

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования

**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Факультет Энергетический

Кафедра Энергетики

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Направленность (профиль) образовательной программы:

«Электроэнергетические системы и сети»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

И.о. зав. кафедрой

 Н.В. Савина

«22» 06 2020 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему: Разработка методов и способов синхронизации аппаратов для  
защиты от коммутационных перенапряжений

Исполнитель

студент группы 842ом-1

 02.07.2020 А.В. Шабанов  
подпись, дата

Руководитель

канд. техн. наук, профессор

 02.07.2020 О.В. Мясоедов  
подпись, дата

Руководитель магистерской

программы

 02.07.2020 Н.В. Савина  
подпись, дата

Нормоконтроль

ст. преподаватель

 02.07.2020 Н.С. Бодруг  
подпись, дата

Рецензент

 06.07.2020 Е.А. СУХАНОВА  
подпись, дата

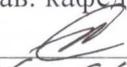
Благовещенск 2020

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет энергетический  
Кафедра энергетики

УТВЕРЖДАЮ

И.о. зав. кафедрой

  
« 26 04 2020 г. Н.В. Савина

**ЗАДАНИЕ**

К выпускной квалификационной работе студента Шабанова Артёма Викторовича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Разработка методов и способов синхронизации аппаратов для защиты от коммутационных перенапряжений  
(утверждено приказом от 01.06.2020 № 975 уч )

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 14.06.2020

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: Амурские электрические сети 220 кВ; электрические нагрузки и уровни токов короткого замыкания на шинах подстанций к 2025 году; проект развития Амурской энергосистемы на 2025 г.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): Введение, 1) Синхронизация коммутационных аппаратов для защиты от коммутационных перенапряжений, 2) Пример расчета параметров синхронизации, 3) Переключения в электроустановках, 4) Инструкция по охране труда при выполнении работ по оперативным переключениям в распределительных сетях, Заключение, Библиографический список.

5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.) \_\_\_\_\_

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов) \_\_\_\_\_

7. Дата выдачи задания 25.03.2020

Руководитель выпускной квалификационной работы: Мясоедов Ю.В. профессор к.т.н.  
(фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, ученое звание)

Задание принял к исполнению (дата):  25.03.2020  
(подпись студента)

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 82 с., 40 рисунков, 13 таблиц, 30 источников.

### КОММУТАЦИЯ, КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ, СИНХРОНИЗАЦИЯ, ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ, УСТРОЙСТВО, МЕТОДИКА

В магистерской диссертации были исследованы методы синхронизации коммутационных аппаратов для защиты от коммутационных перенапряжений.

Проведен анализ современных устройств для защиты от коммутационных перенапряжений. В ходе которого были выявлены некоторые недостатки данных устройств.

Рассмотрен метод синхронизации выключателя для уменьшения коммутационных перенапряжений. А также изучены современные устройства синхронной (управляемой) коммутации.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1. Синхронизация коммутационных аппаратов для защиты от коммутационных перенапряжений	8
1.1. Понятие коммутационных перенапряжений	8
1.2. Современные методы защиты от коммутационных перенапряжений	13
1.3. Понятие синхронизации коммутационных аппаратов	15
1.4. Анализ современных устройств синхронной коммутации	21
2. Пример расчета параметров синхронизации	27
2.1. Методика расчета параметров синхронизации	27
2.2. Расчет параметров синхронизации на примере ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23, ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23	30
3. Переключения в электроустановках	59
3.1. Общий порядок переключений на объектах электроэнергетики	59
3.2. Проведение операций с выключателями, разъединителями, отделителями и выключателями нагрузки	60
3.3. Операции с коммутационными аппаратами присоединений линий, трансформаторов (автотрансформаторов), синхронных компенсаторов и генераторов	65
3.4. Операции при выводе из работы и вводе в работу ЛЭП	65
4. Инструкция по охране труда при выполнении работ по оперативным переключениям в распределительных сетях	67
4.1. Общие требования охраны труда	67
4.2. Требования охраны труда перед началом работы	72
4.3. требования охраны труда во время работы	72
4.4. Требования охраны труда в аварийных ситуациях	76
4.5. Требования охраны труда по окончании работы	77
Заключение	78
Библиографический список	79

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

АСУ ТП - Автоматизированная система управления технологическими процессами;

ВВ – высоковольтный выключатель;

ВЛ – воздушная линия;

ЛЭП – линия электропередач;

ОПН – ограничитель перенапряжения;

ПС – подстанция;

ПТК - программно-технический комплекс (средство);

РУ – распределительное устройство;

РЗА – релейная защита и автоматика;

РЭ – руководство по эксплуатации;

ТН – трансформатор напряжения;

ТТ – трансформатор тока.

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с действующим стандартом на качество электрической энергии под перенапряжением понимается временное возрастание напряжения в конкретной точке электрической системы выше установленного порогового значения. Пороговым значением считается уровень напряжения, превышающий номинальный на 10 %. По источнику возникновения можно выделить два основных вида перенапряжений, которые имеют место в высоковольтных сетях: атмосферные (грозовые) и коммутационные.

Атмосферные перенапряжения, как известно, вызваны протеканием тока молний через проводящие части элементов системы, которые имеют электрически близкое расположение с анализируемой точкой. Появления атмосферных перенапряжений, зависящих главным образом от климатических условий определенного района, достаточно сложно спрогнозировать.

Коммутационные перенапряжения связаны с резким изменением режима работы электрической сети. Включение и отключение мощной нагрузки (индуктивного и емкостного характера): силовых трансформаторов, двигателей, конденсаторных батарей и др. может привести к значительному увеличению линейных напряжений в первоначальный момент после коммутации.[1]

Перенапряжения негативным образом влияют на оборудование системы электроснабжения, происходит ускоренное разрушение изоляции всех элементов сети (силовых трансформаторов, кабельных линий, муфт и др.), что может привести к перекрытию их изоляции с последующим возникновением короткого замыкания, отключением аварийного участка и потерей питания потребителей.

К основной мере защиты высоковольтного электрооборудования от перенапряжений относится установка разрядников и ограничителей перенапряжений (ОПН). Их принцип действия основан на срезе волны

перенапряжения за счет перекрытия искрового промежутка или резкого роста проводимости нелинейных элементов.

Для ограничения амплитуды бросков тока обычно используются постоянно включенные реакторы или предвключаемые резисторы. Применение указанных решений в большинстве случаев оказывается неэффективным или экономически не выгодным. Кроме того, использование предвключаемых резисторов требует дополнительных коммутационных аппаратов.

Указанные средства ограничения не решают проблему перенапряжений и бросков тока кардинально, так как коммутация все равно может произойти в наихудшей фазе напряжения. Принципиально иным способом снижения негативного воздействия переходных процессов является использование управляемой (или синхронной) коммутации.[2]

#### **Цель магистерского исследования:**

Повышение эффективности функционирования электрических сетей 220 кВ за счет применения устройств синхронной коммутации.

#### **Задачи:**

- Разработка методов и способов синхронизации коммутационных аппаратов для защиты от коммутационных перенапряжений;
- Исследовать влияние параметров электрической сети на характер переходных процессов, сопровождающих коммутацию реактивных нагрузок;
- Рассмотреть методику определения параметров синхронизации.

# 1 СИНХРОНИЗАЦИЯ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

## 1.1 Понятие коммутационных перенапряжений

Коммутационные перенапряжения возникают при внезапных изменениях в схеме или параметров сети (плановые и аварийные переключения линий, трансформаторов и т.д.), а также в результате замыканий на землю и между фазами. При включении элементов электрической сети (проводов линии или обмоток трансформаторов и реакторов) или отключении (разрыв электропередачи) возникают колебательные переходные процессы, которые могут привести к возникновению значительных перенапряжений. При возникновении короны потери оказывают демпфирующее действие на первые максимумы этих перенапряжений.

Отключение емкостных токов электрических цепей может сопровождаться повторными зажиганиями дуги в выключателе и многократными переходными процессами и перенапряжениями, а отключение малых индуктивных токов холостого хода трансформаторов - принудительным обрывом дуги в выключателе и колебательным переходом энергии магнитного поля трансформатора в энергию электрического поля его параллельных емкостей.

Коммутации в электрических сетях сопровождаются переходными процессами, которые обусловлены перераспределением энергии между индуктивными и емкостными элементами электрической сети. При этом могут возникать значительные уровни коммутационных перенапряжений и бросков тока, негативно сказывающихся на сроке службы электрооборудования.[3]

При анализе процессов проходящих в электрических цепях выделяют два основных режима работы: установившийся и переходный. Установившийся режим характеризуется постоянными или периодически повторяющимися мгновенными значениями токов и напряжений в цепи. В

реальных электрических сетях параметры режима непостоянны. Эти изменения, происходящие около некоторого среднего значения, могут быть настолько малыми, что режим допустимо считать установившимся.[2]

Под переходным процессом (или переходным режимом) понимают процесс, возникающий в электрической цепи при переходе от одного установившегося режима к другому, чем-либо отличающимся от предыдущего. Переходные процессы возникают при любых изменениях режима работы электрической цепи: включение или отключение (коммутация) элементов цепи, изменение нагрузки, возникновение аварийных режимов (короткое замыкание, обрыв провода и так далее). Переходные процессы в реальных электрических сетях являются быстропротекающими. Их продолжительность составляет доли секунды. Сравнительно редко длительность этих процессов достигает единицы секунды.

В ряде случаев возникновение переходных процессов нежелательно и опасно. Возникающие при этом перенапряжения и броски тока могут значительно превышать уровни напряжений и токов установившегося режима. Основной причиной возникновения переходных процессов являются элементы электрических цепей, способные запасать энергию: индуктивность и емкость.[3]

Количество энергии, накапливаемой в магнитном поле катушки выражается формулой:

$$W_L = \frac{L \cdot i_L^2}{2}, \quad (1)$$

где  $L$  – индуктивность;

$i_L$  – ток индуктивности.

Энергия, накапливаемая в электрическом поле конденсатора равна:

$$W_C = \frac{C \cdot u_C^2}{2}, \quad (2)$$

где  $C$  – емкость;

$u_C$  – напряжение.

Поскольку запас магнитной энергии  $W_L$  определяется током в катушке  $i_L$ , а электрической энергии  $W_C$  – напряжением на конденсаторе  $u_C$ , то при любых коммутациях соблюдаются два основных положения: ток катушки и напряжение на конденсаторе не могут изменяться скачком.

Таким образом, коммутации в электрических сетях приводят к возникновению переходного процесса, который сопровождается обменом и перераспределением энергии между электрическим и магнитными полями, причем наиболее интенсивно протекает обмен между реактивными сопротивлениями элементов сети, находящихся в непосредственной близости от места возмущения. Как правило, процесс имеет колебательный характер с частотой, превышающей промышленную, и может сопровождаться повышениями напряжения, опасными для изоляции оборудования, и бросками тока, увеличивающими электродинамические усилия на токоведущие элементы.[5]

Под перенапряжениями понимается всякое превышение мгновенным значением напряжения амплитуды наибольшего рабочего напряжения. Одной из важных характеристик перенапряжений на изоляции является их кратность – отношение максимального значения напряжения к амплитуде наибольшего рабочего напряжения на данной изоляционной конструкции:

$$K = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2} \cdot U_{\text{нр}}}, \quad (3)$$

где  $U_{\max}$  – максимальное значение напряжения;

$U_{\text{нр}}$  – наибольшее рабочее напряжение.

Обычно перенапряжения высокой кратности, возникающие при коммутации электрической сети, приводят к повреждению изоляции оборудования. Однако следует отметить, что перенапряжения небольшой кратности также оказывают негативное влияние на изоляцию путем многократного воздействия на нее. Это приводит к существенному снижению электрической прочности изоляции и повышает вероятность ее повреждения при последующих воздействиях перенапряжений.

Значительные амплитуды бросков тока, которые могут возникать при включении реактивных элементов электрической сети (трансформатор, конденсаторная батарея), вызывают повышенные электродинамические усилия на токоведущие элементы, что приводит к уменьшению ресурса оборудования, и требуют загрубения релейной защиты, что ведет к снижению коэффициента чувствительности срабатывания защиты.[4]

Классификация коммутационных перенапряжений представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация коммутационных перенапряжений

Коммутационные перенапряжения	Перенапряжения при включении линий
	Перенапряжения при отключении линий
	Перенапряжения при включении индуктивных элементов
	Перенапряжения при отключении индуктивных элементов
	Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю
	Перенапряжения при отключениях конденсаторных батарей

*Перенапряжения при отключении линий* возникают вследствие переходного процесса от предшествующего нормального или аварийного режима к квазистационарному режиму односторонне включенной линии, а также при отключении последней выключателем, допускающим повторные

зажигания дуги. Каждое зажигание сопровождается колебательным процессом перезаряда емкости линии.

Перенапряжения наблюдаются и на поврежденной фазе при отключении короткого замыкания в сети. Опасные, но сравнительно редкие перенапряжения возможны при разрывах передачи, когда линия отключается во время асинхронного хода энергосистем. Наличие устройств продольной компенсации приводит к дополнительному повышению этих перенапряжений.

Перенапряжения при отключении конденсаторных батарей появляются вследствие повторных зажиганий дуги в выключателе. Они аналогичны перенапряжениям, возникающим при отключении линий.

Перенапряжения при включении индуктивных элементов сети (электрических машин, ненагруженных трансформаторов, реакторов) возникают вследствие колебательного заряда емкостей обмоток и других элементов (например, кабелей). Разброс моментов включения разных фаз и наличие обмотки, включенной треугольником, способствуют увеличению перенапряжений вследствие ненулевых начальных условий при включении второй и третьей фаз.

Перенапряжения при отключении индуктивных элементов сети наблюдаются при быстром принудительном уменьшении (“обрыве”) тока дуги в выключателе. Энергия магнитного поля индуктивности переходит в энергию электрического поля емкости отключенной обмотки. Возникающие при этом перенапряжения зависят от мгновенного значения и скорости изменения тока в выключателе в момент его обрыва, параметров схемы и характеристики намагничивания индуктивного элемента.

Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю имеют место вследствие неустойчивого горения (погасания и повторного зажигания) дуги однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью. Наибольшие перенапряжения отмечаются на здоровых фазах. Перенапряжения зависят от моментов повторного зажигания и погасания дуги.[5]

## **1.2 Современные методы защиты от коммутационных перенапряжений**

В настоящее время основными средствами для защиты от коммутационных перенапряжений являются: нелинейный ограничитель перенапряжений (ОПН), выключатели с предвключаемыми резисторами или постоянно включенные реакторы.

Отсутствие искровых промежутков и высокая нелинейность варисторов ОПН приводит к тому, что ОПН ограничивает все виды перенапряжений от которых разрядник отстроен высоким пробивным напряжением. Поэтому ОПН должен надежно работать как при рабочем напряжении, так и при различного вида повышений напряжений. Отсюда следует, что важнейшими характеристиками ОПН, которые обеспечивают его надежную работу в эксплуатации являются следующие:

- наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, которое не должно быть ниже наибольшего рабочего напряжения сети,
- характеристика «напряжение-время», т.е. характеристика, нормирующая допустимые повышения напряжения и их длительность,
- энергоемкость, т.е. нормируемая энергия, которую ОПН способен рассеять в любых эксплуатационных режимах без нарушения его термической устойчивости.

Защитный уровень ОПН при коммутационном перенапряжении нормируется при токе 30/60 мкс с амплитудой 500 А для ОПН класса 110-220 кВ и 1000 А для ОПН классов 330-500 кВ. Защитный уровень при грозовых и коммутационных перенапряжениях должен быть на 15-20% ниже испытательных напряжений защищаемого оборудования.

В настоящее время на энергетическом рынке России имеется большой выбор ограничителей перенапряжений как отечественного, так и зарубежного производства. На один класс напряжения имеется несколько вариантов типов ограничителей с различными значениями наибольшего рабочего напряжения, защитными характеристиками, пропускной способностью и т.п. Это позволяет

подобрать наиболее оптимальные параметры ограничителя в зависимости от схемы сети и ее параметров.[6]

Общий вид ОПН показан на рисунке 1.



Рисунок 1 – ОПН 220

*Выключатель предвключаемыми резисторами* применяется для снижения скачка амплитуды напряжения при коммутации. Предвключаемые резисторы используются исключительно при включении и состоят из нескольких блоков сопротивлений, включенных параллельно дугогасительной камере. Блоки резисторов замыкают цепь за 8-12 мс до замыкания дугогасительных контактов. В результате значительная часть энергии переходного процесса рассеивается на высокоомном предвключаемом резисторе, не вызывая возникновения значительных апериодических токов. Один из примеров выключателя с предвключаемыми резисторами показан на рисунке 2

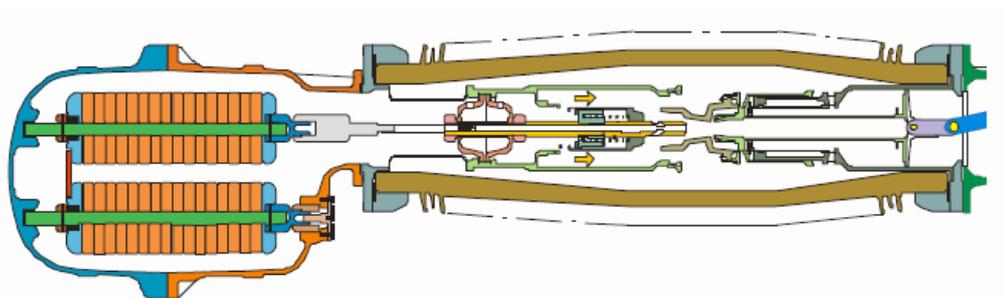


Рисунок 2 - Выключатель с предвключаемыми резисторами

### **1.3 Понятие синхронизации коммутационных аппаратов**

Коммутация реактивных элементов электрической сети в произвольные моменты времени может приводить к появлению высоких переходных напряжений или токов. Переходные процессы сопровождаются электрическими и механическими нагрузками на электрооборудование и способны вызвать его постепенное или мгновенное повреждение. Снижение негативных воздействий переходных процессов связано с применением специальных средств ограничения. Стандарт организации «Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 1150 кВ. Указания по выбору» рекомендует в случаях возникновения опасных уровней коммутационных перенапряжений использовать ОПН, RC-цепи и устройства управляемой коммутации.[7]

Для ограничения амплитуды переходных токов при коммутации обычно используют постоянно включенные реакторы или предвключаемые резисторы. Однако применение указанных решений в большинстве случаев оказывается неэффективным или экономически не выгодным. Кроме того использование предвключаемых резисторов требует дополнительных коммутационных аппаратов, что снижает надежность системы электроснабжения в целом.

Указанные средства ограничения не решают проблему перенапряжений и бросков тока кардинально, так как коммутация все равно может произойти в наихудшей фазе напряжения. Принципиально иным способом снижения уровня коммутационных перенапряжений и амплитуды бросков тока является использование управляемой (или синхронной) коммутации. Суть такой коммутации заключается во включении и отключении электрической сети в строго определенные моменты времени.[8]

Управляемая (или синхронная) коммутация – это коммутация электрической сети в определенный момент времени, производимая с учетом состояния сети на момент операции, позволяющая произвести включение или отключение в наиболее благоприятных для оборудования условиях.

Коммутационный аппарат, реализующий принципы управляемой коммутации (далее – синхронный выключатель), представляет собой аппарат, контакты которого размыкаются в заданную фазу тока и (или) замыкаются в заданную фазу напряжения.

Использование управляемой коммутации реактивных элементов в электрических сетях предотвращает появление бросков тока и перенапряжений, увеличивает коммутационный ресурс выключателей. В нормальных режимах управляемое включение выключателя на реактивную нагрузку позволяет существенно уменьшить броски тока, а при управляемом отключении снизить вероятность повторных пробоев и, как следствие, возникновение перенапряжений. Также управляемая коммутация токов нормального режима позволяют улучшить характеристики выключателя: повысить его ресурс (что особенно важно при работе выключателя в режиме частых коммутаций), увеличить номинальное напряжение за счет сокращения коммутационных перенапряжений.[9]

В аварийных режимах управляемое отключение токов короткого замыкания дает возможность сократить время горения дуги до минимальных значений. При отключении минимальное время горения дуги определяется из условия, что за это время контакты должны разойтись на расстояние, достаточное для успешного гашения дуги при первом переходе тока через ноль. Поэтому управляемое отключение токов короткого замыкания является средством, обеспечивающим уменьшение электрической эрозии частей дугогасительного устройства и повышение ресурса выключателя.[10]

#### Управляемое отключение

Управляемое отключение осуществляется путем размыкания контактов выключателя в строго определенный момент времени с опережением момента перехода отключаемого тока через ноль. Время горения дуги в этом случае значительно сокращается, так как количество энергии, выделяющейся в дуге, уменьшается. Управление моментом размыкания контактов предотвращает

отказы работы выключателей и снижает воздействие в целом на систему электроснабжения.

В синхронном выключателе необходимо очень точно подать сигнал на размыкание и создать очень большую скорость движения контактов, чтобы к моменту погасания электрической дуги расстояние между контактами было достаточным для обеспечения необходимой электрической прочности промежутка и исключения возможности повторного зажигания дуги. Точность подачи импульса на отключение определяется синхронизирующим устройством, а большая скорость движения контактов создается специальным приводом.[11]

На рисунке 3 представлен принцип управляемого отключения. На синхронизирующее устройство в случайный момент времени  $t_{command}$  подается команда на отключение выключателя. Эта команда задерживается контроллером на некоторый промежуток времени  $T_{total}$ . Интервал времени  $T_{total}$ , в соответствии с (4) представляет собой сумму времени реакции контроллера  $T_{resp}$  и преднамеренной выдержки синхронизации  $T_{sync}$ . Интервал времени  $T_{sync}$  рассчитывается по выражению (5) относительно определенного момента перехода тока через ноль и зависит от собственного времени отключения выключателя  $T_{opening}$  и времени расхождения контактов на определенное расстояние, достаточное для обеспечения необходимой электрической прочности промежутка  $t_{separate}$ .

$$T_{total} = T_{resp} + T_{sync}, \quad (4)$$

где  $T_{resp}$  – время реакции контроллера;

$T_{sync}$  – выдержка синхронизации.

$$T_{sync} = T_{zero} - T_{arcing} - T_{opening}, \quad (5)$$

где  $T_{zero}$  – интервал положительного значения времени синхронизации;

$T_{arcing}$  – время горения дуги;

$T_{opening}$  – время отключения выключателя.

Точное управление временем  $t_{separate}$ , которое соответствует моменту времени гашения электрической дуги, фактически определяет время горения дуги  $T_{arcing}$ . Собственное время отключения  $T_{opening}$  является интервалом времени между подачей питания на катушку привода выключателя и началом расхождения контактов выключателя.

