 дней;
3. Составлена смета затрат основной и дополнительной заработной платы, внебюджетных отчислений и накладных расходов. Основная часть бюджета ушла на основную заработную плату исполнителям. Общая стоимость НТИ составила 35980 руб.;

4. Оценка ресурсоэффективности показала, что интегральный показатель ресурсоэффективности составил 4,6 единиц, что говорит о высокой эффективности проекта.

РАЗДЕЛ 6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

Социальная ответственность – это ответственность организации за воздействие ее решений и деятельности на общество и окружающую среду через прозрачное и этическое поведение [23].

В работе разрабатываются мероприятия по повышению динамической устойчивости генераторов Богучанской ГЭС при параллельной их работе с ОЭС Сибири. Расчеты электрических режимов, производимые при помощи ПК RUSTab, и мероприятия, такие как ОГ, применяются специалистами в службах электрических режимов, релейной защиты и противоаварийной автоматике, оперативного планирования режимов.

В качестве рабочего места рассматривается место работы с ЭВМ в кабинете службы электрических режимов.

6.1 Производственная безопасность

6.1.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

К вредным факторам при работе специалиста с ЭВМ относятся: повышенный уровень шума, параметры микроклимата, недостаток естественного света, недостаточная освещенность рабочего места и электромагнитное излучение [24]. Опасными факторами, влияющие на специалиста, являются повышенный уровень статического электричества и поражение электрическим током, пожар [24].

При длительном нахождении человека в зоне воздействия разных неблагоприятных факторов приводит к различного рода заболеваниям.

Рассмотрим действие различных факторов на организм человека и способы индивидуальной и коллективной защиты.

- *Превышение уровня шума*

С физиологической точки зрения шумом называют любой нежелательный звук, оказывающий вредное воздействие на организм человека.

Шум определяется следующими основными параметрами:

- уровень звукового давления A , дБ;

- интенсивность звука I , Вт/м²;
- уровень звука L , дБА.

Согласно [25] допустимые уровни звука при работе, требующей сосредоточенности, работе с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами составляют 75 дБА.

При организации рабочего места оперативного персонала следует принимать следующие меры по снижению шума:

- звуковая изоляция и звуковое поглощение;
- применение глушителей шума;
- использование средств индивидуальной защиты: вкладыши, шлемы, противοшумные наушники [26].

Дополнительные меры по шумопоглощению: использование подвесного потолка, служащего как звукопоглощающий экран; подвесные акустические потолки; установка шумящего оборудования на виброизолирующие поверхности автономно от рабочего места пользователя.

- *Микроклимат*

Показатели, характеризующие микроклимат в производственных помещениях:

- температура воздуха;
- температура поверхностей ограждающих конструкций, устройств, технологического оборудования;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового облучения [28].

В таблице 23 приведены допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений [28].

Таблица 23 – Допустимые величины показателей микроклимата

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
		Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин			
Холодный	Iб (140-174)	19-20,9	23,1-24	18-25	15-75	0,1
Теплый		20-21,9	24,1-28	19-29		

Зоны пребывания человека считаются безопасными, если в них не превышены требования по параметрам микроклимата по таблице 23.

Для поддержания соответствующих микроклиматических параметров в кабинете используются водяная система отопления, система естественной вентиляции, а также система кондиционирования.

Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тела работающих от производственных источников не более 25% облучаемой поверхности тела составляет 100 Вт/м, от 25% до 50% величина интенсивности теплового облучения не более 70 Вт/м, а при 50% и более облучаемой поверхности тела интенсивность теплового облучения не более 35 Вт/м.

После каждого часа работы с ЭВМ проводится ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание [27].

- *Производственное освещение*

В рассматриваемом производственном помещении имеется совмещенное освещение, то есть и естественное освещение, и искусственное.

Нормирование освещенности производится в соответствии с [29].

В кабинете двустороннее боковое естественное освещение через световые проемы в наружных стенах. Так как естественного освещения в утренний и вечерний период, при пасмурной погоде недостаточно, применяется искусственное освещение. В качестве искусственного освещения используются люминесцентные лампы со световой отдачей 75 лм/Вт сроком службы до 10 тыс.ч. Освещенность на поверхности стола в рабочей зоне составляет 400 лк,

что соответствует [29]. Также имеется аварийное, охранное и дежурное искусственное освещение.

