

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»

институт

«Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

А.С. Торопов

подпись инициалы, фамилия

« _____ » _____ 2023 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код – наименование направления

Моделирование работы АПВ линии Д–61 энергосистемы

тема

Республики Хакасия

Руководитель

подпись, дата

доц., к. т. н

должность, ученая степень

А. В. Коловский

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

А.А. Петрова

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

И. А. Кычакова

инициалы, фамилия

Абакан 2023

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
институт

Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ А.С. Торопов

«__» _____ 2023 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в виде бакалаврской работы

Студентке Петровой Алине Андреевне

(фамилия, имя, отчество)

Группа ХЭн 19-01 Направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

(код)

(наименование)

Тема выпускной квалификационной работы «Моделирование работы АПВ линии Д-61 энергосистемы Республики Хакасия»

Утверждена приказом по институту № _____ от _____

Руководитель ВКР А.В. Коловский, доцент кафедры «Электроэнергетика»

(инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы)

Исходные данные для ВКР однолинейная схема электрических подстанций, данные по генераторам, линиям электропередач.

Перечень разделов выпускной квалификационной работы:

Введение

1 Теоретическая часть

1.1 Характеристика энергосистемы

1.2 Описание исследуемого участка сети

1.3 Современные устройства автоматического повторного включения

1.5 Эксплуатация устройств трехфазного автоматического повторного включения на линиях с двухсторонним питанием

1.6 Устройства автоматического повторного включения с контролем синхронизма

1.7 Предъявляемые требования к устройствам АПВ

1.8 Метод работы автоматического повторного включения с контролем синхронизма

1.9 Обзор программного обеспечения для моделирования работы АПВ

1.10 Влияние срабатывания устройств АПВ на статическую и динамическую устойчивость энергосистемы

2 Аналитическая часть. Разработка модели сети в приложении RUSTab ПК RastrWin

2.1 Формирование топологии сети

2.2 Математическое описание генераторов и их моделирование в ПК RUSTab

2.3 Моделирование системы АРВ генераторов в RUSTab

2.4 Формирование подсистемы моделирования автоматики

3 Практическая часть. Моделирование переходного процесса при АПВ линии

3.1 Выбор параметров расчета

3.2 Описание модели энергосистемы Республики Хакасия в RUSTab ПК RastrWin3

3.3 Расчет параметров настройки АПВ с функцией контроля синхронизма

3.4 Моделирование работы автоматического повторного включения с контролем синхронизма

Перечень обязательных листов графической части:

1. Модель исследуемого участка сети и функции моделирования АПВ линии

2. Графики угла ротора и тока статора генератора на Абаканской ТЭЦ

3. Графики изменения частоты и напряжения Абаканской ТЭЦ

Руководитель ВКР

А.В.Коловский

(подпись, инициалы и фамилия)

Задание принял к исполнению

А.А. Петрова

(подпись, инициалы и фамилия студента)

«11» декабря 2022 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Моделирование работы АПВ линии Д-61 энергосистемы Республики Хакасия» содержит 81 страниц текстового документа, 26 использованных источников, 3 листа графического материала.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ, КОНТРОЛЬ СИНХРОНИЗМА, ЭНЕРГОСИСТЕМА, ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ, УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, RASTRWIN3.

Объект исследования – подстанции ПС 220 кВ Абакан–районная и Абаканская ТЭЦ, ВЛ Д-61 Абакан-районная – Абаканская ТЭЦ.

Предмет исследования: параметры синхронизации напряжения и фазового угла.

Цель данной работы заключается в моделировании работы устройства автоматического повторного включения с контролем синхронизма в программном комплексе RUSTab.

Практическая значимость исследований – внедрение устройства способствует повышению эффективности работы автоматического повторного включения с контролем синхронизма, позволит сократить время синхронизации энергосистем для поддержания непрерывного электроснабжения потребителей.

THE ABSTRACT

The final qualifying work on the topic "Modeling the operation of the APV line D-61 of the power system of the Republic of Khakassia" contains 81 pages of a text document, 26 sources used, 3 sheets of graphic material.

AUTOMATIC RE-ACTIVATION, SYNCHRONISM CONTROL, POWER SYSTEM, TRANSIENTS, POWER SYSTEM STABILITY, MODELING, RASTRWIN3..

The object of the study is the electrical substations of 220 kV Abakan-district and Abakan thermal power plants, overhead power line D-61 Abakan-district - Abakan thermal power plant.

Subject of research: voltage and phase angle synchronization parameters.

The purpose of this work is to simulate the operation of an automatic re-activation device with synchronism control in the RUSTab software package.

The practical significance of the research is that the introduction of the device contributes to improving the efficiency of automatic re-activation with synchronism control, will reduce the synchronization time of power systems to maintain continuous power supply to consumers.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 Теоретическая часть.....	10
1.1 Характеристика энергосистемы.....	10
1.2 Описание исследуемого участка сети.....	13
1.3 Современные устройства автоматического повторного включения.....	16
1.5 Эксплуатация устройств трехфазного автоматического повторного включения на линиях с двухсторонним питанием.....	18
1.6 Устройства автоматического повторного включения с контролем синхронизма.....	19
1.7 Предъявляемые требования к устройствам АПВ.....	21
1.8 Метод работы автоматического повторного включения с контролем синхронизма.....	22
1.9 Обзор программного обеспечения для моделирования работы АПВ.....	25
1.10 Влияние срабатывания устройств АПВ на статическую и динамическую устойчивость энергосистемы.....	27
2 Аналитическая часть. Разработка модели сети в приложении RUSTab ПК RastrWin3.....	31
2.1 Формирование топологии сети.....	32
2.2 Математическое описание генераторов и их моделирование в ПК RUSTab.....	36
2.2.1 Математическая модель синхронных генераторов.....	36
2.2.2 Модели генераторов, используемых в ПК RUSTab.....	40
2.3 Моделирование системы АРВ генераторов в RUSTab.....	44
2.3.1 Настройка параметров регуляторов возбуждения.....	44

2.3.2 Задание параметров форсировки возбуждения.....	46
2.3.3 Определение параметров возбудителей	47
2.4 Формирование подсистемы моделирования автоматики.	49
3 Практическая часть. Моделирование переходного процесса при АПВ линии.....	57
3.1 Выбор параметров расчета	58
3.2 Описание модели энергосистемы Республики Хакасия в RUSTab ПК RastrWin3	60
3.3 Расчет параметров настройки АПВ с функцией контроля синхронизма .	66
3.4 Моделирование работы автоматического повторного включения с контролем синхронизма.....	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	79
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	81

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос синхронизации отделившихся от ЕЭС России в результате аварийных событий энергоузлов имеет большое значение, особенно в дефицитных по генерации районах, так как скорейшее восстановление синхронной работы позволяет избежать аварийных ограничений потребителей. В масштабах ЕЭС России существует множество таких районов.

Синхронизация отдельных частей энергосистемы необходима для обеспечения стабильного и надежного электроснабжения потребителей. Когда отдельные части энергосистемы не синхронизированы должным образом, это может привести к нарушению синхронной работы.

Синхронная работа относится к скоординированной деятельности генераторов в энергосистеме. Когда генераторы синхронизированы, они работают с одинаковой частотой и фазовым углом. Это обеспечивает бесперебойную передачу энергии от одного генератора к другому и поддерживает стабильную сеть. Если два генератора не синхронизированы, они будут работать на разных частотах и фазовых углах. При подключении они будут пытаться выровнять свои частоты и фазовые углы, что может привести к большим скачкам напряжения и нестабильности в системе. Это может привести к отключению электроэнергии или повреждению оборудования.

Актуальность. С увеличением количества аварий на линиях электропередач возникает потребность в быстром ликвидации повреждения и возобновлении устойчивой работы всей энергосистемы. Использование АПВ позволит повысить надежность энергосистемы и быстро восстановить подачу электроэнергии.

Объектом исследования являются подстанции ПС 220 кВ Абакан–районная и Абаканская ТЭЦ.

Предметом исследования являются параметры синхронизации напряжения и фазового угла.

Цель – разработка концепции построения устройства автоматического повторного включения с контролем синхронизма для линий, отключение которых приводит к изменению баланса мощностей, развитию аварии и нарушению устойчивости.

Задачи работы:

1. Анализ устройств АПВ с контролем синхронизма.
2. Определение проблем, возникающих при их эксплуатации АПВ с контролем синхронизма.
3. Определение основных теоретических принципов, необходимых для построения АПВ с контролем синхронизма.
4. Предоставить обзор использования и назначения табличных элементов запуска при моделировании автоматизации в программном пакете RUSTab.
5. Моделирование процесса работы АПВ с контролем синхронизма в ПК RUSTab.
6. Разработка алгоритма работы устройства АПВ с контролем синхронизма.

Методы – разработка принципов построения устройства АПВ с контролем синхронизма в программном комплексе.

1 Теоретическая часть

1.1 Характеристика энергосистемы

Энергетическая система представляет собой совокупность электростанций, тепловых и электрических сетей, которые соединены между собой и связаны одинаковым режимом работы в процессе преобразования, производства и передачи электроэнергии.

Энергосистема исследуемого региона входит в операционную зону Филиала Акционерного общества «Системный оператор Единой энергетической системы» Хакасское РДУ.

Основной задачей АО «СО ЕЭС» [7], является обеспечения устойчивого режима работы ЕЭС и качественной электроэнергией, соответствующей требованиям технических регламентов и других нормативных документов. Достигается это путем управления производством электрической энергии.

Основные направления деятельности Системного оператора [7]:

- Управление технологическими режимами работы объектов ЕЭС России в реальном времени;
- Долгосрочное и перспективное планирование, участие в перспективном развитии ЕЭС России;
- Планирование и прогнозирование управления электроэнергетическими режимами;
- Поддержание торговых процедур и сопровождение оптового рынка электроэнергии;

Структура Системного оператора [7]:

- Исполнительный аппарат с центральным диспетчерским управлением;
- 7 филиалов – объединенных диспетчерских управлений (ОДУ);
- 49 филиалов – региональных диспетчерских управлений (РДУ).

В операционную зону Филиала АО «СО ЕЭС» Хакасского РДУ входят 6 электростанций, общая установленная мощность которых 7157,2 МВт. Саяно–Шушенская ГЭС, Майнская ГЭС и Абаканская ТЭЦ являются наиболее крупными из них.

Электроэнергетический комплекс Республики Хакасии представляет собой 10 линий электропередачи класса напряжения 500 кВ, 34 линии электропередачи класса напряжения 220 кВ, 50 линий электропередачи класса напряжения 110 кВ, 65 трансформаторных подстанции и распределительных устройства электростанций напряжением 500–110 кВ с суммарной мощностью трансформаторов 10 694 МВА.

Контролируемые сечения, контроль перетока активной мощности в которых осуществляется в нормальной схеме:

- 1 – Выдача мощности Саяно–Шушенской ГЭС;
- 2 – Абакан – Сора;
- 3 – Выдача мощности Абаканской ТЭЦ;
- 4 – Абаканская – Абакан–районная;
- 5 – Абакано–Черногорский узел;
- 6 – АТ Означенное.

Крупнейшими потребителями электроэнергии являются: Саянский и Хакасский алюминиевые заводы ПАО «РУСАЛ», ООО «Сибирская угольно–энергетическая компания (СУЭК)», Сорский горно–обогатительный комбинат, ОАО «РЖД».

На рисунке 1 представлена схема основной системообразующей сети 110–500 кВ энергосистемы Республики Хакасия.

ИЗЪЯТ 1 РИСУНОК

1.2 Описание исследуемого участка сети

Участок электрической сети, который будет рассматриваться в данной работе, представляет из себя подстанцию ПС 220 кВ Абакан–районная и Абаканскую ТЭЦ. Абаканская ТЭЦ является частью Абакано–Черногорского узла, от которой происходит питание таких подстанций, как ПС 110 кВ Рассвет, ПС 110 кВ Юго–Западная, ПС 110 кВ Калининская.

Таблица 1.1 – Технические данные подстанций

Наименование подстанции	Диспетчерское наименование Т/АТ/Г	Название трансформаторов	Изготовитель	Тип системы охлаждения	Срок службы нормативный, лет
1	2	3	4	5	6
ПС 220 кВ Абакан–Районная	АТ1	АТДЦТН – 200000/220/110– У1	г. Тольятти ОАО "Трансформатор "	Масляное охлаждение с дутьем	25
	АТ2	АТДЦТН – 200000/220/110– У1	г. Тольятти ОАО "Трансформатор "	Масляное охлаждение с дутьем	25
Абаканская ТЭЦ	1Т	ТРДЦН– 80000/110–75У	г. Тольятти ОАО "Трансформатор "	Масляное охлаждение с дутьем	25
	2Т	ТРДН– 32000/110/76У1	г. Тольятти ОАО "Трансформатор "	Масляное охлаждение с дутьем	25
	3Т	ТДЦ– 125000/110/10У1	ООО "Сименс Трансформаторы "	Масляное охлаждение с дутьем	30
	4Т	ТДЦ–160000/110– У ХЛ1	ООО "Сименс Трансформатор"	Масляное охлаждение с дутьем	30
Абаканская ТЭЦ	1Г	ТВФ–63–2–У3	г. Новосибирск ОАО «ЭЛСИБ»	Форсированное охлаждение обмотки ротора водородом и косвенное водородное охлаждение обмотки статора	25
	2Г	ТВФ–120–2–У3	г. Новосибирск ОАО «ЭЛСИБ»		25
	3Г	ТВФ–110–2–Е–У3	г. Новосибирск ОАО «ЭЛСИБ»		25
	4Г	ТВФ–136–2У3	г. Новосибирск ОАО «ЭЛСИБ»		25

Таблица 1.2 – Технические данные воздушных линий электропередачи

Наименование ЛЭП	Вид ЛЭП	Номинальное напряжение кВ	Длина км	Количество штук	Марка провода
1	2	3	4	5	6
ВЛ 220 кВ Абакан-районная – Абаканская I цепь (Д-67)	ВЛ	220	6,3	1	АС – 400/51
ВЛ 220 кВ Абакан-районная – Абаканская II цепь (Д-68)	ВЛ	220	6,3	1	АС – 400/51
ВЛ 220 кВ Абакан-районная – Абаканская III цепь (Д-69)	ВЛ	220	9	1	АС – 400/51
ВЛ 220 кВ Абакан-районная – Абаканская ТЭЦ (Д-61)	ВЛ	220	9,7	1	АС – 400/51
ВЛ 110 кВ Абакан-районная – Абаканская ТЭЦ I цепь (С-303)	ВЛ	110	9,1	1	АСО – 400/22
ВЛ 110 кВ Абакан-районная – Абаканская ТЭЦ II цепь (С-304)	ВЛ	110	9,1	1	АСО – 400/22

На рисунке 1.2 представлена часть однолинейной схемы исследуемого участка сети. Для наглядного представления на схеме изображены основные рассматриваемые объекты (ПС Абакан–Районная, Абаканская ТЭЦ и ЛЭП Д–61):

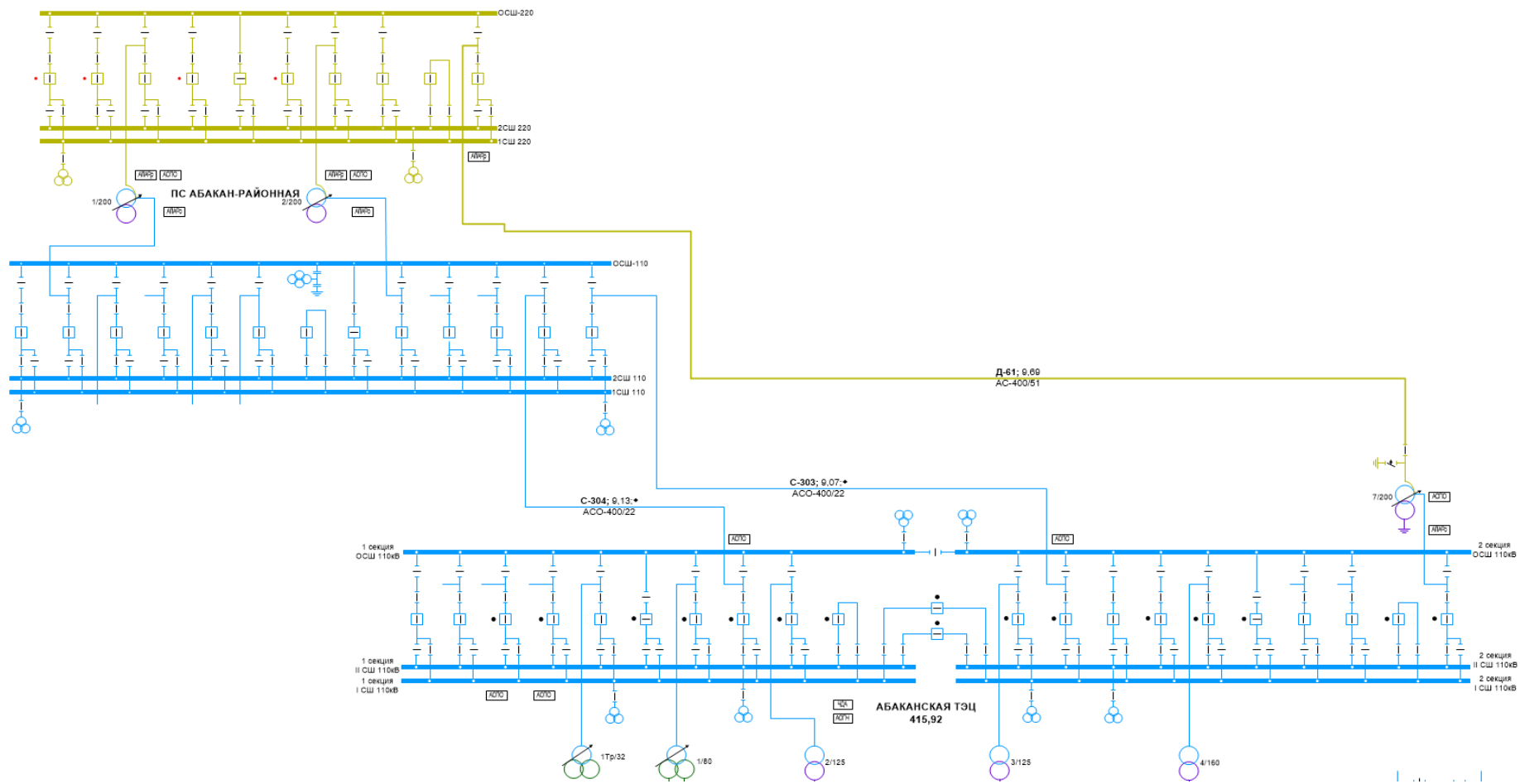


Рисунок 1.2 – Фрагмент однолинейной схема исследуемого участка сети

1.3 Современные устройства автоматического повторного включения

Автоматическое повторное включение (АПВ) — средство электроавтоматики, которое предназначено для повторного включения выключателя отключившегося элемента энергосистемы через определённый промежуток времени для восстановления нормальной схемы.

В электрической сети все повреждения подразделяются на два вида: *устойчивые и кратковременные*.

- Устойчивые аварийные повреждения характеризуются постоянным фактором, который не способен самоустраниться без вмешательства персонала. К таким повреждениям можно отнести обрывы тросов, проводов, падение опор, повреждения электрических аппаратов и т.д.

- Неустойчивые (кратковременные) повреждения являются самоустраняющимися. Они обусловлены случайными причинами, действующими в течение непродолжительного промежутка времени. Такие повреждения могут возникать в результате падения деревьев, перемещения животных, при схлёстывании проводов из-за ветра и т.д.

В энергосистеме применяют устройства АПВ для ускорения и автоматизации процесса повторного включения отключенного участка сети под напряжение. Автоматические повторные включения делятся на *успешные и неуспешные*. Действие АПВ называется успешным, если после повторного включения ЛЭП устройством АПВ линия остается в работе. Соответственно, при неуспешном повторном включении поврежденный элемент вновь отключится устройствами защиты.

Классификация устройств АПВ:

1. В зависимости от числа включаемых фаз:

- Однофазные (ОАПВ) – для автоматического включения одной фазы (при однофазном коротком замыкании);

- Трехфазные (ТАПВ) – для включения трех фаз выключателя (после их отключения).