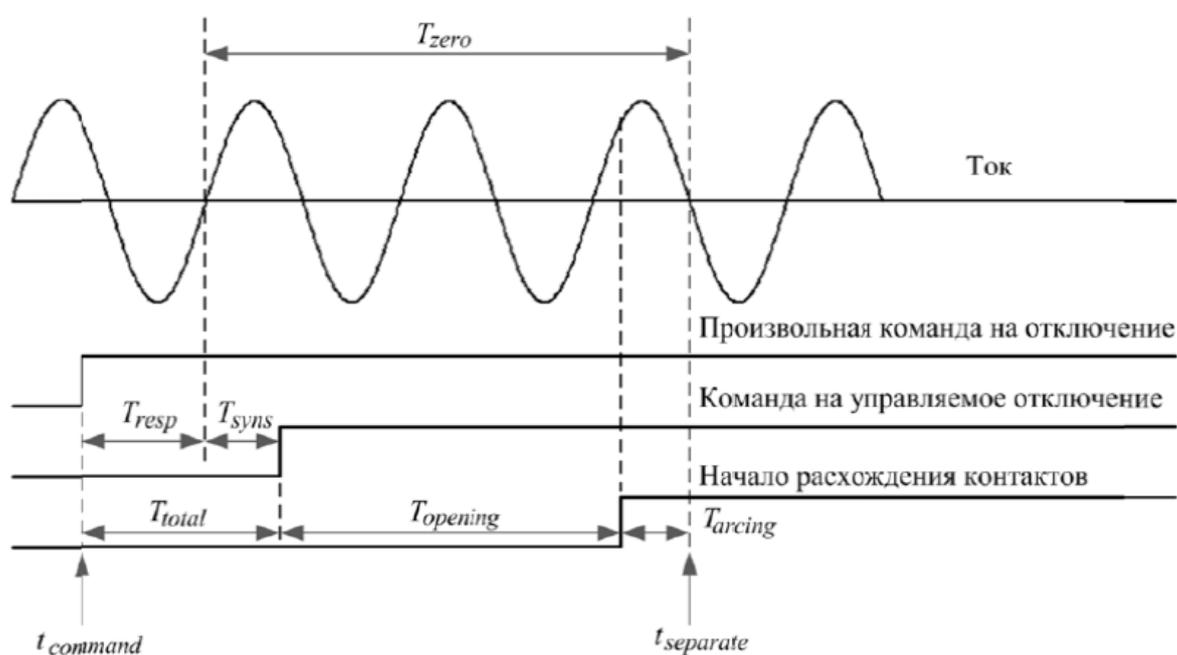


Рисунок 3 – Принцип управляемого отключения

#### Управляемое включение

Управляемое включение представляет собой процесс замыкания контактов выключателя, начинающийся в строго определенный момент времени с опережением момента перехода напряжения источника через ноль. В рабочих режимах включение реактивной нагрузки сопровождается бросками тока. При этом, чем дальше момент смыкания контактов от нулевого значения напряжения на разрыве, тем выше броски тока.[12]

Для осуществления операции управляемого включения синхронизирующее устройство отслеживает напряжение источника питания.

Случайным образом подается команда на включение выключателя в момент времени  $T_{command}$ . На рисунке 4 представлен принцип управляемого включения емкостной нагрузки. Контроллер задерживает команду на включение на некоторое время  $T_{total}$ . Вводит задержку времени синхронизации  $T_{sync}$  относительно соответствующего перехода напряжения источника через ноль, которая рассчитывается по выражению (5) с учетом времени включения выключателя  $T_{closing}$  и времени пробоев  $T_{prestriking}$ . В момент времени  $t_{make}$  и следующим за ним временем перехода напряжения источника через ноль.

Время отключения  $T_{closing}$  есть интервал времени с момента подачи питания на катушку включения выключателя до момента механического касания контактов. Время пробоев при включении  $T_{prestriking}$  является интервал времени между первым пробоем и механическим касанием контактов. Время  $T_{making}$  является промежутком времени от подачи питания на катушку включения до начала пробоев  $t_{make}$ .

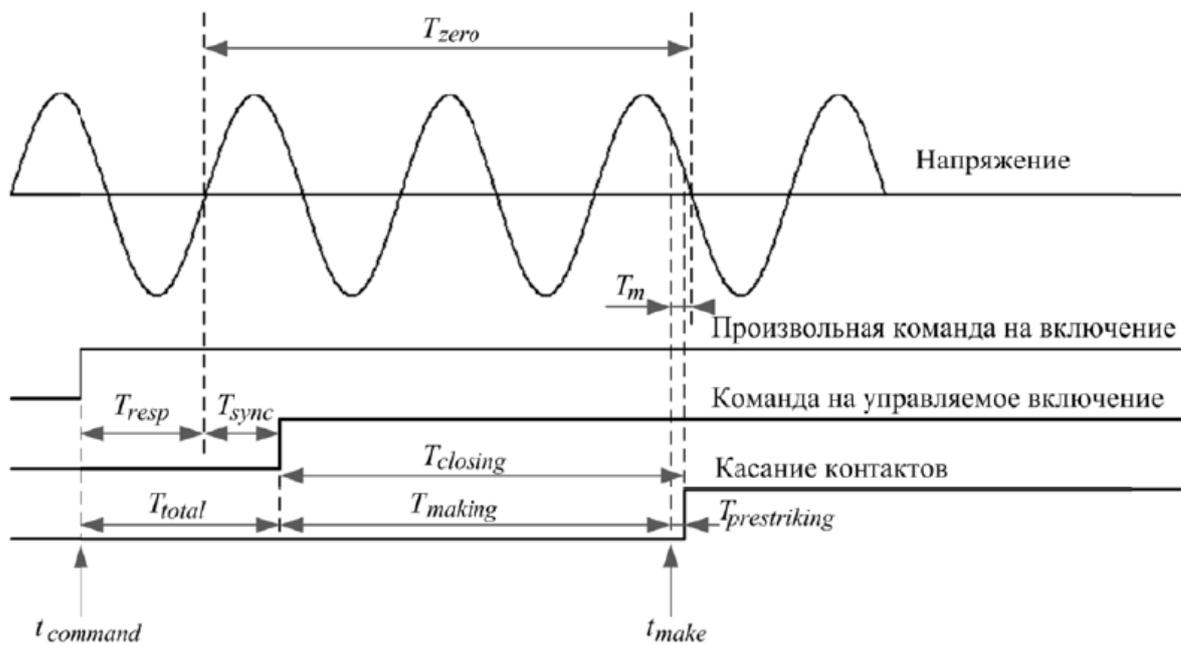


Рисунок 4 – Принцип управляемого включения

#### Управляемое отключение токов КЗ

В отличие от коммутации токов нормального режима коммутация аварийных токов должна быть осуществлена как можно быстрее, так как длительное протекание тока короткого замыкания может вызвать

повреждение оборудования. Поэтому в этом режиме нет возможности выжидания наилучшего, с точки зрения уменьшения перенапряжений, момента времени коммутации. Однако в аварийном режиме возможно минимизировать воздействие сверхтока на выключатель за счет снижения времени горения дуги в дугогасительной камере.[13,14]

При отключении короткого замыкания минимальное время горения дуги представляет собой наименьшее время, за которое контакты выключателя расходятся на расстояние достаточное для успешного гашения дуги при первом переходе тока через ноль. Максимальное время горения дуги возникает, когда выключатель не может произвести успешное отключение при первом прохождении аварийного тока через ноль. Это происходит в том случае, когда разделение контактов выключателя начинается до первого перехода тока через ноль за время, меньшее минимального времени горения дуги, что в результате приводит к существенному увеличению продолжительности горения дуги.[15]

Безусловно, при неуправляемом отключении аварийного тока в большинстве случаев длительность горения дуги превосходит минимальную, а в некоторых случаях достигает максимальной величины. Избыток времени горения дуги добавляет электрическую эрозию частям дугогасительного устройства и снижает ресурс выключателя. Минимизация избытка времени горения дуги является основной целью управляемой коммутации в аварийном режиме.

#### Особенности управляемой коммутации в электрических сетях

В трех фазных сетях переменного напряжения напряжение каждой фазы пересекает ноль в разные моменты времени, поэтому для осуществления переключения электрической сети с минимальными переходными процессами необходимо производить коммутацию полюсов разновремено.[16]

## **1.4 Анализ современных устройств синхронной коммутации**

Управляемая коммутация используется для снижения вредного воздействия переходных процессов посредством управляемых по времени операций коммутации шунтирующих конденсаторных батарей, шунтирующих реакторов и силовых трансформаторов. Этот принцип также применим при повторном включении линий электропередач сверхвысокого напряжения, и заменяет традиционное решение с предвключаемыми резисторами.

Сравнительный анализ существующих в настоящее время устройств синхронной коммутации позволил определить современные тенденции их технического и функционального развития, а также сформировать ряд актуальных нерешенных вопросов.[17]

### **1. Универсальность устройства**

Использование устройства для всех возможных вариантов коммутируемых нагрузок вызывает необходимость приема и обработки сигналов различных типов, в том числе сигналов, применяемых для адаптивных алгоритмов прогнозирования времени коммутации выключателя. Разработка универсального устройства, содержащего в своем составе каналы приема различных сигналов в требуемом количестве, затруднительна и экономически нецелесообразна. Кроме того, применение универсального устройства для ВВ разных производителей осложняется различиями в характеристиках цепей управления высоковольтных выключателей.

Решением данной задачи может стать возможность модифицирования конструкции устройства под конкретные требования: компоновка устройства на базе ПЛК с набором модулей ввода-вывода, соответствующим требуемому набору сигналов, и конфигурируемым для различных задач программным обеспечением. Положительными эффектами такого решения станут уменьшение габаритов и стоимости устройства и возможность стандартизации конструктива для облегчения установки устройства в шкафах управления выключателями любых производителей.[18]

## 2. Повышение надежности работы цепей управления выключателем

В целях повышения надежности необходимо исключение влияния сбоев в работе устройства («зависаний») на выполнение коммутации ВВ. Авторами предлагается применять специальные схемотехнические решения, связанные с самодиагностикой устройства. По данным самодиагностики устройство должно переходить в режим работы, позволяющий команде управления выключателем быть исполненной при неработоспособности устройства «в обход» его выходных каналов. Дополнительно предлагается использовать контроль целостности соленоидов выключателя, который может выполняться выходными каналами устройства синхронной коммутации.[19]

## 3. Интеграция устройства в систему верхнего уровня энергообъекта, поддержка стандарта IEC 61850

Для устройств автоматизации, устанавливаемых на подстанциях, приоритетной задачей является поддержка современных протоколов обмена данными и интеграция в системы верхнего уровня (например, АСУ ТП) энергообъекта по существующим интерфейсам. Интеграция устройства синхронной коммутации предполагает наличие интерфейсов Ethernet или ВОЛС с поддержкой протоколов ModBus TCP, IEC 60870-5-104. Кроме того, развитие «умных сетей» требует поддержки устройствами автоматизации современных стандартов, в том числе стандарта IEC 61850. В части устройств синхронной коммутации требуется поддержка стандартов IEC 61850-8-1 и IEC 61850-9-2LE.

## 4. Синхронизация с системой астрономического времени

Предлагается дополнить устройство системой точного астрономического времени. Это позволит привязать метки времени значений измеренных сигналов, рассчитанных значений, событий аварийной и предупредительной сигнализации в устройстве синхронной коммутации к единому времени подстанции. Синхронизация может быть выполнена посредством протокола SNTP или с использованием подключаемой антенны GPS/Глонасс.

## 5. Развитие адаптивных алгоритмов прогнозирования времени срабатывания выключателя

Анализ наработанных данных по коммутациям и информации по заводским испытаниям выключателей позволяет вводить дополнительные зависимости времени срабатывания выключателя от таких факторов, как напряжения питания цепей соленоидов выключателя, температура и давление элегаза, время безоперационного простоя выключателя и др. В связи с вышесказанным становятся возможным разработка и введение в устройство дополнительных адаптивных алгоритмов, улучшающих результаты работы устройств синхронной коммутации.[20]

## 6. Расширение диагностики выключателя

Одним из перспективных направлений развития функциональных возможностей устройства может стать расширение диагностики высоковольтного выключателя за счет совмещения функций синхронной коммутации и полноценного мониторинга высоковольтного выключателя.

Подробная диагностика данных, требующихся для выполнения алгоритма синхронной коммутации, может быть введена за счет расширения программного обеспечения. Дополнительно может быть применен контроль состояния выключателя, параметров его соленоидов, привода, изоляции, расчет выработанного и остаточного ресурса, а также диагностика подключаемых устройств и датчиков.

## 7. Анализ эффективности работы устройства

Для оценки эффективности применения устройства синхронной коммутации в его программное обеспечение могут быть введены алгоритмы сравнительного анализа процесса коммутации при работе устройства и при его отсутствии. Оценка может строиться на контроле остаточного ресурса выключателя, косвенной оценке ресурса первичного оборудования.[21]

Существующие устройства синхронной коммутации:

### 1. АВМ-СК

Устройство синхронной (управляемой) коммутации АВМ-СК предназначено для обеспечения коммутаций высоковольтного выключателя в наиболее оптимальные с точки зрения первичного оборудования моменты времени посредством формирования временных задержек на команды включения и отключения ВВ, поступающие в режиме оперативного управления или в цикле АПВ (только для операции включения). Устройство предназначено для применения совместно с высоковольтными выключателями классов 110-750 кВ, выполненных с функционально независимыми полюсами.[22]

Устройство АВМ-СК представляет собой ПЛК и имеет набор модулей ввода-вывода, необходимый для выполнения следующих функций.

- Прием и обработка сигналов от датчиков и систем, установленных на коммутационном оборудовании;
- Регистрация осциллограмм токов и напряжений при коммутации (с записью предшествующего режима) с дискретизацией 0,1 мс;
- Реализация режимов оперативного управления коммутационными аппаратами с управлением моментом коммутации (включение и отключение выключателя с пофазным приводом);
- Выдача управляющих команд в приводы коммутационных аппаратов с точностью до 0,1 мс;
- Аппаратное и программное исключение возможности «зависания» устройства, ложных включений и отключений выключателя;
- Прогнозирование фактических значений времени включения и отключения выключателя (адаптивный алгоритм);
- Расчет выработанного и остаточного ресурса выключателя;
- Контроль целостности цепей соленоидов выключателя;
- Формирование предупредительной и аварийной сигнализации при выходе контролируемых параметров за допустимые пределы и общей сигнализации по устройству;

- Архивирование информации по всем операциям (не менее 100 операций), в том числе, архивирование осциллограмм (длительность записи 300 мс);
- Синхронизация с системой единого астрономического времени от внешней антенны GPS/Глонасс или по протоколу SNTP;
- Интеграция в АСУ ТП объекта по интерфейсам ВОЛС, Ethernet или RS-485 по протоколам ModBus TCP, IEC 60870-5-104 или ModBus RTU, а также IEC 61850(MMS) (опционально);
- Визуальная индикация текущего состояния устройства, выключателя, предупредительной и аварийной сигнализации на лицевой панели устройства;
- Конфигурирование устройства с лицевой панели или с использованием сервисного ПО через подключаемый персональный компьютер;
- Самодиагностика внутренних узлов устройства, диагностика подключаемых устройств и датчиков.

## 2. ABB Switchsync PWC600

Switchsync PWC600 - последнее поколение устройств для синхронной коммутации АББ, основанное на хорошо отработанной технологии аппаратов защиты и контроля Relion® platform. Предлагая полную функциональность и надежность как и в предыдущих устройствах Switchsync, это поколение дополнительно включает в себя интерфейсы Ethernet, которые поддерживают современные протоколы связи, такие как IEC 61850, электронные преобразователи напряжения и тока, а также расширенные функциональные возможности для пользователя.



Рисунок 5 - Switchsync PWC600

Switchsync PWC600 предназначен для выключателей с пополюсным управлением, контролируя каждый полюс, чтобы закрыть и/или открыть в точке на волну, которая является оптимальной для коммутируемой нагрузки, автоматического выключателя, или качество электроэнергии. Она компенсирует колебания температуры, контроль напряжения, время простоя, накопитель энергии, и для дрефта в выключатель механические свойства. Локальный человеко-машинный интерфейс (HMI) обеспечивает прямой доступ к настройкам и эксплуатационные данные, а веб-интерфейс позволяет онлайн просмотр и скачивание операции. Она также включает библиотеку АББ каталог, содержащий все данные необходимые для оптимального контролируемого переключения производительности и мониторинга состояния.

Колонковые элегазовые выключатели производства АББ особенно хорошо подходят для управляемой коммутации из-за стабильного времени механического срабатывания и диэлектрических свойств.[23]

## 2 ПРИМЕР РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СИНХРОНИЗАЦИИ

### 2.1 Методика расчета параметров синхронизации

Условия успешной синхронизации.

При включении разделившихся частей энергосистемы на параллельную работу необходимо осуществлять контроль следующих параметров:

- 1) разность углов векторов напряжения на полюсах коммутационного аппарата на включаемой ВЛ – угол включения ( $\delta_{вкл}$ );
- 2) разность частот между разделившимися частями энергосистемы ( $\Delta f$ ).

Параметры  $\delta_{вкл}$  и  $\Delta f$  должны быть такими, чтобы обеспечивались следующие условия:

- 1) не должна допускаться работа устройств противоаварийной автоматики (ПА) и технологических автоматов электростанций, действующих на отключение генерирующего оборудования (при наличии параметров настройки);
- 2) должна быть обеспечена устойчивая работа энергосистемы после включения ВЛ (отсутствие возникновения асинхронного режима);
- 3) значения токов в генерирующем оборудовании электростанций и на ЛЭП должны быть не выше допустимых;
- 4) должен обеспечиваться коэффициент запаса по активной мощности 20% по включаемой ЛЭП.

#### Определение допустимых параметров синхронизации

Целью расчетов является определение предельных режимов, при которых допустимо включать несинхронно работающие части энергосистемы на параллельную работу.

Для определения допустимых  $\delta_{вкл}$  и  $\Delta f$  необходимо моделировать включение ЛЭП при разных  $\delta_{вкл}$  и  $\Delta f$  с последующей оценкой допустимости параметров режима.[24]

#### Выполнение расчетов

Для оценки величины  $\Delta f$ , которая установится после разделения системы, необходимо выполнить расчет электромеханического переходного процесса после отключения единственной оставшейся в работе ЛЭП на связях двух частей энергосистемы. По результатам расчета необходимо построить зависимость  $\Delta f(t)$ . Если установившееся значение  $\Delta f$  не достигло требуемого, скорректировать переток по ЛЭП и заново выполнить расчет. После достижения установившегося значения  $\Delta f$ , требуемого для выполнения первого расчета ( $\Delta f_1$ ), необходимо построить зависимость  $\delta_{вкл}(t)$  по результатам расчета электромеханического переходного процесса. По полученному графику  $\delta_{вкл}(t)$  определить время включения выключателя ( $t_{вкл}$ ), которое соответствует каждому расчетному  $\delta_{вкл}$ . Также необходимо знать параметры настройки устройства АПВ, установленного на ЛЭП со стороны ПС, на которой происходит синхронизация. Максимально и минимально возможные уставки по углу включения будут являться предельными при проведении расчетов.

Необходимо скорректировать время включения ЛЭП на время  $t_{вкл}$ , которое будет соответствовать расчетному  $\delta_{вкл1}$ . По результатам расчета необходимо выполнить оценку допустимости параметров режима и условий успешной синхронизации. В случае нахождения параметров режима в области допустимых значений, увеличить угол включения и повторить расчет для определения предельно допустимого угла включения для  $\Delta f_1$ .

Таким образом, необходимо выполнить ряд расчетов с величиной  $\Delta f_2$  и  $\Delta f_N$  для определения предельных параметров синхронизации.

#### Анализ полученных результатов

По результатам расчета каждого режима при  $\delta_{вкл}$  и  $\Delta f$  необходимо выполнить оценку допустимости параметров режима и условий успешной синхронизации.

Оценить допустимость кратности тока статора генераторов электростанций ( $I_{cm}$ ), ближайших к ЛЭП, по которой происходит синхронизация. Необходимо построить зависимость тока по блочным трансформаторам со стороны генераторного напряжения от времени, что равносильно зависимости  $I_{cm}(t)$ . Допустимая кратность перегрузки для турбогенераторов и гидрогенераторов с успокоительными контурами определяется следующим соотношением:

$$\frac{I_{max}}{I_{ном}} \leq \frac{0,625}{x''_{dг}}, \text{ где}$$

$x''_{dг}$  – сверхпереходное реактивное сопротивление цепи статора по продольной оси (см. Справочник генерирующего оборудования);

$I_{ном}$  – номинальный ток статора;

$I_{max}$  – ток статора при несинхронном включении.

Проверить отсутствие нарушения динамической устойчивости генерирующего оборудования электростанций. Для оценки построить зависимость разности углов роторов электростанций в синхронизируемых частях от времени (или зависимости углов напряжения в узлах).

Оценить установившееся значение активной мощности по ЛЭП после ее включения. Оно должно быть таким, чтобы обеспечивался коэффициент запаса по активной мощности 20% по включаемой ЛЭП;

Оценить установившееся значение тока по ЛЭП после ее включения. Ток не должен превышать длительно допустимый.

Не должны создаваться условия работы ПА в сети, прилегающей к ЛЭП, по которой происходит синхронизация, например, АРПМ и другой ПА, уставки срабатывания по времени которой может быть меньше времени колебаний параметров электроэнергетического режима.

Не должны создаваться условия работы технологических автоматик электростанций (при наличии параметров настройки).

Наибольшие полученные значения  $\delta_{вкл}$  и  $\Delta f$ , которые обеспечат выполнение всех условий синхронизации, необходимо выбирать в качестве допустимых параметров синхронизации.

## **2.2 Расчет параметров синхронизации на примере ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23, ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23**

На ПС 220 кВ Ключевая на присоединении ВЛ 220 кВ Ключевая – Сиваки установлен выключатель АBB HLP 245 В1 (рисунок 6).

Элегазовый высоковольтный колонковый выключатель с дугогасительным устройством компрессионного типа с использованием механической энергии привода как для перемещения контактов, так и для создания потока элегаза для охлаждения и прерывания дуги. Длина пути утечки 25 мм/кВ, (большая длина - по запросу заказчика) Температурный диапазон -30 до +40 °С (возможна эксплуатация при температурах до -60 °С или до +70 °С, по требованию). Расчетная высота установки 1000 м над уровнем моря (другая высота установки - по запросу) Отсутствие конденсаторов выравнивания напряжения делает их более надежными и менее требовательными к техобслуживанию. Для эксплуатации в экстремальных внешних условиях выключатели серии HPL могут поставляться с защитными лакокрасочными покрытиями. Механическая стойкость выключателя обеспечивает достаточный запас прочности при нормальных ветровых нагрузках, статических и динамических нагрузках со стороны проводов.[24]

Элегазовый выключатель HPL рассчитан на срок эксплуатации более 30 лет или 10 000 коммутаций без нагрузки, число механических операций под нагрузкой до срока проведения обслуживания определяется величиной отключаемого тока. Выключатель HPL 245В1 управляется механизмом управления с моторно-пружинным приводом типа BLG, установленным в компактном брызгозащищенном и коррозионностойком корпусе,

прикрепленном к опорной конструкции. Все выключатели серии HPL оборудованы одним указателем плотности элегаза на каждый полюс. Система герметизации элегаза (SF<sub>6</sub>) содержит двойные уплотнительные кольца круглого сечения из нитрильного каучука во всех неподвижных уплотнениях и двойные X-образные (по форме сечения) кольца на всех динамических уплотнениях. Основные характеристики представлены в таблице 2.