В качестве критериев комфортности по освещению установлены нормативные требования к естественному и искусственному освещению, представленные в таблице 24.

Таблица 24 – Нормируемые показатели освещения

Наименование рабочего места	Рабочая поверхность и плоскость нормирования КЕО и освещенности (Г – горизонтальная, В – вертикальная) и высота плоскости над полом, м	Коэффициент естественной освещенности, КЕО, %		Освещенность при совмещенной системе, лк	
		При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении
Помещения для работы с дисплеями и видео терминалами, залы ЭВМ	Г – 0,8	3,5	1,2	2,1	0,7
	Экран монитора: В – 1,2	-	-	-	-

- *Электромагнитное излучение*

ЭВМ является источником электромагнитного, ультрафиолетового излучения, электростатических полей, источником шума.

При работе с ЭВМ предусматриваются различные требования по организации рабочих мест и эксплуатации ЭВМ [27].

Параметры электромагнитных излучений на рабочем месте пользователя ПК и величина электростатического потенциала экрана дисплея не должны превышать значений, установленных [27].

Согласно [31] необходимо отметить следующие требования:

- рекомендуется организация перерывов на 10-15 минут через каждые 45-60 минут работы с ЭВМ;
- продолжительность непрерывной работы без регламентированного перерыва не должна превышать 1 часа.

Защита от действия ЭМП:

- активное, пассивное и комплексное экранирование;
- удаление источников из ближней и рабочей зоны;
- усовершенствование конструкции оборудования для снижения уровня ЭМП, а также для снижения излучаемой и потребляемой мощности оборудования;
- ограничение времени пребывания операторов или населения в зоне действия ЭМП.

В таблице 25 представлены средства защиты от излучений электромагнитных полей ЭВМ.

Таблица 25 – Средства защиты от излучений оптического диапазона и электромагнитных полей ПЭВМ

№ п/п	Средство профилактики неблагоприятного влияния ЭВМ	Оказываемое профилактическое действие
1	Приэкранные защитные фильтры для видеомониторов	Снижают уровень напряженности электрического и электростатического поля, повышают контрастность изображения, уменьшают блики
2	Нейтрализаторы электрических полей промышленной частоты	Снижают уровень электрического поля промышленной частоты (50 Гц)
3	Очки защитные со спектральными фильтрами ЛС и НСФ, разрешенные Минздравом России для работы с ЭВМ	Профилактика компьютерного зрительного синдрома, улучшение визуальных показателей видеомониторов, повышение работоспособности, снижение зрительного утомления

- *Поражение статическим электричеством и электрическим током*

Электрические заряды, находящиеся без движения, накапливаются на

предметах, тогда имеет место быть статическое электричество. Последствия накопления статического электричества варьируются от небольшого дискомфорта при прикосновении к заряженному предмету до больших и серьезных телесных повреждений. Наибольшую опасность статическое электричество представляет для ЭВМ в виде поломки техники.

Рассматриваемое помещение относится к категории помещений с повышенной опасностью поражения людей электрическим током, так как в помещении имеются токопроводящие полы, имеется токопроводящая пыль, а также есть возможность прикосновения человека к открытым проводящим частям электрооборудования [14].

Для предотвращения поломок ЭВМ и телесных повреждений у человека применяются следующие средства коллективной и индивидуальной защиты: заземляющие устройства, увлажняющие устройства, нейтрализаторы, экранирующие устройства, антиэлектростатическая одежда и обувь [32].

Электрический удар, шок наблюдается, как правило, при воздействии малых токов и при напряжении до 1000 В. Следствием электротравмы являются ожоги, металлизация кожи, электрические знаки. Не вызывая ожога, ток действует на нервную систему и мышцы, вызывая паралич мышц дыхания и сердечной мышцы, поэтому при поражении электрическим током действовать надо быстро, не забывая о безопасности оказывающего помощь, то есть о средствах и способах защиты.

Способы и средства защиты от поражения электрическим током:

- недоступность токоведущих частей оборудования;
- проведение вводных, первичных и периодических инструктажей по технике безопасности;
- правильная организация рабочего места;
- защитное заземление оборудования;
- контроль изоляции проводов.