2. В зависимости от количества источников питания:

- С односторонним питанием – питание линии происходит от одного источника
- С двухсторонним питанием – электроснабжение предусматривается от двух источников питания

3. В зависимости от условий работы трехфазные устройства АПВ разделяются на:

- Несинхронные (НАПВ) – производится ввод двух выключателей одновременно без соблюдения синхронности;
- Быстродействующие (БАПВ) – повторное включение происходит за максимально короткое временное значение;
- С проверкой наличия напряжения (АПВНН);
- С проверкой отсутствия напряжения (АПВОН);
- С ожиданием синхронизма (АПВОС) – включение происходит последовательно с противоположных сторон;
- С улавливанием синхронизма (АПВУС) – разрешается включение линии при определенном значении диапазона углов между векторами напряжений.

Принцип действия автоматического повторного включения на линиях электропередач заключается в восстановлении подачи электроэнергии на неисправный участок линии передачи или распределения путем автоматического включения выключателя после короткой задержки. Процесс автоматического повторного включения обычно включает ряд операций, направленных на изоляцию неисправного участка линии, а затем повторное включение его после устранения неисправности. Шаги, связанные с процессом автоматического повторного включения:

1.Обнаружение неисправности. Когда на линии электропередачи возникает неисправность, защитные реле обнаруживают неисправность и посылают сигнал на автоматический выключатель для отключения, который изолирует данный участок линии.

2.Временная задержка: после срабатывания автоматического выключателя вводится временная задержка, позволяющая устранить неисправность. Эта временная задержка может варьироваться от нескольких секунд до нескольких минут, в зависимости от типа неисправности и настроек защитных реле.

3.Автоматическое повторное включение: по истечении времени задержки автоматический выключатель автоматически замыкается реле повторного включения. Если неисправность устранена, электроснабжение поврежденного участка линии восстанавливается.

4.Второе отключение: Если неисправность сохраняется, защитные реле снова обнаружат ее и отправят сигнал на отключение автоматического выключателя во второй раз. Это делается для предотвращения дальнейшего повреждения оборудования и защиты безопасности населения.

5.Блокировка: если неисправность сохраняется после второго отключения, автоматический выключатель заблокирован, и требуется ручное вмешательство для восстановления питания линии.

1.5 Эксплуатация устройств трехфазного автоматического повторного включения на линиях с двухсторонним питанием

Из-за наличия в энергосистемах магистральных линий с двухсторонним питанием при возникновении аварии требуется отключение линии электропередачи с обеих сторон для ликвидации повреждения. Поэтому устройства АПВ должны устанавливаться по обоим концам линии.

Особенностью использования АПВ на линии с двухсторонним питанием является то, что при отключении линии возможно нарушение синхронной работы связываемых ею источников питания. Повторное включение таких линий

без соблюдения условий синхронизации будет недопустимо из-за больших толчков уравнивающего тока. Так, при отключении линии, вследствие возникновения трехфазного короткого замыкания, вектора напряжений систем будут вращаться друг относительно друга, то есть может возникнуть разность частот. В одной из частей энергосистемы может произойти снижение частоты и возникнет дефицит мощности, а в другой частота повысится и появится избыток мощности.

На таких линиях по условиям работы устанавливаются устройства АПВ с контролем синхронизма, которые обеспечивают необходимость проверки синхронизма встречных напряжений двух энергосистем. Проверка синхронизма осуществляется с помощью специальных органов, которые запрещают повторное включение ЛЭП, если синхронное включение невозможно. Данные органы, задачей которых является запрет на несинхронное включение, включают в себя реле. Одно из них – это реле, которое контролирует наличие напряжения на линии, а другое – реле контроля синхронизма. Последнее реагирует на разность векторов напряжений на линиях и шинах.

Благодаря этим реле после аварийного отключения линии с обеих сторон сначала производится АПВ выключателя на одном из концов линии при условии, что напряжение на линии отсутствует; повторное включение выключателя на другом конце линии производится, если АПВ выключателя, включавшегося первым, было успешным и напряжения на линии и шинах синхронны или угол сдвига их фаз не превосходит допустимого. [15]

1.6 Устройства автоматического повторного включения с контролем синхронизма

Устройства АПВ с контролем синхронизма делятся на два вида: устройства АПВ с ожиданием синхронизма (АПВОС) и устройства АПВ с улавливанием синхронизма (АПВУС).

АПВОС используется при включении под нагрузку линий, которые имеют достаточно мощные шунтирующие связи. Данное устройство повторно включает линию при условии синхронности встречных напряжений и допустимых углах сдвига между ними. Повторное включение с использованием АПВОС не сопровождается большими возмущениям в энергосистеме, так как данное устройство контролирует скольжение и дает разрешение на включении линии лишь при незначительной разности частот.

При использовании устройства АПВОС рассматривается поочередное включение выключателей с обоих концов линии. Производится АПВ с контролем отсутствия напряжения на конце той линии, выключатель которой включается раньше, а с противоположного конца при включении выключателя проверяется только наличие синхронизма. Устройства АПВОС обоих концов линии предполагают одинаковую схему, включающую органы контролирующей отсутствие напряжения (KV) и контроля синхронности напряжений (KS), как показано на рисунке 2. На данной схеме C1, C2 – условные обозначения энергосистем; Q1, Q2 – выключатели.

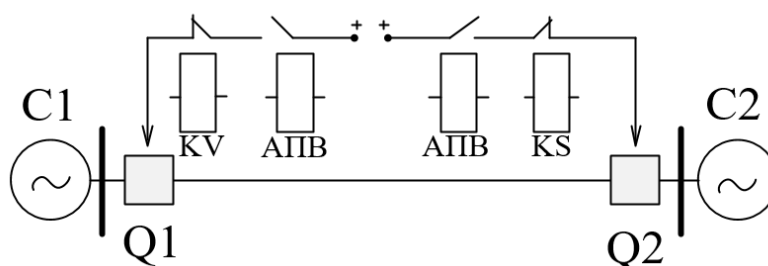


Рисунок 2 – Схема выполнения АПВ линии с двухсторонним питанием

В этом случае линия опробуется с одной стороны (где введен орган контролирующей отсутствие напряжения KV). В случае успешного опробования, если не нарушена синхронная работа с другой стороны ТАПВ

будет успешным. Если же синхронная работа нарушена – ТАПВ с ОС не работает по режиму.

АПВУС предназначается для повторного включения линий, имеющих слабые параллельные связи или обладающие малой пропускной способностью, вследствие отключения которых произойдет нарушение синхронной работы энергосистем. Принцип действия заключается в поочередном включении выключателей: происходит включение выключателя на конце линии, где контролируется отсутствие напряжения, а потом на противоположном конце включается выключатель, если органы, контролирующие разность частот, позволяют выполнить повторное включение линии. Органы контроля синхронизма устройства АПВУС контролируют угловую скорость вращения векторов разделившихся энергосистем. Они обеспечивают подачу импульса на включение выключателя в определенном диапазоне разности частот с опережением момента совпадения фаз.

Отличие устройств трехфазных АПВ с ожиданием и улавливанием синхронизма заключается в следующем: АПВОС обеспечивает повторное включение линии либо сразу по истечении выдержки времени устройства при сохранении синхронизма, либо после ожидания условий синхронизации (уменьшение скольжения до допустимых значений), а АПВУС выполняет АПВ линии, если произошло нарушение синхронизма, путем улавливания

1.7 Предъявляемые требования к устройствам АПВ

1) Устройства должны иметь высокую степень надежности для предотвращения возникновения ложных срабатываний.

2) Устройства должны иметь настраиваемые параметры для различных линий электропередач.

3) Устройства должны быть спроектированы таким образом, чтобы выдерживать суровые погодные условия и различные типы отказов.

4) Устройства также должны иметь расширенные возможности связи и мониторинга, чтобы облегчить своевременное обнаружение неисправностей и их местонахождение.

5) Устройства должны быть экономичными и простыми в обслуживании, чтобы обеспечить широкое внедрение.

Выполняя эти требования, устройства АПВ могут эффективно защищать линии электропередач и повышать надежность электроснабжения.

Существует ряд некоторых принципов, которых стоит придерживаться при построении устройства АПВ с контролем синхронизма:

- Система должна быть оснащена современным оборудованием, например: выключатели измерительные трансформаторы с цифровыми выходами, контроллерами, предназначенными для управления и т.д.
- Применять современные цифровые технологии передачи и обработки данных.
- Передача информации о параметрах режима энергосистемы, состоянии схем и возникающих возмущениях должна осуществляться с использованием коммутационных каналов связи. Благодаря высокой пропускной способности и определенным протоколам передачи они должны обеспечивать получение точной информации.
- Размещение всех используемых блоков должно осуществляться в одном шкафу.

1.8 Метод работы автоматического повторного включения с контролем синхронизма

Автоматическое устройство синхронизации должно начать свою работу незамедлительно после появления возмущения и, вследствие чего, отключения линии устройствами релейной защиты. Устройство синхронизации начинает

действовать при отсутствии напряжения на отключенной линии. Его задачей является подведение параметров одной системы под значения параметров другой при соблюдении условий синхронизации для того, чтобы в дальнейшем устройство АПВ успешно сработало.

На генераторе в энергорайоне устанавливается устройство точной синхронизации, которое производит подбор параметров для синхронизации. Оно соединяется с измерительными устройствами, такими как БИМ, МИП и т.д.). С помощью данных устройств телеизмерений незамедлительно замеряются параметры электрической сети. Данный метод телеизмерения позволяет с минимальной погрешностью передавать измеряемые величины на расстояния. На рисунке 4 представлена обобщенная схема принципа работы телеизмерения.

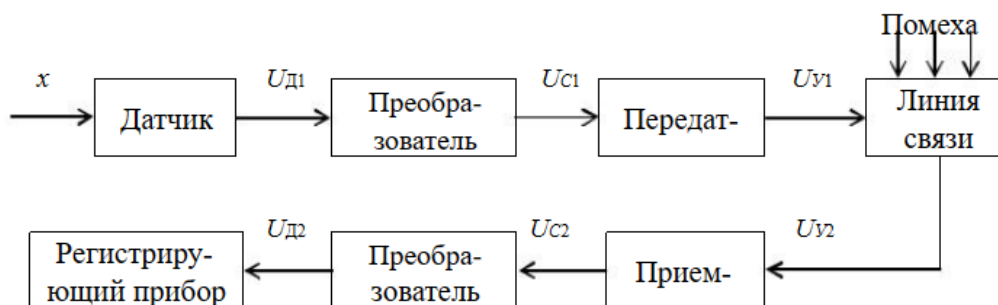


Рисунок 3 – Структурная схема телеизмерения

Многофункциональные измерительные преобразователи включают в себя измерение и вычисление электрических параметров и имеют широкий спектр возможностей:

- Современная элементная база.
- Высокая точность измерений и быстрота измерений.
- Простота программирования по сети Ethernet.
- Наличие аналоговых входов для измерения сигналов тока и напряжения.
- Высокая надежность.
- Обеспечение технической поддержки.

Данное устройство может определять более 30 параметров трехфазной сети, например частота напряжения, действующее значение тока, активная и

реактивная мощности и др. Выходы устройства телеизмерения связаны с контроллером, который выполняет сбор и обработку полученной информации.

Основными функциями контроллеров являются:

- Отображение и контроль данных
- Сбор параметров
- Обработка технологических параметров
- Диспетчеризация и протоколирование

Через контроллер измеренные параметры поступают на входы устройства точной синхронизации. На представленном ниже рисунке 5 можно увидеть алгоритм работы АПВ с контролем синхронизма.



Рисунок 4 – Ход работы АПВ с контролем синхронизма

Синхронизация будет успешной при следующих условиях:

- Равенство напряжений сети.
- Равенство частот сети.
- Совпадение по фазе векторов фазных напряжений обоих генераторов.

После срабатывания релейной защиты и отключения линии сигналы напряжений $U_1(t)$ и $U_2(t)$ поступят на вход измерителя. На выходе происходит формирование сигналов, которые будут пропорциональны модулям напряжений. Также на выход производятся сигналы пропорциональные углу разности фаз между векторами $U_1(t)$ и $U_2(t)$. Сигналы поступают на вход анализатора состояния. Он отслеживает выполнение условий точной синхронизации.

На рисунке 5 отображена схема устройства АПВ с контролем синхронизма.

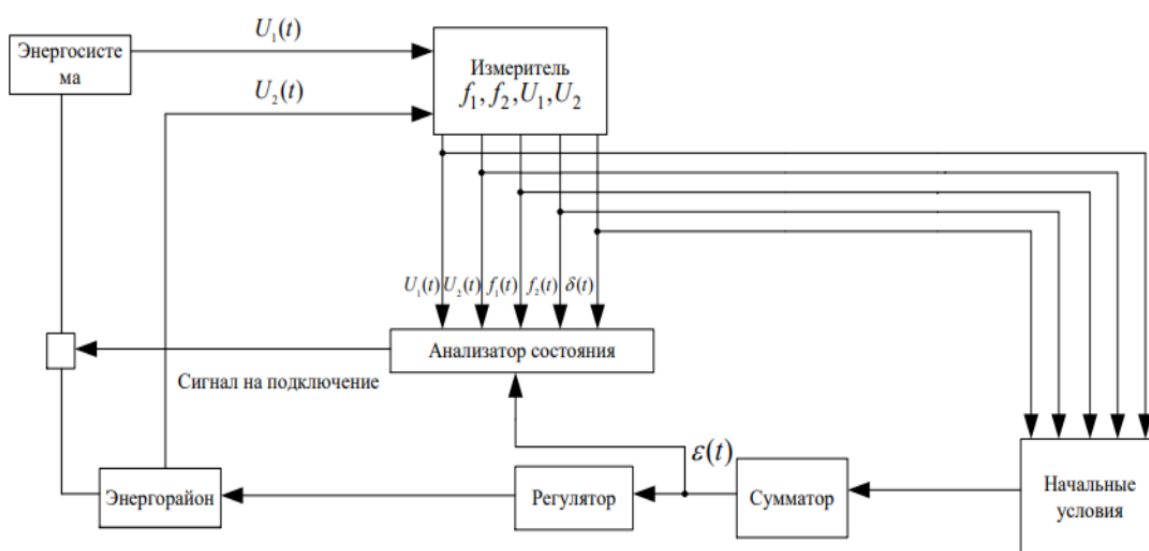


Рисунок 5 – Структурно–функциональная схема АПВ с контролем синхронизма

1.9 Обзор программного обеспечения для моделирования работы АПВ

Программный комплекс RastrWin3 предназначен для решения задач по расчету, анализу и оптимизации режимов электрических сетей и систем.[16] Данный программный комплекс используется на территории нашей страны,

основными пользователями которого являются АО «СО ЕЭС», ПАО «ФСК ЕЭС» и распределительные сетевые компании. Программный комплекс RastrWin3 также используется студентами большинства институтов для выполнения всевозможных заданий в процессе изучения учебных программ.

Программная среда Matlab Simulink используется для моделирования и симуляции на системном уровне. Эта функция применяется для различного рода исследований. Данная программная среда позволяет получить представление о процессах, протекающих в ЭЭС, для проверки правильного функционирования алгоритмов управления. Matlab Simulink широко применяется для моделирования различных режимов работы энергетических систем, а также устройств релейной защиты и автоматики, благодаря библиотеке Simscape Electrical.

Программная среда SimInTech используется для решения задач моделирования разных энергетических объектов. Данная программа позволяет подробно исследовать и анализировать смоделированные в ней процессы.

Для дальнейшей работы был выбран ПВК «RastrWin» (RUSTab), который позволяет проводить многократные расчеты режима для решения прикладных задач. Использование библиотеки, включающей расчёт динамики, astra.dll позволяет упростить создание специализированных программ и автоматизировать рутинную работу. Новые версии RUSTab выпускаются в составе в RastrWin3 и имеют такие возможности, как:

1. Расчет динамических моделей основного оборудования;
2. Моделирование сценария расчёта автоматики (в том числе АЛАР, АПВ, АЧР и т.д.);
3. Моделирование первичного привода (паросиловые, газотурбинные и парогазовые установки);
4. Моделирование систем возбуждения и т.д.

Программный комплекс RastrWin3 обладает рядом достоинств:

1. Удобный и понятный интерфейс;

2. Возможность расчета режимов с использованием различных алгоритмов;
3. Возможность применения макросов для создания формул;
4. Возможность вести историю произведенных действий и откат до необходимого момента;
5. Наличие базы трансформаторов.

Недостатки ПК RastrWin3:

1. Отсутствие библиотеки электросетевых элементов
2. Периодические сбои, приводящие к необходимости вбивания системы заново.

Программный пакет RUSTab является широко используемым инструментом для анализа и защиты энергосистем. Он предназначен для предоставления пользователям возможности моделирования работы энергосистемы и схем защиты, включая автоматическое повторное включение с контролем синхронизма. Эта функция имеет решающее значение для поддержания стабильности и надежности энергосистем, защиты оборудования и сведения к минимуму перебоев в подаче электроэнергии.

1.10 Влияние срабатывания устройств АПВ на статическую и динамическую устойчивость энергосистемы

В энергетических системах существует статическая устойчивость и динамическая устойчивость энергосистемы.

Статическая устойчивость – это способность системы самостоятельно восстанавливать исходный (или близкий к исходному) режим после малого его возмущения [10]. Малые возмущения параметров режима обычно связаны с изменениями нагрузки, отключением или включением отдельных генераторов, нормальными эксплуатационными изменениями схемы (коммутациями).

Динамическая устойчивость – это способность системы самостоятельно возвращаться в исходное состояние (или близкое к нему) после большого

возмущения [10]. Большие возмущения включают в себя короткие замыкания, аварийные отключения линий или генераторов, отделение отдельных энергосистем от синхронной зоны и т.д.

Из-за небалансов активной мощности, снижения напряжения, нарастания тока по линии, периодических колебаний электрических параметров возникает нарушение устойчивости. Данные нарушения могут быть вызваны такими причинами, как:

- Перегрузки ЛЭП;
- Внеплановые отключения нагрузки или генерации;
- Несрабатывание устройств релейной защиты и автоматики;
- Несинхронное включение ЛЭП или генераторов.

В «Методических указаниях по устойчивости энергосистем», утвержденных приказом Минэнерго России от 03.08.2018 № 630, выделены три группы наиболее тяжелых возмущений, которые называются нормативными возмущениями.

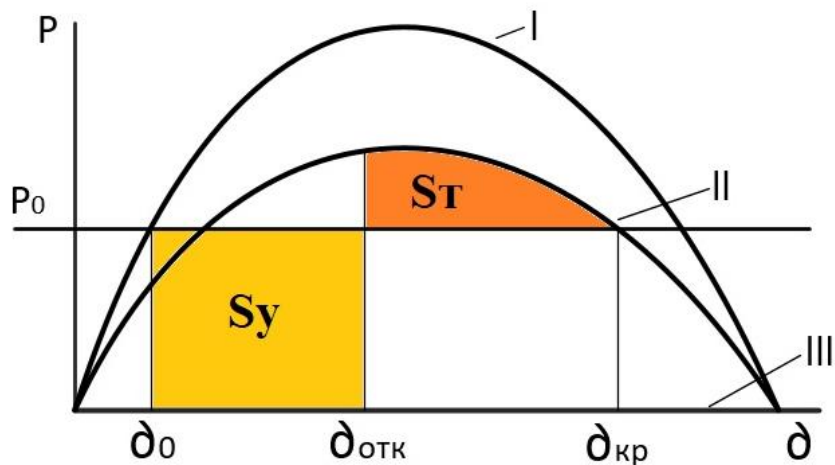
Таблица 2 – Распределение возмущений по группам

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	-	-

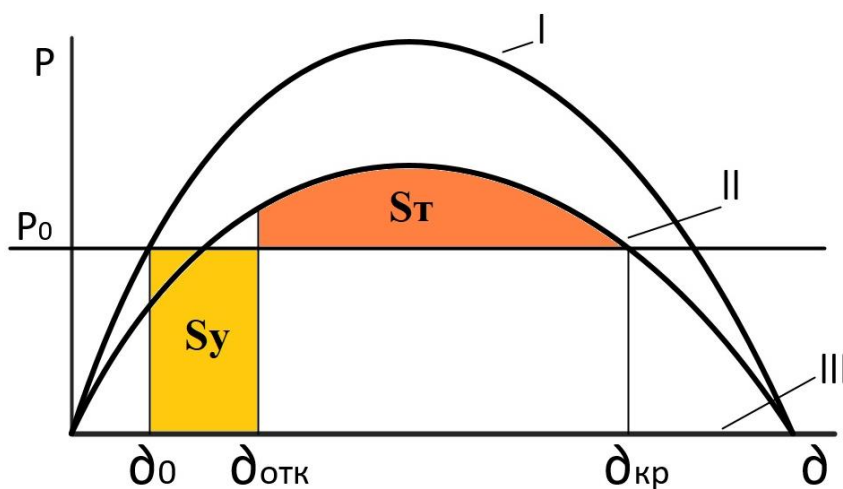
Нарушение динамической устойчивости энергосистемы приводит к асинхронному режиму.