Надежный выключатель обеспечивающий уверенную эксплуатацию в самых критических условиях. Данный выключатель обладает самыми высокими в отрасли номинальными значениями, идеально подходит для передачи электроэнергии при сверхвысоком напряжении, а также незаменим в ситуациях, в которых требуется высокая отключающая способность. Выключатель HPL В способен отключать токи короткого замыкания до 63 кА без выравнивающих конденсаторов, и справляться с током в 80 кА при наличии всего лишь двух разрывах на полюс.

Механическая прочность конструкции HPL В позволяет выдерживать высокие амплитуды сейсмических воздействий, поэтому он идеально подходит для установки в сейсмически активных районах. Он так же является хорошим решением для тяжелых условий эксплуатации, таких как экстремальные температуры и большая высота установки относительно уровня моря.[25]



Рисунок 6 - ABB HPL 245 V1

Таблица 2 - Характеристики АBB HLP 245 В1

Номинальное напряжение, кВ	220
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	252
Номинальный ток, А	4000
Номинальный ток отключения, кА	63
Ток термической стойкости, кА (с)	63 (3)
Собственное время отключения, мс	14
Полное время отключения, мс	40
Собственное время включения, мс	60

На ПС 220 кВ НПС-23 на присоединении ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23 установлен выключатель ВГТ-УЭТМ-1А1-220 (рисунок ).

Выключатели серии ВГТ относятся к электрическим коммутационным аппаратам высокого напряжения, в которых гасящей и изолирующей средой является: для исполнения У1 – элегаз (SF<sub>6</sub>), а для исполнения ХЛ1\* – смесь газов (элегаз SF<sub>6</sub> + тетрафторметан CF<sub>4</sub>). Элегазовый выключатель ВГТ-1А1-220 колонковый относится к выключателям нового поколения. Состоит из трех функционально связанных между собой полюсов (колонн), установленных на общей раме и опорных металлоконструкциях. Все три полюса выключателя управляются одним пружинным приводом типа ППВ. Количество разрывов электрической цепи – один разрыв на полюс.

Каждый полюс выключателя имеет электроконтактный сигнализатор давления показывающего типа, который снабжен устройством температурной компенсации, приводящим показания давления к температуре 20°С с тремя парами контактов, разомкнутых при нормальном (рабочем) давлении газа.

Выключатели изготавливаются в климатических исполнениях У1\* и ХЛ1\*. Естественный уровень утечек элегаза – не более 0,5% в год.

Предназначены для эксплуатации в открытых распределительных устройствах в сетях переменного тока частотой 50 Гц с номинальным напряжением 220 кВ в районах с умеренным и холодным климатом ( до минус 55°С) при следующих условиях:

- окружающая среда – невзрывоопасная, не содержащая агрессивных газов и паров в концентрациях, разрушающих металлы и изоляцию. Содержание коррозионно-активных агентов по ГОСТ 15150 (для атмосферы типа II);

- верхнее рабочее значение температуры окружающего выключатель воздуха составляет 40°С;

- нижнее рабочее значение температуры окружающего выключатель воздуха составляет: для климатического исполнения У1\* - минус 45°С, для исполнения ХЛ1\* - минус 55°С при заполнении выключателя газовой смесью (элегаз+тетрафторметан).

Гололед с толщиной корки льда до 20 мм и ветре скоростью до 15 м/с, а при отсутствии гололеда - при ветре скоростью до 40 м/с. Высота установки над уровнем моря не более 1000 м. Тяжение проводов в трех взаимно перпендикулярных направлениях – 2550/2300/1250 Н. Технические характеристики представлены в таблице 3.



Рисунок 7 – Выключатель ВГТ-УЭТМ-1А1-220

Таблица 3 - Характеристика ВГТ-УЭТМ-1А1-220

Номинальное напряжение, кВ	220
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	252
Номинальный ток, А	3150
Номинальный ток отключения, кА	50
Ток термической стойкости, кА (с)	50 (3)
Собственное время отключения, мс	20
Полное время отключения, мс	45
Собственное время включения, мс	70

### 1. Цель работы

Определение параметров синхронизации ( $\delta_{вкл}$ ,  $\Delta f$  и  $\Delta U$ ) для ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23, ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23 на основании «Методики расчета допустимых параметров электрического режима при синхронизации».

### 2. Расчетные модели

Для расчета параметров синхронизации в ПК Rustab использована актуальная динамическая расчетная модель ОЭС Востока на ожидаемый летний максимум нагрузок 2020-2021 гг.

В расчетной модели смоделированы выключатели с обоих концов каждой рассматриваемой ЛЭП, на которых выполняется синхронизация (рисунок 6).

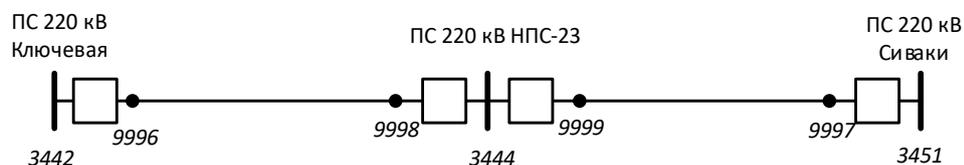


Рисунок 8 - Моделирование выключателей. Цифрами указаны номера узлов в ПК Rustab.

### 3. Определение параметров синхронизации для ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23

ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23 входит в состав сечения, состоящего из следующих связей:

- ВЛ 220 кВ Ключевая – Чалганы/т;
- ВЛ 500 кВ Зейская ГЭС – Амурская № 1;
- ВЛ 500 кВ Зейская ГЭС – Амурская № 2;
- ВЛ 220 кВ Февральская – Тунгала;
- ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23.

Режим АПВ с улавливанием синхронизма возможен на ПС 220 кВ

НПС-23 и на ПС 220 кВ Сиваки. Диапазон возможных уставок АПВ приведен в таблице 4.

Таблица 4 - Диапазоны уставок АПВ на ВЛ 220 кВ Сиваки– НПС-23

№ п/п	Наименование	Диапазон уставок
НПС-23 (В-1 220 Сиваки, В-2 220 Сиваки)		
1	Максимальная разница частот для АПВ УС	0,05...2,0 Гц
2	Максимальная разница напряжений	11000...66000 В.
3	Максимальная разница углов напряжений	5...85 град
ПС 220 кВ Сиваки (СВ-220)		
1	Максимальная разница частот для АПВ УС	0,05...2,0 Гц
2	Максимальная разница напряжений	11000...66000 В.
3	Максимальная разница углов напряжений	5...85 град

Создан сценарий на одностороннее отключение ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23 со стороны ПС 220 кВ НПС-23 и последующее включение.

Расчет параметров синхронизации:

Отключены:

- ВЛ 500 кВ Зейская ГЭС – Амурская № 1;
- ВЛ 500 кВ Зейская ГЭС – Амурская № 2;
- ВЛ 220 кВ Февральская – Тунгала;
- ВЛ 220 кВ Ключевая – Чалганы/т.

Установим переток активной мощности по ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23, соответствующий ДДТН ВЛ, 235 МВт (переток по критериям 15 % U и 20%P ВЛ не достигнут при перетоке активной мощности 235 МВт).

Для получения наибольшей разности напряжений (66 кВ) в узле № 9999 и 3444 смоделирован источник реактивной мощности.

После отключения ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23 со стороны ПС 220 кВ НПС-23 получена разность частот в установившемся режиме 0,46 Гц и разность напряжений 66 кВ.

Полученная разность частот превышает 0,4 Гц, поэтому необходимо снизить переток активной мощности ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23 до получения разности частот 0,4 Гц. Требуемая разность частот получена при перетоке активной мощности 175 МВт.

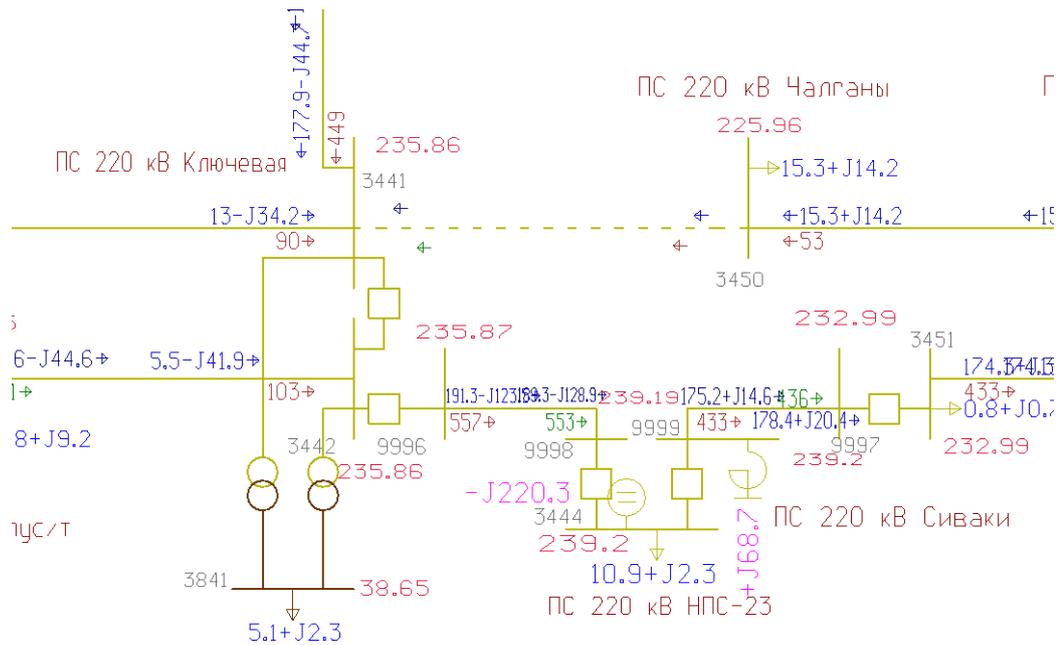


Рисунок 9 - Исходный режим с перетоком 175 МВт для разности частот 0,4 Гц

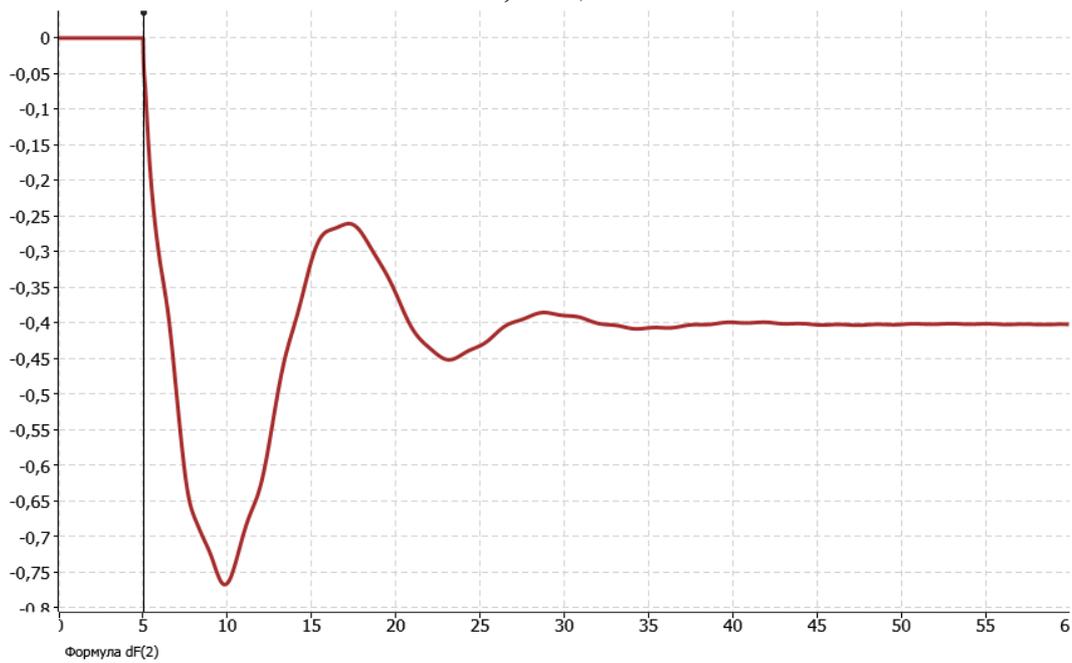


Рисунок 10 - Разность частот при перетоке по ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23 178 МВт

Максимальному значению разности углов напряжений ( $85^{\circ}$ ), которое можно реализовать в устройстве АПВ, соответствует момент включения 40,35311 с. В указанный момент времени величина  $\Delta f$  также достигает принятого для расчетов установившегося значения. Выполним включение ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23 в указанный момент времени.

Синхронизация выполнена успешно – возникновение асинхронного режима по ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23 не зафиксировано, но в момент синхронизации бросок тока по ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23 1420 А, мощности - 400 МВт.

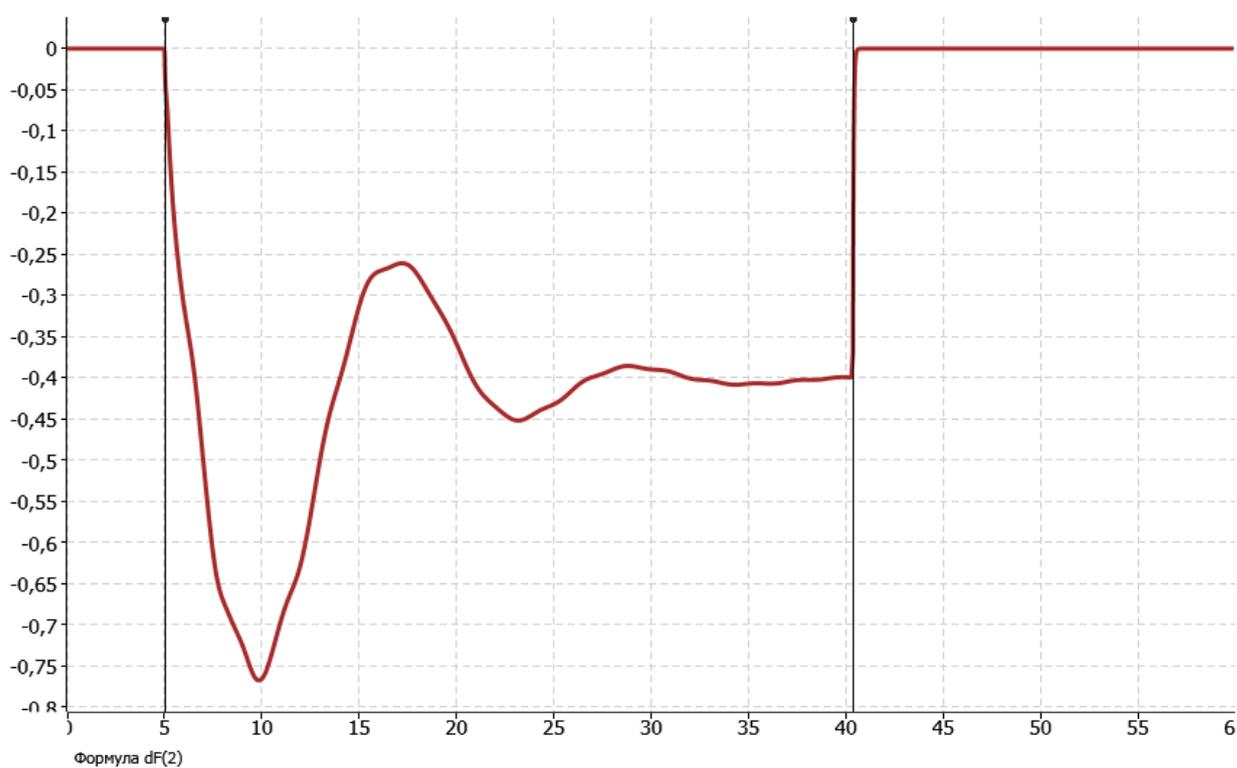


Рисунок 11 - Разность частот в момент синхронизации ( $\Delta f(t)$ ) 0,4 Гц

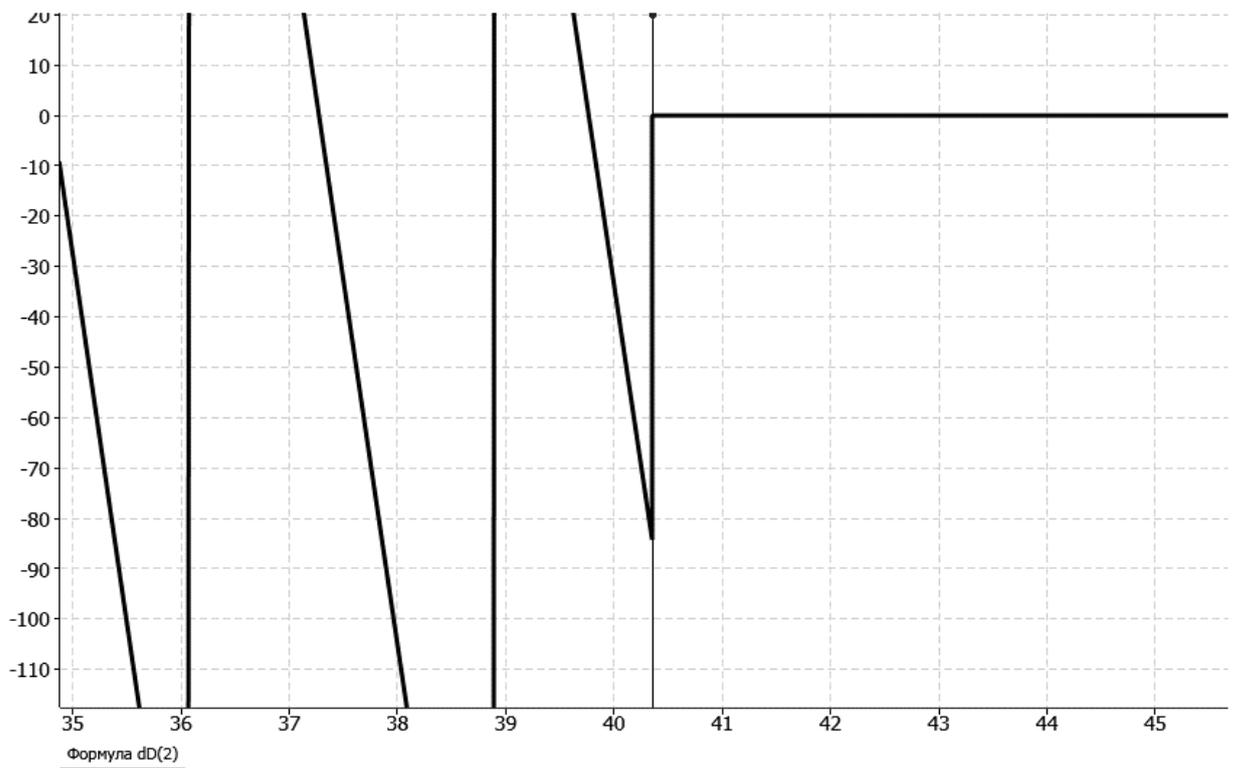


Рисунок 12 - Разность углов напряжений в момент синхронизации 85 град. ( $\delta_{\text{вкл}}(t)$ )

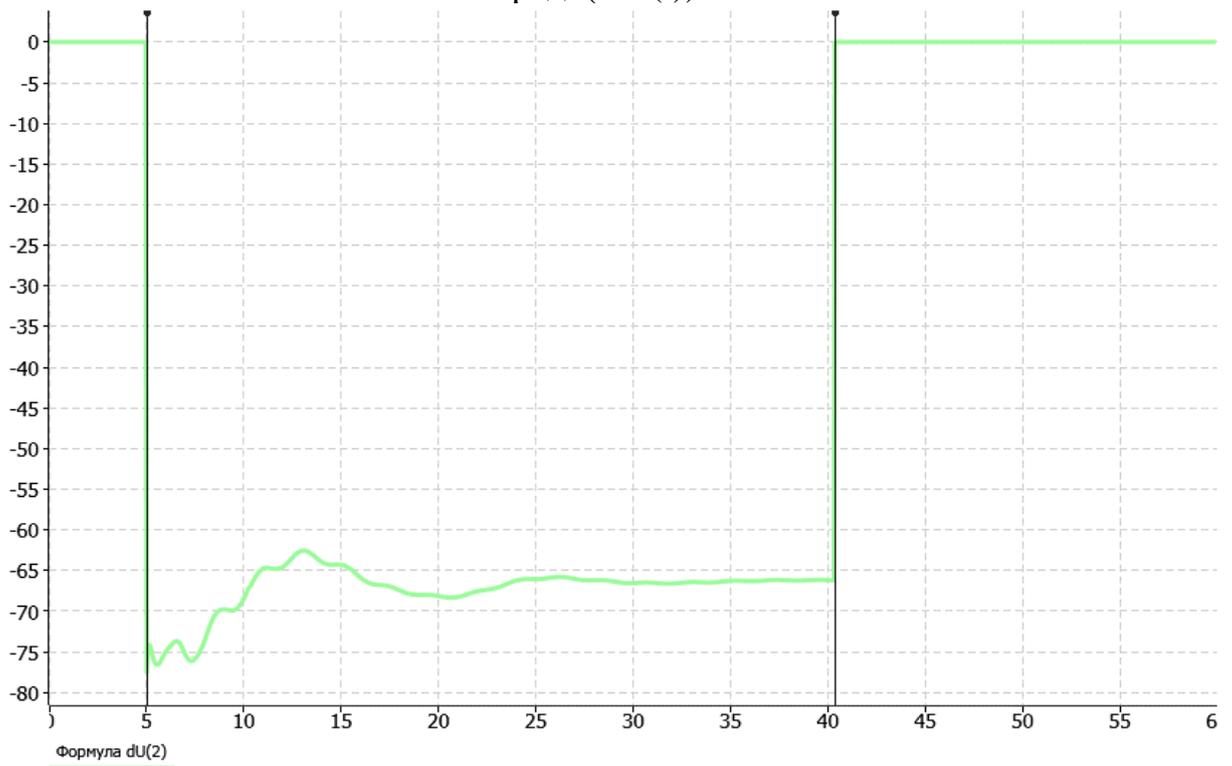


Рисунок 13 - Разность напряжений в момент синхронизации 66 кВ

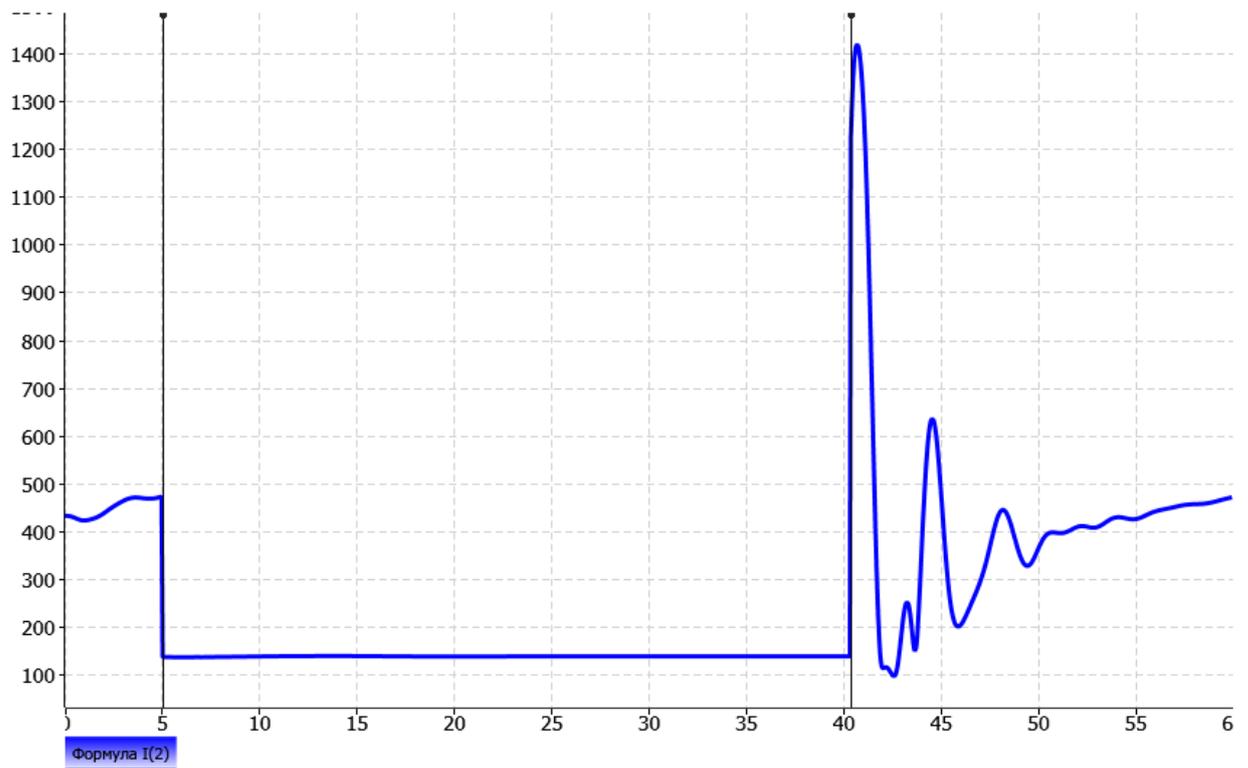


Рисунок 14 - Ток по ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23. Установившееся значение после синхронизации 476 А

