

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого»

На правах рукописи

МИНГАЗОВ Радмир Ильмирович

**Исследование процессов в электроэнергетической системе с  
фазопоротным трансформатором при одновременном управлении  
потоками мощности и ограничении токов короткого замыкания**

Направление подготовки 13.06.01 – Электро- и теплотехника

---

*Код и наименование*

Направленность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

---

*Код и наименование*

Научный доклад

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: аспирант  
Мингазов Радмир Ильмирович

Научный руководитель: доктор  
технических наук, профессор  
Евдокунин Георгий Анатольевич

Санкт-Петербург – 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе электроэнергетических систем Института энергетики федерального автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/зав. кафедрой: Зверев Сергей Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Научный руководитель: Евдокунин Георгий Анатольевич

доктор технических наук, профессор

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Рецензент: Смолеников Сергей Владимирович

доктор технических наук, профессор

Акционерное общество «Научно-технический центр Единой энергетической системы Противоаварийное управление» (АО «НТЦ ЕЭС Противоаварийное управление»)

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте библиотеки по адресу: <https://elib.spbstu.ru/>

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Стабильное функционирование электроэнергетических систем (ЭЭС) зависит от множества факторов, обусловленных взаимным влиянием друг на друга различных элементов ЭЭС и режимов их работы. В процессе работы ЭЭС постоянно подвержена различным возмущениям, которые могут приводить к нарушению условий её нормального функционирования. Способность системы сохранять текущее состояние под малыми воздействиям, таким как малые изменения нагрузок, коммутация элементов электрической сети, изменения активной и реактивной генерируемой мощности электростанций, или большими воздействиями, такими как короткие замыкания, большие набросы или потеря нагрузок, отключения электроэнергетического оборудования вследствие работы защит и противоаварийной автоматики называют устойчивостью ЭЭС.

Повышение устойчивости ЭЭС является важной задачей в рамках развития ЭЭС. Наиболее ценными в данном вопросе являются методы повышения устойчивости энергосистемы за счет оптимального использования пропускных способностей существующих сетей без нового сетевого строительства. Тем не менее, часть существующих линий электропередачи 110-220 кВ находятся в отключенном состоянии, так как не могут быть введены в работу ввиду недопустимо больших токов короткого замыкания, превышающих отключающую способность выключателей, или недопустимого перетока активной мощности, приводящего к токовым перегрузкам электроэнергетического оборудования. Возникновение подобных электропередач обусловлено ростом потребления электроэнергии, переводом в кабельное исполнение воздушных ЛЭП, увеличением генераторных мощностей электростанций. Данные факторы приводят к существенному и чаще всего нежелательному изменению потокораспределения.

Осуществление деления электрической сети 110-220 кВ решает проблему ограничения ТКЗ, однако может приводить к токовым перегрузкам в примыкающей электрической сети, что приводит к необходимости дополнительного усиления электрических сетей, что в значительной степени увеличивает расходы сетевых организаций. Альтернативой является замыкание разомкнутых электропередач 220-110 кВ с введенным в цепь индуктивным сопротивлением, достаточным для ограничения ТКЗ, например токоограничивающий реактор. Однако большая величина индуктивного сопротивления может приводить к неоптимальному потокораспределению в нормальных и послеаварийных режимах работы, что приводит к необходимости применения устройств для управления потоками активной мощности, например фазоповоротный трансформатор.

Использование фазоповоротного комплекса, состоящего из фазоповоротного трансформатора и токоограничивающего реактора, может позволить включить в работу электропередачи, отключенные по критерию недопустимого уровня ТКЗ или недопустимого перетока активной мощности, повысив запасы устойчивости энергосистемы без применения дополнительного сетевого строительства.

Функционал фазоповоротного комплекса позволяет осуществлять регулирование перетока активной мощности электропередачи за счет изменения действующей положения отпайки устройства РПН, входящего в состав комплекса. Наличие у ФПК возможности изменения параметров режима позволяет рассматривать его как дополнительное устройство противоаварийного управления.

## **Цели и задачи научной работы**

Целью работы является исследование процессов в ЭЭС с применением фазоповоротных комплексов при одновременном управлении потоками мощности и ограничении токов короткого замыкания.

Задачами работы являются:

1. анализ существующих способов управления потоками активной мощности и методов ограничения токов короткого замыкания, выявление возможных проблем при совместном управлении потоками активной мощности и ограничении токов короткого замыкания;

2. создание математической модели ФПК с заданными параметрами фазового сдвига и индуктивного сопротивления устройства для расчета электромагнитных переходных процессов, связанных с коммутациями электропередачи с ФПК;

3. создание и проверка алгоритма автоматического поддержания заданного потока мощности с использованием устройства РПН ФПК при различных схемно-режимных ситуациях в ЭЭС;

4. исследование особенностей применения устройств РЗА при эксплуатации электропередачи с ФПК;

5. исследование возможности снятия ограничений выдачи мощности электростанции за счет установки ФПК.

### **Научная новизна**

1. Разработана компьютерная модель ФПК, позволяющего осуществлять регулирование потоков активной мощности в электропередачах, при ограничении токов короткого замыкания до значений, не превышающих отключающую способность выключателей;
2. Исследованы электромагнитные переходные процессы, возникающие при различных коммутациях электропередачи с ФПК;
3. Разработан алгоритм автоматического поддержания заданного потока активной мощности через электропередачу с помощью устройства РПН ФПК на основе контроля токовой загрузки электропередачи;
4. Разработаны рекомендации по выбору средств РЗА по защите электропередачи с ФПК.

### **Практическая значимость работы**

1. На основе конструктивных параметров ТОР и ФПТ, входящих в состав ФПК, создана компьютерная модель ФПК, учитывающая свойства материала его магнитопроводов и емкости обмоток.
2. Определен безопасный порядок объединения на параллельную работу двух энергорайонов за счет электропередачи с ФПК.
3. В программном комплексе «АТРdraw», предназначенном для расчета электромагнитных переходных процессов, разработан программный модуль, позволяющий поддерживать заданный переток активной мощности по электропередаче с ФПК.
4. В программном комплексе «RastrWin», предназначенном для расчета установившихся режимов, показана эффективность применения ФПК для снятия ограничений с выдаваемой электростанцией мощности.

### **Методы исследования**

Использовались методы математического моделирования ЭЭС, теории электрических машин, теории автоматического регулирования, численных методов решения дифференциальных уравнений. Моделирование было выполнено в ПК «АТРdraw», «RastrWin».

Защищаемые научные положения:

1. Компьютерная модель ФПК на основе данных о параметрах его конструкции.
2. Алгоритм автоматического поддержания заданного потока мощности с помощью регулирования отпайки РПН ФПК при различных режимах работы энергосистемы.
3. Применение ФПК в схеме выдачи мощности электростанции для снятия сетевых ограничений.

### **Степень достоверности**

Достоверность полученных результатов подтверждается результатами расчётов на математических моделях.

### **Апробация результатов работы**

Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical And Electronic Engineering (2017 EIConRus) (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2017);
2. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical And Electronic Engineering (2018 EIConRus) (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2018);

3. IEEE Conference Of Russian Young Researchers In Electrical And Electronic Engineering (2020 ElConRus) (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2020).

#### **Личный вклад автора**

Разработка и тестирование компьютерной модели ФПК для расчетов установившихся режимов и электромагнитных переходных процессов, определение безопасного порядка включения электропередачи с ФПК на примере электропередачи 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная в энергосистеме города Санкт-Петербурга и Ленинградской области, разработка и апробация алгоритма автоматического поддержания заданного потока мощности с помощью регулирования отпайки ФПК в электропередаче 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная, рекомендации для средств РЗА для электропередач с ФПК, демонстрация эффективности применения ФПК в схеме выдачи мощности Саратовской ГЭС.

#### **Публикации**

По теме диссертации в соавторстве опубликовано 5 печатных работ, из них 2 – в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведено обоснование актуальности выбранной темы исследования, цель и задачи научной работы, практическая значимость работы, научная новизна работы, защищаемые научные положения, апробация результатов работы, публикации и личный вклад автора.

**В первой главе** выполнен анализ существующие способов регулирования потоков активной мощности и ограничения токов короткого замыкания, определены возможные недостатки совместного управления потоками активной мощности и ограничения токов короткого замыкания.

**Во второй главе** приведено описание математической модели ФПК на основании конструктивных параметров ТОР и ФПТ. Моделируемый фазоповоротный комплекс состоит из последовательно включенных фазоповоротного трансформатора ТДФ-49866-110-У1 и токоограничивающего реактора РТД-37807-110-У1, конструктивные параметры которых получены от завода-изготовителя. На рисунке 1 показана схема замещения, отражающая электрическое соединение между обмотками.