Асинхронным режимом является такой режим энергосистемы, в котором присутствуют глубокие периодические колебания токов, мощностей и напряжений, периодические изменения угла ЭДС генераторов, а также такой режим характеризуется наличием разности частот разделившихся энергосистем.

Действие АПВ оказывает значительное влияние на динамическую устойчивость энергосистемы. Проанализировать влияние срабатывания устройства АПВ на устойчивость энергосистемы можно на приведенных ниже графиках, изображенных на рисунке 6.



а) неустойчивый режим без АПВ (устойчивость не сохраняется)



б) устойчивый режим с успешным АПВ

Рисунок 6 – Влияние на динамическую устойчивость времени отключения короткого замыкания.

На данном рисунке цифра 1 характеризует доаварийный режим, 2 – аварийный режим, 3 – послеаварийный режим.

При отсутствии срабатывания устройства АПВ из рисунка 3а видно, что при данном угле отключения $\delta_{откл}$ устойчивость системы будет нарушена, так как площадь ускорения S_y окажется больше площади торможения S_T .

Быстрое отключение позволяет уменьшить угол отключения короткого замыкания $\delta_{откл}$, а это в свою очередь уменьшит площадь ускорения S_y и

увеличит площадь возможного торможения S_T . Устойчивость системы сохраняется, так как выполняется условие:

$$S_T > S_y \quad (1)$$

Устойчивость энергосистемы можно охарактеризовать коэффициентом запасом устойчивости. Данный коэффициент отражает величину, на которую можно увеличить передаваемую мощность от станции в сеть, чтобы при этом сохранить устойчивость электрической системы.

Использование устройства АПВ дает возможность повысить коэффициент запаса динамической устойчивости, который равен:

$$K = \frac{S_T}{S_y} \quad (2)$$

Из этого следует, что для повышения коэффициента запаса устойчивости, необходимо уменьшить площадь ускорения.

Необходимо учесть, что процессы, происходящие в генераторах, оказывают особое влияние на динамическую устойчивость, так как они определяют характер переходного процесса.

2 Аналитическая часть. Разработка модели сети в приложении RUSTab ПК RastrWin3

Для формирования исходных данных для расчета динамической устойчивости в ПК RUSTab потребуется выполнить следующие действия:

1. Входная модель системы. Первым шагом является ввод модели системы, которая включает модель генератора, модель линии передачи и нагрузки. Это делается путем создания файла в соответствующем формате и его импорта в RUSTab.

2. Установить рабочие условия: Необходимо установить рабочие условия для моделирования, такие как выходная мощность и уровни напряжения.

3. Рассчитать начальные условия: после того, как модель системы и рабочие условия установлены, нужно определить начальные условия для

моделирования. Это включает в себя решение уравнений потока мощности для определения начального напряжения и фазового угла каждой шины в системе.

4. Создание сценариев. Чтобы оценить динамическую устойчивость системы, необходимо создать нештатные ситуации, которые включают моделирование реакции системы на различные возмущения, такие как сбой или внезапные изменения нагрузки.

5. Моделирование сценариев. Моделирование нештатных случаев позволяет проанализировать результаты, чтобы определить динамическую устойчивость системы. Это может включать проверку таких факторов, как стабильность угла ротора, стабильность частоты и стабильность напряжения.

2.1 Формирование топологии сети

В начале создается таблица исходных данных. Данные по генераторам, регуляторам возбуждения и возбудителям, регуляторам скорости вводятся в разделе «Открыть – Динамика (ИД)».

Для формирования исходных данных электрической сети следует выполнять ряд таких действий, как:

1) Узлы электрической сети должны быть пронумерованы. Для каждого узла определяется номинальное напряжение. В каждый узел нагрузки вносятся значения активной и реактивной мощности;

2) ЛЭП определяются активным, реактивным сопротивлениями, продольным сопротивлением и проводимостью на землю;

3) В узлы, содержащие синхронные машины (генераторы, компенсаторы), вносятся параметры активной мощности генерации, также пределы регулирования реактивной мощности;

4) Трансформаторы определяются значением сопротивления, которое приводится к стороне высокого напряжения, коэффициентом трансформации (отношение низкого напряжения к высокому), проводимостью шунта на землю.

Создание модели представляет собой заполнение таблиц: «Узлы» и «Ветви» (рисунок 7).

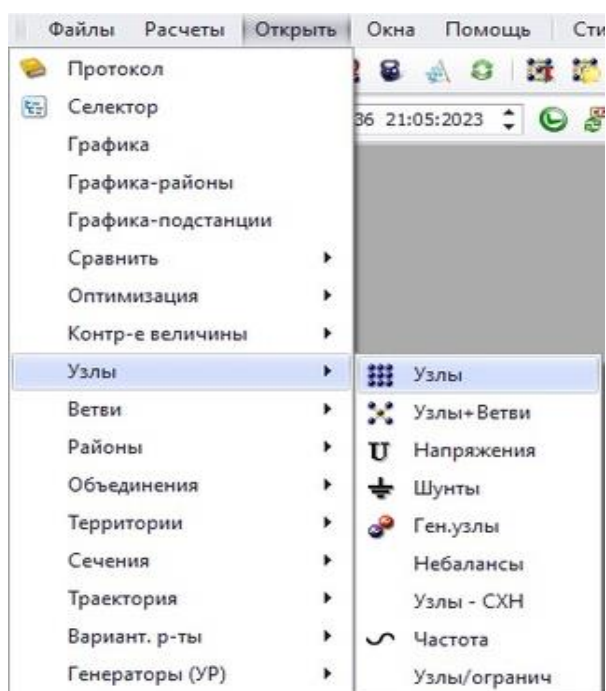


Рисунок 7 – Узлы

Пример ввода параметров, которые задаются в разделе «Узлы» (рисунок 8):

S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	V_ш	V
Нагр	1	ПС 1	110			10,0	7,5				110,0				110,00
Нагр	2	ПС 2	110								110,0				110,00
Нагр	3	ПС 3	110			10,0	7,5				110,0				110,00
Нагр	4	ПС 4	110								110,0				110,00
Нагр	5	ПС 5	110			10,0	7,5				110,0				110,00
Нагр	6	ПС 6	110								110,0				110,00
Нагр	7	ПС 7	110			10,0	7,5				110,0				110,00
Ген	8	ПС 8	110						20,0	25,0	110,0	1,0	100,0		110,00
База	9	ПС 9	110						20,0	25,0	110,0				110,00

Рисунок 8 – Параметры таблицы «Узлы»

Моделирование узлов является важным аспектом сетевого анализа, поскольку это позволяет визуализировать и понять структуру и поведение сложных систем.

В ПК RUSTab моделирование узлов достигается за счет использования графового подхода. Программное обеспечение позволяет создать графики с узлами и ветвями, определить свойства каждого узла и задать отношения между узлами. Сюда могут входить такие атрибуты, как размер, цвет, форма и метка, а также такие соединения, как направленные и ненаправленные ребра.

Каждому узлу присваивается свой уникальный номер в столбце номер 5 под названием «Номер». В столбец « $U_{\text{ном}}$ » вносятся значения номинальных напряжений.

Все исходные данные по ЛЭП и трансформаторам заносятся в таблицу «Ветви» (рисунок 9).

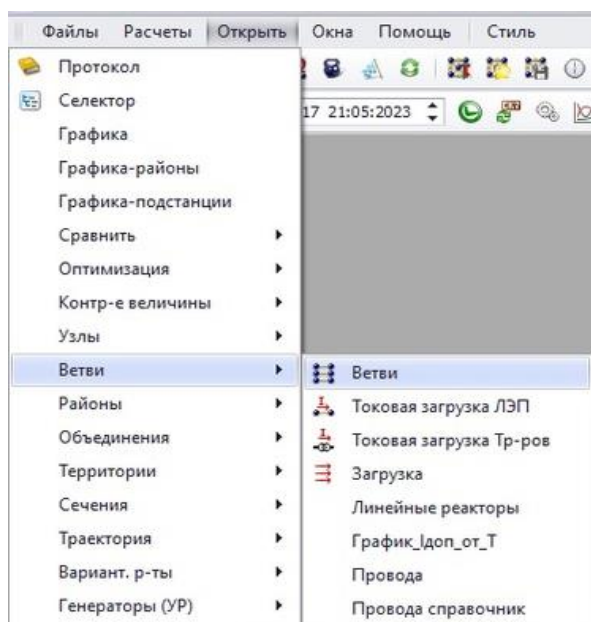


Рисунок 9 – Ветви

Пример ввода параметров для таблицы «Ветви» представлен на рисунке 10.

Тип	N_нач	N_кон	N_л	ID...	Название	R	X	B	Kт/r	N_анц	БД_...	P_нач	Q_нач	Na	I max
ЛЭП	1	2	2		ПС-2-110 - ПС-1-110	7,67	13,15	327,0				-23	-20		171
ЛЭП	2	3	2		ПС-1-110 - ПС-4-СН-121	5,93	10,00	253,0				662	782		6 113
ЛЭП	3	4	2		ПС-02-230 - ПС-5-110	4,95	8,50	211,0				-1 375	-2 092		6 595
ЛЭП	5	6	2		ПС-02-230 - ПС-3-110	3,17	5,50	136,0				37	12		108
Тр-р	1	2	1		ПС-2-110 - ПС-2-10,5	2,54	55,90		0,095			45	1 663		9 501
Тр-р	1	2	2		ПС-2-110 - ПС-2-10,5	2,54	55,90		0,095			45	1 663		9 501
Тр-р	2	222	1		ПС-1-110 - ПС-1-10,5	2,54	55,90		0,095			289	3 550		21 181
Тр-р	2	222	2		ПС-1-110 - ПС-1-10,5	2,54	55,90		0,095			289	3 550		21 181
Тр-р	3	3	1		ПС-3-110 - ПС-3-10,5	2,54	55,90		0,095			371	8 169		21 542

Рисунок 10 – Параметры таблицы «Ветви»

Чтобы выполнить моделирование трансформатора в ПК RUSTab, необходимо сначала определить параметры трансформатора, такие как активное и индуктивное сопротивления, а также коэффициент трансформации. После определения параметров трансформатора можно использовать модель трансформатора для имитации его поведения в энергосистеме. Модель может использоваться для имитации различных сценариев, таких как регулирование напряжения, анализ потоков нагрузки и анализ неисправностей.

В ПК RUSTab инструмент моделирования трансформаторов интегрирован с другими инструментами моделирования энергосистем, такими как анализ потока нагрузки и анализ короткого замыкания. Это помогает изучить поведение трансформаторов в различных условиях эксплуатации и оптимизировать его работу.

Трансформаторы и автотрансформаторы представлены схемой замещения, представленной на рисунке 11.



Рисунок 11 – Схема замещения трансформатора

Чтобы смоделировать линию электропередачи необходимо ввести параметры линии, такие как активное сопротивление, индуктивное

сопротивление и емкостная проводимость. Данные заносятся в столбцы «R», «X», «B» соответственно.

Программный комплекс RUSab также позволяет создавать диаграммы потоков мощности, которые обеспечивают визуальное представление потоков мощности и падений напряжения на ЛЭП. Это может быть полезно для определения участков линии, в которых наблюдаются значительные потери мощности или падения напряжения.

Линии электропередачи в расчетах представляются П-образной схемой замещения, изображенной на рисунке 12.

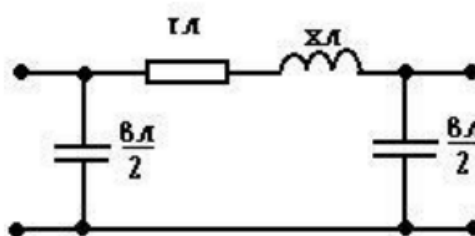


Рисунок 12 – Схема замещения линии

2.2 Математическое описание генераторов и их моделирование в ПК RUSab

2.2.1 Математическая модель синхронных генераторов

Синхронный генератор представляет собой электрическую машину, преобразующую механическую энергию в электрическую. Математическая модель синхронного генератора необходима для понимания поведения генератора в различных условиях эксплуатации. Одной из наиболее часто используемых математических моделей синхронного генератора является уравнение Парка–Горева.

Уравнение Парка–Горева — это математическая модель, которая используется для описания поведения синхронного генератора в различных

условиях. Это набор дифференциальных уравнений, которые связывают электрические и механические переменные генератора. Он основан на принципе преобразования трехфазных напряжений и токов синхронного генератора в двухосную систему. Уравнение Парка–Горева широко используется при анализе и управлении энергосистемами.

Двухосная система состоит из прямой оси (ось d) и квадратурной оси (ось q). Ось d совмещена с магнитным полем ротора, а ось q перпендикулярна оси d . Преобразование напряжений и токов из трехфазной системы в двухосную осуществляется с помощью преобразования Парка.

Существует два варианта расположения оси d по отношению к оси q (вращение осуществляется против часовой стрелки):

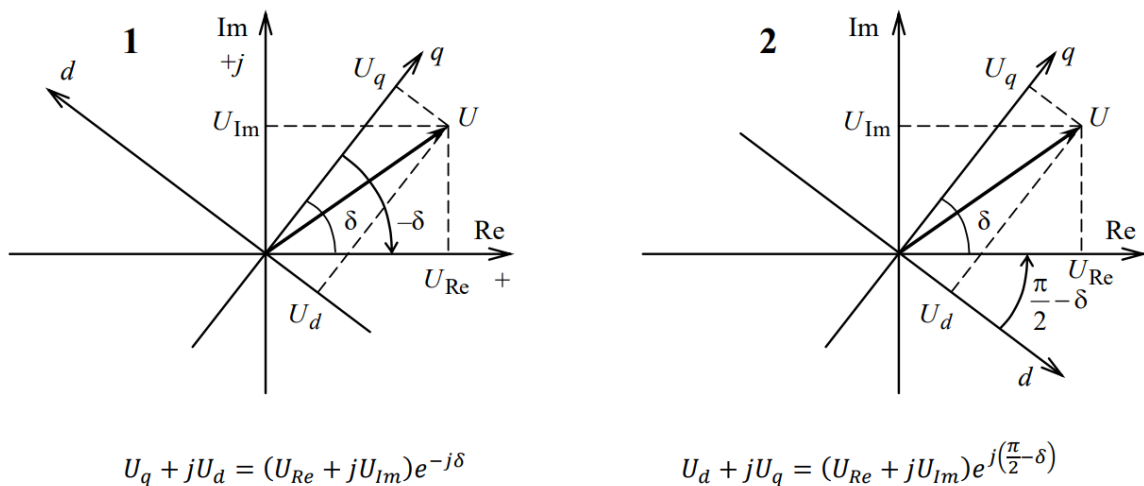


Рисунок 13 – Графическое расположение оси d по отношению к оси q
 1) Ось d опережает ось q ; 2) Ось d отстает от оси q .

В ПК RUSTab используется система (1).

Уравнение Парка–Горева включает уравнения для электромагнитного момента, токов статора и потока ротора. Электромагнитный момент определяется произведением тока статора на поток ротора. Ток статора пропорционален приложенному к статору напряжению, а поток ротора пропорционален току возбуждения, приложенному к ротору. Оно основано на

принципе преобразования вектора из стационарной системы отсчета во вращающуюся систему отсчета.

Если принять, что ось d является опережающей ось q при вращении осей против часовой стрелки и учесть применение наиболее распространенной взаимной системы относительных единиц в теории электрических машин, то математическая модель синхронного генератора будет выглядеть следующим образом:

Уравнение движения ротора:

$$T_j \frac{d\omega}{dt} + K_{\text{ПТ}} \omega = M_T - K_M (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d); \quad (3)$$

Уравнение контура возбуждения:

$$\frac{d\Psi_f}{dt} + r_f i_f = u_f; \quad (4)$$

Уравнение демпферных контуров по оси d :

$$\frac{d\Psi_{D1}}{dt} + r_{D1} i_{D1} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{d\Psi_{D2}}{dt} + r_{D2} i_{D2} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{d\Psi_{D3}}{dt} + r_{D3} i_{D3} = 0; \quad (7)$$

Уравнение потокосцепления в воздушном зазоре по оси d :

$$\Psi_{\delta d} = x_{ad} (K_M i_d + i_f + i_{D1} + i_{D2} + i_{D3}); \quad (8)$$

Уравнение потокосцепления обмотки возбуждения:

$$\Psi_f = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma f} i_f; \quad (9)$$

Уравнение потокосцепления демпферных контуров по оси d :

$$\Psi_{D1} = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma D1} i_{D1}, \quad (10)$$

$$\Psi_{D2} = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma D2} i_{D2}, \quad (11)$$

$$\Psi_{D3} = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma D3} i_{D3}; \quad (12)$$

Уравнение результирующего потокосцепления по оси d :

$$\Psi_d = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma} K_M i_d = \Psi_{\delta d} + \Psi_{\delta d}; \quad (13)$$

Уравнение демпферных контуров по оси q :

$$\frac{d\Psi_{Q1}}{dt} + r_{Q1} i_{Q1} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{d\Psi_{Q2}}{dt} + r_{Q2} i_{Q2} = 0, \quad (15)$$

$$\frac{d\Psi_{Q3}}{dt} + r_{Q3} i_{Q3} = 0, \quad (16)$$

$$\frac{d\Psi_{Q4}}{dt} + r_{Q4} i_{Q4} = 0; \quad (17)$$

Уравнение потокосцепления в воздушном зазоре по оси q :

$$\Psi_{\delta q} = x_{aq} (K_M i_q + i_{Q1} + i_{Q2} + i_{Q3} + i_{Q4}); \quad (18)$$

Уравнение потокосцепления демпферных контуров по оси q :

$$\Psi_{Q1} = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma Q1} i_{Q1}, \quad (19)$$

$$\Psi_{Q2} = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma Q2} i_{Q2}, \quad (20)$$

$$\Psi_{Q3} = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma Q3} i_{Q3}, \quad (21)$$

$$\Psi_{Q4} = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma Q4} i_{Q4}; \quad (22)$$

Уравнение результирующего потокосцепления по оси q :

$$\Psi_q = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma} K_M i_q = \Psi_{\delta q} + \Psi_{\sigma q}; \quad (23)$$

Уравнение результирующего потокосцепления в воздушном зазоре:

$$\Psi_{\delta} = \sqrt{\Psi_{\delta d}^2 + \Psi_{\delta q}^2}; \quad (24)$$

Уравнение напряжения статора по оси d :

$$u_d = -\omega \Psi_q - \frac{d\Psi_d}{dt} - r_a K_M i_d; \quad (25)$$

Уравнение напряжения статора по оси q :

$$u_q = \omega \Psi_d - \frac{d\Psi_q}{dt} - r_a K_M i_q, \quad (26)$$

Общая сводка уравнений для моделей синхронного генератора:

$$U_d = -r \cdot i_d - \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q - \psi_q\omega_s; \quad (27)$$

$$U_q = -r \cdot i_q - \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d + \psi_d\omega_s; \quad (28)$$

$$U_f = r_f \cdot i_f + \frac{d\psi_f}{dt}; \quad (29)$$

$$T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} = M_m - r_q \cdot \psi_d + r_d \cdot \psi_q; \quad (30)$$

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, индуцируемая 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.