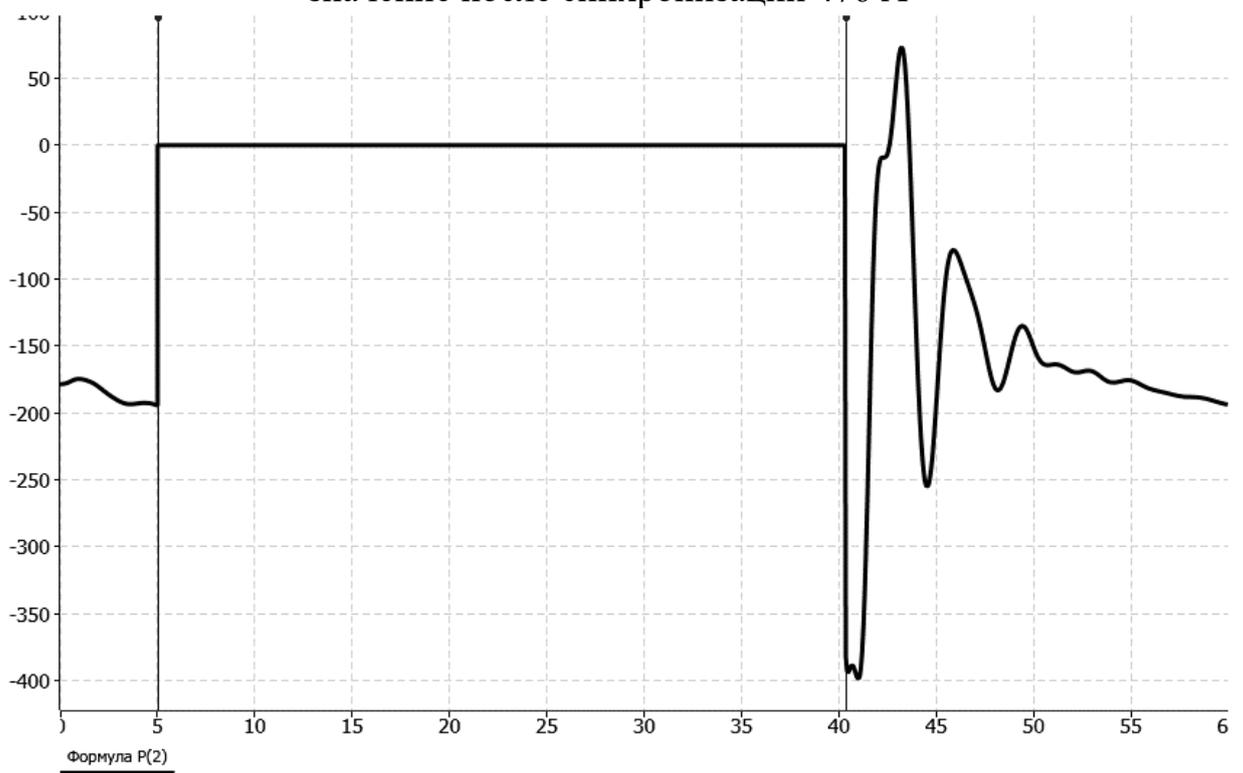


Рисунок 15 - Активная мощность по ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23. Установившееся значение после синхронизации 190 МВт

Для получения тока после синхронизации не более АДТН линии и перетока мощности не более МДП, снизим разность напряжений до 44 кВ и разность углов до  $40^{\circ}$ , разность частот 0,3 Гц.

Разности углов напряжений  $40^{\circ}$  соответствует момент включения 37,29898 с. В указанный момент времени величина  $\Delta f$  также достигает принятого для расчетов установившегося значения. Выполним включение ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23 в указанный момент времени.

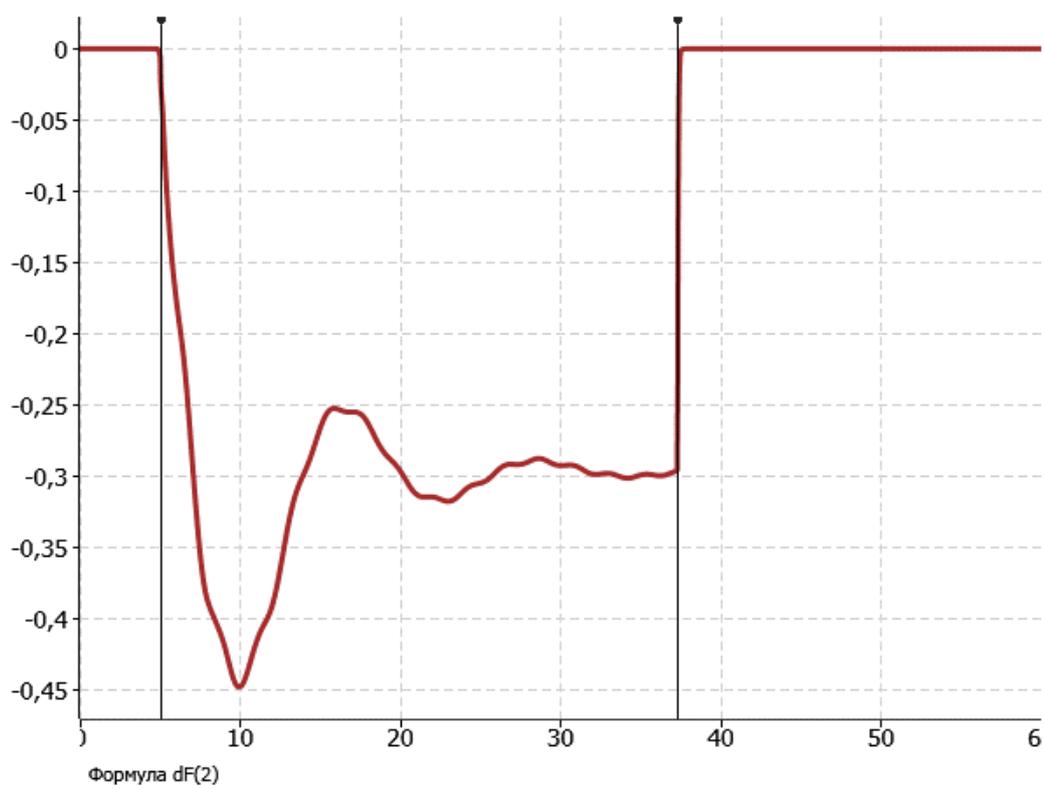


Рисунок 16 - Разность частот в момент синхронизации ( $\Delta f(t)$ ) 0,3 Гц

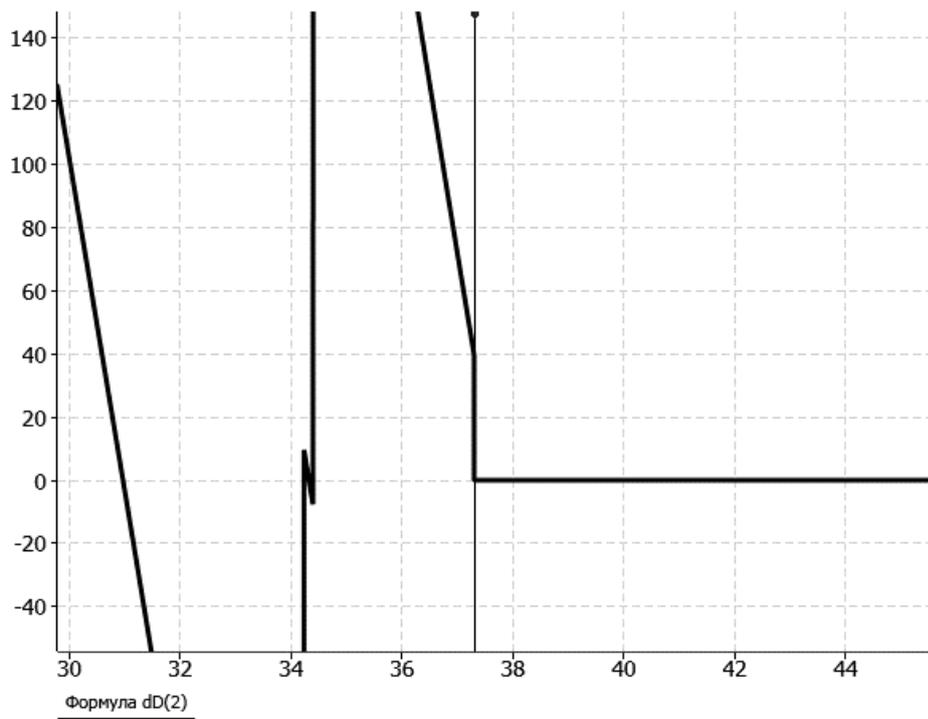


Рисунок 17 - Разность углов напряжений в момент синхронизации 40 град. ( $\delta_{\text{вкл}}(t)$ )

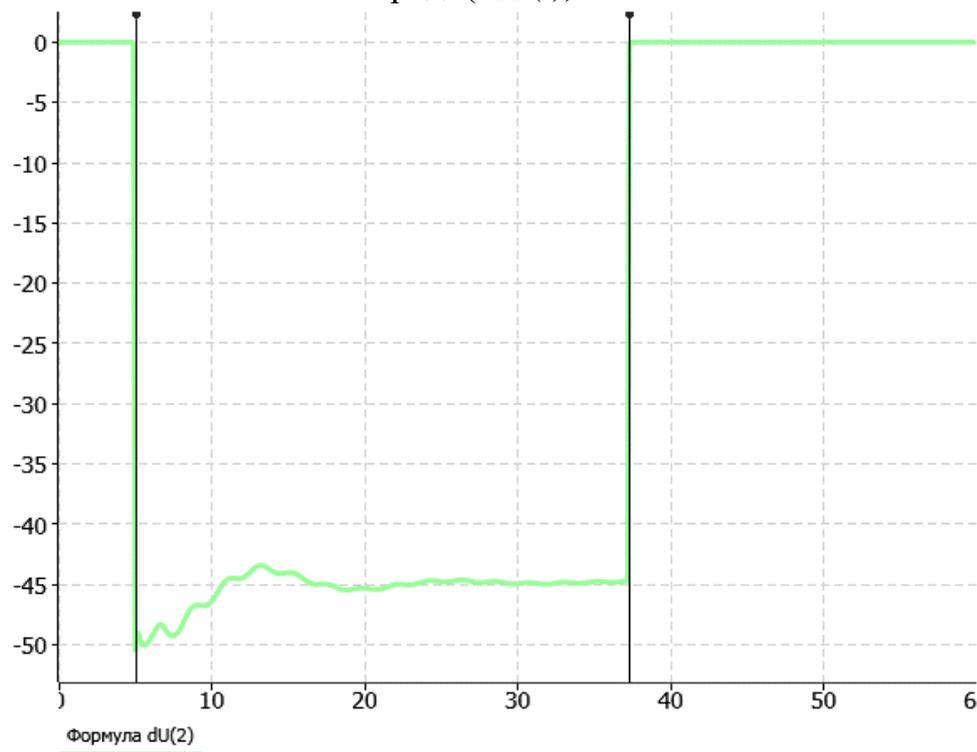


Рисунок 18 - Разность напряжений в момент синхронизации 44 кВ

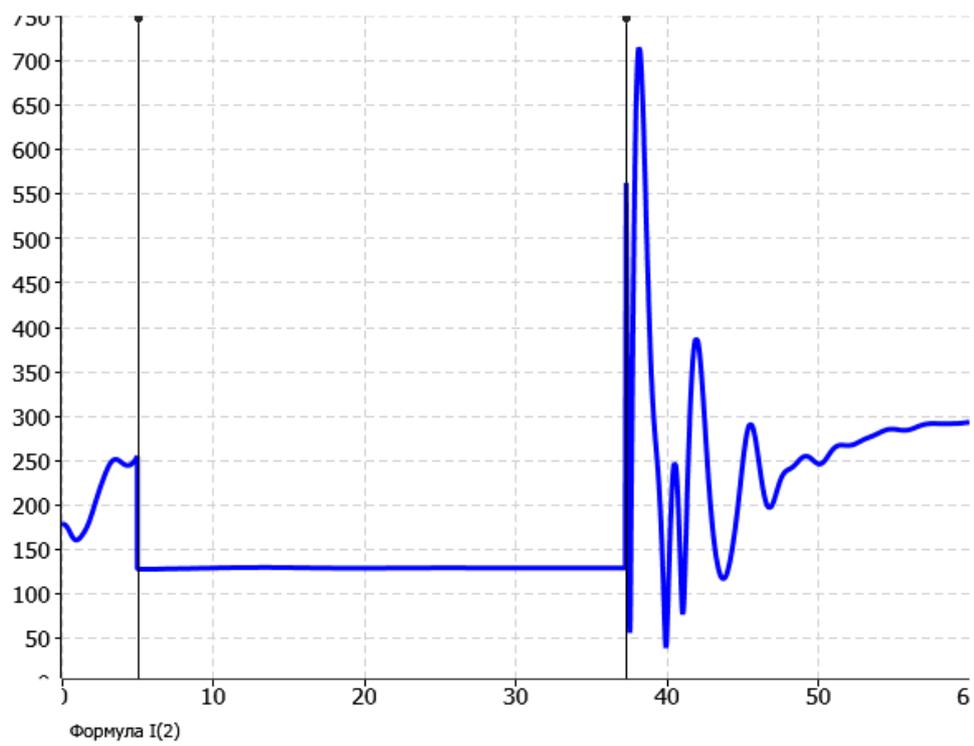


Рисунок 19 - Ток по ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23. Установившееся значение после синхронизации 300 А

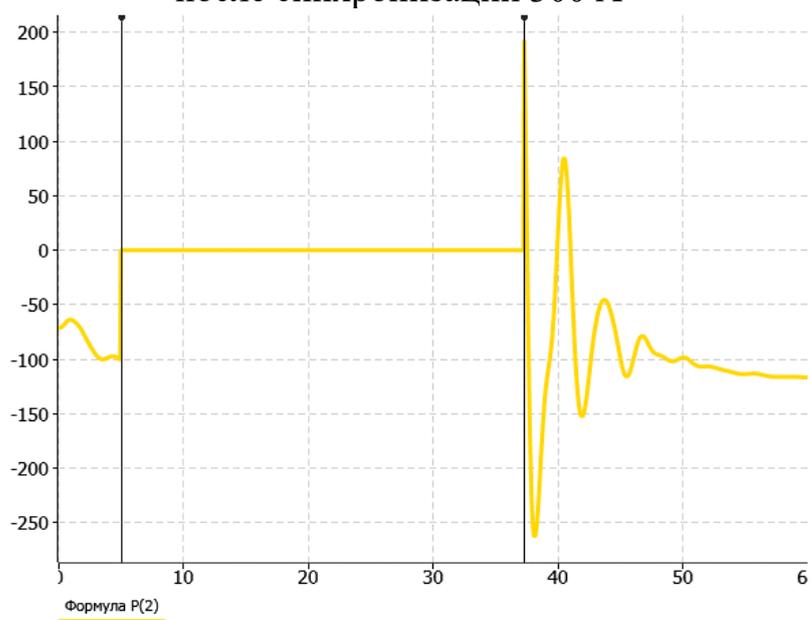


Рисунок 20 - Активная мощность по ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23. Установившееся значение после синхронизации 115 МВт



Рисунок 21 - Ток статора генераторов Зейской ГЭС

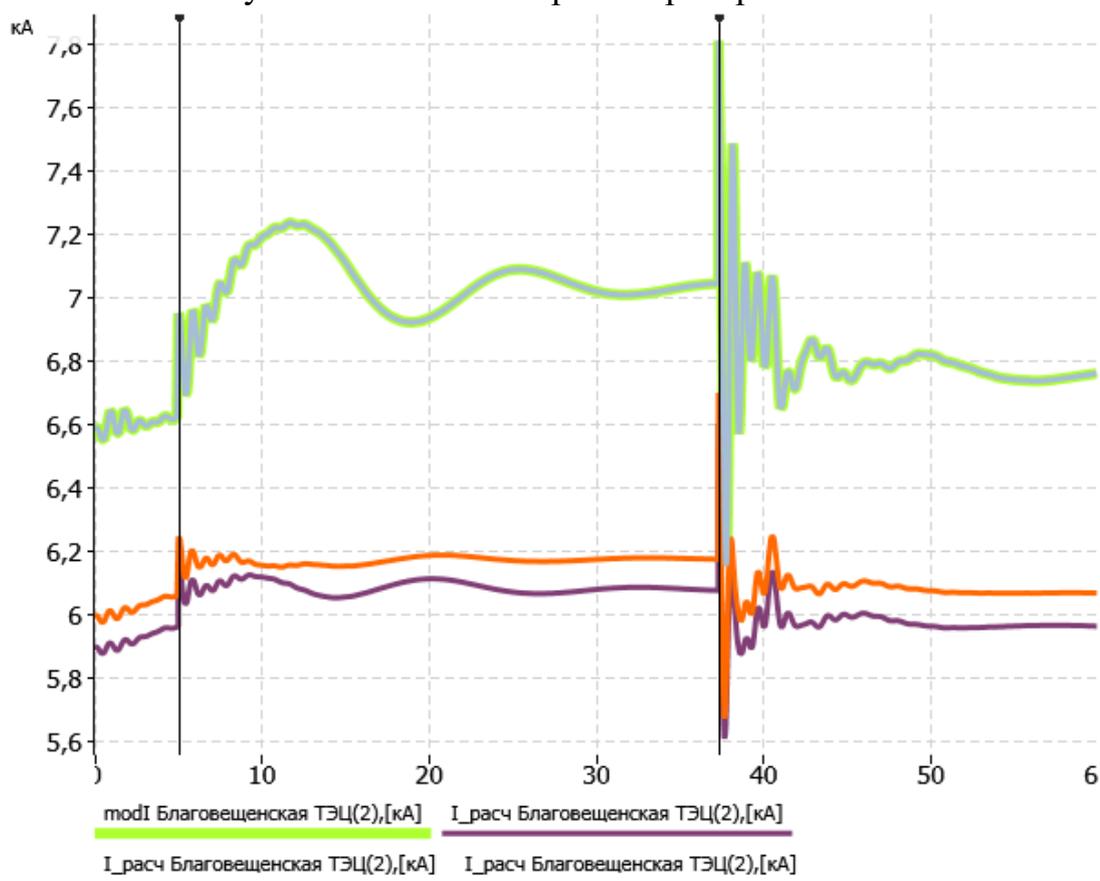


Рисунок 22 - Ток статора генераторов Благовещенской ТЭЦ

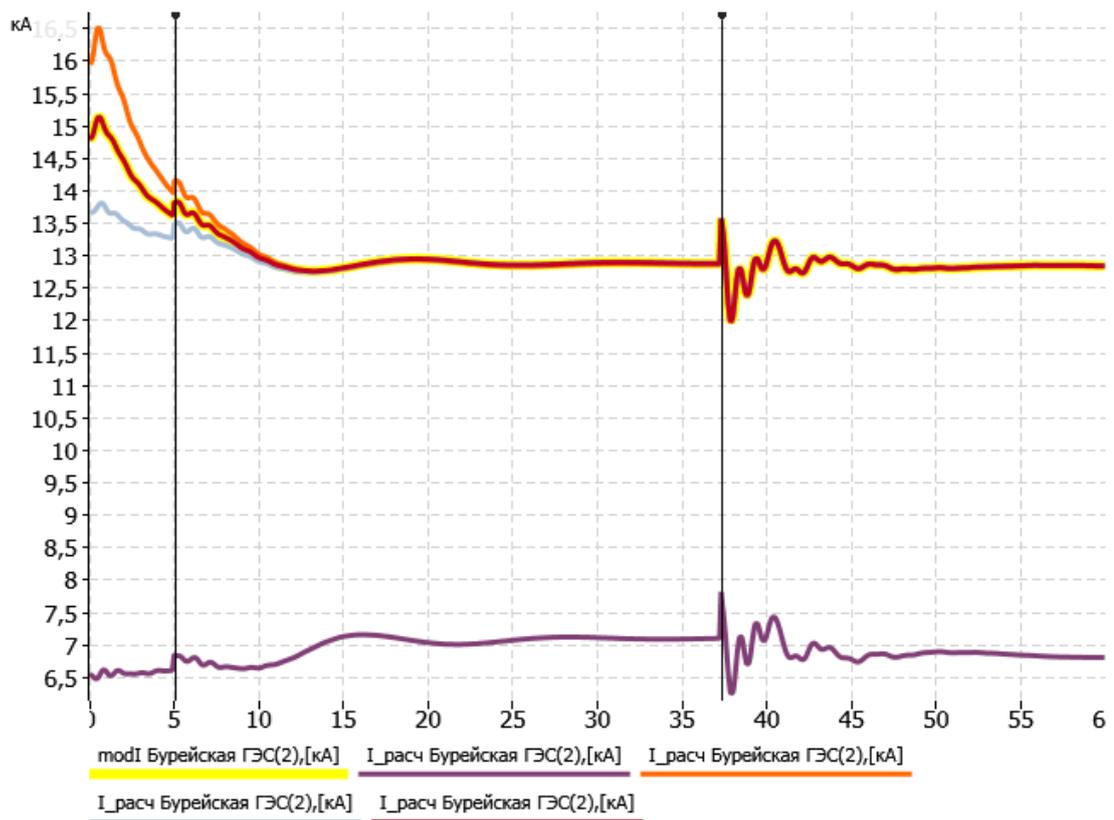


Рисунок 23 - Ток статора генераторов Бурейской ГЭС

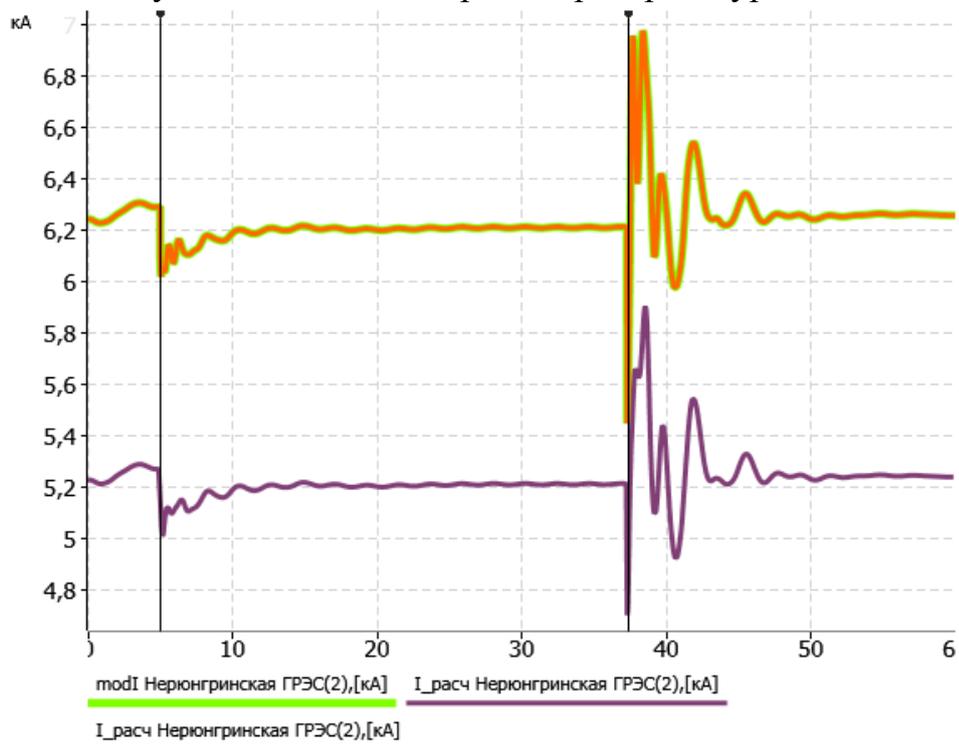


Рисунок 24 - Ток статора генераторов Нерюнгринской ГРЭС

Генерирующее оборудование, ток статора которого не указан на рисунках 21-24, находится в отключенном состоянии.