6.2 Экологическая безопасность

Расчеты электрических режимов, необходимые для выполнения ВКР,

проводились на ЭВМ, поэтому рассмотрим влияние ЭВМ на окружающую среду.

При сборке ЭВМ большинство сырья является токсичным. При сборке компьютера используется пластик, оргстекло, алюминий, кремний и еще около 30 высокотоксичных материалов. Устаревшие и непригодные для дальнейшего использования ЭВМ разбираются на запчасти, а все что остается – это отходы, которые включают в себя токсичные вещества, утилизируемые компоненты, а также драгоценные материалы. Если устаревший ЭВМ отправить просто на свалку, то материалы, из которых изготавливается ЭВМ, начнут выделять токсичные вещества и это негативно скажется на экологии окружающей среды, поэтому существует определенная методика утилизации компьютерной техники.

Существует три способа утилизации отходов: переработка, захоронение и сжигание, которые подбираются для каждого материала индивидуально.

Утилизация твердых отходов осуществляется при помощи специальных оборудований для сжигания отходов при высокой температуре. При утилизации жидких токсичных отходов применяются реагенты, которые подбираются для каждого вида вещества.

Для захоронения отходов существуют специальные площадки (полигоны), которые соответствуют установленным регламентам, контролируются на наличие вредных выбросов в окружающую среду и имеют разрешение на захоронение веществ.

При утилизации компьютерной техники имеется определенный порядок оформления документации. Для начала заказчик направляет заявку с указанием количества и марки утилизируемого продукта (например, монитор ЖК – 5 шт., системный блок – 3 шт.). Далее исполнитель отправляет заказчику комплекс услуг и счет, заказчик оплачивает счет, оформляется договор и необходимая документация и исполнитель при согласовании с заказчиком вывозит утилизируемую технику.

6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В работе в качестве рабочего место рассматривается место специалиста службы электрических режимов за ЭВМ. Помещение, где рассматривается рабочее место, по взрывопожарной безопасности относится к категории «В1», так как в помещении имеются твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы, которые при взаимодействии с водой, с воздухом или друг с другом только горят [36].

В современных ЭВМ очень плотно размещены элементы электронных схем. Близко друг к другу располагаются и соединительные провода, кабели. В течении продолжительного времени работы провода нагреваются при протекании по ним электрического тока и их изоляция может расплавиться. Все это приводит к короткому замыканию с сопровождением искрения. В результате, элементы электронных схем перегреваются и возможно возникновение пожара.

Поэтому во всех организациях предусматривают пожарную профилактику, то есть комплекс организационных и технических мероприятий для обеспечения безопасности людей.

Существуют следующие виды мероприятий по пожарной безопасности:

- 1) Мероприятия по установлению противопожарного режима;
- 2) Мероприятия по определению и поддержанию надлежащего противопожарного состояния во всех зданиях, сооружениях, помещениях, участках, площадках, кабинетах, отдельных местах и точках;
- 3) Мероприятия по контролю, надзору за выполнением правил пожарной безопасности при эксплуатации, ремонте, обслуживании зданий, сооружений, помещений, коммунальных сетей, оборудования, инвентаря и т.п.

Мероприятия противопожарной профилактики:

- регламентирование проведения пожароопасных работ;
- при пожаре применение порядка обесточивания электрооборудования;
- после окончания работ установка порядка осмотра и закрытия помещений;
- определение действия персонала, работников при обнаружении пожара;

- проведение противопожарного инструктажа и занятий по пожарной безопасности;
- наличие в помещениях аптечки первой помощи и углекислотных огнетушителей;
- оснащение помещения автоматической системы газового пожаротушения;
- установка противопожарных дымовых датчиков;

При возгорании или возникновении пожара следует немедленно начать эвакуацию людей, отключить подачу воздуха по системе вентиляции, обесточить помещение, вызвать пожарную охрану, пожар следует тушить переносным углекислотным огнетушителем марки ОУ-3, который должен быть в каждом помещении.