Рабочие характеристики синхронного генератора можно проанализировать с помощью уравнения Парка–Горева путем моделирования его поведения при различных условиях работы, таких как изменения нагрузки, возбуждения и скорости. Уравнение Парка–Горева является важным инструментом для анализа поведения синхронных генераторов. Он используется в исследованиях устойчивости энергосистемы, анализе переходных процессов и разработке систем управления. Уравнение также используется при проектировании систем управления синхронными генераторами для регулирования выходного напряжения и частоты.

2.2.2 Модели генераторов, используемых в ПК RUSab

В ПК RUSab используется 7 моделей синхронных машин, которые представлены в таблице 3. Расположены они в порядке возрастания сложности.

Таблица 3 – Модели реализуемых генераторов

№	Название	Описание	Параметры	Умолчани я	Расчеты	Внешн ие
1	ШБМ	Генератор бесконечной мощности	X'_d		P,Q,V,I	
2	Ур.движения	Классическая модель – эдс за сопротивлением	$M_j(T_j)K_{демп}$		δ_s	P_T S_u
3	1к- E'_q	Контур обмотки возбуждения (1 контур)	X_d X_q T'_{d0}	$= X'_d$ $= X_d$ $=5$	E'_q E_q (ток возб)	E_{qe}
4	3к-ЭДС	3-х контурная модель в форме эдс	X''_d X''_q T''_{d0} T''_{q0}	$= 0.1X'_d$ $= X''_d$ $=0.2$ $=0.5$	E''_d E''_q	
5	3к-Mustang	3-х контурная модель Mustang	–	–	–	–
6	3к-Парк	3-х контурная модель в форме Парка	X_c	$= 0.8X''_d$		
7	4к-Парк	4-х контурная модель в форме Парка	X'_q	$= X_q$	E'_d	

При расчете динамики в узлах сети фигурируют следующие параметры:

- V, δ – модуль и угол напряжения узла;
- S_u – скольжение угла напряжения узла.

Для ввода исходных данных по генераторам необходимо открыть таблицу, расположенную: Открыть – Динамика (ИД) – Генераторы (ИД) (рисунок 14).

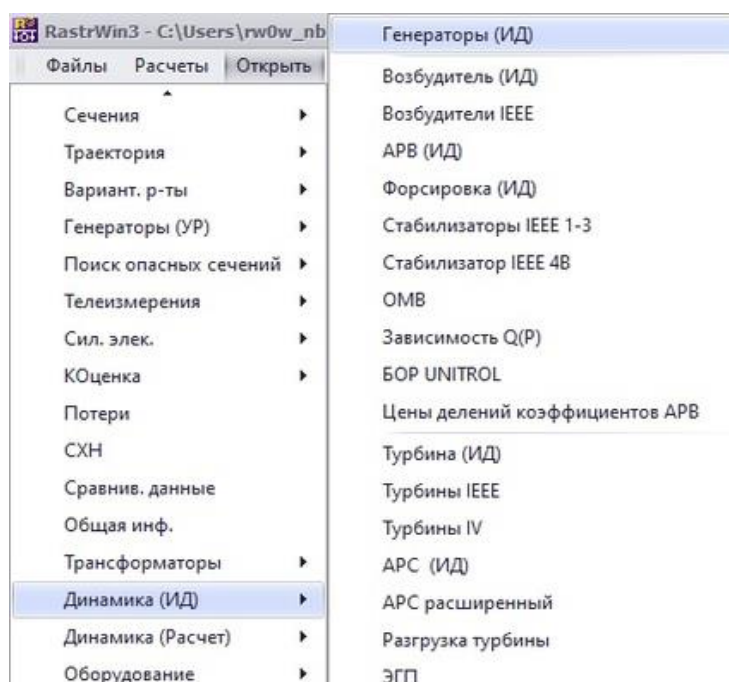


Рисунок 14 – Генераторы (ИД)

В ПК RUSTab необходимо ввести параметры генераторов, которые представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры генераторов

Параметр	Описание
S	Состояние генератора
Нагр	Номер генератора
Название	Название генератора
Модель	Модель генератора
Марка	Марка генератора
K_ген	Число генераторов одной марки
N_взб	Номер возбудителя
N_PC	Номер РС
P	Активная мощность генерации
Q	Реактивная мощность генерации
Pном	Номинальная мощность генератора
Uген	Номинальное напряжение генератора
cosφ	Номинальный коэффициент мощности
K_демп	Коэффициент демпфирования
Mj	Механическая постоянная инерции генератора вместе с турбиной
X'd	Переходное реактивное сопротивление по продольной оси
Xd	Синхронное реактивное сопротивление по продольной оси
Xq	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
X2	Реактивное сопротивление обратной последовательности
X0	Реактивное сопротивление нулевой последовательности
T'do	Переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке статора

Пример параметров в таблице «Генераторы (ИД)» представлен на рисунке 15.

N узла	Модель	Марка	K_ген	V_лст	N_PC	P	Q	P_ном	Jr_ном	S(Ф)_н	K_демп	Mj	Xd	Xd'	Xq	Xq'	Td0	T'd0	T''q0	Xq	X_1	X2	X0	Tq0
11	Эк-Пар	СВ 1548/20	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	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
22	Эк-Пар	СВ 1548/20	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	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
33	Эк-Пар	СВ 1548/20	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	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
44	Эк-Пар	СВ 1548/20	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	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
55	Эк-Пар	СВ 1548/20	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	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
66	Эк-Пар	СВ 1548/20	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	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
77	Эк-Пар	СВ 1548/20	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	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
88	Эк-Пар	СВ 1548/20	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	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02

Рисунок 15 – Параметры «Генераторы (ИД)»

Моделирование синхронного генератора в ПК RUSTab включает создание математического представления электрического и механического поведения генератора. Эта модель обычно включает динамику ротора генератора, электрические характеристики статора и систему возбуждения.

Для создания модели необходимо определить физические параметры генератора, такие как инерция ротора, коэффициенты демпфирования и сопротивления обмотки. Эти параметры используются для построения математической модели с использованием уравнений, описывающих поведение генератора.

В целом, моделирование синхронного генератора является важным этапом анализа энергосистемы и помогает понять поведение генератора в различных условиях эксплуатации.

2.3 Моделирование системы APB генераторов в RUSTab

2.3.1 Настройка параметров регуляторов возбуждения

Для переноса данных для моделирования автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) нужно открыть таблицу: Открыть – Динамика (ИД) – АРВ (ИД).

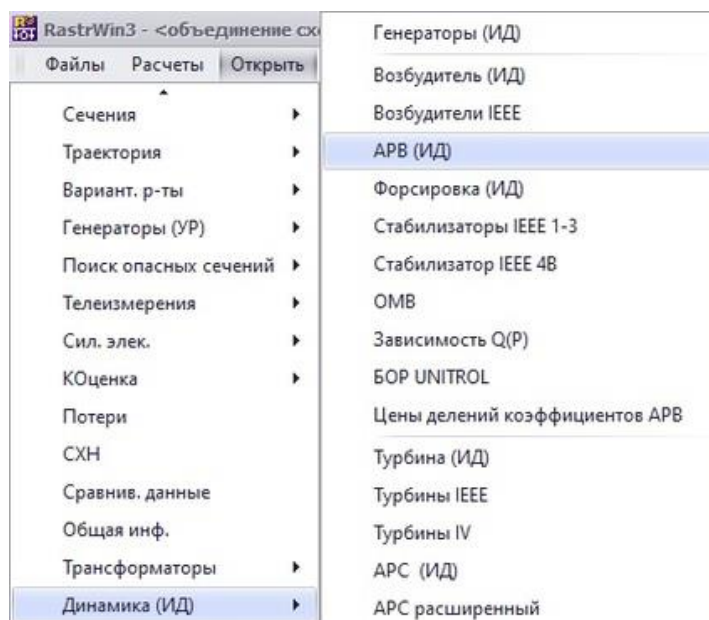


Рисунок 16 – АРВ (ИД)

Список параметров, требуемых для описания АРВ представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры автоматических 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' _I f	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 данных по АРВ показан на рисунке 17.

N	Название	Модель	Марка	T _{рв}	K _u	K' _u	K' _I f	K _f	K' _f	T _f	U _{min}	U _{max}
1		Автовыбор	<не задано>	0,05	50,0	10,0		6,5	5,0	0,8	-10,000	10,000
2		Автовыбор	<не задано>	0,05	50,0	10,0		6,5	5,0	0,8	-10,000	10,000
3		Автовыбор	<не задано>	0,05	50,0	10,0		6,5	5,0	0,8	-10,000	10,000
4		Автовыбор	<не задано>	0,05	50,0	10,0		6,5	5,0	0,8	-10,000	10,000
5		Автовыбор	<не задано>	0,05	50,0	10,0		6,5	5,0	0,8	-10,000	10,000
6		Автовыбор	<не задано>	0,05	50,0	10,0		6,5	5,0	0,8	-10,000	10,000
7		Автовыбор	<не задано>	0,05	50,0	10,0		6,5	5,0	0,8	-10,000	10,000
8		Автовыбор	<не задано>	0,05	50,0	10,0		6,5	5,0	0,8	-10,000	10,000
9		Автовыбор	<не задано>	0,05	50,0	10,0		6,5	5,0	0,8	-10,000	10,000

Рисунок 17 – Пример таблицы об АРВ

Автоматический регулятор возбуждения необходим для регулирования тока возбуждения синхронного генератора. Ток возбуждения регулирует силу магнитного поля, которое, в свою очередь, влияет на выходное напряжение и реактивную мощность генератора. Автоматический контроллер возбуждения отслеживает выходное напряжение генератора и регулирует ток возбуждения для поддержания постоянного напряжения и коэффициента мощности.

2.3.2 Задание параметров форсировки возбуждения

Для того, чтобы ввести данные нужно открыть таблицу, расположенную:
Открыть – Динамика (ИД) – Форсировка (ИД).

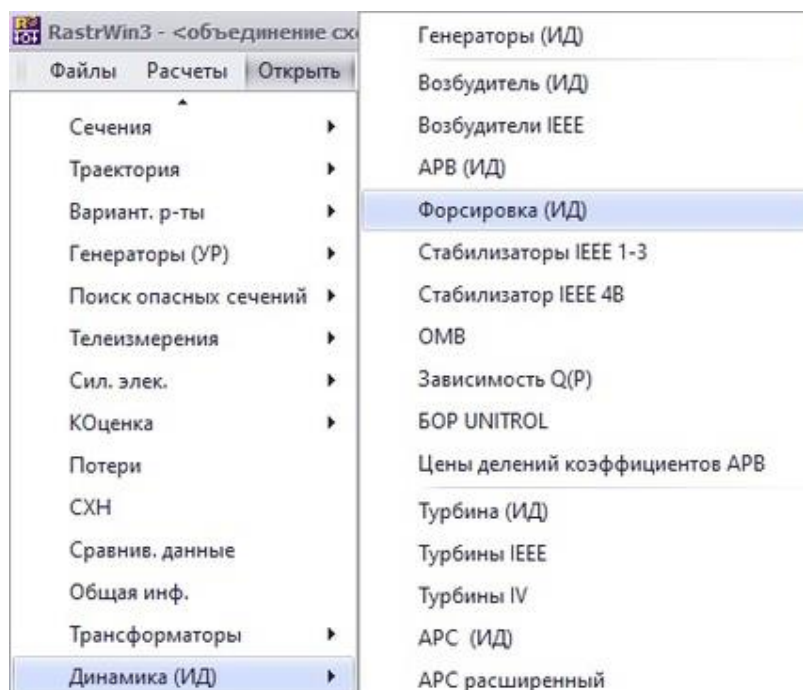


Рисунок 18 – Форсировка (ИД)

Ниже в таблице 6 указаны параметры форсировки.

Таблица 6 – Параметры форсировки

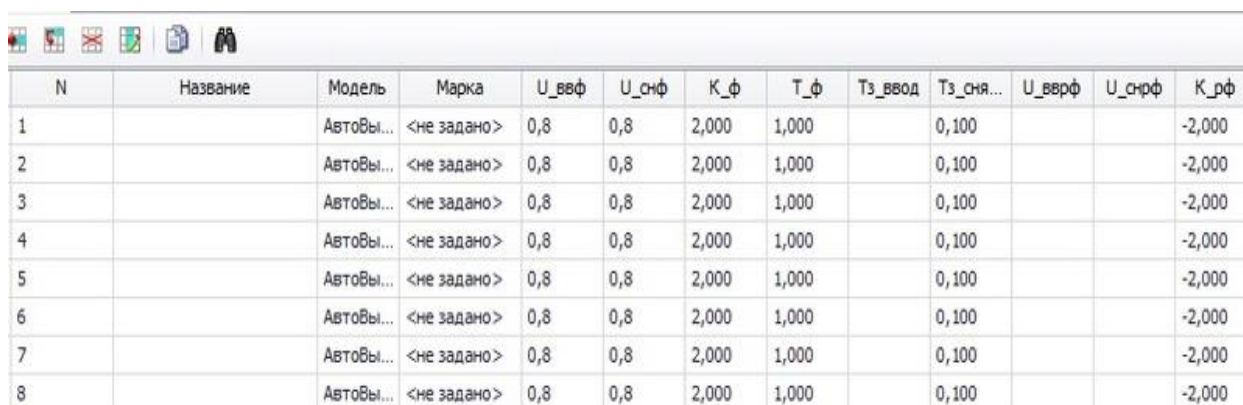
Параметр	Описание
S	Состояние форсировки
N	Номер форсировки
Название	Название форсировки
Модель	Модель форсировки
Марка	Марка форсировки
U_ввф	Напряжение ввода форсировки
U_свф	Напряжение снятия форсировки
K_ф	Кратность форсировки
T_ф	Постоянная времени возбудителя при форсировке возбуждения

Если синхронный генератор теряет возбуждение по какой-либо причине, например, из-за неисправности в системе возбуждения или внезапного

изменение нагрузки, генератор замедляется и теряет синхронизацию с энергосистемой переменного тока. Это может привести к «блокировке» или полной остановке генератора, что может привести к отключению электроэнергии или другой нестабильности системы.

Принудительное возбуждение синхронных генераторов необходимо для того, чтобы привести их обратно в синхронизацию с энергосистемой переменного тока после потери возбуждения. Форсировка возбуждения генераторов нужна для подъема напряжения и повышения динамической устойчивости энергосистемы. Это приведет к скорейшему восстановлению нормального режима работы электрической сети.

На рисунке 19 показан пример ввода данных в таблицу Форсировка (ИД).



N	Название	Модель	Марка	U_ввф	U_снф	K_ф	T_ф	Tз_ввод	Tз_сня...	U_вврф	U_снрф	K_рф
1		АвтоВы...	<не задано>	0,8	0,8	2,000	1,000		0,100			-2,000
2		АвтоВы...	<не задано>	0,8	0,8	2,000	1,000		0,100			-2,000
3		АвтоВы...	<не задано>	0,8	0,8	2,000	1,000		0,100			-2,000
4		АвтоВы...	<не задано>	0,8	0,8	2,000	1,000		0,100			-2,000
5		АвтоВы...	<не задано>	0,8	0,8	2,000	1,000		0,100			-2,000
6		АвтоВы...	<не задано>	0,8	0,8	2,000	1,000		0,100			-2,000
7		АвтоВы...	<не задано>	0,8	0,8	2,000	1,000		0,100			-2,000
8		АвтоВы...	<не задано>	0,8	0,8	2,000	1,000		0,100			-2,000

Рисунок 19 – Ввод данных Форсировка (ИД)

2.3.3 Определение параметров возбудителей

Для того, чтобы ввести параметры возбудителей необходимо выполнить следующие действия: Открыть – Динамика (ИД) – Возбудитель (ИД) (рисунок 20).

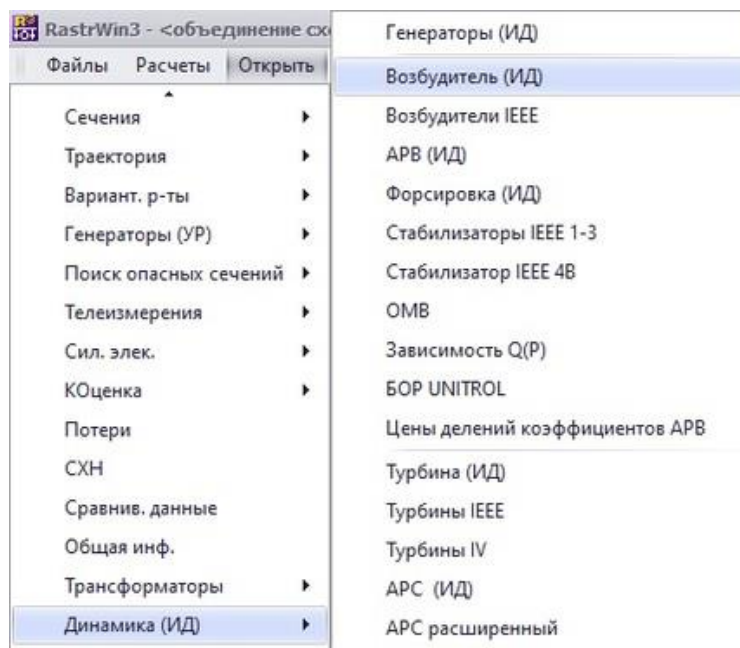


Рисунок 20 – Возбудитель (ИД)

В RUSTab моделирование возбудителей выполняется с помощью математических моделей, имитирующих поведение различных типов возбудителей. Эти модели учитывают различные параметры, такие как так возбуждения возбудителя, настройки регулятора напряжения и другие факторы, влияющие на характеристики возбудителя.

В таблице 6 представлены параметры возбудителей, которые вводятся при заполнении таблицы Возбудители (ИД).

Таблица 7 – Параметры возбудителей

Параметр	Описание
S	Состояние возбудителя
Нагр	Номер возбудителя
Название	Название возбудителя
Модель	Модель возбудителя. Элементы перечисления: Автовыбор Выбор Пользов. Упрощенная Полная.
Марка	Марка возбудителя
N_АРВ	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_ir	Коэффициент регулирования по отклонению тока статора
K_if	Коэффициент регулирования по отклонению тока ротора

Тип	Тип возбуждения. Элементы перечисления: Независимое/Зависимое
-----	---

На рисунке 21 показан пример ввода данных в таблицу Возбудитель (ИД).

N	Название	Модель	Марка	N_АРВ	N форс	T_возб	K_lr	K_if	Uf_min	Uf_max	If_min	If_max	Тип
1		АвтоВы...	<не зад...			0,010			-2,000	2,000	0,3	3,0	Неза...
2		АвтоВы...	<не зад...			0,010			-2,000	2,000	0,3	3,0	Неза...
3		АвтоВы...	<не зад...			0,010			-2,000	2,000	0,3	3,0	Неза...
4		АвтоВы...	<не зад...			0,010			-2,000	2,000	0,3	3,0	Неза...
5		АвтоВы...	<не зад...			0,010			-2,000	2,000	0,3	3,0	Неза...
6		АвтоВы...	<не зад...			0,010			-2,000	2,000	0,3	3,0	Неза...
7		АвтоВы...	<не зад...			0,010			-2,000	2,000	0,3	3,0	Неза...
8		АвтоВы...	<не зад...			0,010			-2,000	2,000	0,3	3,0	Неза...
9		АвтоВы...	<не зад...			0,010			-2,000	2,000	0,3	3,0	Неза...

Рисунок 21 – Пример таблицы Возбудитель (ИД).

Функцию моделирования в RUSTab можно использовать для анализа и оптимизации конструкций возбудителей, а также для устранения неполадок и диагностики проблем с существующими системами возбуждения.

2.4 Формирование подсистемы моделирования автоматки

Моделирование автоматизации требует использования табличных элементов запуска. Эти элементы играют решающую роль в определении различных аспектов автоматизированного процесса, таких как синхронизация и последовательность событий, входные и выходные сигналы и другие важные параметры.

В этом разделе будут рассмотрены различные типы элементы запуска таблиц, доступных в программном обеспечении, их функции в процессе автоматизации и преимущества их использования.

В ПК RUSTab существует возможность моделирования событий, происходящих в процессе расчета. Эта система включает в себя две подсистемы: моделирование автоматики и моделирование сценария расчета динамики.