Проверка параметров режима после выполнения синхронизации приведена в таблицах 5, 6.

Таблица 5 - Проверка допустимости тока статора генераторов при синхронизации

Генера- тор	Тип генератора	X"d, о.е.	Sном, МВА	Uном, кВ	Iном, кА	Максимальный ток статора, кА	Кратность перегрузки (Iмакс/Iном)	Допустимая кратность перегрузки
<b>Зейская ГЭС</b>								
ГГ-1	СВ 1130/220-44хл4	0.22	265	15.75	9.71	0*	0.00	2.84
ГГ-2	СВ 1130/220-44хл4	0.22	265	15.75	9.71	4.6	0.47	2.84
ГГ-3	СВ 1130/220-44хл4	0.21	253	15.75	9.27	0	0.00	2.98
ГГ-4	СВ 1130/220-44хл4	0.22	265	15.75	9.71	7.3	0.75	2.84
ГГ-5	СВ 1130/220-44хл4	0.22	265	15.75	9.71	7.26	0.74	2.84
ГГ-6	СВ 1130/220-44хл4	0.21	253	15.75	9.27	7.3	0.79	2.98
<b>Бурейская ГЭС</b>								
ГГ-1	СВ 1313/265-48ухл4	0.2	372.22	15.75	13.64	9.5	0.7	3.13
ГГ-2	СВ 1313/265-48ухл4	0.2	372.22	15.75	13.64	0	0.00	3.13
ГГ-3	СВ 1313/265-48ухл4	0.2	372.22	15.75	13.64	7.8	0.57	3.13
ГГ-4	СВ 1313/265-48ухл4	0.2	372.22	15.75	13.64	13.5	0.99	3.13
ГГ-5	СВ 1313/265-48ухл4	0.2	372.22	15.75	13.64	13.6	1.0	3.13
ГГ-6	СВ 1313/265-48ухл4	0.2	372.22	15.75	13.64	13.3	0.98	3.13
<b>Благовещенская ТЭЦ</b>								
ТГ № 1	ТВФ-63-2	0.18	78.75	6.3	7.22	6.2	0.86	3.00
ТГ № 2	ТВФ-120-2У3	0.192	125	10.5	6.87	6.6	0.96	3.00
ТГ № 3	ТВФ-120-2У3	0.192	125	10.5	6.87	6.7	0.98	3.00
ТГ № 4	ТФЗП-130-2У3	0.19	162.5	10.5	8.94	7.8	0.87	3.00
<b>Нерюнгринская ГРЭС</b>								
Блок 1	ТГВ-200-2МУ3	0,225	247	15,75	9,05	7.4	0.82	3
Блок 2	ТГВ-200-2МУ3	0,225	247	15,75	9,05	5.9	0.65	3
Блок 3	ТГВ-200-2МУ3	0,225	247	15,75	9,05	6.9	0.76	3

\* генератор отключен

Таблица 6 - Проверка допустимости параметров режима при синхронизации

Параметр	Значение при синхронизации	Допустимое значение
Ток по ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23	Установившееся значение: 300 А	630 А (ДДТН при ТНВ +25 °С)
Переток активной мощности по ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23	Установившееся значение: 115 МВт	235 МВт (ДДТН)

Все параметры режима находятся в пределах допустимых значений.

Параметры синхронизации ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23 на ПС 220 кВ НПС-23 приведены в таблице 5.

Таблица 7 - Параметры синхронизации ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23 на ПС 220 кВ НПС-23

№ п/п	Наименование	Значение уставки
1	Максимальная разница напряжений в момент синхронизации	44 кВ
2	Максимальная разница углов в момент синхронизации	40 °
3	Максимальная разница частот в момент синхронизации	0,3 Гц

Параметры синхронизации ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23 на ПС 220 кВ Сиваки такие же.

Таблица 8 - Параметры синхронизации ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23 на ПС 220 кВ Сиваки

№ п/п	Наименование	Значение уставки
1	Максимальная разница напряжений в момент синхронизации	44 кВ
2	Максимальная разница углов в момент синхронизации	40 °
3	Максимальная разница частот в момент синхронизации	0,3 Гц

#### 4. Определение параметров синхронизации для ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23

ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23 входит в состав сечения, состоящего из следующих связей:

- ВЛ 220 кВ Ключевая – Чалганы/г;
- ВЛ 500 кВ Зейская ГЭС – Амурская № 1;
- ВЛ 500 кВ Зейская ГЭС – Амурская № 2;
- ВЛ 220 кВ Февральская – Тунгала;

- ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23.

Режим АПВ с улавливанием синхронизма возможен на ПС 220 кВ Ключевая и НПС-23. Диапазон возможных уставок АПВ приведен в таблице 9.

Таблица 9 - Диапазоны уставок АПВ на ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23

№ п/п	Наименование	Диапазон уставок
НПС-23 (В-1 220 Ключевая, В -2 220 Ключевая)		
1	Максимальная разница частот для АПВ УС	0,05...2,0 Гц
2	Максимальная разница напряжений	11000...66000 В.
3	Максимальная разница углов напряжений	5...85 град
ПС 220 кВ Ключевая (В-220 ВЛ НПС-23)		
1	Максимальная разница частот для АПВ УС	0,05...2,0 Гц
2	Максимальная разница напряжений	11000...66000 В.
3	Максимальная разница углов напряжений	5...85 град

Создан сценарий на одностороннее отключение ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23 со стороны ПС 220 кВ Ключевой и последующее включение.

Расчет параметров синхронизации:

Отключены:

- ВЛ 500 кВ Зейская ГЭС – Амурская № 1;
- ВЛ 500 кВ Зейская ГЭС – Амурская № 2;
- ВЛ 220 кВ Февральская – Тунгала;
- ВЛ 220 кВ Ключевая – Чалганы/т.

Установим переток активной мощности по ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23, соответствующий ДДТН ВЛ, 239 МВт (переток по критериям 15 % U и 20%P ВЛ не достигнут при перетоке активной мощности 239МВт). Для получения наибольшей разности напряжений (66 кВ) в узле № 9996 и 3442 смоделирован источник реактивной мощности. После отключения ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23 со стороны ПС 220 кВ Ключевая получена разность частот в установившемся режиме 0,47 Гц и разность напряжений 66 кВ. Полученная разность частот превышает 0,4 Гц, поэтому необходимо снизить переток активной мощности ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23 до получения

разности частот 0,4 Гц. Требуемая разность частот получена при перетоке активной мощности 181 МВт.

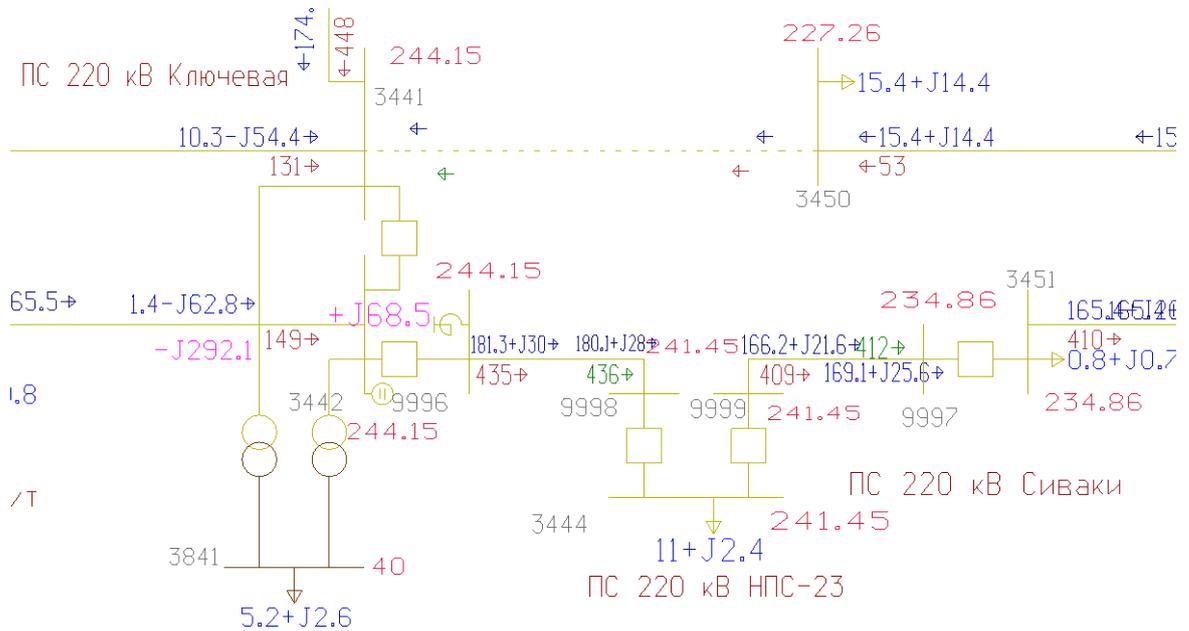


Рисунок 25 - Исходный режим с перетоком 181 МВт для разности частот 0,4 Гц

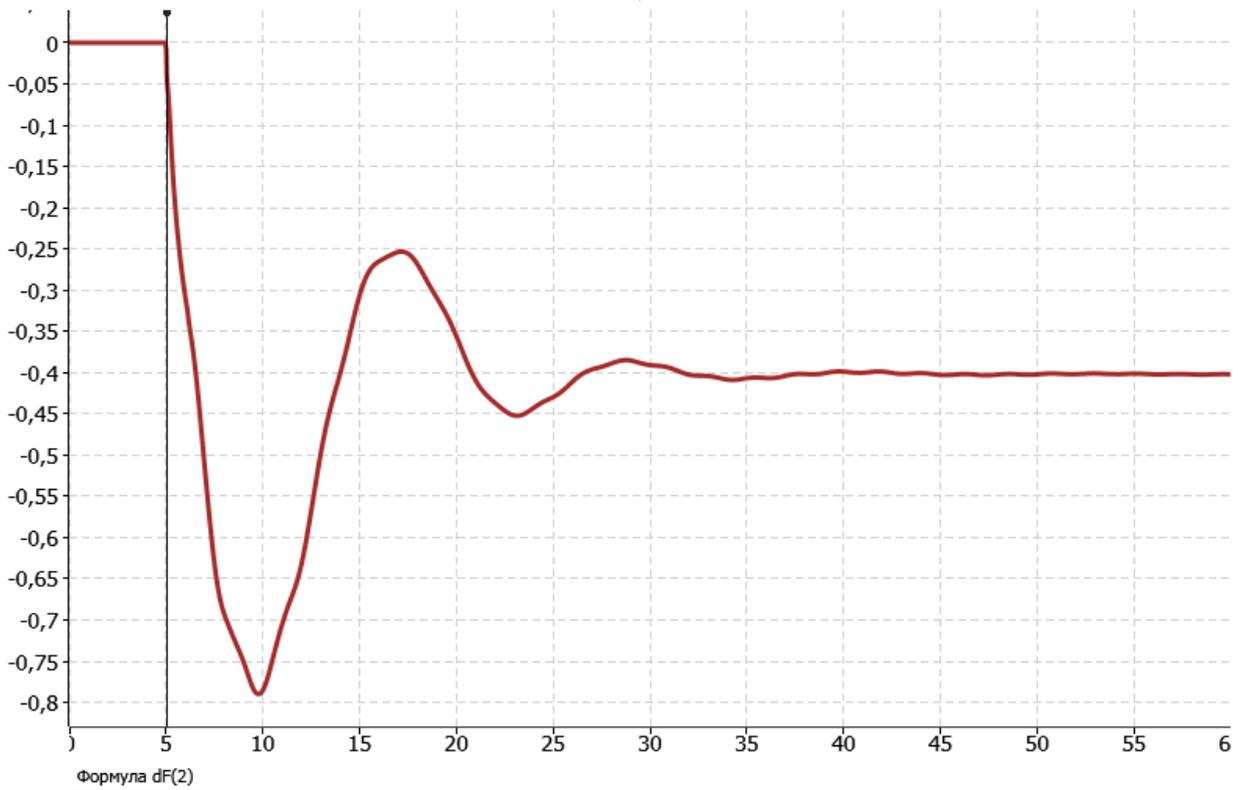


Рисунок 26 - Разность частот при перетоке по ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23 181 МВт

Максимальному значению разности углов напряжений ( $85^{\circ}$ ), которое можно реализовать в устройстве АПВ, соответствует момент включения

36,54137 с. В указанный момент времени величина  $\Delta f$  также достигает принятого для расчетов установившегося значения. Выполним включение ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23 в указанный момент времени.

Синхронизация выполнена успешно – возникновение асинхронного режима по ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23 не зафиксировано, но в момент синхронизации бросок тока по ВЛ 220 кВ Сиваки – НПС-23 1180 А, мощности - 380 МВт.

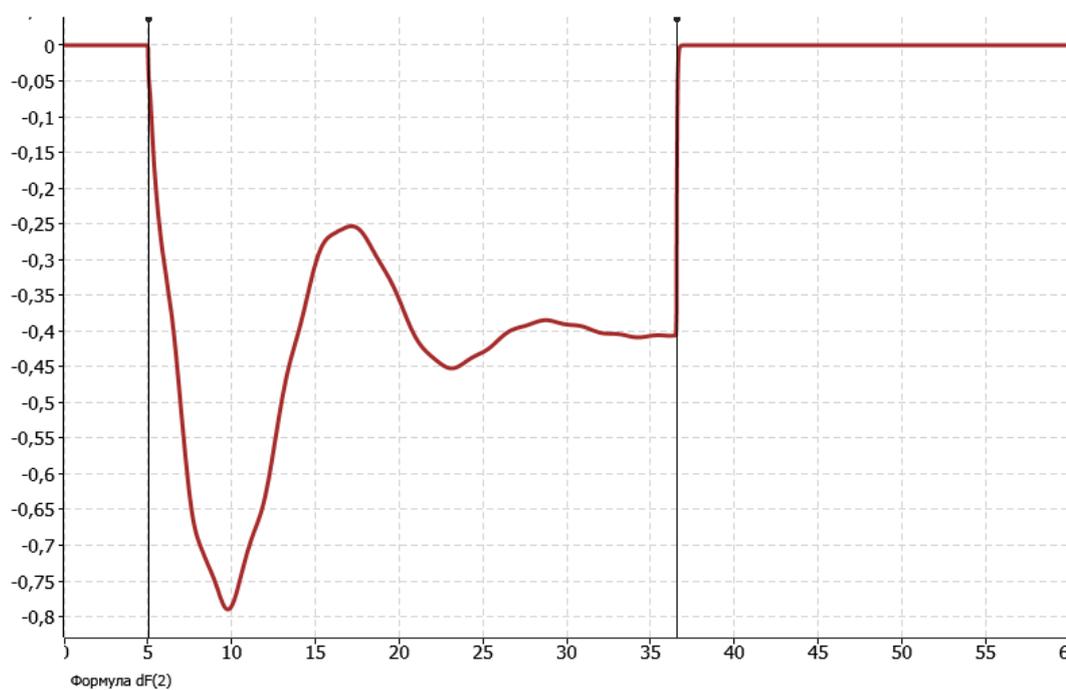


Рисунок 27 - Разность частот в момент синхронизации ( $\Delta f(t)$ ) 0,4 Гц

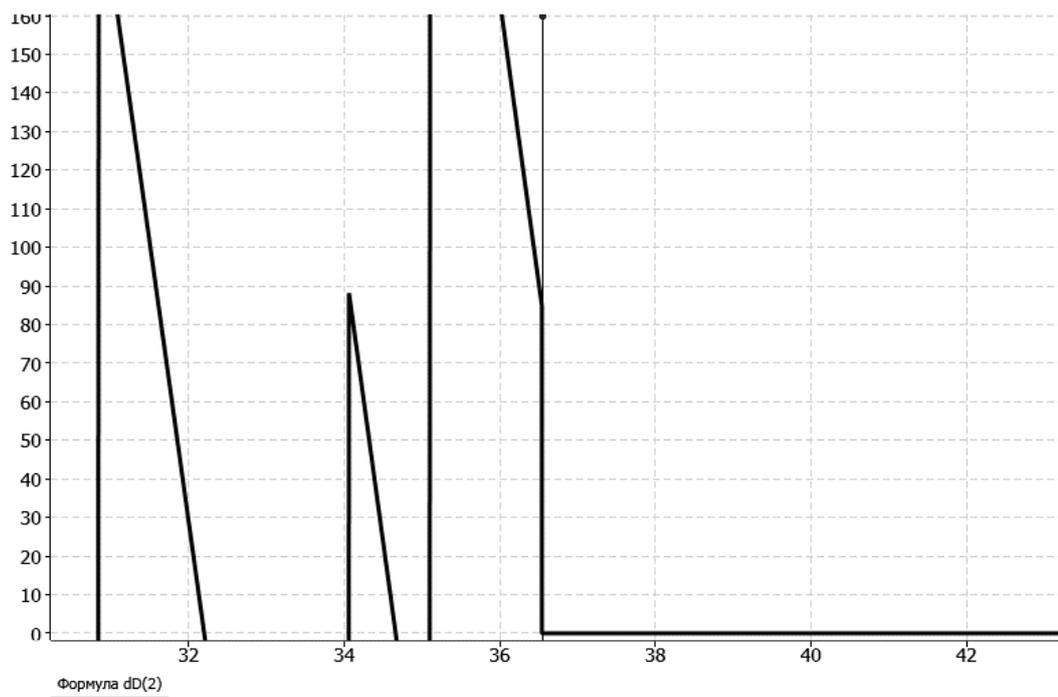


Рисунок 28 - Разность углов напряжений в момент синхронизации 85 град. ( $\delta_{вкл}(t)$ )

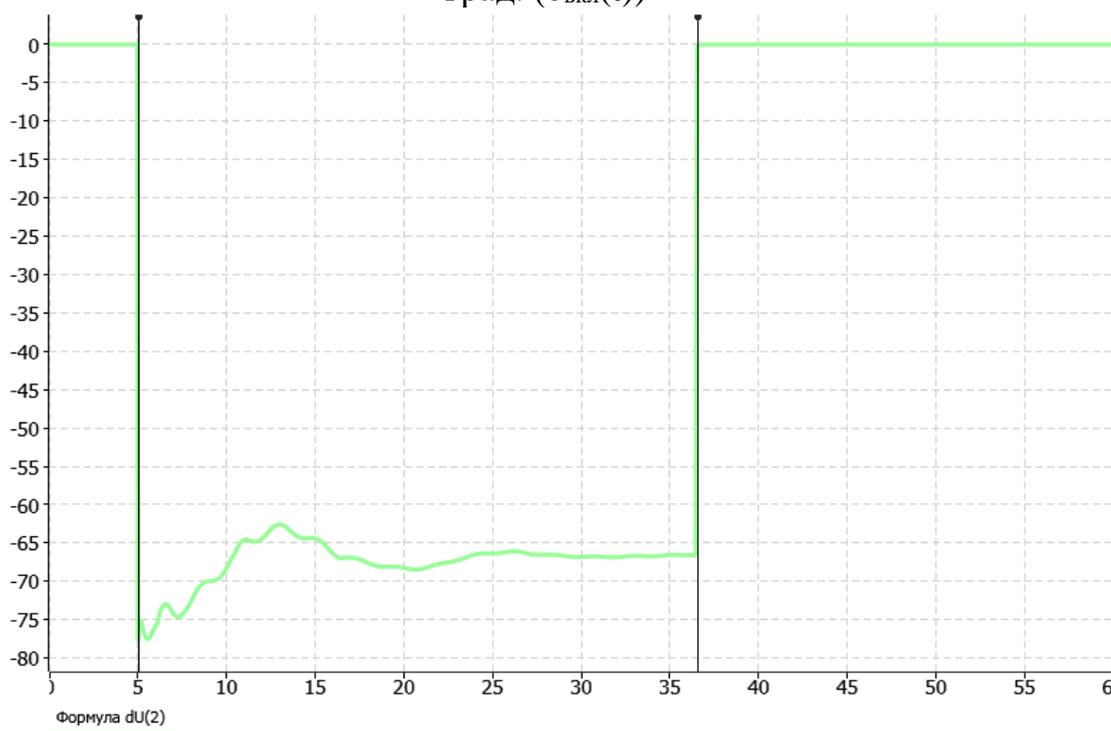


Рисунок 29 - Разность напряжений в момент синхронизации 66 кВ.