План эвакуации при пожаре выглядит следующим образом:

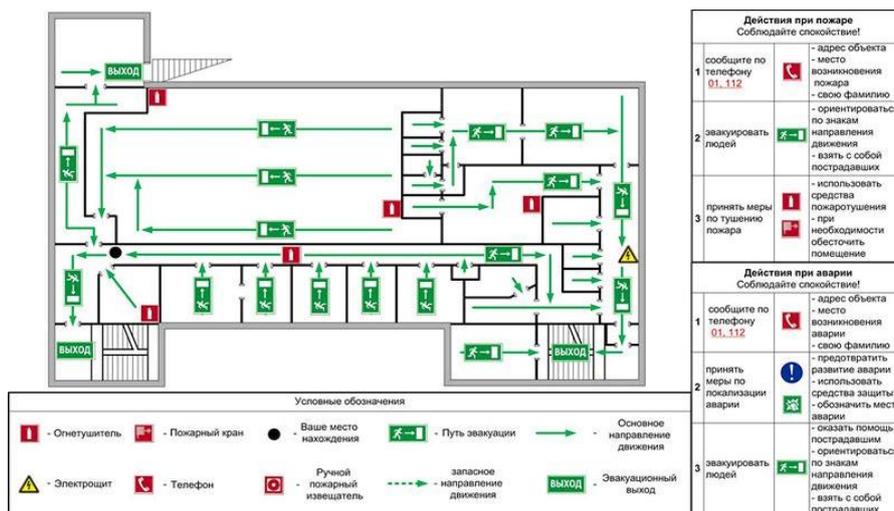


Рисунок 48 – План эвакуации

6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

6.4.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

Специалист службы электрических режимов должен иметь высшее образование в энергетической области по профилю управление режимами энергосистем, владеть навыками работы с ПК. При отсутствии необходимых навыков работники должны быть обучены в специализированных центрах подготовки персонала.

Профессиональная подготовка персонала, повышение его квалификации, проверка знаний и инструктажи проводятся в соответствии с требованиями государственных и отраслевых нормативных правовых актов по организации охраны труда и безопасной работе персонала.

Организационные мероприятия описаны в межотраслевых правилах по охране труда при эксплуатации электроустановок [34].

6.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Рабочее место специалиста должно быть организовано в соответствии с требованиями стандартов, технических условий.

Согласно [27] и [34] существуют определенные требования к организации рабочего места за ЭВМ:

- помещения с ЭВМ должны иметь естественное и искусственное освещение;
- размещением рабочего места, по возможности, при падении естественного света слева;
- площадь рабочего места при работе в нашем случае с плоским дисплеем должна составлять не менее 6 м²;
- помещения с ЭВМ должны быть оборудованы системами отопления и кондиционирования воздуха;
- организация оптимального положения специалиста, что достигается при наличии регулировочного сиденья, рабочей поверхности, либо наличием подставки для ног шириной не менее 300 мм с регулировкой высоты до 150 мм;
- расстояние между рабочими местами специалиста должно быть не менее 2 м;
- расположение ЭВМ от глаз специалиста на расстоянии 600-700 мм под углом 30°;
- проведение ежедневной влажной уборки в помещениях с ЭВМ;
- организация режима труда и отдыха при работе с ЭВМ;
- уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБА, а при работающих печатных оборудований 75 дБА;

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью выпускной квалификационной работы были разработаны мероприятия по повышению динамической устойчивости параллельной работы генераторов Богучанской ГЭС с ОЭС Сибири.

В первом разделе была дана характеристика существующего состояния электрических сетей ОЭС Сибири, Красноярской и Тывинской ЭС, сформированы исходные данные и выявлена необходимость в повышении динамической устойчивости в связи с открытием в 2016 году Богучанского алюминиевого завода, которому потребуется до 50 % мощности Богучанской ГЭС. В качестве выбранного мероприятия для решения проблемы является наиболее распространенный способ повышения и сохранения динамической устойчивости ГЭС – ОГ.

Во втором разделе приведены основные положения при расчете и анализе динамической устойчивости, рассмотрены основные виды управляющих воздействий и дана подробная характеристика ОГ.

В третьем разделе рассмотрен ПК RUSTab, как инструмент для исследования динамической устойчивости. Подробно описаны принципы подготовки исходных данных для расчета и анализа динамической устойчивости.