Каждая подсистема включает в себя три таблицы, которые описывают принцип работы автоматики (сценария): «Логика», «Действия», «Пусковые органы». Таблицы «Пусковые органы» и «Действия» содержат такие параметры, как мощность, ток, состояние. Эти параметры характеризуют объект (например, генератор N, узел N, ветвь N) текущей расчетной схемы.

«Пусковые органы» позволяет измерять параметры модели. В таблице «Действие» при необходимости можно изменять параметры расчетной модели. В «Логике» вносятся выражения, которые определяют принцип работы «Действий», исходя из тех параметров, которые мы задали в таблице «Пусковые органы». Все элементы, входящие в действия и в логику, возможно объединять в группы для создания сложных действий, с помощью которых появляется возможность изменять параметры объектов модели.

В таблице логики указываются логические условия, которые необходимо выполнить для автоматического повторного включения линии. В таблице действий указываются действия, которые необходимо предпринять во время последовательности повторного включения. Эти таблицы работают вместе для имитации автоматического повторного включения линии и расчета динамики системы.

Все необходимые таблицы для ввода данных находятся по следующей ссылке: [Открыть – Автоматика \(Сценарий\)](#) (рисунок 22).

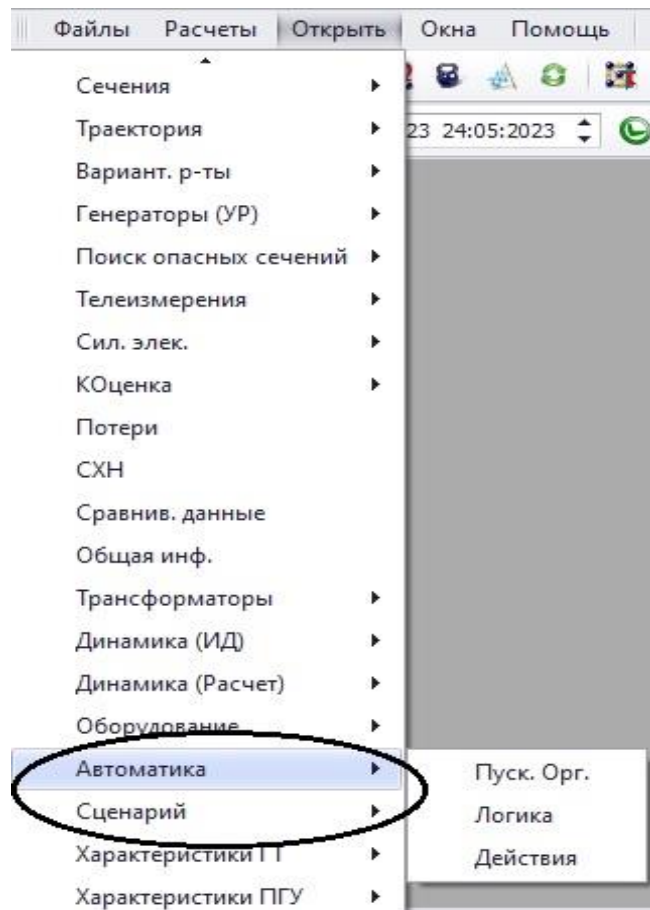


Рисунок 22 – Открытие окна «Автоматика»

Автоматика представляет собой шаблон «автоматика.dfw», а описание сценариев шаблон «сценарий.scn». Автоматика и Сценарий разделены на разные функции для того, чтобы была возможность описать автоматику независимо от описания событий. Это дает возможность выполнить разные варианты расчетов на одной и той же автоматике.

Одной из ключевых особенностей данных расчетов является способность автоматизировать процесс моделирования. Пользователь определяет правила и условия, управляющие поведением системы, а RUSTab автоматически сгенерирует соответствующий код для имитации этих правил.

Чтобы использовать RUSTab для расчета автоматики (сценария), нужно создать модель системы, необходимую для изучения, которая будет включать все соответствующие переменные и взаимосвязи между ними. Особенностью является возможность задавать различные сценарии, изменяя значения

определённых переменных или вводя в модель новые переменные. После определения модели и сценариев запускается симуляция для расчёта динамики системы в разных условиях.

Общая структура подсистем логики работы автоматики и сценария представлена на рисунке 23.

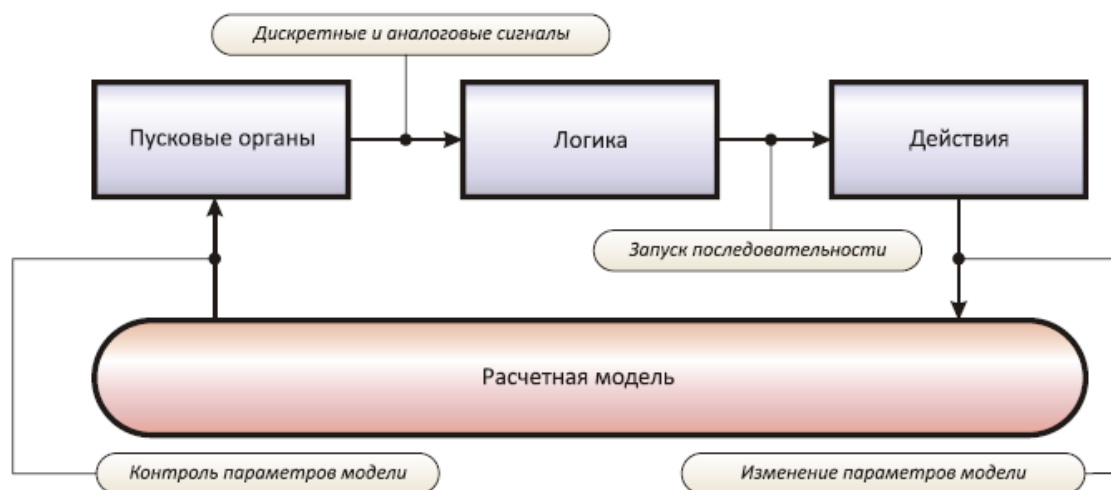


Рисунок 23 – Общая структура подсистем автоматики (сценария)

Таблица «Пусковые органы» располагается по следующей ссылке: Открыть – Автоматика – Пусковые органы. Образец табличного элемента представлен на рисунке 24.

N	Тип	Название	Формула	Тип объекта	Свойство объекта	Ключ объекта
---	-----	----------	---------	-------------	------------------	--------------

Рисунок 24 – Таблица «Пусковые органы»

Таблица пусковых органов содержит столбец «N», в котором каждый пусковой орган должен иметь свой уникальный номер. Важно задать тип объекта, который будет определять параметры органа.

В столбце «Название» дается произвольное наименование пускового органа.

Ключ объекта подразумевает под собой запись номера узла.

В Руководстве пользователя ПК RUSTab предложены следующие варианты для заполнения поля «Тип»:

Таблица 8 – Параметры, поступающие из расчётной 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 столбце «Формула» записывается расчетное выражение, характеризующее значение, которое будет передаваться на выход. Примеры формул пусковых органов представлены в таблице 8.

Таблица 9 – Формулы для «Пускового органа»

$V/2$	Половина значения параметра объекта модели (параметр определяется типом пускового органа)
$\sqrt{\text{node}[1320].Vre^2 + \text{node}[1320].Vim^2} < 495$	1, если модуль напряжения узла 1320 меньше 495 кВ и 0 в противном случае
$\text{node}[1320].vras < 495$	То же самое, что и в предыдущем примере, но запись упрощена за счет использования параметра vras, рассчитываемого непосредственно в программе

$V \geq P1 \ \& \ V \leq P2$	1, если значение параметра объекта модели находится в диапазоне [P1;P2] и 0 в противном случае. Значения P1 и P2 являются параметрами и задаются в ссылке на пусковой орган
V-BASE	Разница между текущим и исходным значением параметра передается на выход

Таблица «Логика» содержит набор инструкций, определяющих время и условия операции повторного включения. Таблица предназначена для генерации сигнала, запускающего операцию повторного включения. Сигнал формируется на основе временной задержки и состояния системы защиты.

При возникновении неисправности срабатывает система защиты, и данная таблица запускает таймер обратного отсчета. Таймер выжидает заданный интервал времени перед тем, как отправить сигнал системе защиты на закрытие. Если система защиты обнаружит, что неисправность все еще присутствует, она не включится повторно. Однако, если неисправность устранена, система защиты повторно закроет линию и восстановит подачу электроэнергии на поврежденный участок линии.

Рисунок 25 представляет собой форму таблицы модуля «Логики».

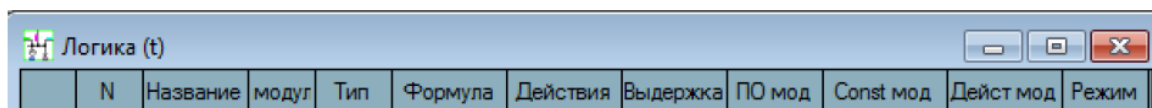


Рисунок 25 – Таблица «Логика»

Каждый элемент имеет свой уникальный номер в поле «N». К определенной строке таблицы присваивается один элемент логики.

Существует два варианта заполнения поля «Тип», которые отражены в таблице 10.

Таблица 10 – Варианты исполнения «Логики»

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

В поле «Тип» указывается элемент логики, к примеру *Формула*. Это отсылает нас в поле «Формула», где элемент должен проанализировать выражение, вбитое в данный столбец. Если выражение в поле «Формула» истинно, автоматически выполняются действия, которые находятся в поле «Действия». В поле «Действия» заносятся действия, которые находятся в параллельно открытой одноименной таблице. В столбце «Выдержка времени» указывается интервал времени, по истечении которого исполняются действия.

Таблица «Действия», содержащая необходимые значения для выполнения расчетов, выглядит следующим образом (рисунок 26):

Действия (t)										
	N	N группы	Тип	Название	Формула	Тип объекта	Свойство объекта	Ключ объекта	Режим	N сраб

Рисунок 26 – Таблица «Действия»

Каждое действие имеет уникальный идентификатор в столбце «N» и уникальный номер группы, в которое оно входит (в столбце «N группы»). Действия объединяются в группу, и выполняются только те действия, которые входят в группу.

Столбец «Тип» может характеризоваться значениями, приведенными в таблице ниже.

Таблица 11 – 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 «-».
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 «Ключ объекта» задается номер узла. В столбце «Формула» 0 обозначает выключенное состояние объекта, 1 означает включенное состояние.

В поле «N сраб.» указываем 1, это означает, что действие не будет выполняться более 1 раза.

Данные о возбудителях, АРВ и генераторах сохраняются одним файлом – динамика.rst, как показано на рисунке 27.

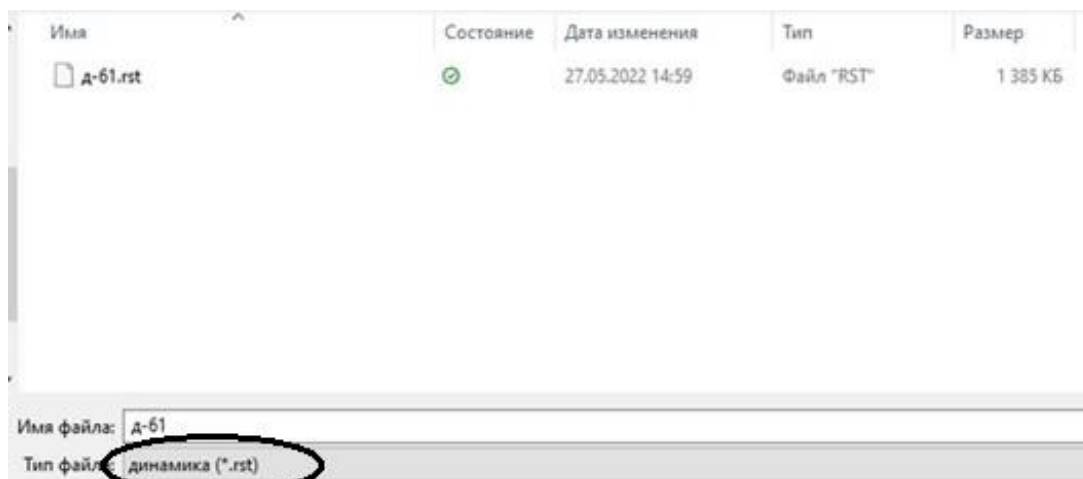


Рисунок 27 – Сохранение динамики

Данные для всех элементов автоматики сохраняются одним файлом автоматика.dfw (рисунок 28).

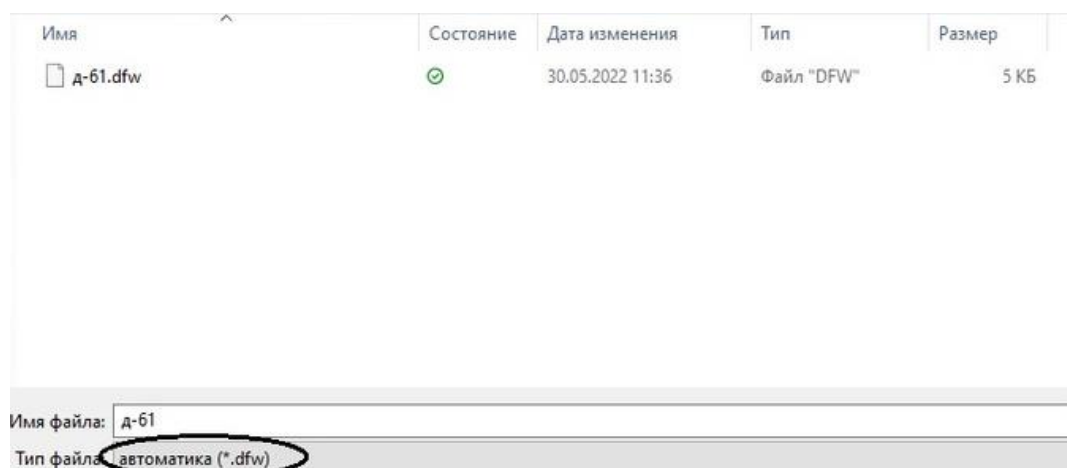


Рисунок 28 – Сохранение данных автоматики

3 Практическая часть. Моделирование переходного процесса при АПВ линии

В Республике Хакасия в период ремонтной кампании проблемным становится Абакано–Черногорский узел, когда в ремонте находятся часть генераторов и одна из систем шин 220 кВ на ПС 220 кВ Абакан–районная. В описанной ситуации при отключении оставшейся в работе системе шин 220 кВ ПС 220 кВ Абакан–районная (например, при возникновении КЗ на системе шин в процессе переключений по вводу ее в работу) Абакано–Черногорский узел (АЧУ) выделится на изолированную работу с дефицитом мощности в узле. АЧУ может выделиться даже в нормальной схеме – при переключениях на присоединении выключателя МШВ–220.

До 2022 года при управлении режимом ЕЭС использовались только оперативные методы синхронизации (выполняется оперативным персоналом энергообъекта по команде диспетчера), а именно синхронизация через колонку

синхронизации либо включение ключа управления схемы АПВ. При этом диспетчер заранее подготавливает режим, чтобы синхронизовать сбалансированный узел, частота в котором близка к 50 Гц, что обеспечивает наиболее благоприятные условия синхронизации. В случае, если энергорайон оставался связан с энергосистемой по одной связи, отключение которой возможно в результате единичного возмущения, диспетчер оперативно отключал АПВ, и при КЗ энергорайон отключался без возможности синхронизации в автоматическом режиме.

Начиная с 2022 года в АО «СО ЕЭС» введена практика использования автоматической синхронизации посредством АПВ с КС. Для этого были выполнены расчеты с целью определения допустимых условий синхронизации (допустимый угол и частота). По ряду устройств было выдано задание по перенастройке уставок АПВ для обеспечения допустимости расчетного угла и частоты.

3.1 Выбор параметров расчета

Для расчета переходного процесса нужно выбрать и задать время расчета $T_{\text{расч}}$. Также необходимо определить параметры, которые будут определяться во время расчета переходного процесса.

Для того, чтобы открыть таблицу параметров расчета, необходимо открыть: Расчеты – Параметры – Динамика (рисунок 29).

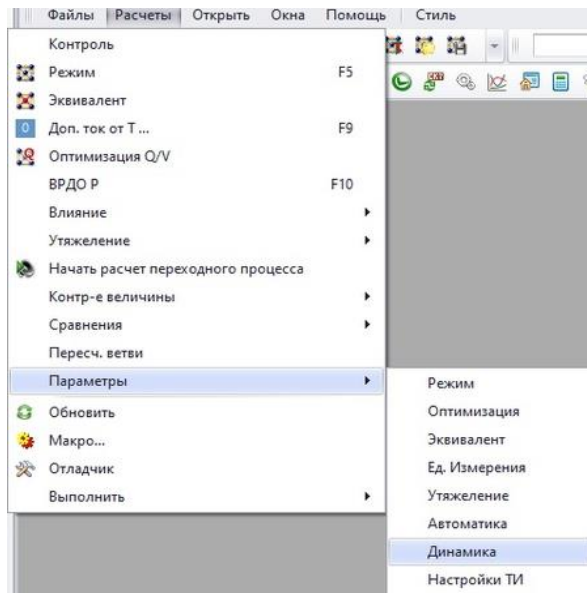


Рисунок 29 – Параметры расчета динамики

В таблицу «Динамика» заносятся данные, исходя из таблицы, в которой представлено описание параметров (таблица 12).

Название	
Время расчета (T_расч)	15,000
Начальный шаг интегрирования (H_инт)	0,010000
Минимальный шаг интегрирования (H_мин)	0,001000
Максимальный шаг интегрирования (H_макс)	0,500000
Шаг печати (H_печ)	0,050000
Основной метод интегрирования (Осн.Метод)	HM5
Стартовый метод интегрирования (Старт.Метод)	KM4
Точность шага интегрирования (dInt)	0,000001
Информировать об изменении шага (Выводить шаг)	<input checked="" type="checkbox"/>
Постоянная сглаживания угловой скорости (частоты) узла (Tf)	0,040
Точность балансировки эдс при учете явнополюсности (dEf)	0,01000
Макс число пересчетов UP на шаге при учете явнополюсности (It)	30
Контроль входных параметров (Контр.)	По умолчанию
Демпфирование в уравнениях движения (Демпф)	S
Корректировать T в парковских моделях (Корр T)	Да
Учет демп. момента в моделях с демп контурами (Уч Демп)	Нет
Напряжения перехода с СХН на шунт (V_минСХРН)	0,750
Допустимый небаланс СХН (SXNToI)	0,001000
Выходной каталог файлов результатов (Кат. результатов)	C:\tmp\
Максимальное кол-во файлов результатов (Макс. файлов)	100
Шаблон имени выходного файла (Шаблон имени)	<count>.sna
Автозагрузка последнего результата (Автозагрузка)	<input checked="" type="checkbox"/>
Максимальное кол-во слотов результатов (Макс. рез-тов)	6

Рисунок 30 – Параметры расчета

Таблица 12 – Описание 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 (Р–К4). 2. Встроенный метод Кутты–Мерсона с переменным шагом (К–М4) 3. Метод Адамса 4 порядка с переменным шагом (Адамс4). 4. Метод обратного дифференцирования (BDF4) с постоянным шагом.
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	Выходной каталог файлов результатов
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».

3.2 Описание модели энергосистемы Республики Хакасия в RUSTab ПК

RastrWin3

Электрическая сеть Республики Хакасия состоит из нескольких компонентов, включая электростанции, линии электропередач, подстанции, трансформаторы и распределительные сети.

В целом, под моделью в ПК RUSTab подразумевается совокупность таблиц для расчета режимов, которая содержит параметры узлов, ветвей, нагрузок и генерирующих источников.

Модель Республики Хакасия в программном комплексе RUSTab описана 366 узлами и 416 ветвями. Данная модель составлена по данным замеров мощностей (активных и реактивных) нагрузочных и генераторных узлов, а также по исходным данным трансформаторов и ЛЭП, предоставленных Филиалом АО «СО ЕЭС» Хакаское РДУ.

На рисунке 31 представлена часть исходных данных по узлам.