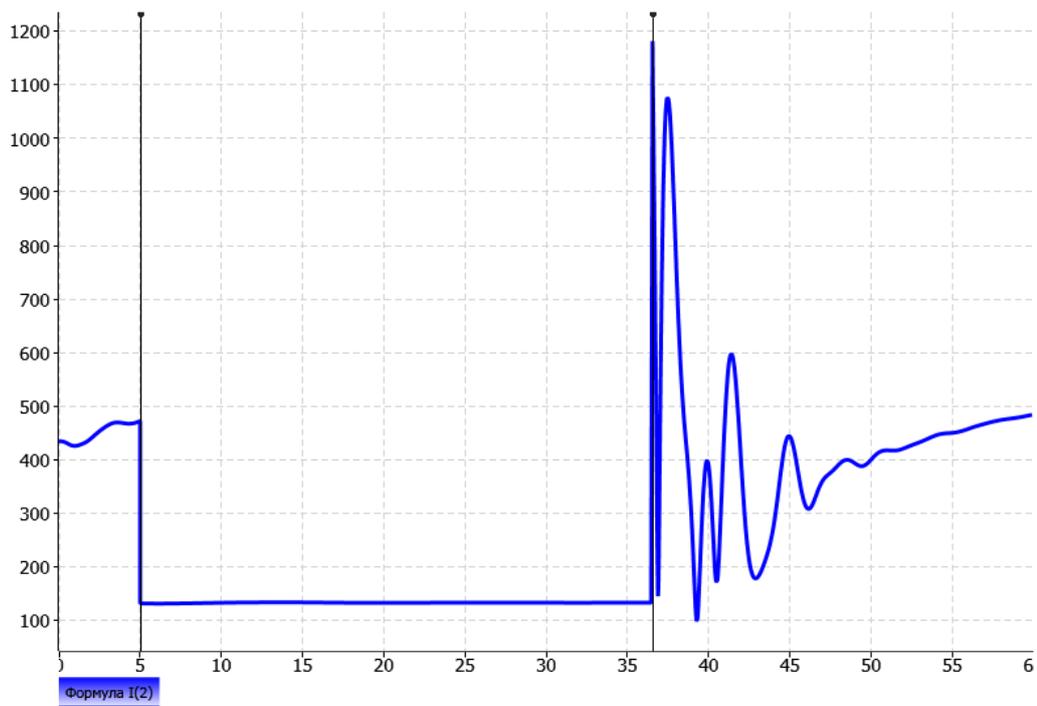


Рисунок 30 - Ток по ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23. Установившееся значение после синхронизации 483 А.

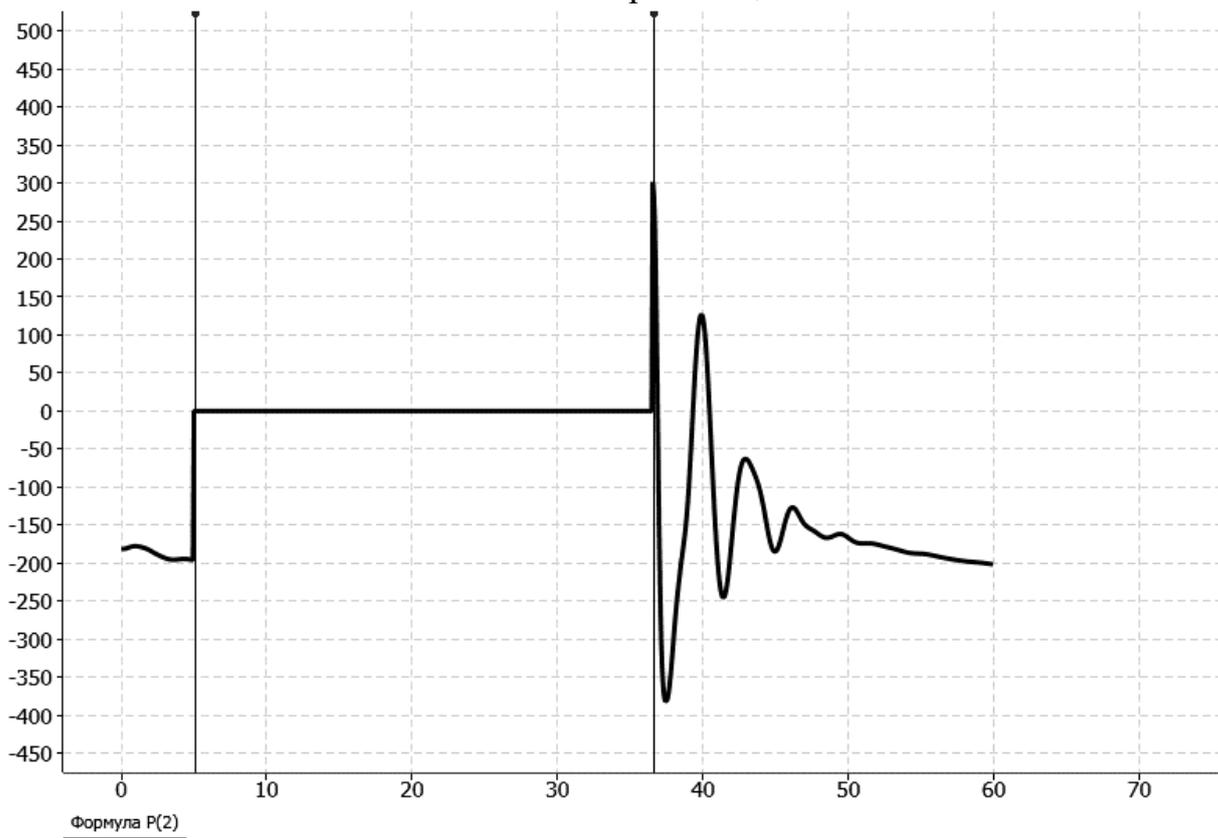


Рисунок 31 - Активная мощность по ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23. Установившееся значение после синхронизации 200 МВт.

Для получения тока после синхронизации не более АДТН линии и перетока мощности не более МДП, снизим разность напряжений до 44 кВ и разность углов до  $40^{\circ}$ , разность частот 0,3 Гц.

Разности углов напряжений  $40^{\circ}$  соответствует момент включения 34,11888 с. В указанный момент времени величина  $\Delta f$  также достигает принятого для расчетов установившегося значения. Выполним включение ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23 в указанный момент времени.

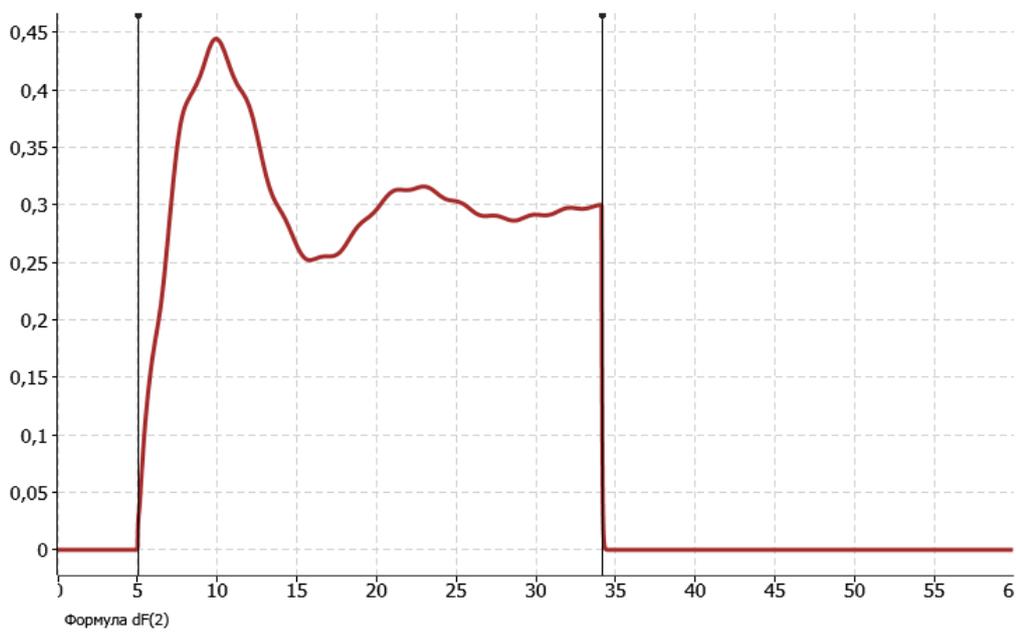


Рисунок 32 - Разность частот в момент синхронизации ( $\Delta f(t)$ ) 0,3 Гц

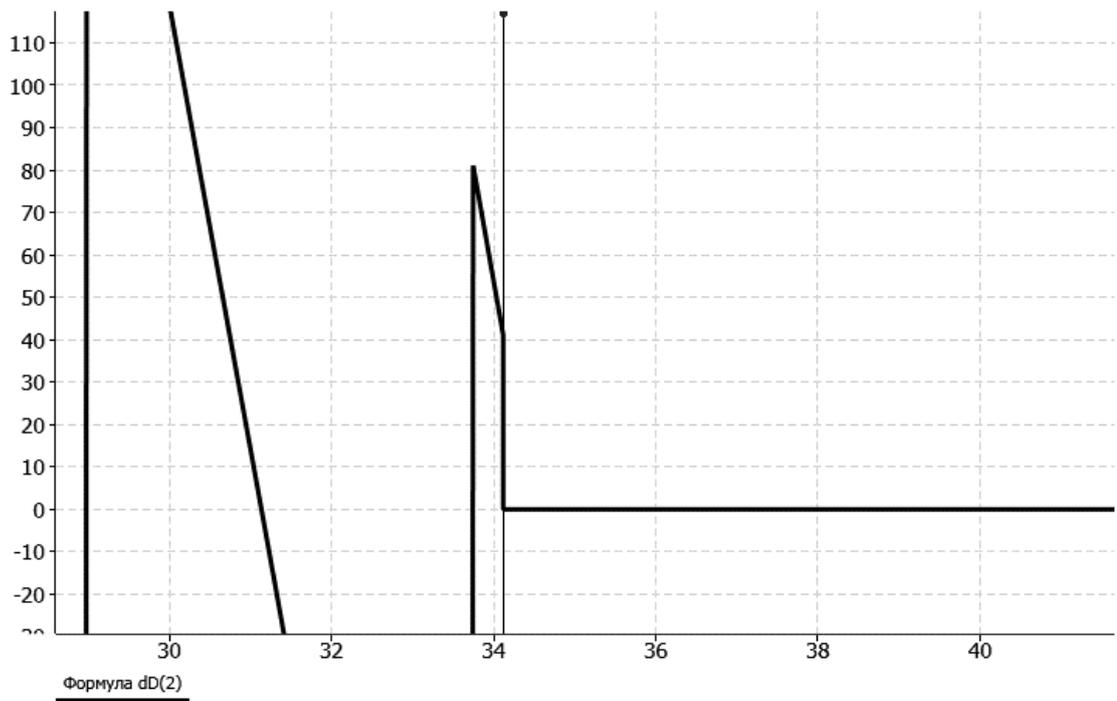


Рисунок 33 - Разность углов напряжений в момент синхронизации 40 град. ( $\delta_{\text{вкл}}(t)$ )

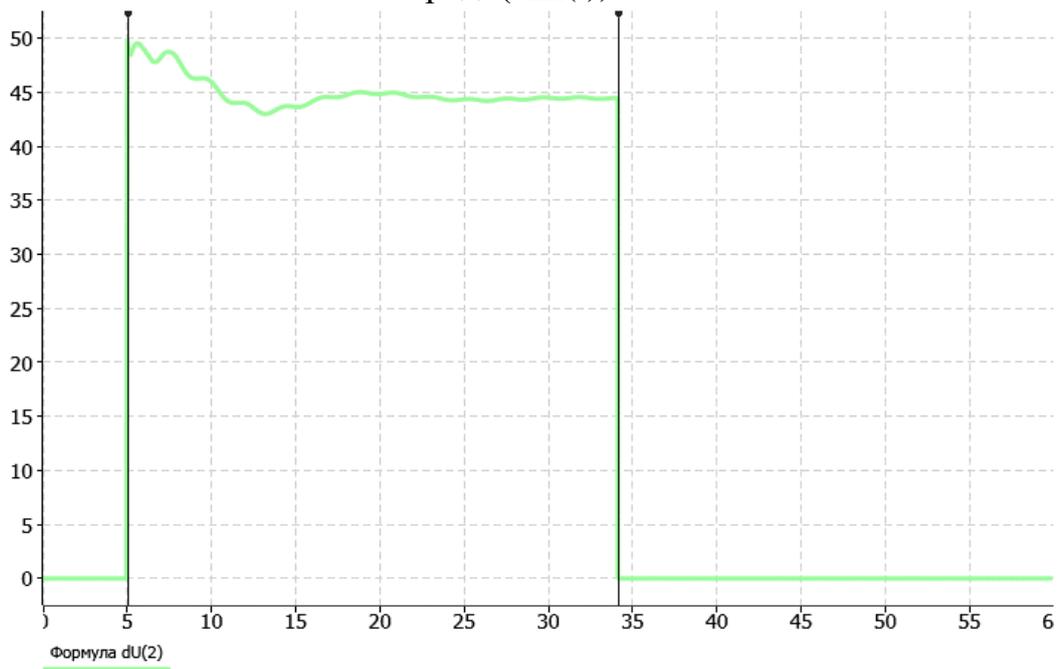


Рисунок 34 - Разность напряжений в момент синхронизации 44 кВ.

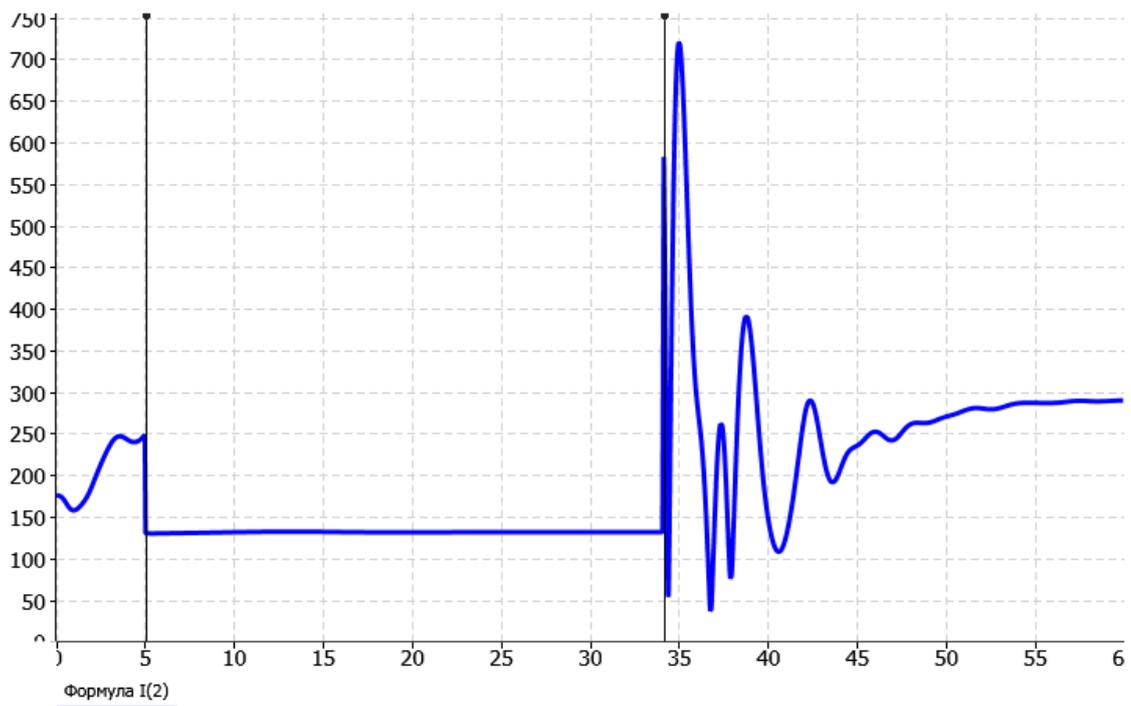


Рисунок 35 - Ток по ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23. Установившееся значение после синхронизации 250 А.

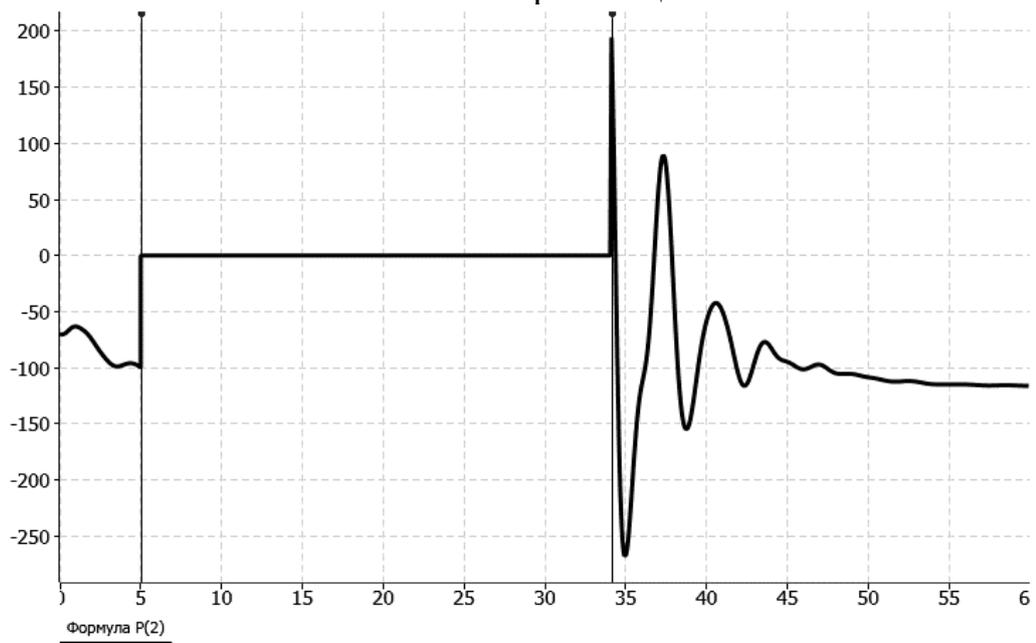


Рисунок 36 - Активная мощность по ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23. Установившееся значение после синхронизации 113 МВт.