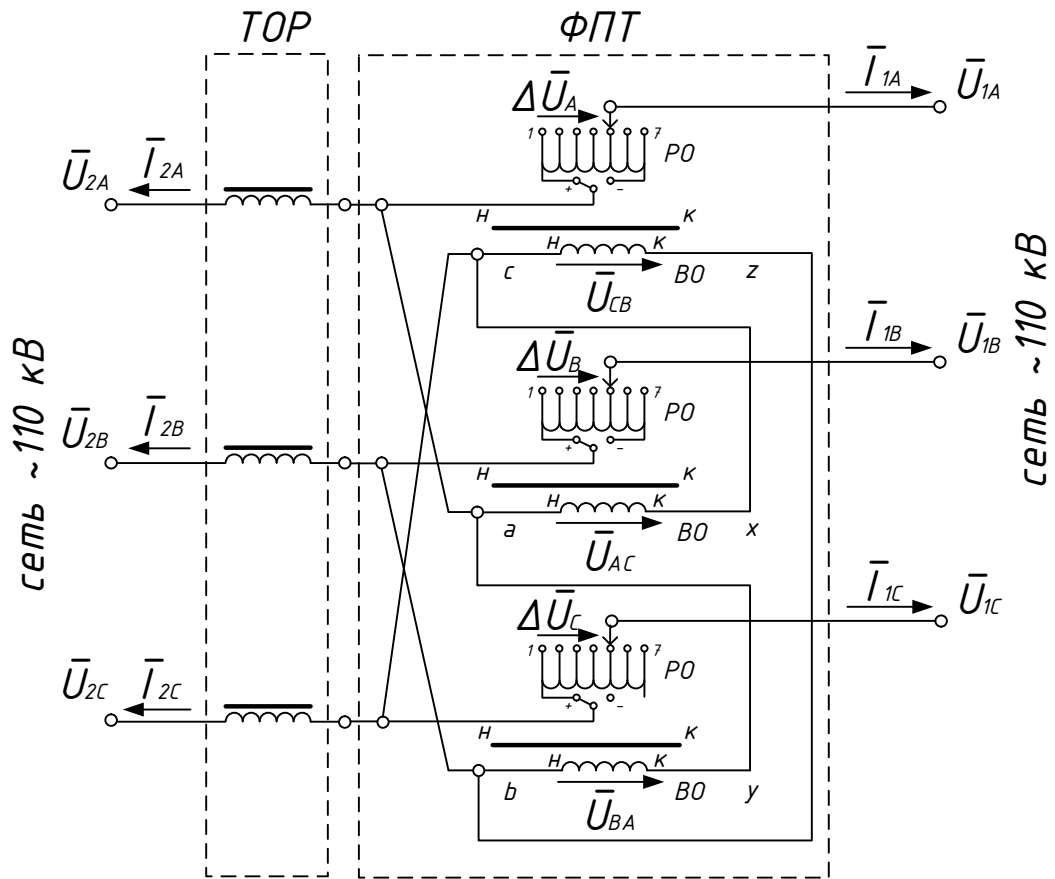


Рисунок 1 – Схема замещения электрической цепи ФПК

Конструктивная схема ФПТ представлена на рисунке 2,. Ярма и стержни магнитопровода устройства выполнены из электротехнической стали. Конструктивная схема ТОР представлена на рисунке 3, конструктивные параметры ТОР. Ярма магнитопровода устройства выполнены из электротехнической стали, а стержни магнитопровода – из дерева. При моделировании металлических частей магнитопровода было учтено свойство насыщения металла посредством учета нелинейной магнитной характеристики.

На обмотках ФПТ установлено устройство РПН, состоящее из 7 ступеней, также предусмотрена возможность регулирования как в положительном, так и в отрицательном направлении. На обмотках ТОР может быть установлено устройство ПБВ в случае необходимости изменения постоянного индуктивного сопротивления ТОР в зависимости от сезона. В данной работе наличие ПБВ не учитывалось.

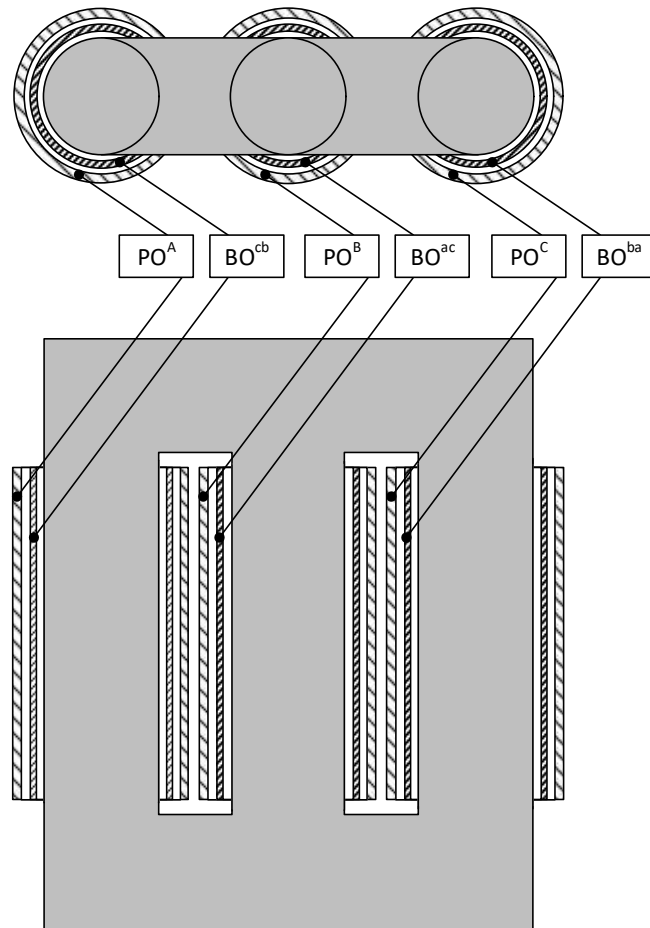


Рисунок 2 – Схема замещения магнитной цепи фазоповоротного трансформатора

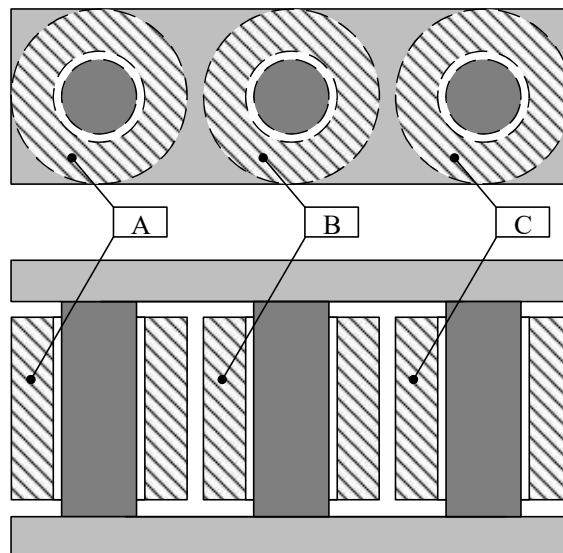


Рисунок 3 – Конструктивная схема токоограничивающего реактора

ТОР и ФПТ представляют собой два отдельных устройства, но соединительный провод между устройствами проходит по маслonaполненному каналу (рисунок 4).

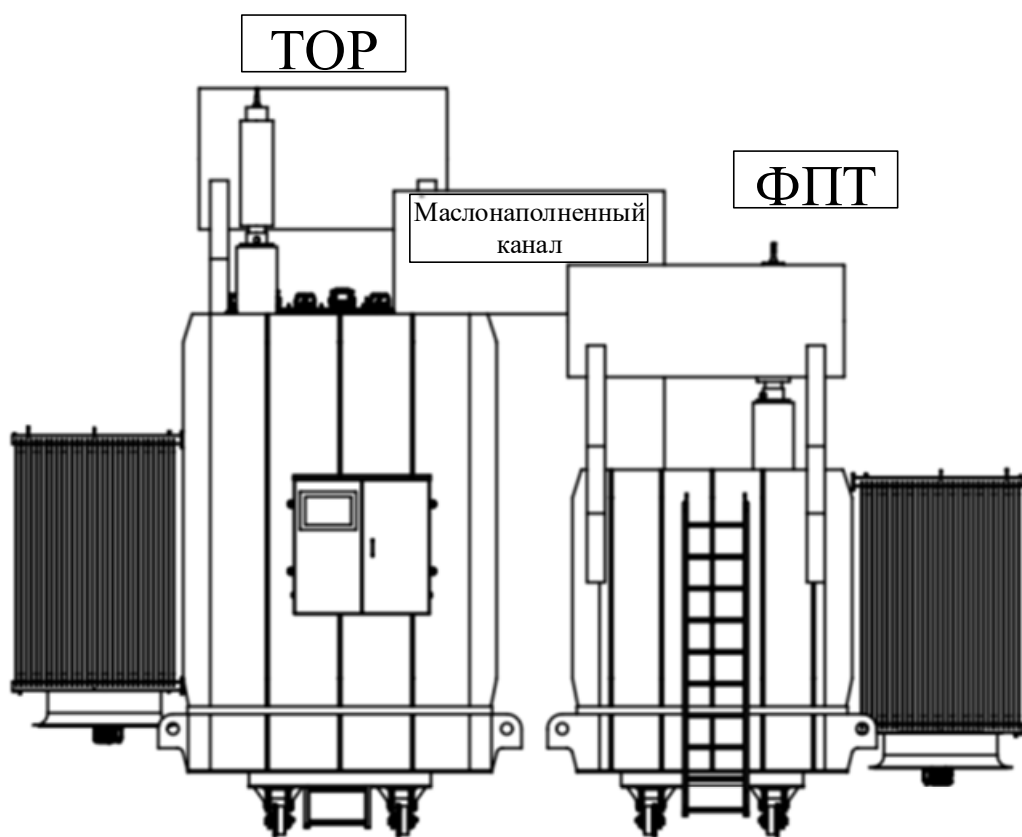


Рисунок 4 – Конструктивная схема соединения ТОР и ФПТ

На основании параметров конструкции для описания поведения магнитного поля в устройствах получены магнитные схемы замещения. Определены основные пути распространения магнитного потока ( $\Phi$ ) в магнитопроводе и по воздушным промежуткам вокруг магнитопровода. Магнитный поток на пути распространения встречает магнитное сопротивление ( $R$ ), обусловленное характеристиками среды. Магнитные сопротивления учтены в виде сосредоточенных элементов с учетом кривой намагничивания для участков магнитопровода выполненных из металла. Источники на схеме ( $F$ ) отражают МДС от протекания соответствующих токов в обмотках. Полученные магнитные схемы замещения ФПТ и ТОР представлены на рисунках 5 и 6 соответственно.