	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	P...	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_...	B...	V	Delta	Тер...
117	<input type="checkbox"/>		Ген	61 111 012	Абаканская ТЭЦ : 2Г	10	2	611	8,8	7,6	98,3	25,4	10,3	-31,0	74,1		10,33	1,82	61111
118	<input type="checkbox"/>		Ген	61 111 013	Абаканская ТЭЦ : 3Г	10	2	611	10,3	7,6	109,0	15,5	10,2	-36,1	82,5		10,24	2,58	61111
119	<input type="checkbox"/>		Ген	61 111 014	Абаканская ТЭЦ : 4Г	10	2	611	14,8	10,1	134,0	42,5	10,4	-14,6	61,2		10,39	1,85	61111
120	<input type="checkbox"/>		Нагр	61 111 018	Абаканская ТЭЦ : 2 секция ...	110	1	611	1,6	0,6							117,35	-2,74	61111
121	<input type="checkbox"/>		Нагр	61 111 001	Абаканская СЭС : 1сек-110...	110		611									117,34	-2,74	61111
122	<input type="checkbox"/>		Нагр	61 111 007	Абаканская СЭС : 2сек-110...	110		611									117,34	-2,74	61111
123	<input type="checkbox"/>		Ген-	61 111 002	Абаканская СЭС : 1ш 10кВ	10	2	611				-2,6	10,5	-2,6	2,6		11,04	-2,71	61111
124	<input type="checkbox"/>		Ген-	61 111 008	Абаканская СЭС : Секция 2	10	2	611				-2,6	10,5	-2,6	2,6		11,04	-2,71	61111
125	<input type="checkbox"/>		Нагр	61 111 146	ПС 110 кВ Черногорская : 2...	35	2	611	26,7	3,8							36,27	-7,88	61111

Рисунок 31 – Фрагмент данных по узлам

1 столбец: тип. В столбце «Тип» задается нагрузка или генерация. Один узел определяется как базисный, для него указывается тип База.

2 столбец: номер. Задается любое число, которое будет определять номер узла.

3 столбец: название. Произвольное название объекта.

4 столбец: номинальное напряжение в узле (кВ).

5 столбец: Активная мощность в узле (МВт).

6 столбец: Реактивная мощность в узле (МВАр).

7 столбец: Активная мощность генератора (МВт).

8 столбец: Реактивная мощность генератора (МВАр).

9 столбец: $V_{зд}$. Это фиксированный модель напряжения, который должен быть выдержан при регулировании реактивной мощности.

10 столбец: Q_{min}, Q_{max} . Ограничения по реактивной мощности в узле генерации.

Исходные данные по ветвям изображены на рисунке 32.

	O	S	Тип	N_нач	N_кон	N_п	I...	Название	R	X	B	Кт/г	...	Б...	P_нач	Q_нач	Na	I max
117	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61111004	61111015			ПС 220 кВ Абакан-районная : 1СШ 220 - ...	0,72	3,98	-26,4				5	-66		163
118	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61111004	61111022			ПС 220 кВ Абакан-районная : 1СШ 220 - ...	0,47	2,61	-17,3				-32	26		99
119	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61111004	61111022	1		ПС 220 кВ Абакан-районная : 1СШ 220 - ...	0,68	3,73	-24,7				-22	19		70
120	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тр-р	61111016	61111026			ПС 220 кВ Абакан-районная - 1АТ ср.т. - ...	1,59	55,...		0,046						
121	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тр-р	61111016	61111003			ПС 220 кВ Абакан-районная - 1АТ ср.т. - ...	0,18	-2,51		0,505						
122	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тр-р	61111010	61111017			ПС 220 кВ Абакан-районная : 2СШ 220 - ...	0,42	28,...	13,4	1,000						
123	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61111010	61112074			ПС 220 кВ Абакан-районная : 2СШ 220 - ...	5,60	32,...	-214,1			44				110
124	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61111010	61111023			ПС 220 кВ Абакан-районная : 2СШ 220 - ...	0,47	2,60	-17,2				-35	26		104
125	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тр-р	61111017	61111027			ПС 220 кВ Абакан-районная - 2АТ ср.т. - ...	1,59	54,...		0,046						
126	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тр-р	61111017	61111009			ПС 220 кВ Абакан-районная - 2АТ ср.т. - ...	0,17	-2,24		0,505						
127	<input type="checkbox"/>		Выкл	61111003	61111009			ПС 220 кВ Абакан-районная : 1СШ 110 - ...						1	5		27	
128	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61111009	61111018			ПС 220 кВ Абакан-районная : 2СШ 110 - ...	0,68	3,81	-24,5				63	22		333
129	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61111009	61111046			ПС 220 кВ Абакан-районная : 2СШ 110 - ...	1,96	4,48	-29,2				18	3		92
130	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61111003	61111109			ПС 220 кВ Абакан-районная : 1СШ 110 - ...	3,76	7,97	-51,2				-9	-3		47
131	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	61111003	61111018			ПС 220 кВ Абакан-районная : 1СШ 110 - ...	0,68	3,83	-24,7				63	22		332

Рисунок 32 – Фрагмент данных по ветвям.

1 столбец: тип. Тип ветви присваивается автоматически в зависимости от вбываемых параметров.

2, 3 столбец: номер. Номера начала и конца узлов, которые ограничивают ветвь.

4 столбец: $N_{п}$. Номер ветви в группе параллельных ветвей.

5 столбец: название. Названия узлов, которые автоматически переносятся из таблицы «Узлы».

6,7 столбец: Активное и реактивное сопротивление (Ом).

8 столбец: Проводимость (мкСм).

9 столбец: Коэффициент трансформации (отношение высокой стороны к низкой).

Для анализа режимов в ПК RUSTab существуют таблицы «Узлы+Ветви» и «Токовая нагрузка ЛЭП».

	N_нач	N_кон	Название	I_нач	I_кон	Мес...	к...	Tс	N_I(t)...	Iдоп_2...	I_доп_об...	Iдоп...	I/I_d...	N_I(t)...	Iдоп_...	I_доп_о...
60	61111004	61111015	ПС 220 кВ Абакан-районн...	160	163	ВН	<input type="checkbox"/>		107	825,0				122	990,0	1 000,0
61	61111004	61111022	ПС 220 кВ Абакан-районн...	99	97	ВН	<input type="checkbox"/>		107	825,0	2 000,0			122	990,0	1 000,0
62	61111004	61111022	ПС 220 кВ Абакан-районн...	70	68	ВН	<input type="checkbox"/>		107	825,0	2 000,0			122	990,0	1 000,0
63	61111010	61112074	ПС 220 кВ Абакан-районн...	106	110	ВН	<input type="checkbox"/>		116	825,0	1 000,0			116	825,0	1 200,0
64	61111010	61111023	ПС 220 кВ Абакан-районн...	104	103	ВН	<input type="checkbox"/>		107	825,0	2 000,0			122	990,0	1 000,0
65	61111009	61111018	ПС 220 кВ Абакан-районн...	333	333	ВН	<input type="checkbox"/>		138	600,0	1 000,0			158	990,0	600,0
66	61111009	61111046	ПС 220 кВ Абакан-районн...	92	91	ВН	<input type="checkbox"/>		160	445,0	600,0			159	534,0	600,0
67	61111003	61111109	ПС 220 кВ Абакан-районн...	46	47	ВН	<input type="checkbox"/>		160	445,0	600,0			159	534,0	600,0
68	61111003	61111018	ПС 220 кВ Абакан-районн...	332	331	ВН	<input type="checkbox"/>		138	600,0	1 000,0			158	990,0	600,0
69	61111011	61111018	ПС 110 кВ Рассвет : ОСШ...	284	283	ВН	<input type="checkbox"/>		162	600,0	2 000,0			161	732,0	600,0
70	61122016	61124001	ПС 220 кВ ПП-2 САЭ : 4 ...			ВН	<input type="checkbox"/>		119	825,0				119	990,0	
71	61112043	61112100	ВЛ 110 кВ Кольево : 1сек...	29	41	ВН	<input type="checkbox"/>									
72	60513109	61112045	ВЛ 110 кВ Кольево – пун...	21	21	ВН	<input type="checkbox"/>		166	390,0	300,0			117	468,0	300,0
73	61111018	61111048	Абаканская ТЭЦ : 2 секц...	263	265	ВН	<input type="checkbox"/>		176	471,0	630,0			175	551,0	630,0
74	61111018	61111047	Абаканская ТЭЦ : 2 секц...	263	265	ВН	<input type="checkbox"/>		176	471,0	630,0			175	551,0	630,0

Рисунок 33. Фрагмент таблицы «Токовая нагрузка ЛЭП»

	O S	Номер	Название	V	Delta	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_...	Q_ш
	O S	№	Название	V_2	dDelta	P_л	Q_л	dP	dQ	I_л	P_ш	Q_ш	
316	<input checked="" type="checkbox"/>	61 111 013	Абаканская ТЭЦ : 3Г	10,24	2,58	10,3	7,6	109,0	15,5	10,2	-36,1	82,5	
317	<input type="checkbox"/>	61 111 018	Абаканская ТЭЦ : 2 секция II СШ 110кВ	117,3	-5,3	-99	-7	0,29	9,16	5 572	0,09	0,49	
318	<input checked="" type="checkbox"/>	61 111 014	Абаканская ТЭЦ : 4Г	10,39	1,85	14,8	10,1	134,0	42,5	10,4	-14,6	61,2	
319	<input type="checkbox"/>	61 111 018	Абаканская ТЭЦ : 2 секция II СШ 110кВ	117,3	-4,6	-119	-31	0,27	10,05	6 830	0,09	0,37	
320	<input checked="" type="checkbox"/>	61 111 018	Абаканская ТЭЦ : 2 секция II СШ 110кВ	117,35	-2,74	1,6	0,6						
321	<input type="checkbox"/>	61 111 164	ВЛ 110 кВ Абаканская ТЭЦ – Сибирь с о...	116,6	-0,6	-37	-9	0,13	0,45	187		-0,40	
322	<input type="checkbox"/>	61 111 009	ПС 220 кВ Абакан-районная : 2СШ 110	116,2	-1,0	-64	-23	0,23	1,27	333		-0,33	
323	<input type="checkbox"/>	61 111 003	ПС 220 кВ Абакан-районная : 1СШ 110	116,2	-1,0	-63	-23	0,22	1,26	331		-0,34	
324	<input type="checkbox"/>	61 111 011	ПС 110 кВ Рассвет : ОСШ-110кВ	115,7	-1,2	-55	-18	0,40	1,37	283		-0,53	
325	<input type="checkbox"/>	61 111 005	Абаканская ТЭЦ : СШ1 6 кВ	6,6	2,7	37	5	0,06	1,77	182	0,09	0,42	
326	<input type="checkbox"/>	61 111 006	Абаканская ТЭЦ : 2РР	6,2	-1,7	-10	-8	0,02	0,51	64	0,04	0,18	
327	<input type="checkbox"/>	61 111 012	Абаканская ТЭЦ : 2Г	10,3	4,6	89	9	0,22	7,30	440	0,11	0,67	
328	<input type="checkbox"/>	61 111 013	Абаканская ТЭЦ : 3Г	10,2	5,3	98	-2	0,29	9,16	483	0,09	0,49	
329	<input type="checkbox"/>	61 111 014	Абаканская ТЭЦ : 4Г	10,4	4,6	118	21	0,27	10,05	592	0,09	0,37	
330	<input type="checkbox"/>	61 111 015	Абаканская ТЭЦ : ВЛ Д-61 Абакан-райо...	239,9	-0,2	-5	64	0,05	2,11	318	0,16	1,01	

Рисунок 34. Фрагмент таблицы «Узлы+Ветви»

Строка, выделенная цветом, содержит параметры узла, а следующие – это параметры присоединенных к этому узлу линий и трансформаторов. Отображаются такие параметры, как номер узла, название, расчетный модуль V и фаза напряжения, нагрузка P_n , Q_n , активная генерация P_g , расчетная

реактивная генерация $Q_{г}$, заданные модуль напряжения $V_{зд}$ и пределы изменения реактивной генерации Q_{min} , Q_{max} .

В строках, которые относятся к параметрам ветви, связанных с узлом, отображаются такие параметры, как номер и название, падение модуля V_2 и угла напряжения $dDelta$, переток мощности $P_{л}$ и $Q_{л}$, входящей в узел, продольные потери dP и dQ , модуль тока $I_{л}$, мощности шунта ветви $P_{ш}$ и $Q_{ш}$.

Генераторы, расположенные на Абаканской ТЭЦ (1Г, 2Г, 3Г, 4Г), описаны 3-х контурной моделью в форме Парка–Горева, так как данную модель в форме Парка следует применять для генераторов наиболее мощных электростанций, поскольку переходные процессы в таких генераторах оказывают решающее влияние на результаты расчета. Эта информация вносится в столбец «Модель». Столбец «P» соответствует активной мощности генерации, а столбец «Q» реактивной мощности генерации (рисунок 35).

	O	S	N	Название	N узла	Модель	Марка	К...	N_взб	N_т...	NPT	P	Q	P_ном	Uг...	CO...	K_...	Mj	X'd	X'd	Xq	X'd	X'q	T'd0	T'd0	T'q0	...	X_J	X2
1			61 111 005	Абаканская ТЭЦ - 1Г	61111005	Эк-Парк	<не з...	1	6111...	6111...		59,00	24,12	63,0	6,3	0,80	1	8,663	0,275	1,915	1,723	0,180	0,198	6,090	0,167	0,500	0,178	0,220	
2			61 111 012	Абаканская ТЭЦ - 2Г	61111012	Эк-Парк	<не з...	1	6111...	6111...		98,27	25,43	100,0	10,5	0,80	1	8,060	0,278	1,907	1,716	0,192	0,211	6,450	0,170	0,500	0,174	0,234	
3			61 111 013	Абаканская ТЭЦ - 3Г	61111013	Эк-Парк	<не з...	1	6111...	6111...		109,00	15,49	110,0	10,5	0,80	1	7,190	0,271	2,037	1,836	0,189	0,208	6,700	0,160	0,500	0,188	0,230	
4			61 111 014	Абаканская ТЭЦ - 4Г	61111014	Эк-Парк	<не з...	1	6111...	6111...		134,00	42,54	136,0	10,5	0,92	1	6,020	0,284	2,180	1,962	0,195	0,214	6,760	0,160	0,500	0,194	0,238	

Рисунок 35 – Фрагмент данных по генераторам

АРВ(ИД) – функция ПК RUSTab, которая позволяет моделировать системы регулирования и управления напряжением для синхронных генераторов. С помощью данного устройства можно обеспечить стабильную работу энергосистемы и предотвращать колебания напряжения, которые могут привести к повреждению оборудования. Фрагмент данных по АРВ представлен на рисунке 36.

АРВ (ИД) X																
	O	S	N	Название	Модель	Марка	T_рв	Ku	K'u	K'f	Kf	K'f	Tf	Umin	Umax	Alp...
1	<input type="checkbox"/>		61 111 005	Абаканская ТЭЦ. 1Г	Пользов.	<не за...	0,300	7,000						-2,0...	2,000	
2	<input type="checkbox"/>		61 111 012	Абаканская ТЭЦ. 2Г	Пользов.	<не за...	0,300	10,000						-2,0...	2,000	
3	<input type="checkbox"/>		61 111 013	Абаканская ТЭЦ. 3Г	Пользов.	<не за...		7,500	2,500	0,600	0,250	0,400	0,200			2,000
4	<input type="checkbox"/>		61 111 014	Абаканская ТЭЦ. 4Г	АРВ-М НТЦ	<не за...		5,000	2,000	1,250		1,000	2,000			0,500

Рисунок 36 – Фрагмент данных об АРВ (ИД)

Фрагмент таблицы с данными по форсировке изображен на рисунке 37. В данной таблице отображаются такие параметры, как напряжение ввода и снятия форсировки, кратность форсировки, постоянная времени возбудит. при форсировке.

Форсировка (ИД) X															
	O	S	N	Название	Модель	Марка	U_ввф	U_снф	K_ф	T_ф	Tз...	Tз_с...	U...	U_...	K_рф
1	<input type="checkbox"/>		61 111 014	Абаканская ТЭЦ. 4Г	Станда...	<не зад...	0,920	0,920	2,500	1,000		0,100			-2,000
2	<input type="checkbox"/>		61 190 050	Саяно-Шушенская ГЭС...	Станда...	<не зад...	0,850	0,850	3,000	1,000		0,100			-3,000
3	<input type="checkbox"/>		61 190 051	Саяно-Шушенская ГЭС...	Станда...	<не зад...	0,850	0,850	3,000	1,000		0,100			-3,000

Рисунок 37 – Фрагмент данных по форсировке (ИД)

В таблице с данными по возбудителям отображаются номер возбудителя, название станции, к которой принадлежит возбудитель, модель и марка. Также в столбце N_АРВ присваивается номер автоматического регулятора возбуждения из таблицы «АРВ (ИД)» и номер форсировки из таблицы «Форсирова (ИД)».

Возбудитель (ИД) X													
	O	S	N	Название	Модель	Марка	N_АРВ	N форс	T_во...	K_ir	K_jf	Uf_min	Uf_max
1	<input type="checkbox"/>		61 111 005	Абаканская ТЭЦ. 1Г	Станда...	<не зад...	6111...		0,300			-2,000	2,000
2	<input type="checkbox"/>		61 111 012	Абаканская ТЭЦ. 2Г	Станда...	<не зад...	6111...		0,300			-2,000	2,000
3	<input type="checkbox"/>		61 111 013	Абаканская ТЭЦ. 3Г	Пользов.	<не зад...	6111...		0,040			-2,000	2,500
4	<input type="checkbox"/>		61 111 014	Абаканская ТЭЦ. 4Г	Станда...	<не зад...	6111...	61111014	0,025			-2,000	2,500

Рисунок 38 – Фрагмент данных по возбудителям (ИД)

3.3 Расчет параметров настройки АПВ с функцией контроля синхронизма

Расчет параметров применяется для определения следующих режимных параметров, используемых для определения параметров настройки функций контроля синхронизма и улавливания синхронизма линий электропередачи, электросетевого оборудования:

- максимально допустимая разность углов векторов напряжения на полюсах коммутационного аппарата ($\delta_{\text{вкл}}$);
 - максимально допустимая разность частот между разделившимися частями энергосистемы (Δf);
 - максимально допустимая разность частот, при которой выполняется смена алгоритма КС и УС (разность частот УС/КС);
 - максимально допустимая разность напряжений (ΔU);
 - минимально допустимое напряжение (уставка контроля наличия напряжения) (U_{min});
 - максимально допустимое напряжение (U_{max}),
- а также дополнительных параметров.

Для функции КС определяются следующие режимные параметры: $\delta_{\text{вкл}}$, Δf , ΔU , U_{min} , U_{max} .

Для определения разности углов $\delta_{\text{вкл}}$ необходимо определить расчетный модуль напряжения V в требуемом узле и расчетный угол напряжения Δ (таблица 13).

Таблица 13 – Значения параметров при режиме с перетоком мощности

Режим с перетоком мощности					
	Номер узла	Название узла	V	Delta	$\delta_{\text{вкл}}$, град
Район АЧУ дефицитный	61111004	ПС 220 кВ Абакан-районная : 1СШ 220	239,35	-9,01	8,02

	61111018	Абаканская ТЭЦ : 2 секция II СШ 110кВ	115,34	- 17,03	
Район АЧУ избыточный	61111004	ПС 220 кВ Абакан-районная : 1СШ 220	240,97	2,67	
	61111018	Абаканская ТЭЦ : 2 секция II СШ 110кВ	118,65	11,9	9,23

Максимально допустимая разность углов векторов напряжения на полюсах коммутационного аппарата ($\delta_{\text{вкл}}$) определяется следующим образом:

$$1) \delta_{\text{вкл}} = \text{Delta} (61111004) - \text{Delta} (61111018) = |(-9,01) - 17,03| = 8,02 \text{ (град.)}$$

$$2) \delta_{\text{вкл}} = \text{Delta} (61111004) - \text{Delta} (61111018) = |2,67 - 11,9| = 9,23 \text{ (град.)}$$

(значение по модулю)

где Delta – расчетный угол напряжения, град;

Если расчетная величина $\delta_{\text{вкл}}$ менее 40 градусов, для дальнейших расчетов необходимо величину $\delta_{\text{вкл}}$ принять 40 градусов.