В четвертом разделе в ПК RUSTab рассматривалось моделирование ЭС. Произведен контроль доаварийного режима рассматриваемой ЭС с целью расчета переходных режимов и с последующим выбором УВ. По результатам исследований сделан вывод о том, что полученные значения токов, передаваемых по ВЛ, не превышают допустимых значений для заданных марок проводов. Расчет переходных режимов производился при возникновении нормативных возмущений групп I и II. Отключение генераторов и включение шунтирующих реакторов оказало положительное влияние на повышение и сохранение динамической устойчивости параллельной работы генераторов Богучанской ГЭС с ОЭС Сибири.

В пятом разделе была произведена оценка эффективности проведенного научно-технического исследования с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Общая стоимость научно-технического исследования составила 35980 рублей. Интегральный показатель ресурсоэффективности составил 4,6 единиц, что говорит о высокой эффективности проекта.

В шестом разделе произведен анализ вредных и опасных факторов воздействия компьютерной техники, рассмотрены меры по ограничению воздействия их на персонал, произведен анализ мероприятий по безопасности в чрезвычайных ситуациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по устойчивости энергосистем. – М.:Издательство НЦ ЭНАС, 2004;
2. Хрущев Ю.В. Методы расчета устойчивости энергосистем. Учебное пособие. – Томск: STT, 2005. – 176 с.;
3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических энергосистемах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.:Вышш.шк.,1985. – 536 с. ил.;
4. Портной М.Г., Рабинович Р.С. Управление энергосистемой для обеспечения устойчивости М.: Энергия, 1978 г. — 352 с;
5. Стандарт организации. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования ОАО «Системный Оператор Единой энергетической системы»;
6. ГОСТ 19431 – 84 "Энергетика и электрификация. Термины и определения". – М: Изд-во стандартов, 1986-9 с.;
7. Программные комплексы RastrWin, Bars, Lincor, Rustab [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.rastrwin.ru/>, свободный;
8. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистеме. –1990 г.– 390 с.;
9. Мелешкин Г.А., Меркурьев Г.В. Устойчивость энергосистем. Монография. Книга 1: СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 369 с.;
10. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / под ред. Л.А. Жукова – М., Энергия, 1979. – 456 с, ил.;
11. Калентионок Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем: учебное пособие / Е. В. Калентионок. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.;

12. Отключение генераторов (ОГ) [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/183061/>, свободный
13. Виды управляющих воздействий [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://so-ups.ru/index.php?id=1351>, свободный
14. Правила устройства электроустановок.– 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 160 с., ил.
15. Постановка задачи управления переходными режимами для обеспечения устойчивости Нурекской ГЭС путем отключения генераторов// Известия Томского политехнического университета – 2009 –№4
16. ГОСТ 721 – 77. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В. – 25 с.;
17. ГОСТ 19431 – 84 "Энергетика и электрификация. Термины и определения". – М: Изд-во стандартов, 1986-9 с.
18. Стандарт ОАО РАО «ЕЭС России» «Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистемы», 2008 – 49 с.;
19. Бухалков М.И. Производственный менеджмент: организация производства: Учебник. – 2-е изд. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 395 с.;
20. ГОСТ 14.322 – 83 Нормирование расхода материала. Основные положения;
21. ГОСТ 51541 – 99 Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. Общие положения;
22. Тихомиров Н.П., Потравный И.М., Тихомирова Т.М. Методы анализа и управления эколого-экономическими рисками: учеб. пособие для вузов / под ред. проф. Н.П. Тихомирова. М., 2003.
23. ГОСТ Р ИСО 26000 – 2012. Руководство по социальной ответственности;
24. ГОСТ 12.003 – 74. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация;

25. ГОСТ 12.1.003 – 83. Шум. Общие требования безопасности;
26. ГОСТ 12.1.029 – 80. Средства и методы защиты от шума.

Классификация;

27. СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»;
28. СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений;
29. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение;
30. ГОСТ 12.1.038–82. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов;
31. ГОСТ 12.1.045 – 84. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля;
32. ГОСТ 12.4.124 – 83. Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования;
33. ГОСТ Р 22.0.07 – 95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники техногенных чрезвычайных ситуаций. Классификация и номенклатура поражающих факторов и их параметров;
34. ПОТ Р М–016–2001 РД 153–34.0–03.150–00. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок;
35. ГОСТ 12.2.032 – 78. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
36. НПБ 105 – 03 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.