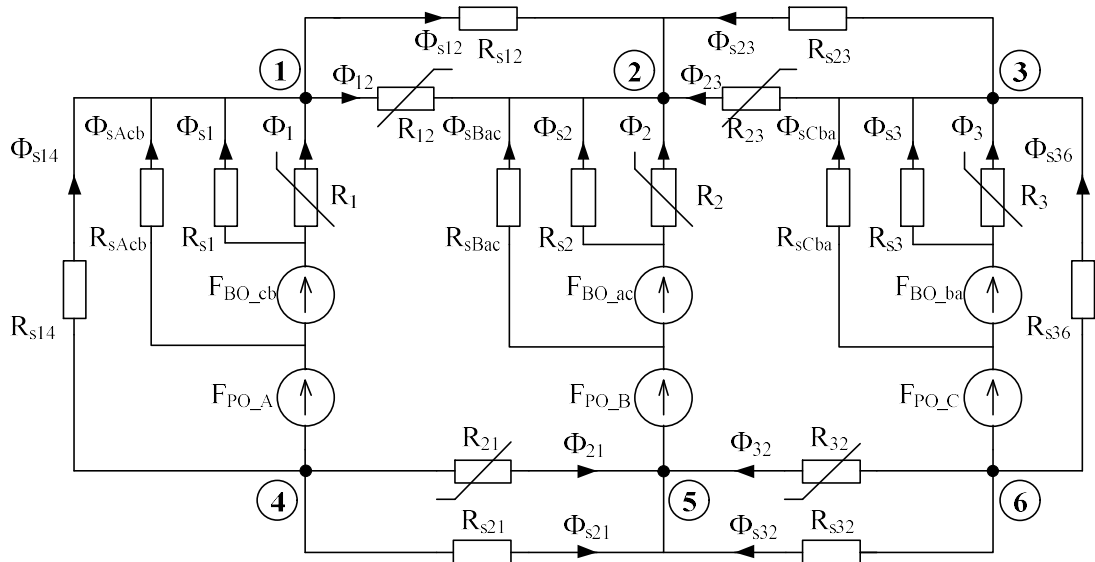


Рисунок 5 – Схема замещения магнитных цепей ФПТ

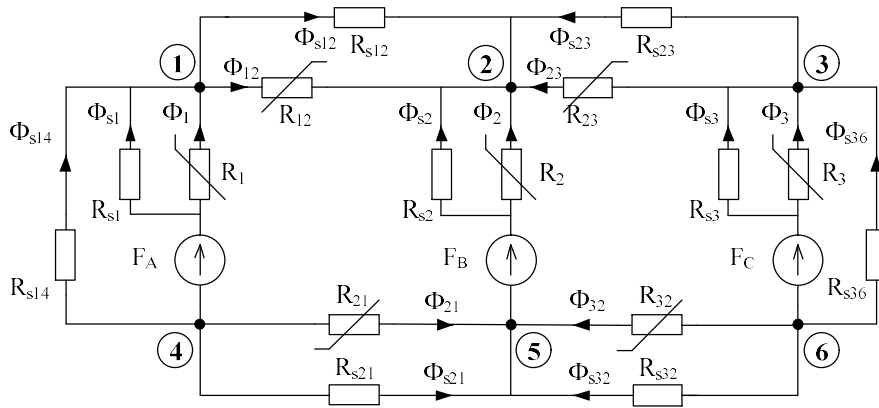


Рисунок 6 – Схема замещения магнитных цепей ТОР

На основании конструкции устройств вычислены значения магнитных сопротивлений исходя из формулы:  $R = l/(\mu\mu_0 S)$ , где  $l$ ,  $S$  – длина и сечение участка магнитной цепи,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость ( $\mu=1$  – для неметаллических участков магнитопровода,  $\mu=f(B)$  – для металлических участков магнитопровода учитывалось намагничивание стали).

Магнитные сопротивления представлены в виде сосредоточенных параметров, при расчетах принято допущение о постоянстве индукции  $B$  и напряженности  $H$  магнитного вдоль сечения участка магнитопровода.

Совместный расчет магнитных и электрических цепей является комплексной задачей, утяжеляющей расчетные условия. На основании

принципа дуальности из магнитной схемы замещения может быть получена дуальная электрическая схема замещения магнитных цепей устройства [1]. Дуальные схемы могут без проблем быть интегрированы в электрическую схему энергосистемы, что значительно упростит расчеты. Полученные дуальные электрических схем замещения магнитных цепей ФПТ и ТОР представлены на рисунках 7 и 8 соответственно.

Согласно принципу дуальности магнитной сопротивление схемы замещения магнитных цепей преобразуется в индуктивное сопротивление электрической схемы замещения магнитных цепей устройства по формуле:

$$L = w_{PO}^2 / R, \text{ где } w_{po} - \text{ количество витков обмотки.}$$

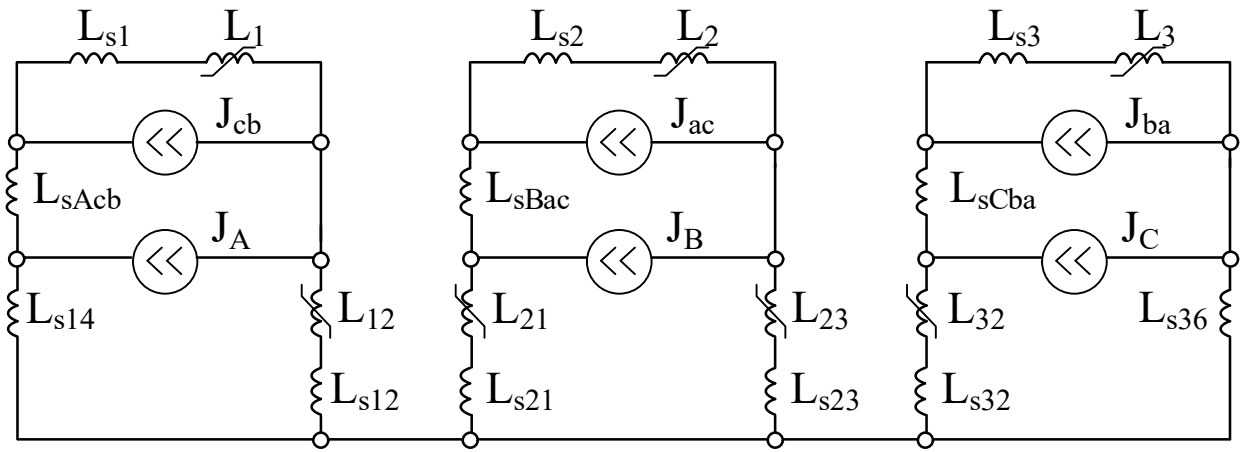


Рисунок 7 – Дуальная электрическая схема замещения магнитных цепей ФПТ

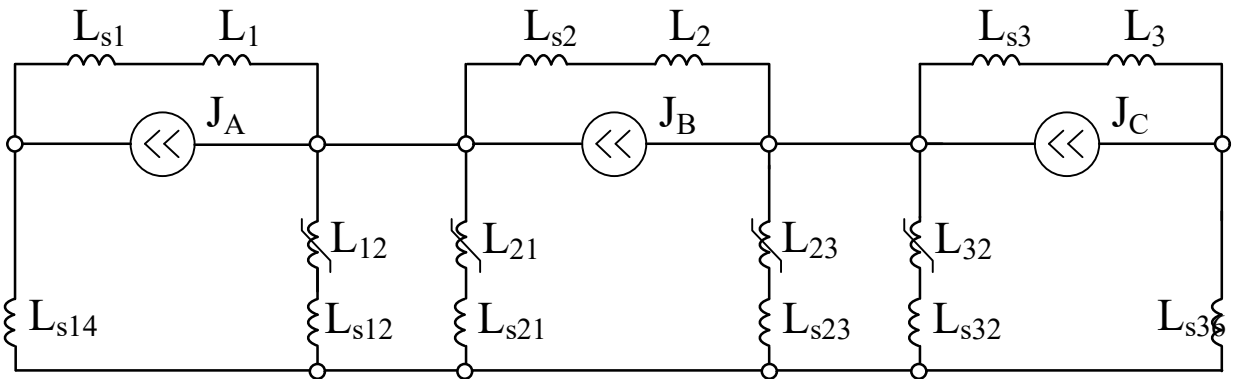


Рисунок 8 – Дуальная электрическая схема замещения магнитных цепей ТОР

Помимо прямого электрического соединения связь между обмотками устройств осуществляется не только через магнитное поле, но и через электрическое поле. Для более полного отображения процессов в устройствах при электромагнитных переходных процессах необходимо учесть емкостные связи между обмоток. Расчет емкостей производился на основе [2,3], проверка полученных значений емкостей осуществлена с помощью программно-вычислительного комплекса COMSOL.

Схематические изображения ФПТ с учетом емкостных связей между обмотками представлены на рисунке 9.