Расчет максимально допустимой разности частот между разделившимися частями энергосистемы:

$$\Delta f = \frac{\delta_{\text{вкл}} \cdot (1 + K_{\text{в}})}{t_{\text{ТАПВ}} \cdot 360},$$

где $K_{\text{в}}$ – коэффициент возврата (для реле РН–55 принимается равным 0,8);

$t_{\text{ТАПВ}}$ – выдержки времени ТАПВ (принимается равным 4 секунды)

$$\Delta f = \frac{\delta_{\text{вкл}} \cdot (1 + K_{\text{в}})}{t_{\text{ТАПВ}} \cdot 360} = \frac{40 \cdot (1 + 0,8)}{4 \cdot 360} = 0,050$$

Данные по расчетам максимально допустимой разности частот сведены в таблицу 14.

Таблица 14 – Максимально допустимая разность частот

	Наименование выключателя	Δf (Кс)
Район АЧУ дефицитный	В Д–61	0,050
Район АЧУ избыточный	В Д–61	0,050

Находим $\delta_{\text{вкл}}$, увеличенный на значение увеличения угла между векторами синхронизируемых напряжений в процессе включения выключателя ($\delta_{\text{вкл.макс}}$), учитывающий время включения выключателя и время срабатывания выходного реле устройств релейной защиты и автоматики, отклонение времени включения выключателя от собственного времени включения, погрешность измерения угла и разницы частот устройством РЗА ($\Delta\delta_{\text{вкл}}$).

Расчет максимально допустимой разности углов векторов напряжения на полюсах коммутационного аппарата:

$$\delta_{\text{вкл.макс}} = \delta_{\text{вкл}} + \Delta\delta_{\text{вкл}},$$

где $\delta_{\text{вкл.макс}}$ – величина $\delta_{\text{вкл}}$, увеличенная на значение увеличения угла между векторами синхронизируемых напряжений в процессе включения выключателя;

$\Delta\delta_{\text{вкл}}$ – значение увеличения угла между векторами синхронизируемых напряжений в процессе включения выключателя, учитывающее время включения выключателя и время срабатывания выходного реле устройств РЗА, отклонение времени включения выключателя от собственного времени включения, погрешность измерения угла и разницы частот устройством РЗА.

Величина $\Delta\delta_{\text{вкл}}$ рассчитывается по формуле:

$$\Delta\delta_{\text{вкл}} = 360 \cdot \Delta f \cdot (t_{\text{вкл}} + t_{\text{реле}}) + \delta_{\text{запаса}},$$

где $t_{\text{вкл}}$ – собственное время включения выключателя, с;

$t_{\text{реле}}$ – время срабатывания выходных реле устройств РЗА, выполняющих включение выключателя с КС (при отсутствии данных в документации изготовителя $t_{\text{реле}}$ принимается равным 0,015 с), с;

$\delta_{\text{запаса}}$ – угол запаса, учитывающий погрешности, вносимые устройствами РЗА (для устройств, для которых расчетная величина $\delta_{\text{вкл}}$ составила 40 градусов и менее, принимается 4 градуса, для остальных устройств – 7 градусов).

$$\Delta\delta_{\text{вкл}} = 360 \cdot \Delta f \cdot (t_{\text{вкл}} + t_{\text{реле}}) + \delta_{\text{запаса}} = 360 \cdot 0,050 \cdot (0,8 + 0,015) + 4 = 18,67$$

$$\delta_{\text{вкл.макс}} = \delta_{\text{вкл}} + \Delta\delta_{\text{вкл}} = 40 + 18,67 \approx 58$$

Расчеты по определению максимально допустимой разности углов сведены в таблицу 15.

Таблица 15 – Максимально допустимые разности углов

	$\delta_{\text{вкл}}$	$\Delta\delta_{\text{вкл}}$	$\delta_{\text{вкл макс}}$
Район АЧУ дефицитный	40	18,67	58
Район АЧУ избыточный	40	18,67	58

При определении параметров синхронизации учитываются критерии допустимости. Параметры $\delta_{\text{вкл}}$ и Δf должны обеспечивать при включении сетевого элемента:

1. Отсутствие срабатывания устройств ПА (кроме автоматики ограничения повышения напряжения) в переходном и установившемся режимах.

2. Отсутствие срабатывания технологических автоматов электростанций, действующих на отключение генерирующего оборудования (при наличии информации о технологических автоматах и параметрах их настройки) в переходном режиме.

3. Отсутствие асинхронного режима.

4. Отсутствие превышения длительно допустимых токовых нагрузок генерирующего оборудования и сетевых элементов в установившемся режиме.

5. Отсутствие превышения допустимой кратности перегрузки генерирующего оборудования по току статора в переходном режиме, для турбогенераторов и гидрогенераторов с демпфирующими контурами определяющейся соотношением:

$$\frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{ном}}} \leq \frac{0,625}{x''_d},$$

где x''_d – сверхпереходное реактивное сопротивление цепи статора по продольной оси;

$I_{\text{ном}}$ – номинальный ток статора;

I_{max} – ток статора при синхронизации.

6. Нормативный (20 %) коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности по сетевому элементу в установившемся режиме.

Необходимо выполнить проверку расчетов по току статора. Данный расчет приведен в таблице ниже.

Таблица 16 – Проверка по току статора

Генераторы	$0,625/x''_d$	$I_{ном}$	I_{max}	$I_{max}/I_{ном}$	Вывод
1	3,47	7210	20000	2,773925	Истина
2	3,26	6875	18000	2,618182	Истина
3	3,29	7560	19000	2,513228	Истина
4	3,19	8129	23000	2,829376	Истина

Исходя из расчетов, можно сделать вывод, что при определении параметров синхронизации были соблюдены критерии допустимости. Соотношение тока статора и номинального не превышают необходимых значений.

3.4 Моделирование работы автоматического повторного включения с контролем синхронизма

Моделирование процесса работы автоматического повторного включения с контролем условий синхронизации между двумя энергосистемами должно включать в себя формирование таблиц, входящих в раздел «Автоматика».

Первой формируется таблица «Пусковых органов», которая определяет используемые объекты. Она позволяет задать начальные условия для моделирования АПВ.

В столбце **Название** необходимо написать наименование объекта, для которого задаются параметры синхронизации. Название узлов отображены в таблице 17.

Таблица 17– Наименование узлов

Номер узла	Название узла
------------	---------------

6111104	ПС 220 кВ Абакан-районная: 1 СШ 220
61111015	Абаканская ТЭЦ: ВЛ Д-61 Абакан-районная – Абаканская ТЭЦ

В столбце **Формула** задана переменная V (угол дельта) умноженный на число 57,296 (константа, используемая для перевода градусов в радианы). **Тип объекта** задается значением node, так как рассматривается узел. Необходимо учесть угол, при котором возможна синхронизация, поэтому **свойством объекта** является delta(V). В столбце **Ключ объекта** указывается номер рассматриваемого объекта (в нашем случае номер узла).

N	Тип	Название	Формула	Тип объекта	Свойство объекта	Ключ объе...
1	Объект	электрический угол узла 61111004	$V*57.2957795130823$	node	delta	61111004
2	Объект	электрический угол узла 61111015	$V*57.2957795130823$	node	delta	61111015

Рисунок 39 – Таблица «Пусковые органы»

При заполнении таблицы «Действия» в столбце **Тип** нужно задать сост.ветви, так как необходимо включить и отключить ветвь. В **Названии** описывается событие, которое произойдет за это действие (задается произвольно). В столбце **Формула** ставится «1», если ветвь включается, и «0», если ветвь отключается. Номера узлов, ограничивающих ветвь, указываются в поле **Ключ объекта**.

N	N гру...	Тип	Название	Формула	Тип объекта	Свойство объекта	Ключ объекта	Режим	N сраб
1	1	Сост ветви	Включение выключателя	1			61111004,61111015	0	1
2	2	Сост ветви	Отключение выключателя	0			61111004,61111015	0	1

Рисунок 40 – Таблица «Действия»

В таблице «Логика» необходимо задать последовательное выполнение заданных ранее действий, соблюдая необходимые для синхронизации параметры. **Название** задается произвольно, чтобы можно было понять какие процессы будут происходить. **Тип** характеризуется формулой. В столбце

Формула 1 означает истину, то есть будет запущено исполнение действия, которое присваивается столбцу **Действие**. **Действие А2** было описано ранее в таблице «Действия» (рисунок 40).

После выполнения 1 элемента логики (отключение выключателя), происходит активация 2 элемента – срабатывание АПВ. Чтобы определить условия синхронизации для срабатывания АПВ с КС, необходимо вычислить разность между углами разделившихся энергосистем.

Было рассмотрено два варианта срабатывания АПВ с КС. В первом варианте определялся диапазон допустимого включения при максимально допустимой разности углов векторов напряжения (δвкл макс) :

$$360^\circ - \delta_{\text{вкл макс}} = 360^\circ - 58^\circ = 302^\circ$$

Действие А1 (включение ветви) выполнится только при условии, если разность между углами разделившихся энергосистем будет больше или равна 302 градусам. **Выдержка времени** определяет, через какое время произойдет заданное событие (устанавливается выдержка времени от 1 сек. до 5 сек., чтобы установился исходный режим без лишних колебаний).

	N	N мо...	Название	Тип	Формула	Действия	Выде...	ПО ...	Соп...	Де...	Режим
1	1		Отключение выключателя	Формула	1	A2	1				Норма...
2	2		ТАПВ	Формула	abs(S1-S2)>=302	A1					Норма...

Рисунок 41 – Таблица «Логика»

Результат расчета переходного процесса можно увидеть на рисунках ниже.

Изменение угла ротора генератора и тока статора генератора на Абаканской ТЭЦ представлено на рисунке 42 и 43.

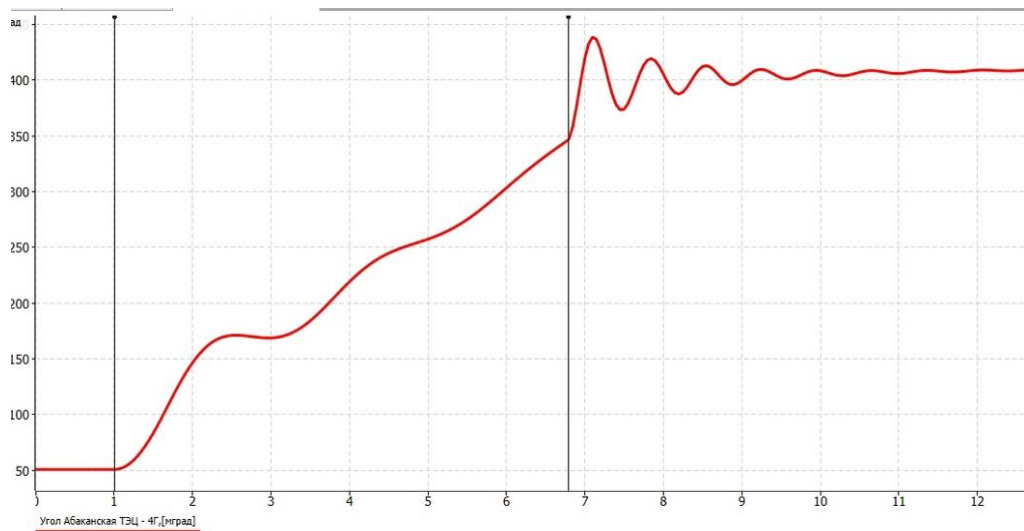


Рисунок 42 – График угла ротора генератора на Абаканской ТЭЦ

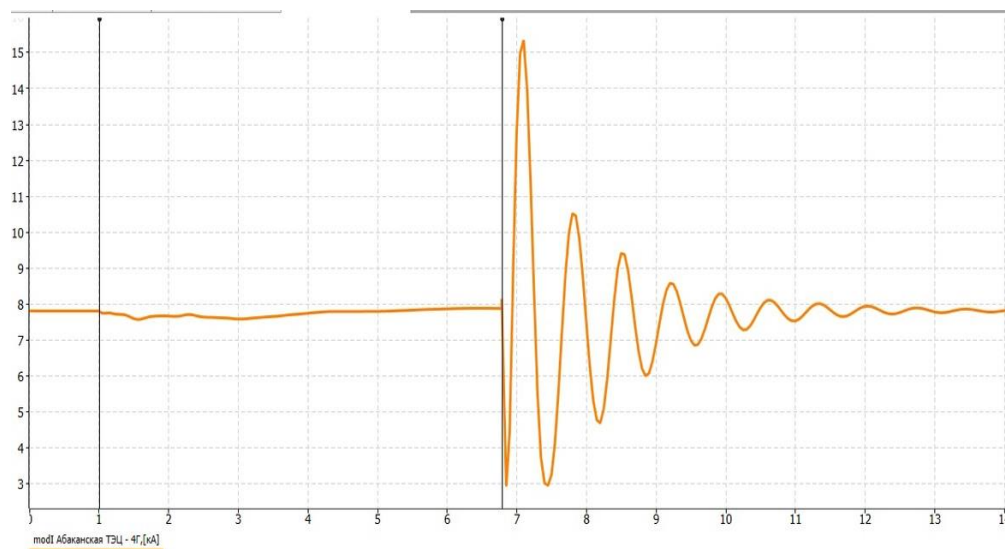


Рисунок 43 – График тока статора генератора Абаканской ТЭЦ

Динамическая устойчивость генераторов на Абаканской ТЭЦ в переходных процессах сохраняется. Превышения допустимой кратности токов статоров генераторов Абаканской ТЭЦ в переходных процессах отсутствуют.

График изменения частоты узла показан на рисунке 44:

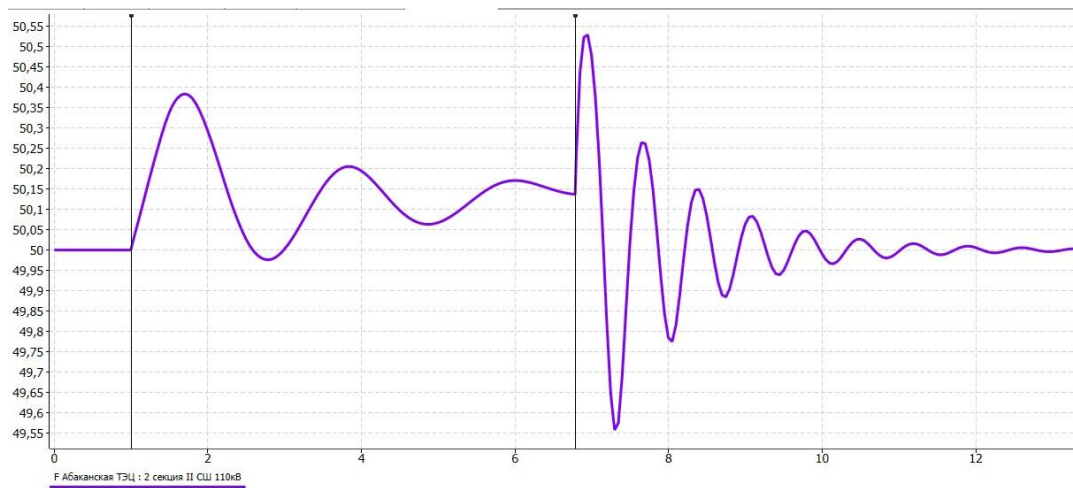


Рисунок 44 – График частоты узла

В результатах расчета синхронизация произошла при разнице частот 0,1 Гц. График изменения напряжения на Абаканской ТЭЦ представлен на рисунке 45:

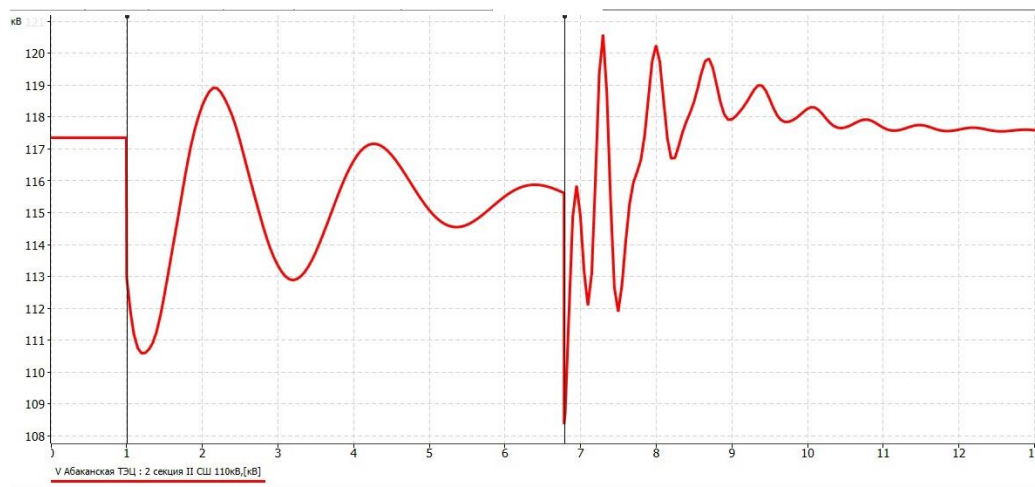


Рисунок 45 – График напряжения в узле на Абаканской ТЭЦ

Для второго варианта расчета за величину разности углов векторов напряжения принимаем минимальный угол между вращающимися векторами (δвкл мин). Для наглядности примем данный угол максимально близким к нулю (δвкл мин ≈ 2°):

$$360^\circ - \delta_{\text{вкл мин}} = 360^\circ - 2^\circ = 358^\circ$$

На представленных ниже графиках можно увидеть результаты расчета переходного процесса:

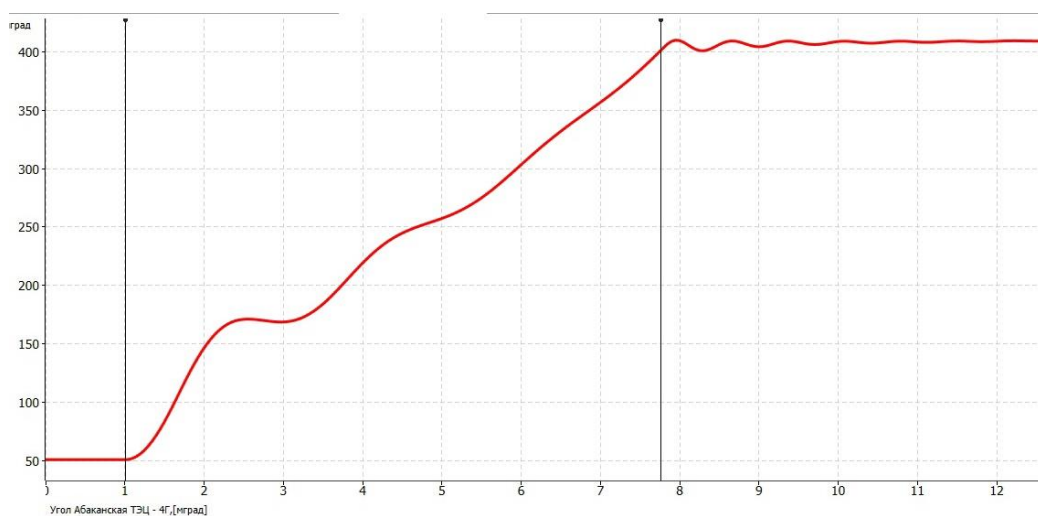


Рисунок 46 – График угла ротора генератора на Абаканской ТЭЦ

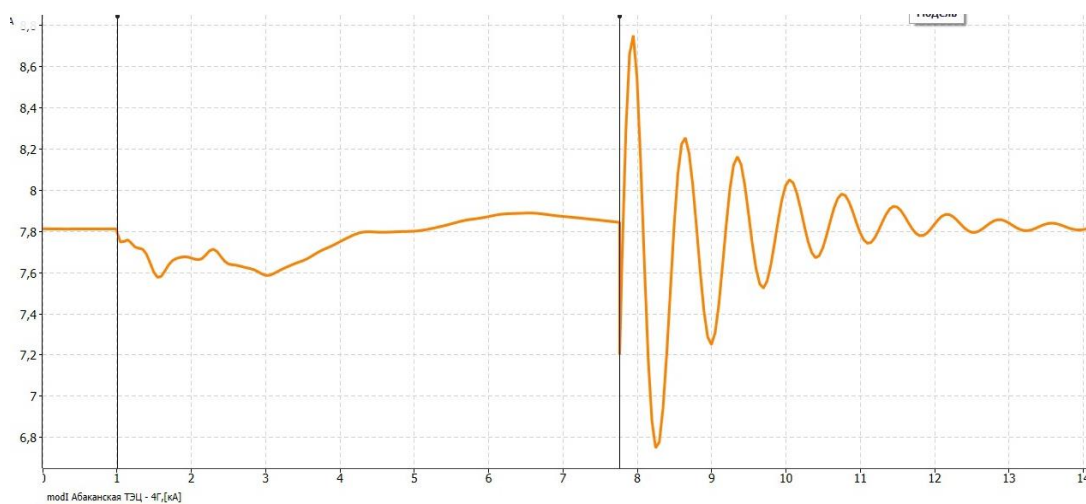


Рисунок 47 – График тока статора генератора Абаканской ТЭЦ

Динамическая устойчивость генераторов на Абаканской ТЭЦ в переходных процессах также сохраняется.