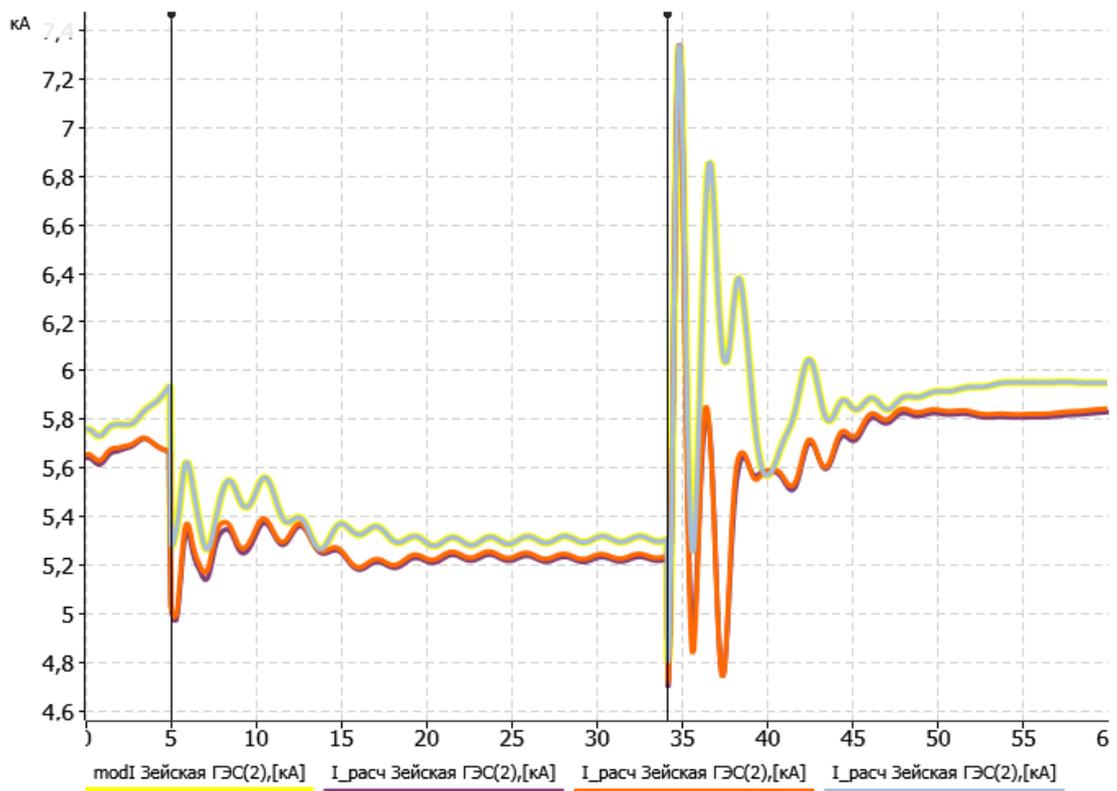


Рисунок 37 - Ток статора генераторов Зейской ГЭС

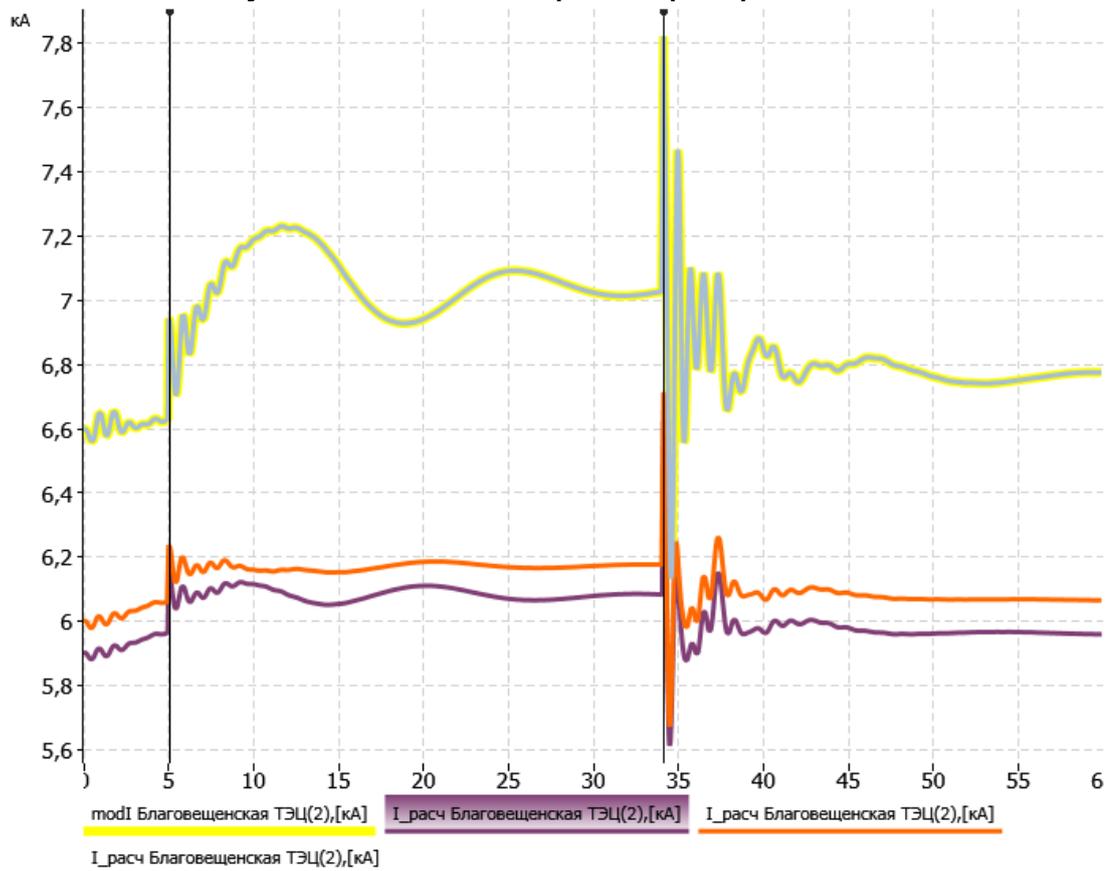


Рисунок 38 - Ток статора генераторов Благовещенской ТЭЦ

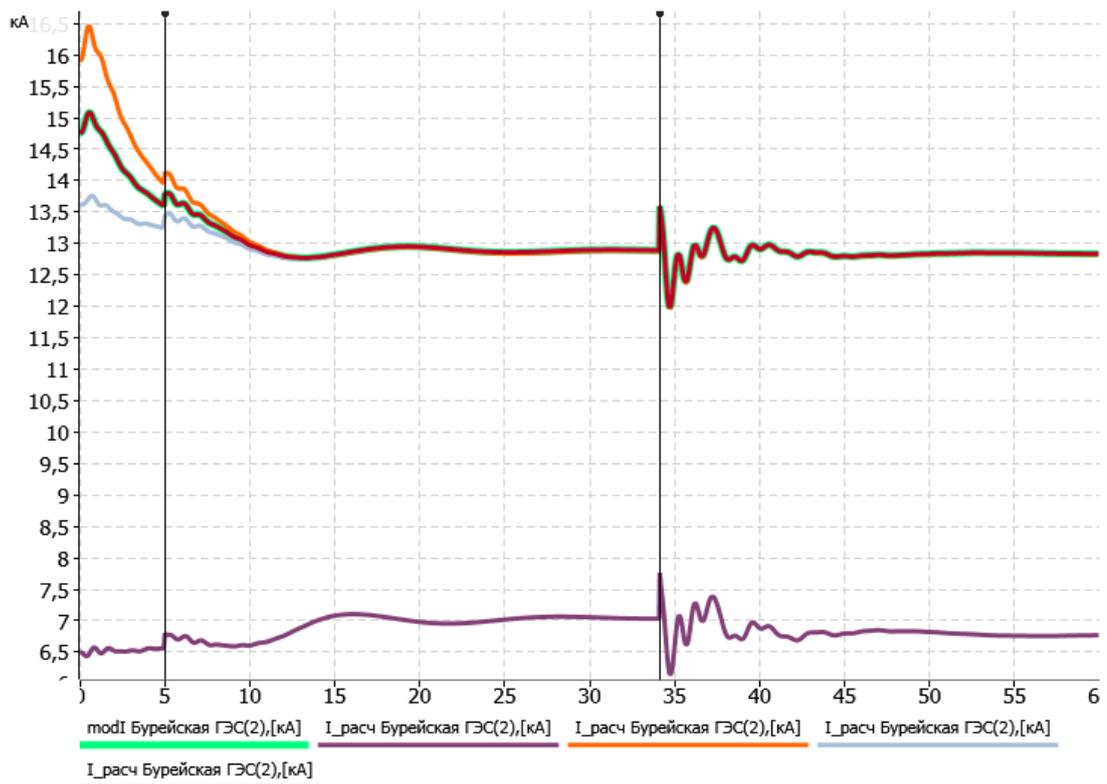


Рисунок 39 - Ток статора генераторов Бурейской ГЭС

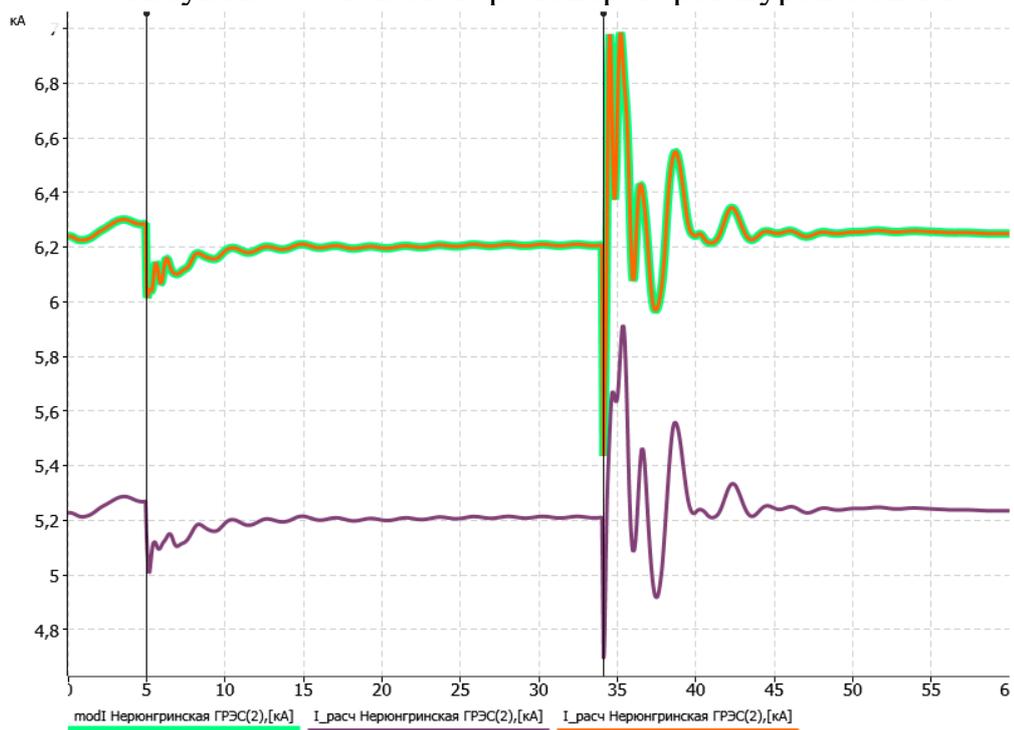


Рисунок 40 - Ток статора генераторов Нерюнгринской ГРЭС

Генерирующее оборудование, ток статора которого не указан на рисунках 37-40, находится в отключенном состоянии.

Проверка параметров режима после выполнения синхронизации приведена в таблицах 10, 11.

Таблица 10 - Проверка допустимости тока статора генераторов при синхронизации

Генера тор	Тип генератора	X"d, о.е.	Sном, МВА	Uном, кВ	Iном, кА	Максимальный ток статора, кА	Кратность перегрузки (Iмакс/Iном)	Допустимая кратность перегрузки ки
<b>Зейская ГЭС</b>								
ГГ-1	СВ 1130/220-44хл4	0.22	265	15.75	9.71	0*	0.00	2.84
ГГ-2	СВ 1130/220-44хл4	0.22	265	15.75	9.71	4.9	0.5	2.84
ГГ-3	СВ 1130/220-44хл4	0.21	253	15.75	9.27	0	0.00	2.98
ГГ-4	СВ 1130/220-44хл4	0.22	265	15.75	9.71	7.35	0.76	2.84
ГГ-5	СВ 1130/220-44хл4	0.22	265	15.75	9.71	7.3	0.75	2.84
ГГ-6	СВ 1130/220-44хл4	0.21	253	15.75	9.27	7.35	0.79	2.98
<b>Бурейская ГЭС</b>								
ГГ-1	СВ 1313/265-48ухл4	0.2	372.22	15.75	13.64	10.1	0.74	3.13
ГГ-2	СВ 1313/265-48ухл4	0.2	372.22	15.75	13.64	0	0.00	3.13
ГГ-3	СВ 1313/265-48ухл4	0.2	372.22	15.75	13.64	7.8	0.57	3.13
ГГ-4	СВ 1313/265-48ухл4	0.2	372.22	15.75	13.64	13.5	0.99	3.13
ГГ-5	СВ 1313/265-48ухл4	0.2	372.22	15.75	13.64	13.5	0.99	3.13
ГГ-6	СВ 1313/265-48ухл4	0.2	372.22	15.75	13.64	13.6	1.00	3.13
<b>Благовещенская ТЭЦ</b>								
ТГ № 1	ТВФ-63-2	0.18	78.75	6.3	7.22	6.3	0.87	3.00
ТГ № 2	ТВФ-120-2У3	0.192	125	10.5	6.87	6.6	0.96	3.00
ТГ № 3	ТВФ-120-2У3	0.192	125	10.5	6.87	6.7	0.97	3.00
ТГ № 4	ТФЗП-130-2У3	0.19	162.5	10.5	8.94	7.8	0.87	3.00
<b>Нерюнгринская ГРЭС</b>								
Блок 1	ТГВ-200-2МУ3	0,225	247	15,75	9,05	7.4	0.82	3
Блок 2	ТГВ-200-2МУ3	0,225	247	15,75	9,05	6	0.66	3
Блок 3	ТГВ-200-2МУ3	0,225	247	15,75	9,05	6.9	0.76	3

\* генератор отключен

Таблица 11 - Проверка допустимости параметров режима при синхронизации

Параметр	Значение при синхронизации	Допустимое значение
Ток по ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23	Установившееся значение: 250 А	630 А (ДДТН при ТНВ +25 °С)
Переток активной мощности по ВЛ 220 кВ Свободненская ТЭС – Ледяная	Установившееся значение: 113 МВт	239 МВт (ДДТН)

Все параметры режима находятся в пределах допустимых значений.

Параметры синхронизации ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23 на ПС 220 кВ Ключевой приведены в таблице 12.

Таблица 12 - Параметры синхронизации ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23 на ПС 220 кВ Ключевой

№ п/п	Наименование	Значение уставки
1	Максимальная разница напряжений в момент синхронизации	44 кВ
2	Максимальная разница углов в момент синхронизации	40 °
3	Максимальная разница частот в момент синхронизации	0,3 Гц

Параметры синхронизации ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23 на ПС 220 кВ НПС-23 такие же.

Таблица 13 - Параметры синхронизации ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23 на ПС 220 кВ НПС-23

№ п/п	Наименование	Значение уставки
1	Максимальная разница напряжений в момент синхронизации	44 кВ
2	Максимальная разница углов в момент синхронизации	40 °
3	Максимальная разница частот в момент синхронизации	0,3 Гц

Вывод: Полученные в ходе расчета параметры можно применять для настройки устройств синхронизации выключателей ВЛ 220 кВ Ключевая – НПС-23 на ПС 220 кВ Ключевая и ПС 220 кВ НПС-23

## 3 ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

### 3.1 Общий порядок переключений на объектах электроэнергетики

1. Перед вводом в работу ЛЭП, оборудования и устройств РЗА после ремонта, технического обслуживания оперативный персонал должен:

- получить в установленном порядке уведомление об окончании работ и возможности ввода ЛЭП, оборудования и устройств РЗА в работу;
- осмотреть место работ в распределительном устройстве;
- проверить, в каком положении находятся (оставлены ремонтным персоналом) коммутационные аппараты и переключающие устройства, заземляющие разъединители, переносные заземления;
- убедиться в отсутствии людей и механизмов, а также посторонних предметов на оборудовании и устройствах РЗА.[26]

Диспетчерский персонал, оперативный персонал ЦУС, НСО перед операциями по вводу в работу ЛЭП, оборудования (устройств РЗА) после ремонта (технического обслуживания) должны получить в установленном порядке сообщение об окончании работ и возможности ввода ЛЭП, оборудования и устройств РЗА в работу.

2. В бланке (типовом бланке) переключений должны быть указаны дата и время начала и окончания переключений.

3. Переключения по бланкам (типовым бланкам) переключений, выполняемые с участием контролирующего лица, должны производиться в следующем порядке:

- на месте переключений персонал должен проверить по надписи диспетчерское наименование присоединения, коммутационного аппарата, переключающего устройства, с которым предстоит проведение операции, и соответствие их указанным в бланке (типовом бланке) переключений. Не допускается производство переключений без прочтения надписи на аппарате (устройстве);

- убедившись в правильности выбранного присоединения и аппарата (устройства), контролирующее лицо зачитывает по бланку (типовому бланку) переключений содержание операции, подлежащей выполнению;

- лицо, выполняющее переключение, повторяет содержание операции, подготавливается к ее выполнению (берется за ключ управления, накладку, испытательный блок, вставляет рукоятку в привод);

- контролирующее лицо убеждается в том, что содержание проводимой операции понято правильно и ключ управления (накладка, испытательный блок, привод) выбран правильно, после чего дает указание на ее выполнение;

- лицо, выполняющее переключение, получив разрешение контролирующего лица, выполняет операцию;

- после выполнения операции контролирующее лицо в бланке (типовом бланке) переключений делает отметку об ее выполнении.

4. При производстве переключений оперативным персоналом по бланку (типовому бланку) переключений единолично лицо, выполняющее переключение, зачитывает по бланку (типовому бланку) переключений предстоящую операцию, убеждается в правильности выбранного присоединения, аппарата, устройства, ключа управления, накладки, испытательного блока, привода, после чего выполняет операцию и делает отметку об ее выполнении.

5. Переключения без бланка (типового бланка) переключений должны производиться оперативным персоналом в последовательности, указанной в 4 (за исключением зачитывания операции непосредственно перед выполнением переключения), с фиксацией выполненной операции в оперативном журнале.[27]

### **3.2 Проведение операций с выключателями, разъединителями, отделителями и выключателями нагрузки**

1. Операции с коммутационными аппаратами, не связанные с предотвращением развития и ликвидацией нарушений нормального режима,

должны производиться при введенных в работу РЗ от всех видов повреждений, в зону действия которых входят коммутационные аппараты, и УРОВ.

Если на время проведения операций какие-либо из этих защит не могут быть введены в работу или должны быть выведены из работы по принципу действия, следует ввести в работу оперативное ускорение резервных защит либо ввести временную защиту, в том числе неселективную.

2. Операции с находящимися под напряжением шинными разъединителями и выключателями, примыкающими к шинам, необходимо выполнять при введенных в работу ДЗШ и УРОВ.

Допускается при выведенных ДЗШ или УРОВ выполнять операции с находящимися под напряжением шинными разъединителями с дистанционным приводом и выключателями, примыкающими к шинам, при введенных временных защитах или ускорениях соответствующих резервных защит.

Для предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима допускается при выведенной ДЗШ или УРОВ выполнять операции под напряжением шинными разъединителями и выключателями, примыкающими к шинам, при введенных ускорениях соответствующих резервных защит или введенных временных защитах.

При необходимости кратковременного (до 30 мин) вывода ДЗШ допускается не вводить ускорение резервных защит. При этом запрещается выполнять в зоне действия упомянутой защиты операции разъединителями и выключателями.

3. Выполняющий переключения оперативный персонал должен располагаться в безопасной зоне, определяемой с учетом местных условий, конструктивных особенностей оборудования и по указанию лица, контролирующего переключения.

При производстве переключений не допускается пребывание лиц, не участвующих в переключениях, на расстоянии от коммутационных аппаратов, не обеспечивающем безопасность персонала в случае повреждения.

4. При наличии дистанционного управления коммутационным аппаратом операции по отключению и включению данного коммутационного аппарата должны производиться дистанционно.

5. При наличии в цепи присоединения выключателя операции по отключению и включению под напряжение и в работу присоединения должно производиться выключателем.[28]

С помощью местного управления отключение и включение выключателя допускается производить в электроустановках, не оборудованных дистанционным управлением. При этом операции с масляными выключателями напряжением 6 или 10 кВ в распределительных устройствах, не имеющих сплошной защитной стенки, необходимо производить с использованием выносных пультов.

В случае отказа в отключении при дистанционном управлении выключателем не допускается его отключение с помощью местного управления (во избежание несчастного случая). Для вывода выключателя в ремонт в этом случае должно быть снято напряжение с соответствующей системы (секции) шин или участка электроустановки или применены другие способы, предусмотренные местной инструкцией по предотвращению развития и ликвидации нарушений нормального режима. Отключение такого выключателя с помощью местного управления допускается только для снятия напряжения с пострадавшего.

Отключение и включение выключателя (за исключением воздушного), оборудованного дистанционным управлением, с помощью местного управления допускается, если отсутствует рабочее напряжение на обоих полюсах вводов выключателя. Отключение и включение воздушных выключателей в процессе ремонтных работ должно выполняться дистанционно со щита управления или с пульта после удаления персонала на безопасное расстояние или в укрытие.[29]

Оперативный персонал, производящий включение выключателя, должен контролировать показания измерительных приборов включаемого

присоединения. При признаках, характерных для короткого замыкания или несинхронного включения, оперативный персонал должен отключить выключатель, не дожидаясь его отключения действием РЗА.

6. На объектах электроэнергетики, оснащенных средствами дистанционного управления коммутационными аппаратами с технической возможностью перевода функций управления на другие объекты электроэнергетики, ЦУС, НСО, ДЦ, должен быть установлен порядок выполнения такого перевода. Запрещается одновременное дистанционное управление (телеуправление) коммутационными аппаратами с разных рабочих мест.

7. При выполнении операций с разъединителями на присоединении, отключенном выключателем, должны быть приняты меры, исключающие самопроизвольное или ошибочное включение выключателя.

При выполнении операций разъединителями с ручным приводом, не находящимися под напряжением, должны быть приняты меры, исключающие самопроизвольное или ошибочное включение выключателей присоединений, при самопроизвольном или ошибочном включении которых разъединителем будет коммутироваться недопустимый ток (зарядный ток ЛЭП, ток нагрузки и т. п.).

В местных инструкциях по производству переключений должны быть описаны меры, исключающие самопроизвольное или ошибочное включение выключателя в зависимости от типа выключателя и его привода.

8. Перед проведением операций с разъединителями и отделителями напряжением 35 кВ и выше с ручным приводом должен производиться их осмотр, в том числе с применением бинокля. Для разъединителей и отделителей с дистанционным управлением необходимость осмотра должна определяться техническим руководителем субъекта электроэнергетики (потребителя электрической энергии) или соответствующего его филиала.

Запрещается производить операции с разъединителями при обнаружении дефектов и повреждений, препятствующих производству

переключений. Характер дефектов и повреждений, при которых запрещается выполнение операций с разъединителями, должен быть определен местной инструкцией по производству переключений (по эксплуатации разъединителей).

9. Не рекомендуется выполнять операции с разъединителями под напряжением, если в процессе производства переключений эти операции могут быть выполнены, когда напряжение с разъединителей будет снято отключением соответствующего выключателя.

10. Включение разъединителей с применением ручных приводов должно выполняться быстро, но без удара в конце хода. При появлении дуги между контактами начатая операция включения должна быть продолжена до конца.

Отключение разъединителей с применением ручных приводов должно выполняться осторожно. Сначала должно делаться небольшое движение рычагом привода, чтобы убедиться в отсутствии качаний и поломок изоляторов. Если при расхождении контактов между ними возникнет дуга, разъединитель должен быть возвращен во включенное положение и до выяснения причины возникновения дуги операции с ним не выполняются. Исключения составляют операции по отключению разъединителями намагничивающего тока силовых трансформаторов, зарядного тока воздушных и кабельных линий, СШ. Отключение разъединителей в этих случаях должно выполняться быстро, чтобы обеспечить гашение дуги. При этом оперативный персонал, выполняющий операцию, должен располагаться под защитным козырьком.

Оперативный персонал до и после проведения операции с разъединителями с ручным приводом должен убедиться в том, что произошла фиксация стержней блокирующих замков блокировки безопасности разъединителей.

11. Перед отключением выключателя нагрузки должно быть проверено значение тока в отключаемой цепи, которое не должно превышать значения номинального тока аппарата.

### **3.3 Операции с коммутационными аппаратами присоединений линий, трансформаторов (автотрансформаторов), синхронных компенсаторов и генераторов**

1. ЛЭП, электрооборудование должны находиться в работе (под напряжением) только с введенными устройствами РЗ от всех видов повреждений.

2. При выводе из работы ЛЭП и оборудования на объектах электроэнергетики при раздельной работе Т (АТ) по стороне среднего и низшего напряжения допускается кратковременно на время перевода нагрузки включение на параллельную работу Т (АТ) по сторонам среднего и низшего напряжения. Для этого должны быть замкнуты шунтирующие связи на стороне высшего напряжения, определены допустимые параметры (уровни напряжения, перетоки мощности по ЛЭП и т. п.), при которых допускается включение на параллельную работу Т (АТ) [проведены необходимые расчеты уравнивающих токов через Т (АТ) при их параллельной работе].

При выводе из работы и вводе в работу ЛЭП, оснащенных устройствами АПВ (трехфазными или однофазными), операции с АПВ в зависимости от их схемы и конструкции должны выполняться в соответствии с указаниями инструкций по оперативному обслуживанию (эксплуатации) устройств РЗА.[28]

### **3.4 Операции при выводе из работы и вводе в работу ЛЭП**

1. При выводе из работы ЛЭП, работающей в тупиковом режиме, первым должен отключаться выключатель со стороны нагрузки, вторым – со стороны питания.

Ввод в работу осуществляется в обратной последовательности.

2. При выводе из работы ЛЭП, отходящей от электростанции, первым, как правило, должен отключаться выключатель со стороны электростанции.

Подача напряжения на линию при ее включении должна производиться, как правило, со стороны энергосистемы.

В местных инструкциях по производству переключений должен быть определен порядок подачи и снятия напряжения с ЛЭП, а также допустимость его изменения с указанием выполнения необходимых мероприятий.

3. Вывод в резерв одной из двух ЛЭП, имеющих общий выключатель, когда обе ЛЭП находятся в работе, должен выполняться в такой последовательности:

- 1) отключить выключатели обеих ЛЭП со стороны нагрузки;
- 2) отключить выключатель ЛЭП, имеющих общий выключатель, со стороны питания;
- 3) отключить линейные разъединители с обеих сторон отключаемой ЛЭП;
- 4) включить выключатель ЛЭП, имеющих общий выключатель, со стороны питания;
- 5) включить выключатель остающейся в работе ЛЭП со стороны нагрузки.

4. Порядок вывода из работы и ввода в работу ЛЭП устанавливается ДЦ и ЦУС, НСО в соответствии с установленным распределением по способу управления.[28]

## 4 ИНСТРУКЦИЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ ПО ОПЕРАТИВНЫМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

### 4.1 Общие требования охраны труда

1. Инструкция по охране труда является основным документом, устанавливающим правила поведения при выполнении оперативных переключений в распределительных сетях и требования безопасности при выполнении данного вида работ.

2. К работе по оперативным переключениям в распределительных сетях допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие предварительный медицинский осмотр и не имеющие противопоказаний к выполнению оперативных переключений в распределительных сетях, имеющие соответствующую группу по электробезопасности.

3. После прохождения подготовки и проверки знаний работник получает право на выполнение оперативных переключений, оформленное распорядительным документом по предприятию.