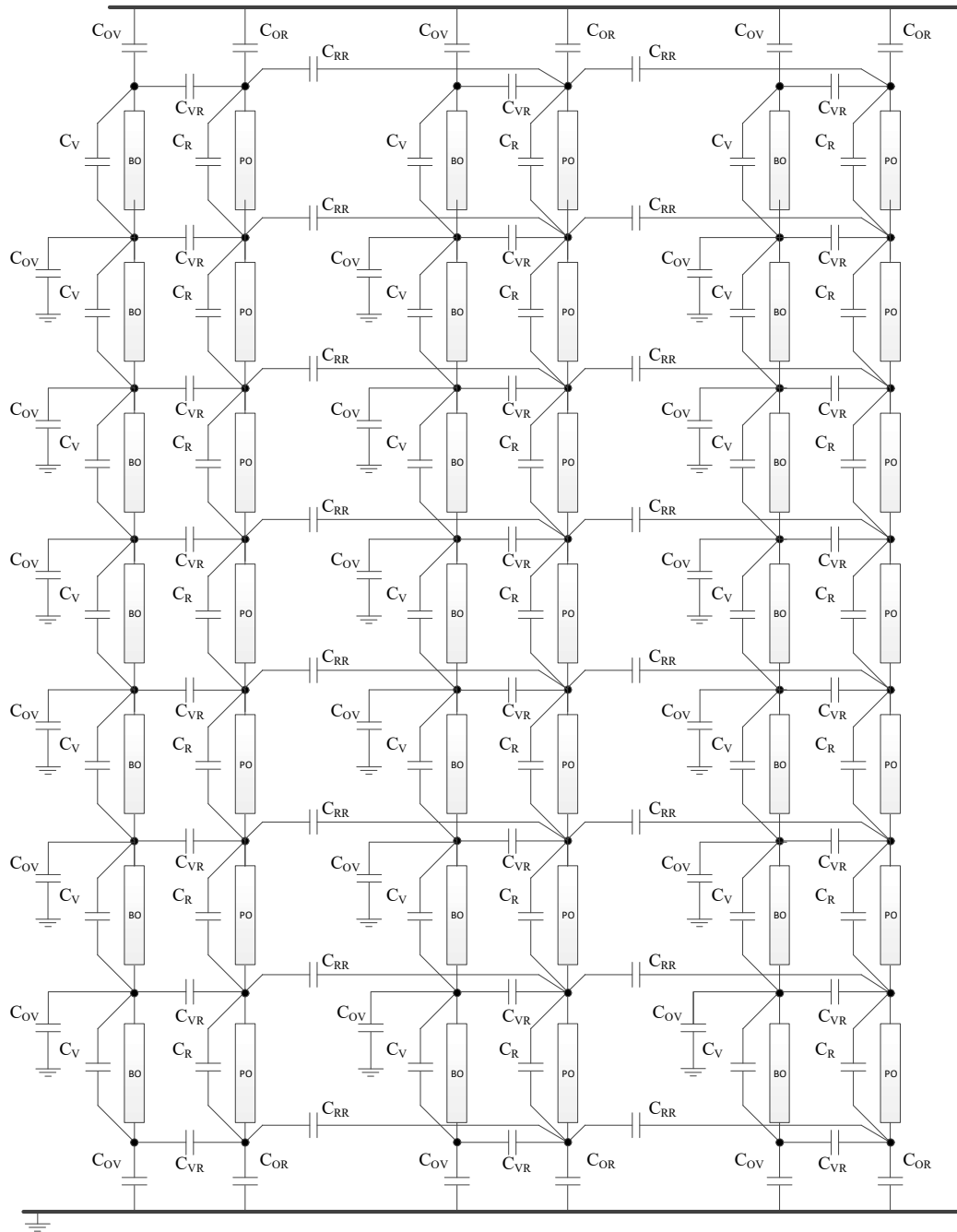


Рисунок 9 – Схематическое изображение ФПТ с учетом емкостных связей между обмотками

За основу принята электрическая схема замещения с разделением регулирующей обмотки ФПТ на 7 отпаяк РПН. Обмотки электрически связаны со стержнями и между собой через емкостные сопротивления. Сердечник ФПТ заземлен, следовательно, емкости между сердечником и обмотками являются емкостями между «землей» и обмотками. При определении значений емкостных сопротивлений использовались размеры ФПТ.

Емкости ФПТ:

- $C_R$  – продольная емкость регулирующей обмотки;
- $C_V$  – продольная емкость возбуждающей обмотки;
- $C_{RR}$  – емкость между фазами (между ближайшими регулируемыми обмотками);
- $C_{VR}$  – емкость между возбуждающей обмоткой и регулирующей обмоткой;
- $C_{OR}$  – емкость между регулирующей обмоткой и стержнем;
- $C_{OV}$  – емкость между возбуждающей обмоткой и стержнем.

Схематические изображения ТОР с учетом емкостных связей между обмотками представлены на рисунке 10. При расчете емкостных сопротивлений ТОР обмотка ТОР была разбита на две части исходя из трехточечной емкостной схемы замещения. При определении значений емкостных сопротивлений использовались размеры ТОР.

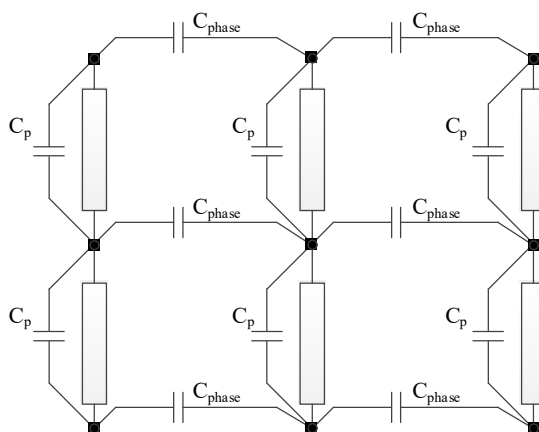


Рисунок 10 – Схематическое изображение ТОР с учетом емкостных связей между обмотками

Емкости ТОР:

- $C_{phase}$  – междуфазная емкость;
- $C_p$  – продольная емкость.

Также определены сопротивления воздушных промежутков для всех емкостных сопротивлений. Полученные активные сопротивления включаются последовательно с емкостными сопротивлениями для демпфирования колебаний, вносимых емкостями. Расчеты производились согласно формулы:  $R = 1/2\omega C$ .

Таким образом, получена математическая модель ФПК, основанная на конструктивных параметрах ФПТ и ТОР.

**В третьей главе** выполнены расчеты электромагнитных переходных процессов в транзитной электропередаче с учетом включения в работу с ФПК на базе реальной схемно-режимной ситуации в электрических сетях города Санкт-Петербурга и Ленинградской области (рисунок 11).

Электроснабжение потребителей Васильевского острова осуществляется через ПС 330 кВ Василеостровская, которая расположена на севере острова, и ПС 110 кВ Балтийская – на юге острова. На территории острова функционирует Василеостровская ТЭЦ-7, осуществляющая выдачу мощности через ПС 110 кВ Балтийская, РУ которой соединено с ПС 330 кВ Василеостровская и ПС 110 кВ Волхов-Южная, в юго-западном районе Санкт-Петербурга. Электропередача 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная образует ответвления потока активной мощности в обход сети 330 кВ между ПС 330 кВ Василеостровская и ПС 330 кВ Западная. Электропередача отключена по условиям недопустимой величины ТКЗ.

В качестве решения проблемы ограничения ТКЗ предлагалась установка ТОР, однако установка ТОР приводит к неоптимальному потокораспределению, которое в различных схемно-режимных ситуациях может приводить к перегрузкам электросетевого оборудования. Поэтому

помимо ограничения проблемы ограничения ТКЗ необходимо осуществить дополнительное управление потоками активной мощности электропередачи, что может быть реализовано за счет установки ФПТ.

Таким образом, электропередача 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная отключенная по условию ограничения ТКЗ может быть включена в работу за счет установки ФПК, состоящим из ТОР и ФПТ. Интересной особенностью данного ФПК является то, что наличие ТОР уменьшает требования к РПН ФПТ. При ТКЗ больше 12 кА РПН становится очень дорогим, а при ТКЗ выше 31.5 кА РПН не ставится, что необходимо учитывать при проектировании.

В качестве альтернативного решения проблемы ограничения ТКЗ в распределительных сетях может рассматриваться установка МТОУ [4–9], однако для рассматриваемых электрических сетей применение ФПК эффективнее, так как МТОУ меняет свое сопротивление в зависимости от режима работы, что утяжеляет схемно-режимную ситуацию.

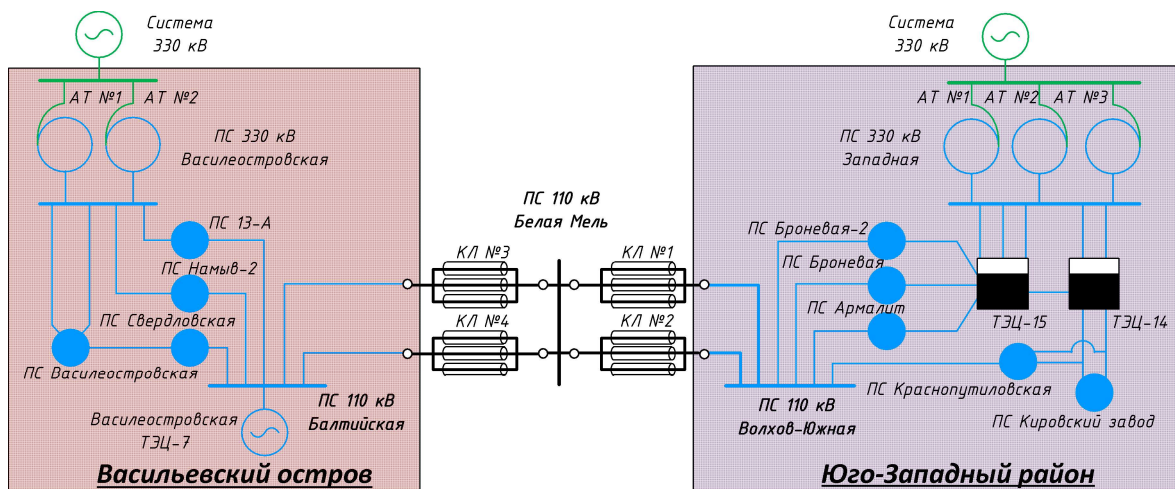


Рисунок 11 – Карта электрических сетей города Санкт-Петербурга и Ленинградской области

В программном комплексе «АТРdraw» получена математическая модель участка электрических сетей города Санкт-Петербурга и Ленинградской области для расчетов электромагнитных переходных процессов. Имеющаяся математическая модель ФПК также интегрирована в программный комплекс «АТРdraw» с целью проведения исследования электромагнитных переходных процессов в ФПК с учетом влияния внешней сети.

При проверке выключателя на его способность к отключению токов короткого замыкания для избегания повторного зажигания дуги также производится сравнение нормируемого переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) и собственного ПВН на полюсах выключателя.

Установка на линию ФПК в электропередачу 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная увеличивает и скорость нарастания, и амплитуду расчетной кривой ПВН, что может привести к повторному зажиганию дуги. Следовательно, при установке ФПК в электропередачу необходимо проверять выключатели при отключении разных видов коротких замыканий на риск возникновения повторного зажигания дуги.

Для определения наиболее безопасной точки подключения ФПК произведена проверка скорости нарастания ПВН после гашения дуги при однофазном и трехфазном КЗ в двух точках при различных вариантах установки ФПК. На рисунке 12 показан рекомендуемый вариант установки ФПК в электропередачу 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная.