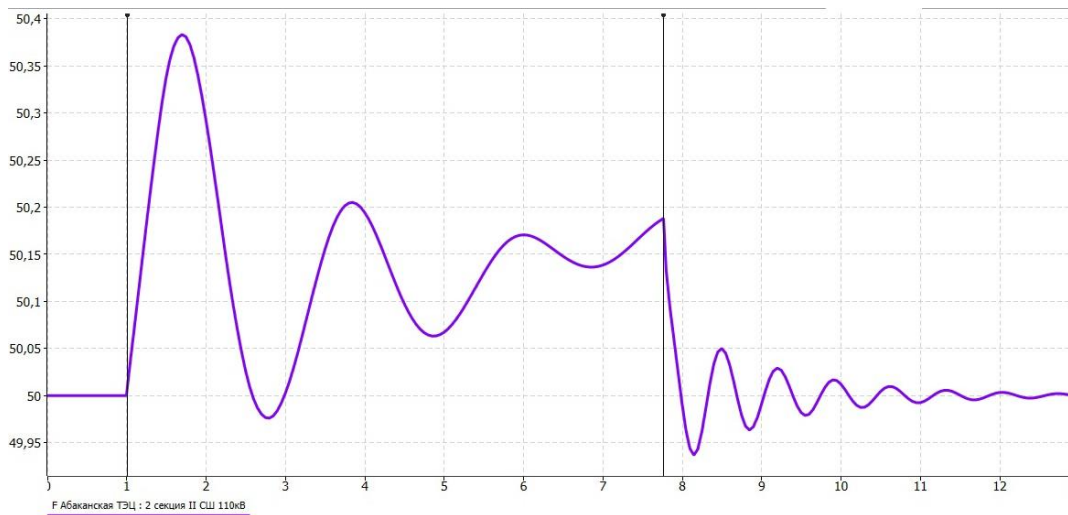


Рисунок 48 – График частоты узла

Исследуя график, видно, что при расчете синхронизация произошла при разнице частот 0,15 Гц.

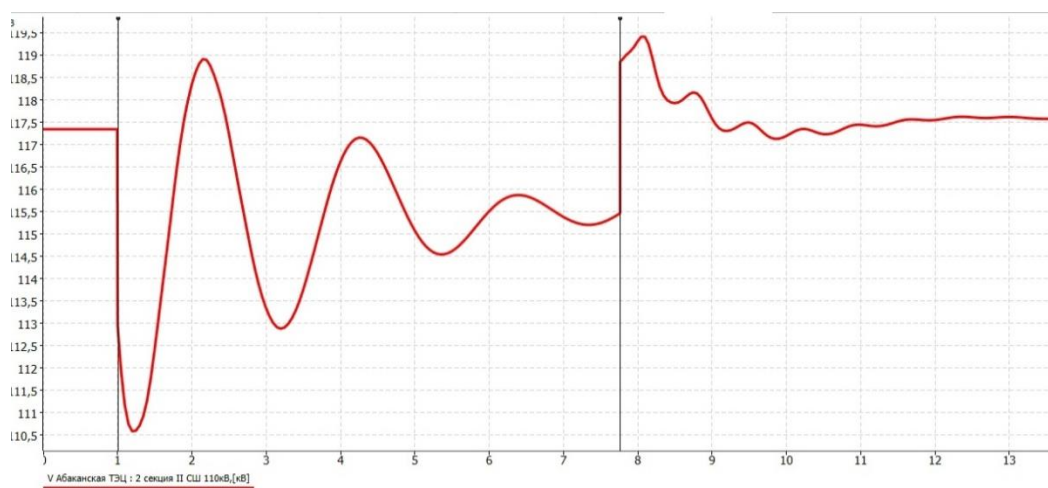


Рисунок 49 – График напряжения в узле на Абаканской ТЭЦ

Для сравнения проанализируем работу АПВ без функции КС. Для этого в столбец **Действия** заносим действия А2 (отключение выключателя) и А1 (включение выключателя через 3 сек.) без учета условий синхронизации.

N	N ...	Название	Тип	Формула	Действия	Выдержка	П...	Со...	...	Режим
1		Отключение выключателя	Формула	1	A2	1				Норма...
2		ТАПВ	Формула	1	A1	3				Норма...

Рисунок 50 – Таблица «Логика» для АПВ без КС

На рисунках ниже представлены графики отражающие включение линии с помощью АПВ спустя 3 сек. без условий синхронизации.

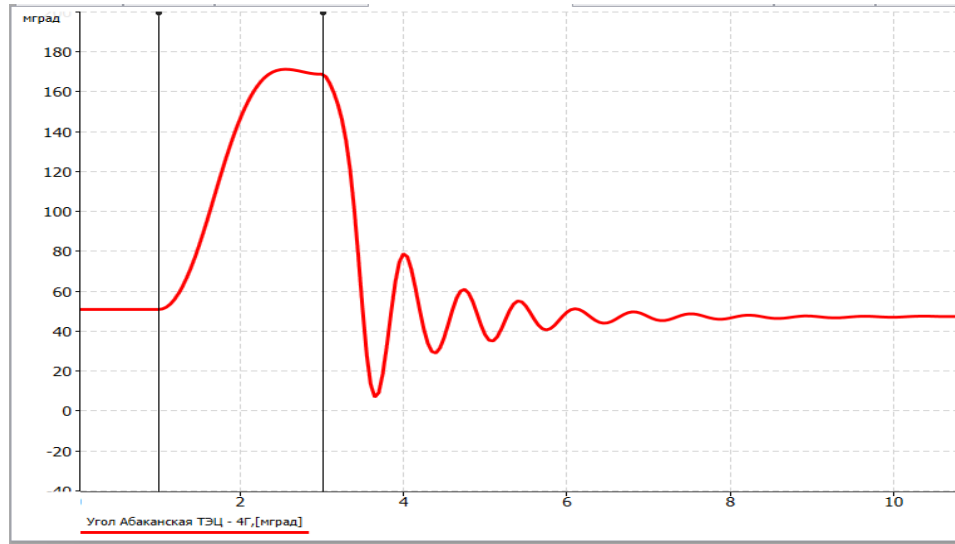


Рисунок 51 – График угла ротора генератора на Абаканской ТЭЦ

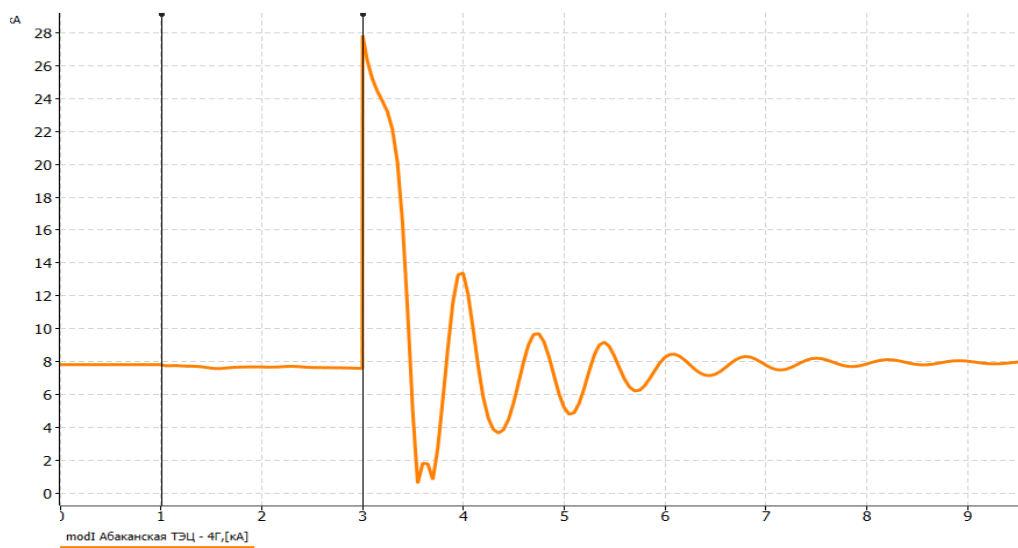


Рисунок 52 – График тока статора генератора Абаканской ТЭЦ

Динамическая устойчивость генераторов на Абаканской ТЭЦ в переходных процессах не сохраняется. Происходит превышение допустимой кратности токов статоров генераторов Абаканской ТЭЦ. На рисунке 53 по

графику тока статора генератора видно, что ток равен 28 кА, это превышает значение максимально допустимого тока статора $I_{max} = 23$ кА.

График изменения частоты узла изображен на рисунке 53.

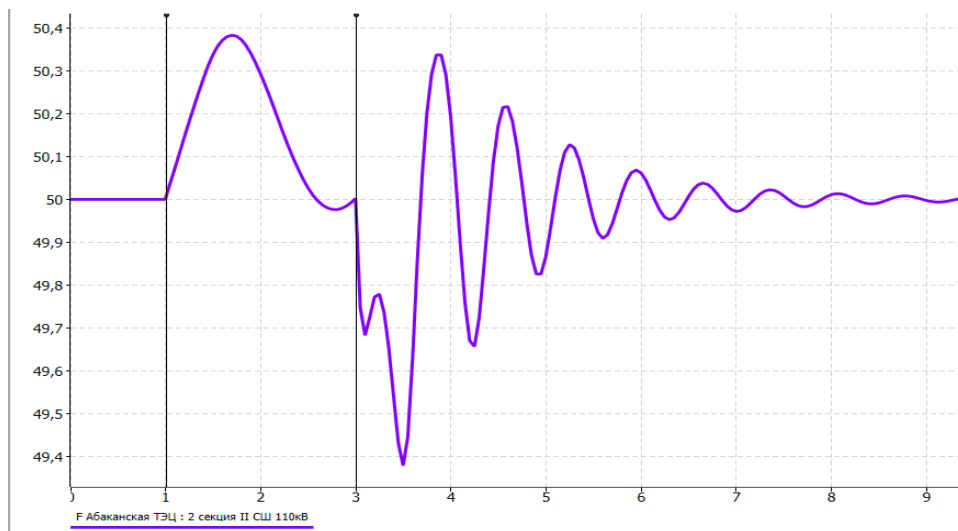


Рисунок 53 – График частоты узла

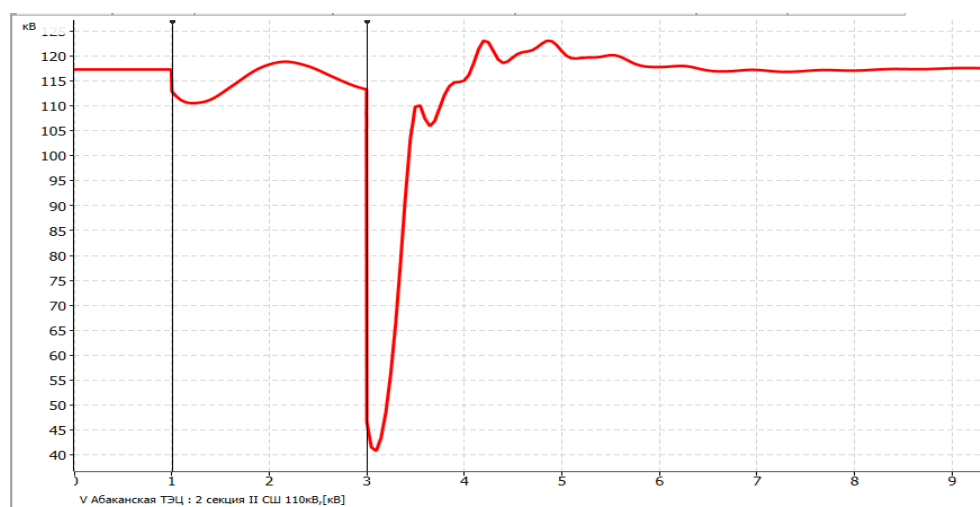


Рисунок 54 – График напряжения в узле на Абаканской ТЭЦ

В результате расчета без условий синхронизации напряжение в узле Абаканской ТЭЦ заметно изменяется в диапазоне от 115 кВ до 40 кВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы по теме «Моделирование работы АПВ линии Д–61 энергосистемы Республики Хакасия» были рассмотрены вопросы, касающиеся выбора параметров для работы устройств АПВ с контролем синхронизма.

Моделирование работы автоматического повторного включения с контролем синхронизма является важным компонентом анализа и защиты энергосистемы.

Программный пакет RUSab является широко используемым инструментом для анализа и защиты энергосистем. В программном комплексе RUSab была создана модель АПВ, которая позволяла синхронизировать две несинхронно работающие части энергосистем, сформированы параметры для работы устройства АПВ. В результате расчетов была проанализирована успешность срабатывания АПВ с КС при максимальном и минимальном углах между вращающимися векторами напряжений. Исходя из полученных результатов расчетов, можно сделать вывод, что применение устройств АПВ с КС на линиях с двухсторонним питанием позволяет уменьшить просадки напряжения и предотвратить превышение максимально допустимого тока статора генератора.

Функция контроля синхронизма является важным компонентом устройств автоматического повторного включения, поскольку она обеспечивает безопасное и надежное восстановление энергосистемы. Практическое применение данных устройств оказывает положительный эффект на сохранение динамической устойчивости энергосистемы и обеспечение ее безопасности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ЕЭС России – Единая Энергетическая Система России

СО – Системный Оператор

ОДУ – Оперативное диспетчерское управление

РДУ – Региональное диспетчерское управление

ГЭС – Гидроэлектростанция

ТЭЦ–Теплоэлектростанция

ПС – Подстанция

ВЛ – Воздушная линия

ЛЭП – Линия электропередачи

АПВ – Автоматическое повторное включение

ПТД – Программная траектория движения

ПК – Программный комплекс

ЭЭС – Электроэнергетическая система

АПВОС – Автоматическое повторное включение с ожиданием синхронизма

АПВУС – Автоматическое повторное включение с улавливанием синхронизма

АРВ – Автоматическое регулирование возбуждения

АЧУ – Абакано-Черногорский узел

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беркович М.А. Основы техники релейной защиты: учебное пособие / Беркович М.А, Молчанов В.В, Семенов В.А. — Москва: Энергоатомиздат, 1984. — 376 с.
2. Чернобровов Н.В. Релейная защита: учебное пособие для техникумов / Чернобровов Н.В. — Москва: «Энергия», 1974. — 680 с.
3. СТУ 7.5–07–2021. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности. – Взамен СТО 4.2–07–2014; дата введ. 20.12.2021. – Красноярск, 2021. – 61 с.
4. Выпускная квалификационная работа по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»: метод. Указания / сост. Н. В. Дулесова: Сиб. федер. ун–т, ХТИ – филиал СФУ. – Абакан: Ред. – изд. Сектор ХТИ – филиала СФУ, 2017. – 56 с.
5. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебное пособие для вузов по специальности «Электроснабжение» / Андреев В.А. — Москва: «Высшая школа», 1991. — 496 с.
6. Требования к содержанию, объему и структуре бакалаврской работы / Н. В. Дулесова [и др.]; – Абакан, 2015. – 56 с.
7. «Системный оператор Единой энергетической системы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.so-ups.ru/>
8. Просвиряков П.Д., Допустимость применение съем контроля синхронизма для синхронизации несинхронно работающих частей энергосистемы. [Текст] / П.Д. Просвиряков,– Иркутск: ИРННТУ, 2019. – 5с.
9. Сапцына Е.Ю. Алгоритм синхронизации энергорайона с сетью энергосистемы в цикле автоматизированного повторного включения ЛЭП. [Текст] / Сапцына Е.Ю., Абюеуров Р.Б. – Санкт-Петербург: «Издательство Фолиант», 2022. – 4с.

10. Статическая и динамическая устойчивость энергосистем. [Текст]: методические указания / В.Т. Пилипенко; Оренбургский гос. ун–т. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 32с.
11. Шабад В.К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / В.К.Шабад. – М.: Издательский дом «Академия», 2013. – 192с.
12. Жданов, П.С. Вопросы устойчивости электрических систем/Под ред. Л.А. Жукова.- М.: Энергия, 1979. – 456 с.
13. СО 153-34.20.576-2003: Методические указания по устойчивости энергосистем. – Москва: «Издательство НЦ ЭНАС», 2004. Режим доступа: <http://aquagroup.ru/normdocs/4713>
14. Автоматическое повторное включение [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ru.wikipedia.org>
15. Богорад А.М. Автоматическое повторное включение в энергосистемах: учебное пособие / Богорад А.М., Назаров Ю.Г. — Москва: Энергия , 1969. — 496 с.
16. Неуймин В.Г. Программный комплекс «RastrWin3» Руководство пользователя // Неуймин В.Г., Машалов Е.В. — Москва, 2012.– 243 с.
17. Углов А.В. Влияние факторов синхронизации на качество переходного процесса при включении синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой: научная статья / Углов А.В., Гусева Е.В., Углова М.Б. – СПб: Elibrary, 2017. – 5с. – ISBN 2413-5526. – Текст: электронный // Elibrary: электронно–библиотечная система. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32341560> (дата обращения: 13.04.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
18. Говорун М.Н. Электроэнергетические системы: учеб. пособие для диспетчерского персонала / М.Н. Говорун – М.: ЗАО «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ», 2021. – 684 с.

19. Автоматическое повторное включение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org>
20. Герасименко А. А. Передача и распределение электрической энергии: Учебное пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Ростов-н/Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. – 720 с. (Серия «Высшее образование»).
21. Глинский Е.В. Противоаварийная и режимная автоматика: конспект лекций Е.В. Глинский, Е.В. Булойчик, А.Г. Сапожникова — Минск: БНТУ, 2013. — 134 с.
22. Автоматическое повторное включение (АПВ): назначение, принцип работы, требования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.asutpp.ru/avtomaticheskoe-povtornoeklyuchenie>
23. Автоматическое повторное включение [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://ofaze.ru/teoriya/apv?ysclid=19kx90r199907531480>
24. Специальный преобразовательный трансформатор по схеме Скотта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://transformer.pr-t.ru/o-kompanii/novosti/285-spetsialnyj-preobrazovatelnyj-transformator-po-skHEME-skotta-ooo-proektelektrotehnika.html>
25. Статическая и динамическая устойчивость системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://infopedia.su>
26. Неуймин В.Г. Программный комплекс «RUSTab» Руководство пользователя // –2012– 243 с.

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

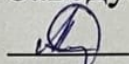
Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»

институт

«Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой



А.С. Торопов

подпись

инициалы, фамилия

« 29 »

06

2023 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

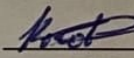
код – наименование направления

Моделирование работы АПВ линии Д–61 энергосистемы

тема

Республики Хакасия

Руководитель

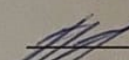
 20.06.23
подпись, дата

доц., к. т. н
должность, ученая степень

А. В. Коловский

инициалы, фамилия

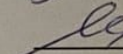
Выпускник

 25.06.2023
подпись, дата

А.А. Петрова

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

 24.06.2023
подпись, дата

И. А. Кычакова

инициалы, фамилия