4. Работник, производящий оперативные переключения в распределительных сетях, должен:

- соблюдать требования настоящей инструкции;
- немедленно сообщать непосредственному руководителю, а при его отсутствии – мастеру о произошедшем несчастном случае и обо всех замеченных им неисправностях сооружений, оборудования и защитных устройств;
- помнить о личной ответственности за несоблюдение требований техники безопасности;
- содержать в чистоте и порядке рабочее место и оборудование;
- обеспечивать на своем рабочем месте сохранность средств защиты, инструмента, приспособлений, средств пожаротушения и документации по охране труда.

5. Работник, выполняющий оперативные переключения в распределительных сетях, должен проходить:

- целевой инструктаж непосредственно перед проведением работ;
- повторный инструктаж не реже одного раза в месяц;
- противоаварийные тренировки не реже одного раза в 3 месяца;
- противопожарные тренировки не реже одного раза в полугодие;
- проверку знаний требований охраны труда при эксплуатации электроустановок не реже одного раза в год;
- проверку знаний ПТЭ, ППБ должностных и производственных инструкций не реже одного раза в три года;
- медицинский осмотр не реже одного раза в два года при выполнении верхолазных работ;
- внеплановый инструктаж или внеочередную проверку знаний в соответствии с правилами организации работы с персоналом на предприятиях и в учреждениях энергетического производства;
- при несчастном случае обязан оказать первую помощь пострадавшему до прибытия медицинского персонала.

6. ЗАПРЕЩАЕТСЯ работать неисправными приспособлениями, инструментом и средствами защиты.

7. Невыполнение требований инструкции по охране труда для работника, выполняющего оперативные переключения в распределительных сетях, рассматривается как нарушение производственной дисциплины. За нарушение требований инструкции он несет ответственность в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации.

8. В процессе работы на лицо, выполняющее работы по оперативным переключениям в распределительных сетях, могут воздействовать следующие опасные и вредные производственные факторы:

- вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его заболеванию;

— опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести его к травме;

— имеют место следующие опасные и вредные производственные факторы;

— повышенное значение напряжения электрической цепи;

— пониженная температура воздуха рабочей зоны при выполнении работ вне помещений;

— работа на высоте.

9. Для защиты от воздействия опасных и вредных факторов необходимо применять соответствующие средства индивидуальной защиты.

10. Для защиты от поражения электрическим током необходимо применять электрзащитные средства: диэлектрические перчатки, боты, галоши, ковры, подставки, накладки, колпаки, заземляющие устройства, изолирующие штанги и клещи, указатели напряжения, слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками, ограждающие устройства, плакаты и знаки безопасности.

11. Работу в зонах с низкой температурой окружающего воздуха следует производить в теплой спецодежде с интервалами времени для обогрева.

12. При нахождении в помещениях с действующим технологическим оборудованием (за исключением щитов управления), а также участвующий в обслуживании и капитальном ремонте ВЛ обязан носить защитную каску для защиты головы от ударов случайными предметами.

13. При работе на высоте 1,3 м и более над уровнем земли, пола, площадки необходимо применять предохранительный пояс.

14. Лицу, выполняющему работу по оперативным переключениям в распределительных сетях должно быть бесплатно выдано: спецодежда, спецобувь, а именно х/б костюм, куртка и брюки на утепляющей прокладке, ботинки и сапоги кирзовые, х/б рукавицы и средства индивидуальной защиты: защитная каска, сигнализатор напряжения, костюм из огнестойкого материала, устойчивый к воздействию электрической дуги, перчатки

термостойкие, перчатки диэлектрические, галоши диэлектрические, пояс предохранительный, каска термостойкая с защитным экраном для лица, подшлемник термостойкий, очки защитные, костюм рабочий из огнестойкого материала, устойчивого к воздействию электрической дуги (зимний), рукавицы хлопчатобумажные теплые.

15. Применяемые средства защиты и спецодежда должны соответствовать стандартам и техническим условиям на их изготовление.

16. Необходимо соблюдать следующие гигиенические требования:

- мыть руки с мылом перед принятием пищи;
- не применять для мытья рук бензин, керосин и различные растворители;
- принимать пищу только в специально отведенном месте;
- использовать для питья только питьевую воду;
- спецодежду, спецобувь и средства индивидуальной защиты содержать в чистоте и хранить в специально отведенном месте.

17. Строго соблюдать правила внутреннего распорядка предприятия.

18. Курить на территории предприятия и в производственных помещениях разрешается в специально отведенных и оборудованных для этого местах.

19. Недопустимо распитие спиртных напитков во время работы на территории и в помещениях предприятия, а также появление на работе в нетрезвом виде.

20. В соответствии с Федеральным законом № 181 от 17.07.1999 г. каждый работник имеет право на:

- обязательное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- получение информации об условиях труда и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья;
- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;

— обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;

— внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы и среднего заработка на время прохождения осмотра;

— обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты за счет работодателя;

— отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда;

— личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания.

21. Гарантии права работников на труд в условиях, соответствующих требованиям охраны труда:

— условия труда, предусмотренные трудовым договором, должны соответствовать требованиям охраны труда;

— в случае, не обеспечения работника средствами индивидуальной и коллективной защиты работодатель не вправе требовать от работника выполнения трудовых обязанностей;

— в случае причинения вреда жизни и здоровья работника при выполнении им трудовых обязанностей возмещение указанного вреда осуществляется в соответствии с законодательством РФ.

22. Работник, допустивший нарушение или невыполнение требований инструкции по охране труда, рассматривается, как нарушитель производственной дисциплины и может быть привлечен к дисциплинарной ответственности, а в зависимости от последствий — и к уголовной; если нарушение связано с причинением материального ущерба, то виновный может привлекаться к материальной ответственности в установленном порядке.[29]

## **4.2 Требования охраны труда перед началом работы**

1. Осмотреть и привести в порядок спецодежду. Рукава и полы спецодежды следует застегнуть на все пуговицы, волосы убрать под каску. Одежду необходимо заправить так, чтобы не было свисающих концов. Обувь должна быть закрытой и на низком каблуке. ЗАПРЕЩАЕТСЯ засучивать рукава спецодежды.

2. Проверить:

— укомплектованность и пригодность средств защиты и приспособлений.

— отсутствие внешних повреждений, (целостность лакового покрова изолирующих средств защиты);

— отсутствие проколов, трещин, разрывов у диэлектрических перчаток и бот, целостность стекол защитных очков);

— у монтерских когтей и лазов необходимо проверить целостность сварных швов, твердосплавных шипов и их затяжку, целостность прошивки ремней и пряжек;

— дату следующего испытания (срок годности определяется по штампу).

3. Средства защиты, приборы, инструмент и приспособления с дефектами или с истекшим сроком испытания необходимо изъять и сообщить об этом своему непосредственному руководителю.

4. Необходимо ознакомиться с нарядами, выданными бригадам на производство работы.[29]

## **4.3 требования охраны труда во время работы**

1. Проверить на рабочем месте целостность элементов защитного заземления оборудования, отсутствие разрушений железобетонных опор, а также целостность изоляторов коммутационных аппаратов.

2. ЗАПРЕЩАЕТСЯ в электроустановках приближение людей, механизмов и грузоподъемных машин к находящимся под напряжением не огражденным токоведущим частям на расстояния, менее указанных в таблице.

3. ЗАПРЕЩАЕТСЯ в электроустановках выше 1000 В при осмотре входить в помещения, камеры, не оборудованные ограждениями или барьерами, препятствующими приближению к токоведущим частям на расстояния менее указанных в таблице выше.

4. ЗАПРЕЩАЕТСЯ открывать двери ограждений и проникать за ограждения и барьеры.

5. При выполнении работ на токоведущих частях, находящихся под напряжением до 1000В, необходимо:

— оградить расположенные вблизи рабочего места другие токоведущие части, находящиеся под напряжением, к которым возможно случайное прикосновение;

— работать в диэлектрических перчатках;

— применять инструмент с изолирующими рукоятками (у отверток должен быть изолирован стержень).

6. ЗАПРЕЩАЕТСЯ работать в одежде с короткими или засученными рукавами, а также пользоваться ножовками, напильниками, металлическими метрами и т.п.

7. ЗАПРЕЩАЕТСЯ производить переключения, если непонятна его цель и очередность выполнения операции.

8. При включении-отключении коммутационных аппаратов и наложении переносных заземлений (ПЗ) необходимо соблюдать следующие меры безопасности:

— на ВЛ, отключенных для сдачи в ремонт устанавливать, а затем снимать переносные заземления и включать имеющиеся на опорах заземляющие ножи должны два работника из числа оперативного персонала: один, имеющий группу IV (на ВЛ напряжением выше 1000 В) или группу III (на ВЛ напряжением до 1000 В), второй – имеющий группу III. Допускается

использование второго работника, имеющего группу III, из числа ремонтного персонала, а на ВЛ, питающих потребителя — из числа потребителя. Отключать заземляющие ножи разрешается одному работнику с группой III оперативного персонала;

— в электроустановках напряжением выше 1000 В устанавливать переносные заземления должны не менее двух человек: один — имеющий группу IV (из числа оперативного персонала), другой — имеющий группу III;

— перед установкой переносных заземлений должно быть проверено отсутствие напряжения на токоведущих частях (исправность указателя напряжения должна быть проверена специальным прибором или на действующей установке);

— при установке ПЗ ЗАПРЕЩАЕТСЯ касаться заземляющего спуска;

— переключения коммутационных аппаратов выше 1000 В с ручным приводом необходимо производить в диэлектрических перчатках.

9. Перед производством переключений следует убедиться в правильности выбранного присоединения и коммутационного аппарата.

10. ЗАПРЕЩАЕТСЯ самовольно нарушать блокировку.

11. Перед тем как отключить или включить разъединитель, отделитель необходимо тщательно их осмотреть и определить техническое состояние.

12. При обнаружении на перечисленных коммутационных аппаратах трещин на изоляторах и других повреждений — операции с ними ЗАПРЕЩАЮТСЯ.

13. Вначале операций с разъединителем делают пробное движение рычагом привода для того, чтобы убедиться в исправности тяг, отсутствии качаний и поломок изоляторов.

14. Включение разъединителей ручным приводом производят быстро, но без удара в конце хода. При появлении дуги ножи не следует отводить обратно, так как при расхождении контактов дуга может удлиниться и вызвать короткое замыкание. Операция включения во всех случаях должна продолжаться до конца.

15. Отключение разъединителей следует производить медленно и осторожно.

16. Если в момент расхождения контактов между ними возникает сильная дуга, разъединители необходимо немедленно включить и до выяснения причин образования дуги операции с ними не производить, кроме случаев отключения намагничивающих и зарядных токов. Операции в этих случаях должны производиться быстро, чтобы обеспечить погасание дуги на контактах.

17. При замыкании на землю в электроустановках 6-10 кВ приближаться к обнаруженному месту замыкания на расстоянии менее 4 м в ЗРУ, а также на ВЛ не менее 10 м допускается только для оперативных переключений с целью освобождения людей, попавших под напряжение и локализации повреждений. При этом следует пользоваться электрозщитными средствами.

18. Снимать и устанавливать предохранители необходимо при снятом напряжении.

19. При этом должны быть выполнены и остальные технические мероприятия (проверка отсутствия напряжения, наложение заземлений и т.д.).

20. Под напряжением, но без нагрузки допускается снимать и устанавливать предохранители на присоединениях, в схеме которых отсутствуют коммутационные аппараты, позволяющие снимать напряжение.

21. Под напряжением и под нагрузкой можно заменять предохранители трансформаторов напряжения.

22. При снятии и установке предохранителей под напряжением необходимо пользоваться следующими средствами защиты:

— в электроустановках до 1000 В – изолирующими клещами или диэлектрическими перчатками и защитными очками;

— в электроустановках выше 1000 В – изолирующими клещами (штангой) с применением диэлектрических перчаток и защитных очков.

23. ЗАПРЕЩАЕТСЯ применять некалиброванные предохранители. Предохранители должны соответствовать току и напряжению.

24. В электроустановках до 1000 В не допускается применение «контрольных» ламп для проверки отсутствия напряжения в связи с опасностью травмирования электрической дугой и осколками стекла.

25. В электроустановках выше 1000 В пользоваться указателями напряжения необходимо в диэлектрических перчатках.[29]

#### **4.4 Требования охраны труда в аварийных ситуациях**

1. В случае возникновения аварийной ситуации (несчастного случая, пожара, стихийного бедствия) следует немедленно прекратить работу и сообщить о ситуации вышестоящему оперативному персоналу.

2. В случаях, не терпящих отлагательств, следует выполнить необходимые переключения в электроустановке с последующим уведомлением вышестоящего оперативного персонала.

3. В случае возникновения пожара:

3.1. Оповестить всех работающих в производственном помещении и принять меры к тушению очага возгорания. Горящие части электроустановок и электропроводку, находящиеся под напряжением, следует тушить углекислотными огнетушителями.

3.2. Принять меры к вызову на место пожара своего непосредственного руководителя или других должностных лиц.

3.3. В соответствии с оперативной обстановкой следует действовать согласно местному оперативному плану пожаротушения.

4. При несчастном случае необходимо немедленно освободить пострадавшего от воздействия травмирующего фактора, оказать ему первую помощь и сообщить непосредственному руководителю о несчастном случае. Вызвать бригаду скорой помощи по телефону 103.

5. При освобождении пострадавшего от действия электрического тока необходимо следить за тем, чтобы самому не оказаться в контакте с токоведущей частью или под шаговым напряжением.

6. По возможности сохранить обстановку, если это не приведет к аварии и/или травмированию других людей, или зафиксировать на фото- , видео.

#### **4.5 Требования охраны труда по окончании работы**

1. Внести в схему и оперативную документацию изменения, произошедшие в течение рабочего дня.

2. После окончания производства работ необходимо привести в порядок рабочее место. Средства защиты убрать в отведенные для них места

3. Снять спецодежду, убрать ее и другие средства индивидуальной защиты в шкаф для рабочей одежды.

4. Доложить об окончании работ и обо всех замеченных в процессе работы неполадках и неисправностях применяемого инструмента и оборудования, а также о других нарушениях требований охраны труда непосредственному руководителю.[30]

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации были исследованы принципы синхронной коммутации выключателей для снижения коммутационных перенапряжений. Произведен расчет параметров синхронизации. Проанализированы современные способы и устройства защиты от коммутационных перенапряжений.

Таким образом можно сделать следующие выводы:

1. Снижение амплитуды переходных процессов связано с использованием специальных средств ограничения: нелинейных ограничителей перенапряжения, RC-цепей, постоянно включенных реакторов или предвключаемых резисторов. Применение указанных средств не всегда оказывается эффективным или экономически выгодным и не решает проблему кардинально, так как коммутация может произойти в наихудшей фазе напряжения.

2. Одним из наиболее перспективных способов решения проблемы уменьшения перенапряжений и бросков тока является применение принципов управляемой коммутации. В нормальных режимах работы управляемая коммутация реактивных нагрузок позволяет существенно уменьшить броски тока и снизить вероятность возникновения перенапряжений. Управляемое отключение токов короткого замыкания способно обеспечить уменьшение электрической эрозии частей дугогасительного устройства и повышение ресурса выключателя.

3. Принцип управляемого отключения заключается в размыкании контактов выключателя в определенный момент времени с опережением перехода отключаемого тока через ноль. Управляемое включение представляет собой процесс замыкания контактов выключателя в определенный момент времени с опережением перехода напряжения источника через ноль.

Применение устройств синхронной коммутации в РФ актуально.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Евдокунин, Г.А., Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и эксплуатационные характеристики) / Г.А. Евдокунин, Г. Тилер. – СПб.: Изд-во Сизова М.П., 2000. – 114 с.

2 Кравченко, А. Вакуумные выключатели нагрузки зарубежных производителей / А. Кравченко, В. Метельский // Электрик. – 2013. – № 3.– С. 14–17.

3 Евдокунин, Г.А. Перенапряжения в электрических сетях /Г.А. Евдокунин, С.С. Титенков // Новости электротехники. – 2002. – № 5 (17). – С. 27–29.

4 Актуальные вопросы развития устройств синхронной коммутации [Электронный ресурс] URL:[http://www.asu-vei.ru/download/publications/reports/doklad\\_travek\\_2016\\_usk.pdf](http://www.asu-vei.ru/download/publications/reports/doklad_travek_2016_usk.pdf) (дата обращения: 25.04.2020)

5 Перспективы развития коммутационного оборудования [Электронный ресурс] URL:[https://studwood.ru/perspektivy\\_razvitiya\\_kommutatsionnoy.html](https://studwood.ru/perspektivy_razvitiya_kommutatsionnoy.html) (дата обращения: 26.04.2020)

6 Коммутационные перенапряжения [Электронный ресурс] URL:<https://pue8.ru/elektrotehnik/464-что-такое-перенапряжение-виды-перенапряжений-i-ikh-opasnost.html> (дата обращения: 28.04.2020)

7 Особенности защиты электрооборудования от коммутационных перенапряжений. // Саенко И.В., Кузнецов В.В., Пинская Д.Б., Генельт А.Е. // Энергия единой сети. 2016, № 24 С. 56 – 61.

8 Применение синхронной коммутации для ограничения коммутационных перенапряжений в электрических сетях [Электронный ресурс] URL: <http://keps.pro/news/primeneniye-kommutatsii-dlya-ogranicheniya>

[kommutatsionnykh-perenapryazheniy-v-elektricheskikh-setyakh/](#) (дата обращения: 03.05.2020)

9 Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы [Электронный ресурс] URL:[http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies\\_aas.pdf](http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf) (дата обращения: 05.05.2020)

10 Особенности реализации первичного и вторичного регулирования параметров электроэнергетических режимов URL:[http://d2\\_rus.cigre.ru/doc/Muzalev\\_S\\_G.pdf](http://d2_rus.cigre.ru/doc/Muzalev_S_G.pdf) (дата обращения: 05.05.2020)

11 Цифровая энергетика и виртуальные электростанции [Электронный ресурс] URL:<https://www.elec.ru/articles/cifrovaya-energetika-i-virtualnye-elektrostantsii/> (дата обращения: 06.05.2020)

12 Цифровая энергетика [Электронный ресурс] URL:<http://peretok.ru/articles/innovations/13216/> (дата обращения: 06.05.2020)

13 Коммутационно защитная аппаратура [Электронный ресурс] URL:[https://www.electroengineer.ru/2011/06/blog-post\\_6783.html](https://www.electroengineer.ru/2011/06/blog-post_6783.html) (дата обращения: 07.05.2020)

14 Применение синхронной коммутации для ограничения коммутационных перенапряжений [Электронный ресурс] URL:<http://keps.pro/news/primenenie-kommutatsii-dlya-ogranicheniya-kommutatsionnykh-perenapryazheniy-v-elektricheskikh-setyakh/> (дата обращения: 08.05.2020)

15 Руководство по защите электрических сетей напряжением 110-750 кВ от грозových и внутренних перенапряжений [Электронный ресурс] URL:[https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO\\_56947007-29.240.01.221-2016.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.01.221-2016.pdf) (дата обращения: 09.05.2020)

16 Классификация перенапряжений. Внутренние перенапряжения [Электронный ресурс] URL:<http://www.cpk-energo.ru/metod/Xalilov13.pdf> (дата обращения: 10.05.2020)

17 Актуальные вопросы развития устройств синхронной коммутации [Электронный ресурс]

URL:[http://www.asuvei.ru/download/publications/reports/doklad\\_travek\\_2016\\_us\\_k.pdf](http://www.asuvei.ru/download/publications/reports/doklad_travek_2016_us_k.pdf) (дата обращения: 10.05.2020)

18 Исследование процессов коммутации вакуумными выключателями индуктивной нагрузки и разработка технических требований к синхронным вакуумным выключателям [Электронный ресурс] URL:<https://www.dissercat.com/content/issledovanie-protssosov-kommutatsii-vakuumnymi-vyklyuchatelyami-induktivnoi-nagruzki-i-razra> (дата обращения: 10.05.2020)

19 Устройство управляемой коммутации [Электронный ресурс] URL:<https://findpatent.ru/patent/243/2432635.html> (дата обращения: 11.05.2020)

20 Устройство управления коммутационным оборудованием [Электронный ресурс] URL:[https://library.e.abb.com/public/efb7b6c66e3cd56cc125723a0031f3d5/1MRK511176-BRU\\_ru\\_Bay\\_control\\_IED\\_REC\\_670\\_pre-configured\\_\(russian\).pdf](https://library.e.abb.com/public/efb7b6c66e3cd56cc125723a0031f3d5/1MRK511176-BRU_ru_Bay_control_IED_REC_670_pre-configured_(russian).pdf) (дата обращения: 12.05.2020)

21 Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем [Электронный ресурс] URL:<http://docs.cntd.ru/document/1200158655> (дата обращения: 12.02.2020)

22 Перспективы развития коммутационных аппаратов высокого напряжения [Электронный ресурс] URL:[https://studwood.ru/1119776\\_fizika/perspektivy\\_razvitiya\\_kommutatsionnoy\\_apparatury\\_vysokogo\\_napryazheniya](https://studwood.ru/1119776_fizika/perspektivy_razvitiya_kommutatsionnoy_apparatury_vysokogo_napryazheniya) (дата обращения: 12.05.2020)

23 Эксплуатация высоковольтных выключателей переменного тока [Электронный ресурс] URL:<https://forca.ru/knigi/arhivy/ekspluatatsiya-vysokovoltnyh-vyklyuchateley-peremennogo-toka-22.html> (дата обращения: 13.05.2020)

24 Последнее поколение устройств синхронной коммутации [Электронный ресурс] URL:<https://new.abb.com/high-voltage/ru/monitoring->

[usloviy-i-upravliayemaya-commutacii/ustroystvo-switchsync](https://energybase.ru/equipment/ustroystvo-switchsync) (дата обращения: 15.05.2020)

25 Устройство синхронной коммутации высоковольтных выключателей АВМ СК [Электронный ресурс]

URL:<https://energybase.ru/equipment/ustroystvo-sinhronnoi-kommutatsii-visokovoltnih-viklyuchatelei-avm-sk> (дата обращения: 16.05.2020)

26 Оперативные переключения в электроустановках [Электронный ресурс] URL: <https://forca.ru/knigi/pravila/operativnye-pereklyucheniya-v-elektrostanovkah.html> (дата обращения: 16.05.2020)

27 Инструкция по переключениям в электроустановках [Электронный ресурс] URL: [https://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/norma/249462/](https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/249462/) (дата обращения: 16.05.2020)

28 Оперативные переключения в электроустановках [Электронный ресурс] URL:<https://tech.wikireading.ru/2709> (дата обращения: 16.05.2020)

29 Инструкция по охране труда при выполнении работ по оперативным переключениям в распределительных сетях [Электронный ресурс] URL: [https://xn-----7cdbxfuat6afkbmmhefunjo4bs9u.xn\\_85.html](https://xn-----7cdbxfuat6afkbmmhefunjo4bs9u.xn_85.html) (дата обращения: 16.05.2020)

30 Инструкция по охране труда для электромонтера по оперативным переключениям в распределительных сетях [Электронный ресурс] URL: [https://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/instructions/167/2823/](https://ohranatruda.ru/ot_biblio/instructions/167/2823/) (дата обращения: 16.05.2020)