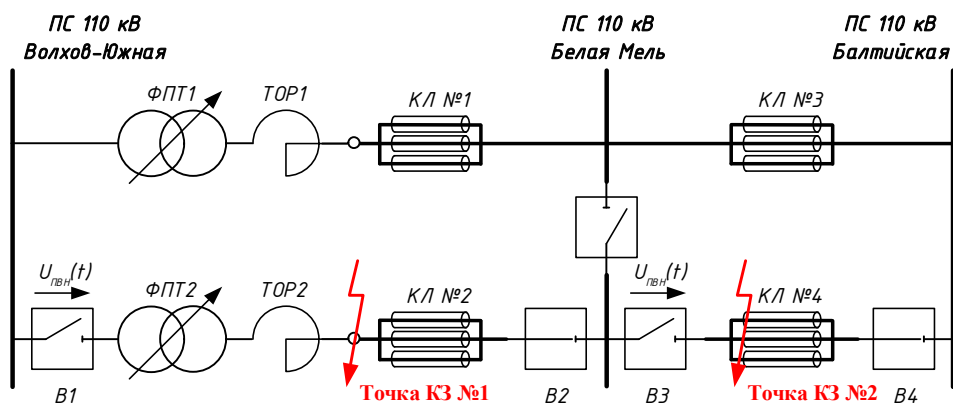


Рисунок 12 – Предлагаемый вариант установки ФПК

Расчеты ПВН производились на полюсе выключателя В1 на фазе «А» при КЗ в точке соединения ФПК и КЛ 110 кВ Волхов-Южная – Белая Мель (точка «1»), а также на полюсе выключателя В3 на фазе «А» при КЗ на следующей кабельной линии в электропередаче – КЛ 110 кВ Балтийская – Белая Мель (точка «2»). Расчеты КЗ в точке соединения ФПТ и ТОР не производились, так как точка соединения защищена от КЗ особенностью конструкции. Оба устройства находятся в разных баках, но соединены маслонаполненным каналом, в котором проходит соединительный провод.

На рисунках 13 – 14 представлены полученные осциллограммы ПВН.

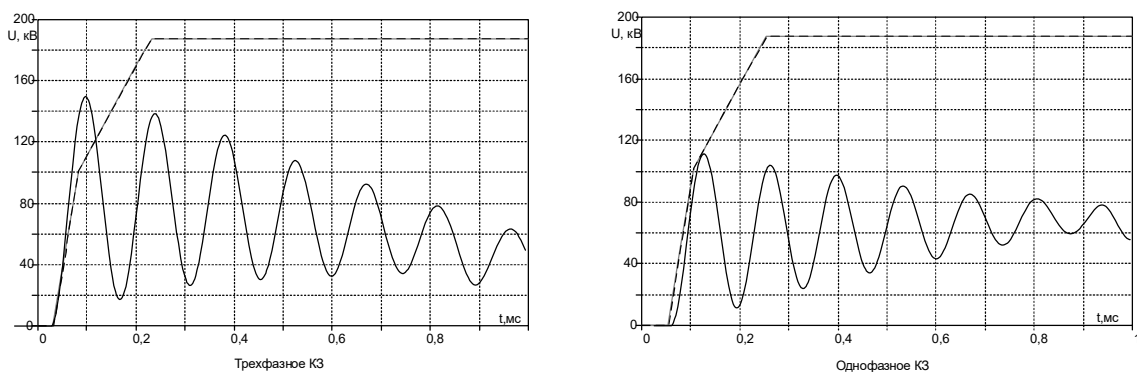


Рисунок 13 – Осциллограммы ПВН выключателя В1 фазы «А»  
при КЗ в точке №1

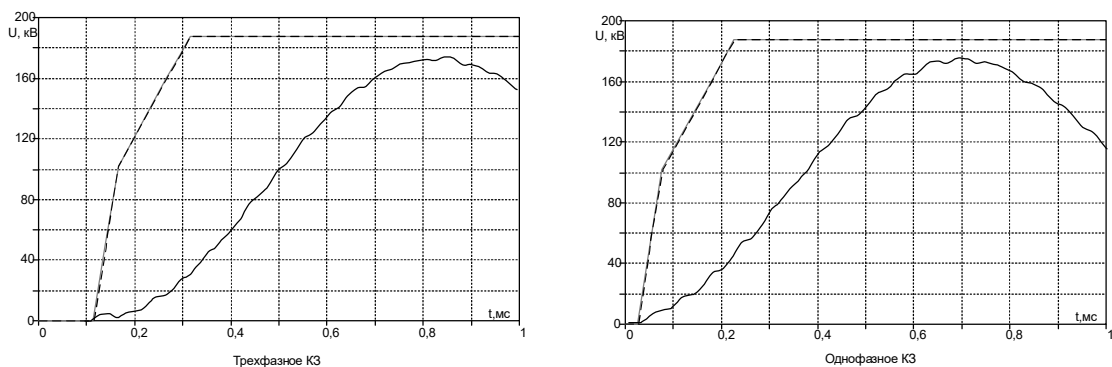


Рисунок 14 – Осциллограммы ПВН выключателя В3 фазы «А»  
при КЗ в точке №2

ПВН зависит от параметров сети (ёмкости, индуктивности, активные и волновые сопротивления), остаточной проводимости после прохождения через нуль тока выключателя и напряжения дуги. Расчетная кривая ПВН

системы не должна выходить за пределы нормированной характеристики, но должна один раз пересечь линию запаздывания [10,11].

Из полученных осциллограмм видно, что короткое замыкание в точке соединения КЛ 110 кВ Волхов-Южная – Белая Мель и ФПК (точка №1) приводит к росту расчётной кривой ПВН при однофазном КЗ. Полученная кривая ПВН пересекает нормированное для выключателя значение, что означает возможный риск повторного зажигания дуги.

Для недопущения повторного пробоя и улучшения условий гашения дуги необходимо перевести процесс нарастания кривой ПВН из колебательного режима в апериодический, в этих целях применяется включение дополнительного RC-элемента по схеме на рисунке 15. Были повторно проведены расчеты ПВН для точки «1», но с учетом RC-элемента с заданными параметрами ( $R=100$  Ом,  $C=30$  нФ), На рисунке 16 представлены полученные осциллограммы ПВН.

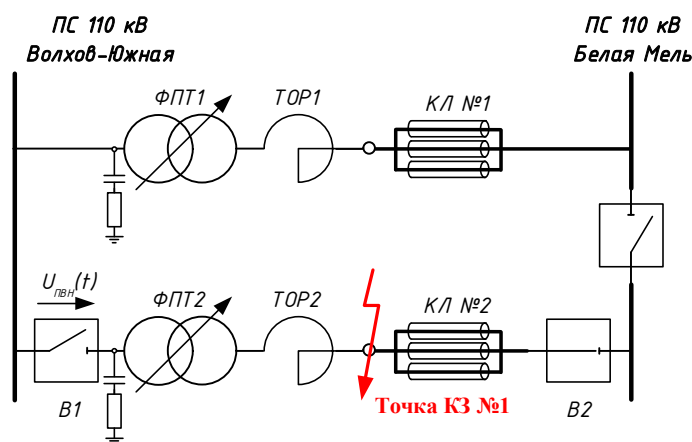


Рисунок 15 – Предлагаемый вариант установки ФПК с учетом RC-элемента

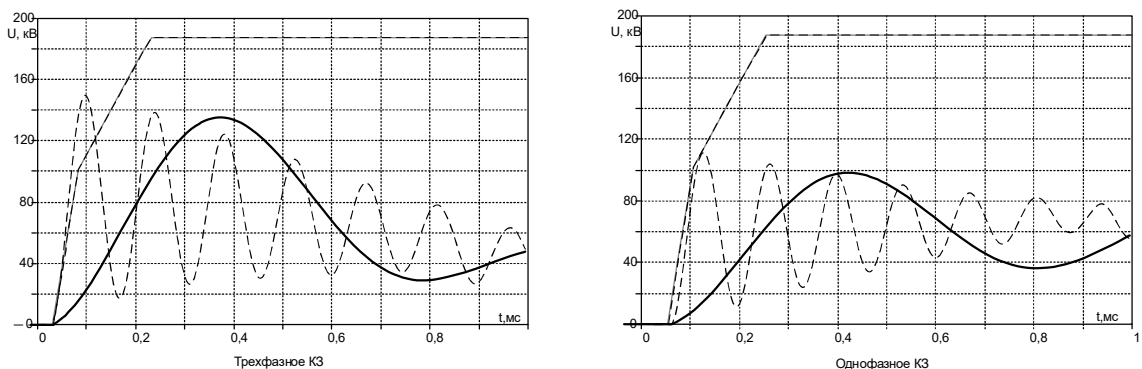


Рисунок 16 – Осциллограммы ПВН выключателя В1 фазы «А»  
при КЗ в точке №1

Согласно проведенным расчетам скорости нарастания ПВН наиболее благоприятным вариантом является вариант 2, но даже в этом случае необходимы дополнительные мероприятия, так как установка разработанного ФПК в электропередачу негативно сказывается на расчетную кривую ПВН, что означает возможное повторное зажигание дуги.

С учетом выбранного варианта подключения определен наиболее безопасный порядок переключений при объединении на параллельную работу двух энергорайонов с помощью включения транзитной электропередачи 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная с установленным ФПК на ПС Волхов-Южная.

Постановку под напряжение электропередачи 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная следует производить со стороны ПС 110 кВ Волхов-Южная (зamyкается выключатель В1) с последующим ручным включением КЛ в транзит на ПС 110 кВ Белая Мель (зamyкается выключатель В2).

Произведем расчет броска тока намагничивания в ФПК при постановке транзита под напряжение со стороны ПС 110 кВ Волхов-Южная (зamyкается выключатель В1, выключатель В2 – разомкнут; рисунок 17).

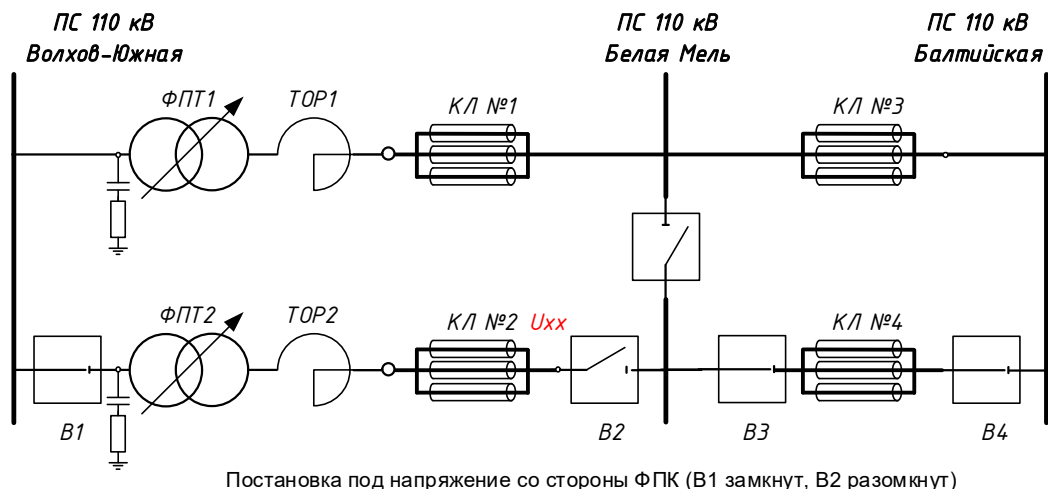


Рисунок 17 – Постановка под напряжение электропередачи с ФПК

На рисунке 18 представлены полученные осциллограммы броска тока намагничивания ФПК. На рисунках 19 – 20 представлены полученные осциллограммы изменения индукции в стержнях и ярмах ФПТ, осциллограммы индукции в ярмах ТОР не снимались ввиду отсутствия влияния, а стержни ТОР выполнены из дерева.

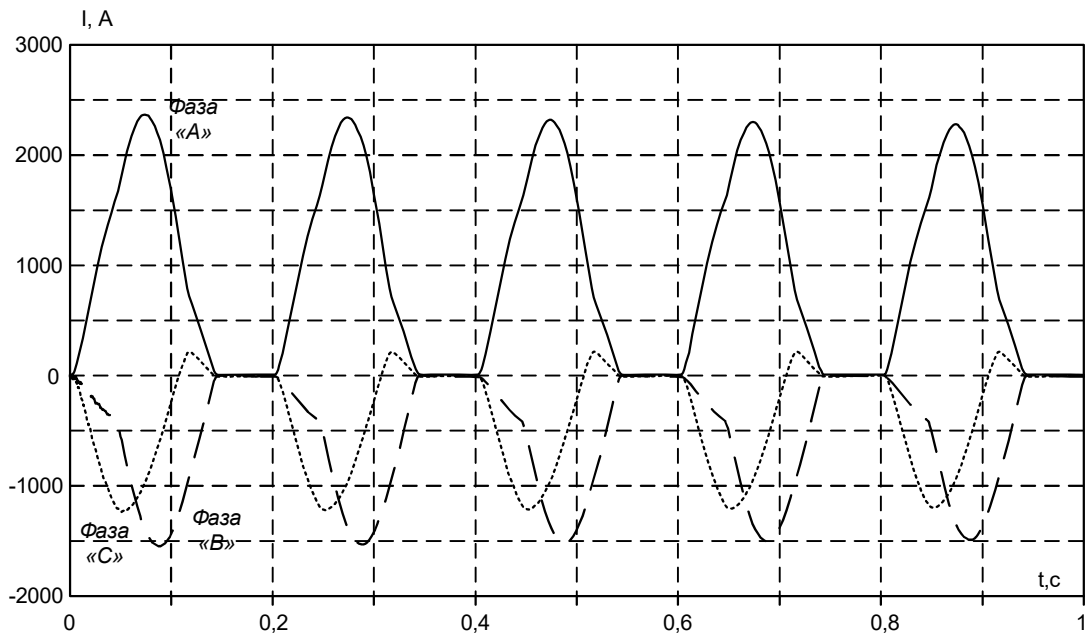


Рисунок 18 – Осциллограммы тока намагничивания ФПК при постановке электропередачи под напряжение

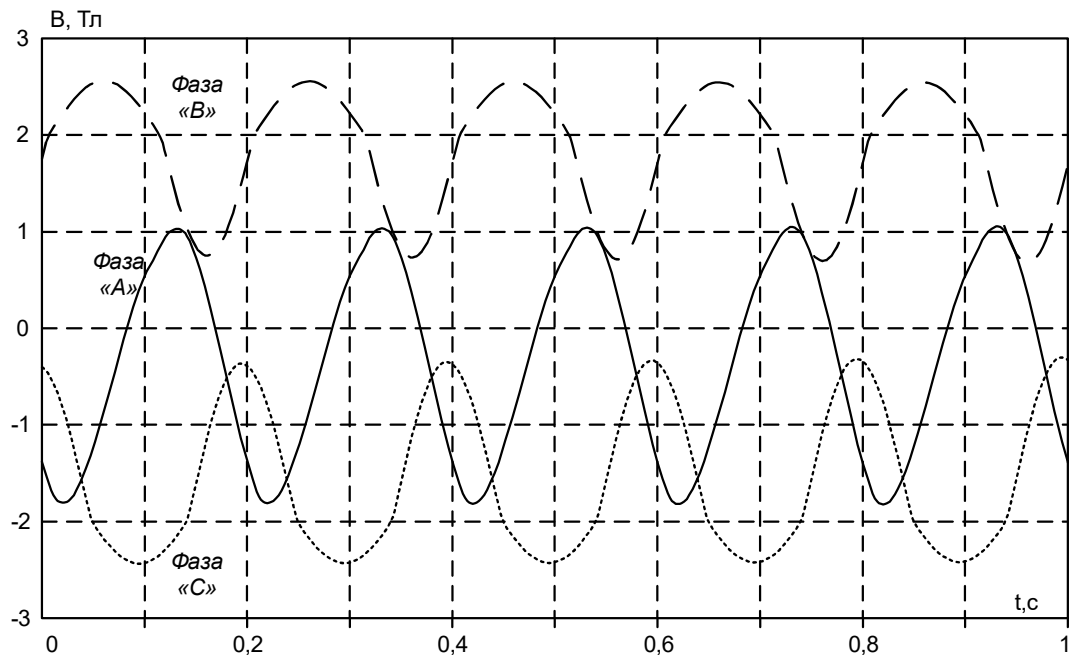


Рисунок 19 –Осциллограммы магнитной индукции в стержнях ФПТ при постановке электропередачи под напряжение

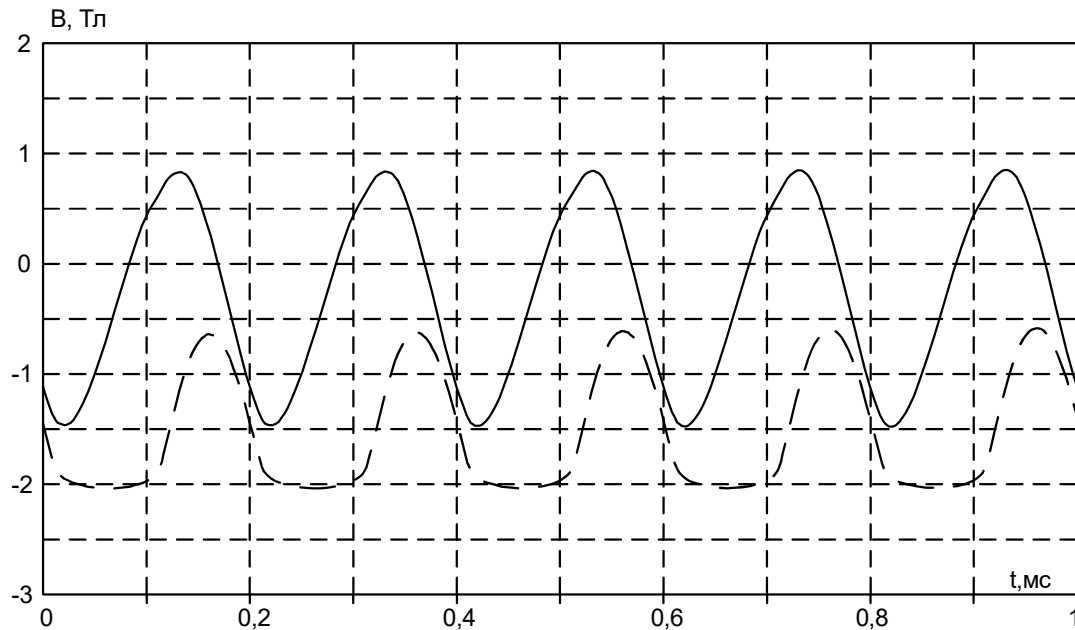


Рисунок 20 –Осциллограммы магнитной индукции в ядрах ФПТ при постановке электропередачи под напряжение

После постановки под напряжение следует включение электропередачи 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная в работу путем замыкания разомкнутого конца электропередачи (в момент времени на графиках  $t=0.2 \text{ с}$  замыкается выключатель В2). На рисунке 21 показан бросок тока при включении электропередачи с ФПК в работу. На рисунках 22 –23 представлены полученные осциллограммы изменения индукции в стержнях и ядрах ФПТ, осциллограммы индукции в ядрах ТОР не снимались ввиду отсутствия влияния, а стержни ТОР выполнены из дерева.

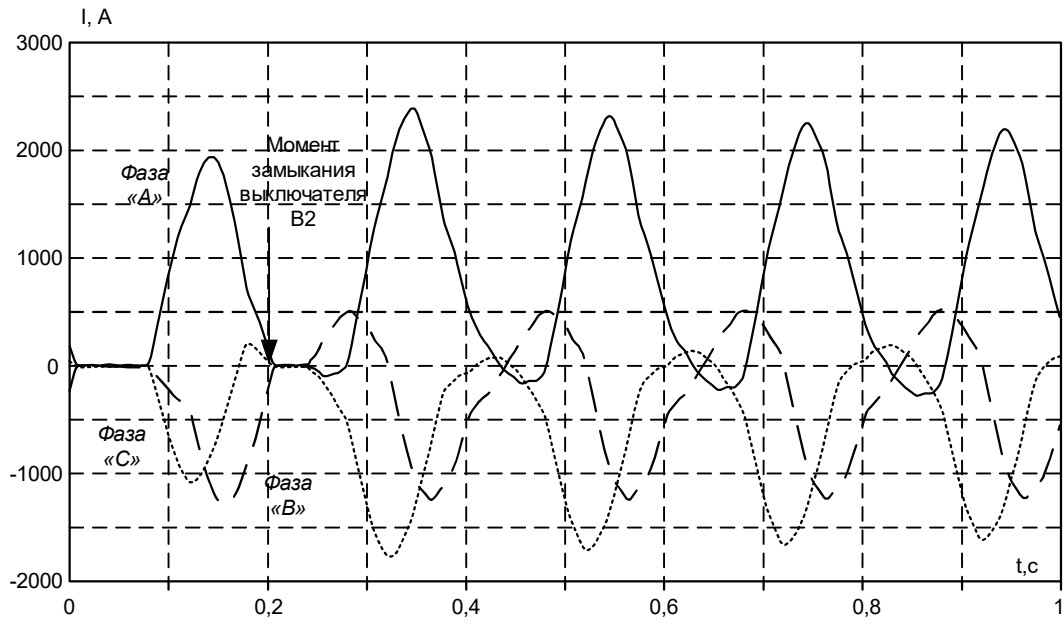


Рисунок 21 – Осциллограммы тока намагничивания ФПК при постановке электропередачи под напряжение

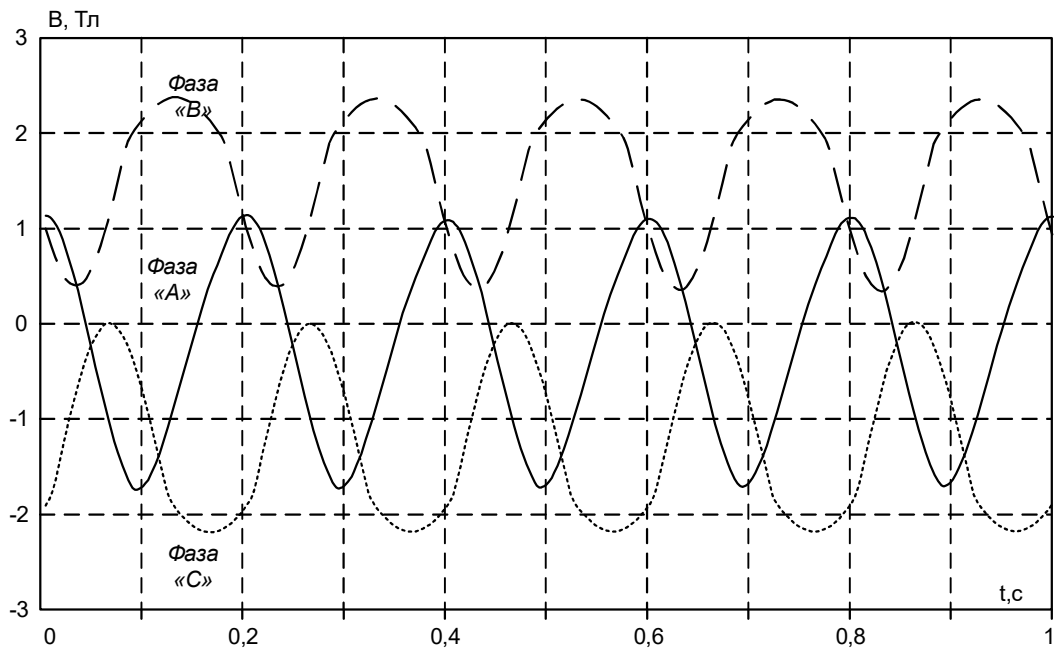


Рисунок 22 – Осциллограммы магнитной индукции в стержнях ФПТ при постановке электропередачи под напряжение

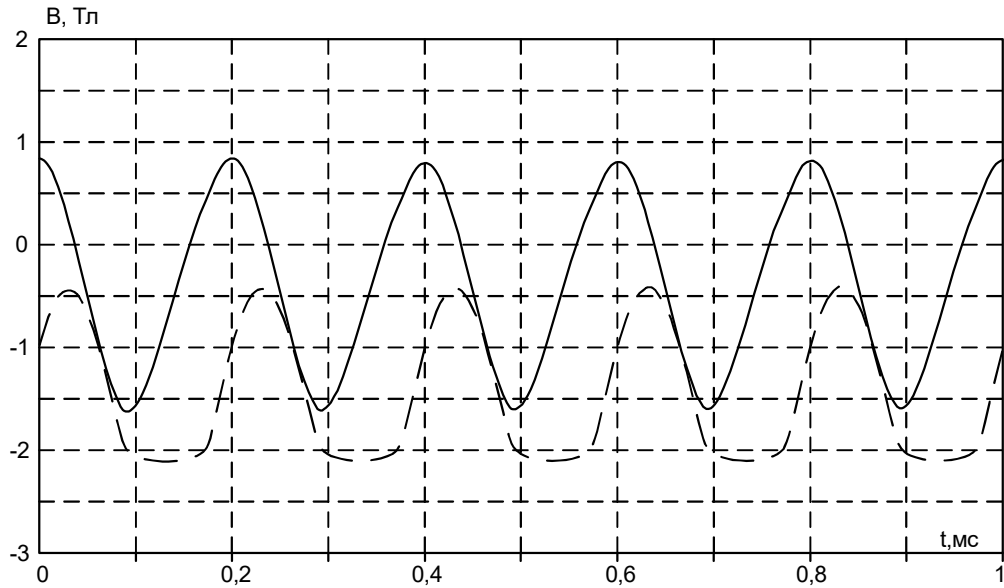


Рисунок 23 – Осциллограммы магнитной индукции в ядрах ФПТ при постановке электропередачи под напряжение

Ввиду наличия остаточной намагниченности магнитопровода ФПК, схема замещения магнитных цепей ФПК обладает ненулевыми начальными условиями, что влияет на величину броска тока намагничивания. Это подтверждает необходимость проведения расчетов по определению максимальной величины броска тока намагничивания ФПК при постановке электропередачи с ФПК под напряжение.

**В третьей главе** выполнено исследование установившихся режимов работы ЭЭС при учете установки ФПК, разработка и апробация алгоритма автоматического поддержания заданного потока мощности с помощью регулирования ФПТ из ФПК с учётом данных о его конструкции на примере транзитной электропередачи 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная (рисунок 24).

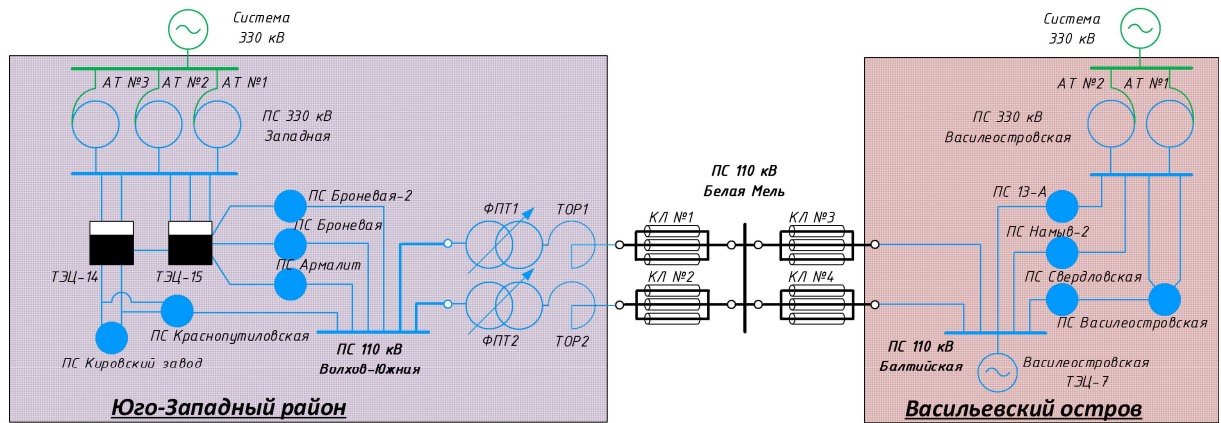


Рисунок 24 – Схема сети 110 кВ энергорайона с учётом установки ФПК

Как было сказано выше, транзитная электропередача 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная отключена по критерию ограничения ТКЗ, но может быть введена в работу за счет установки ТОР, но требуется дополнительное регулирование потока активной мощности через передачу за счет ФПТ. Что и привело нас к созданию ФПК.

Существующие АОПО работают на отключение элементов ЭЭС при возникновении перегрузок, что приводит к ухудшению схемно-режимной ситуации и перегрузкам соседнего электросетевого оборудования ЭЭС, что может привести к срабатыванию установленных на них АОПО, что ведет к каскадному отключению элементов средствами АОПО. Установка ФПК в электропередачу позволяет управлять перетоком активной мощности, что при правильном регулировании позволит избежать перегрузок электросетевых элементов без необходимости отключения элементов средствами АОПО.

Однако чрезмерное ограничение перетока активной мощности транзитной электропередачи может приводить к неоптимальному потокораспределению в примыкающей сети, которое может привести к каскадному отключению электросетевых элементов смежной энергосистемы средствами АОПО.

Таким образом, обосновано применение автоматического регулятора переключения отпаяк РПН ФПК, задача которого состоит в поддержании значения перетока через электропередачу в заданном диапазоне.

Реализована модель регулятора, который осуществляет свою работу через переключение отпаяк РПН ФПК. Регулятор основан на критерии допустимой токовой нагрузки электросетевого элемента. Регулятор сравнивает действующее значение тока с уставкой.

Для работы регулятора контролируются напряжений в трех точках электропередачи: СШ 110 кВ ПС 110 кВ Волхов-Южная, точка соединения ФПТ и ТОР, СШ 110 кВ ПС 110 кВ Белая Мель. На основании напряжений рассчитываются фазовые сдвиги между напряжениями. При превышении током допустимую величину, регулятор меняет отпайку РПН исходя из направления перетока и продолжает работать, пока ток больше тока уставки (или отпайка РПН не является предельной).

Регулирование заключается в том, что устройство переключает отпайки РПН ФПК так, что фазовый сдвиг между векторами напряжений СШ 110 кВ ПС 110 кВ Волхов-Южная и точкой соединения ФПТ и ТОР был сопоставим с фазовым сдвигом между векторами напряжений СШ 110 кВ ПС 110 кВ Волхов-Южная и СШ 110 кВ ПС 110 кВ Белая Мель, тем самым уменьшая падение напряжения на ТОР и КЛ 110 кВ Белая Мель – Волхов-Южная №1 (2), что уменьшает ток, протекающий через электропередачу с ФПК.



Итоговый алгоритм работы регулятора, направленный на ограничение тока через электропередачу с ФПК в определенном диапазоне (рисунок 25):

1. Если через электропередачу с ФПК протекает ток, значение которого выше 600 А (в качестве тока уставки принято наименьшее значение ДДТН кабельных линий, входящих в состав электропередачи), регулятор начинает работу, при этом блокируя АОПО линий электропередачи.

2. Если  $\delta > \varphi$ , направление регулирования РПН ФПК положительное, значит отпайку РПН ФПТ нужно увеличивать. Если  $\delta < \varphi$ , направление регулирования РПН ФПК отрицательное, отпайка РПН ФПТ уменьшается. Ток через электропередачу уменьшается. Диспетчеру получает сигнал об изменении номера действующей отпайки РПН ФПК.

3. При достижении крайнего положения отпайки РПН ФПК, при токе через электропередачу больше уставки в 600 А, диспетчер получает сигнал об возобновлении работы алгоритмов АОПО КЛ 110 кВ Белая Мель – Волхов-Южная №1 (2).

4. Если через электропередачу с ФПК протекает ток, значение которого 400 А (в качестве тока уставки принято  $2/3$  от наименьшего значения ДДТН кабельных линий, входящих в состав электропередачи), что означает чрезмерное ограничение перетока активной мощности через транзит с ФПК. Регулятор начинает работу, при этом блокируя АОПО линий электропередачи.

5. Если  $\delta > \varphi$ , направление регулирования РПН ФПК отрицательное, значит отпайку РПН ФПТ нужно уменьшать. Если  $\delta < \varphi$ , направление регулирования РПН ФПК положительное, отпайка РПН ФПТ увеличивать. Ток через электропередачу увеличивается. Диспетчеру получает сигнал об изменении номера действующей отпайки РПН ФПК

6. При достижении предельного положения отпайки РПН ФПК, но ток ниже уставки в 400 А, диспетчер получает сигнал об возобновлении работы алгоритмов АОПО КЛ 110 кВ Белая Мель – Волхов-Южная №1 (2).

Рассмотрена работа алгоритма на примере электропередачи между ПС 110 кВ Волхов-Южная и ПС 110 кВ Балтийская при различных схемно-режимных ситуациях, вызванных отключением потребителей Василеостровского острова или сбросом мощности Василеостровской ТЭЦ-7.

Энергосистема Василевского острова является дефицитной по активной мощности, при замыкании электропередачи 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная возникает чрезмерный переток по направлению в энергосистему Васильевского острова. Для работы без перегрузок электросетевого оборудования при замыкании электропередачи установленный в электропередачу ФПК работает на «3» отпайке РПН в отрицательном направлении. Переток активной мощности через электропередачу ограничивается за счет ФПК.

При возникновении аварийного сброса мощности Василеостровской ТЭЦ-7 увеличивается дефицит активной мощности, что на данный момент решается отключением нагрузки в объеме до 252 МВт (АОПО АТ 330/110 ПС 330 кВ Василеостровская), что приводит к финансовым потерям электросетевых компаний.

Установка ФПК с регулятором активной мощности позволяет избежать отключения нагрузки, тем самым повысив надежность электроснабжения потребителей.

Представим полученные в ходе опыта осциллограммы. Положение отпайки ФПТ в исходном состоянии энергосистемы системы: «-3». Регулятор в ходе своей работы производит уменьшение действующей отпайки РПН ФПК с «-3» до «-6» (рисунок 26).

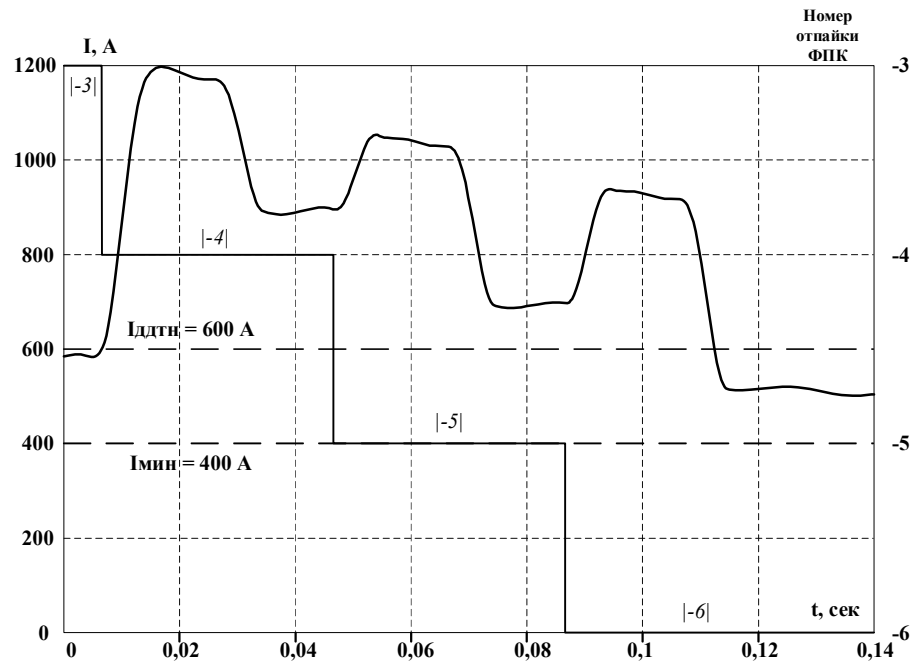


Рисунок 26 – Действующее значение тока через электропередачу с ФПК

Допустим обратное, на Васильевском острове произошло каскадное отключение нагрузки, что решается снижением мощности Василеостровской ТЭЦ-7, что приводит к недоотпуску генерируемой электроэнергии электростанции и как следствие финансовым потерям электрогенерирующей компании. Положение отпайки ФПТ в исходном состоянии системы: «-3». Регулятор в ходе своей работы производит уменьшение действующей отпайки РПН ФПК с «-3» до «-1» (рисунок 27).

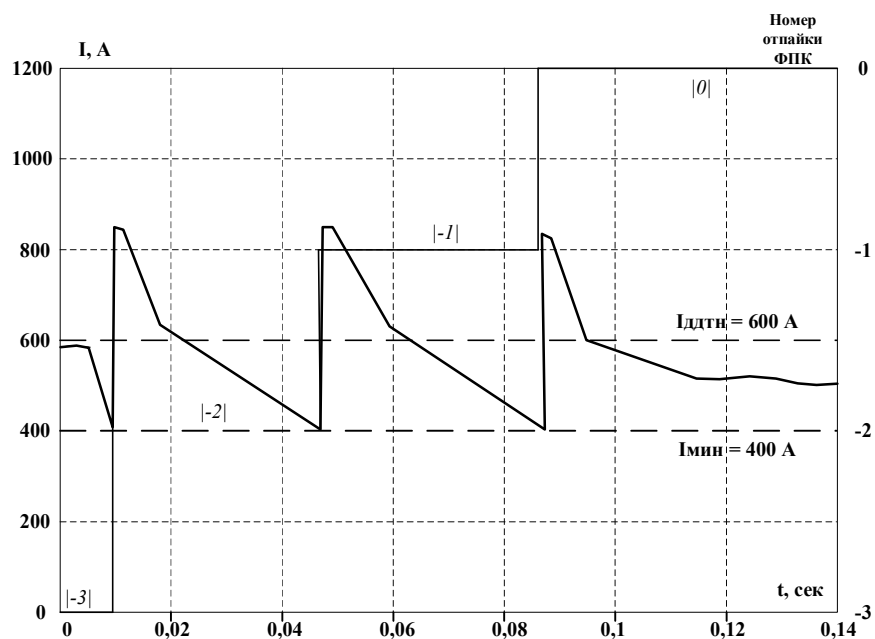


Рисунок 27 – Действующее значение тока через электропередачу с ФПК

Видим, что применение ФПК с регулятором позволяет переключать отпайки таким образом, что переток активной мощности сохраняется на заданном уровне, не приводя к перегрузкам оборудования без необходимости отключения потребителей на острове, что означает повышение надежности электроснабжения потребителей Василеостровского острова без нового сетевого строительства.

В **четвертой главе** приведены результаты исследования особенностей работы РЗ при установке ФПК на электропередаче, выполненной двумя КЛ 110 кВ Балтийская – Белая Мель и КЛ 110 кВ Белая Мель – Волхов-Южная. В качестве основной защиты используется направленная поперечная дифференциальная защита, а в качестве резервной – дистанционная защита.

При защите электропередач из параллельных линий требуется отключать только поврежденную линию, поэтому для защиты применяется направленная поперечная дифференциальная защита. Токовая поперечная дифференциальная защита дополняется реле направления мощности (рисунок 28). Токовое реле является пусковым органом, реле направления мощности выявляет поврежденную линию.

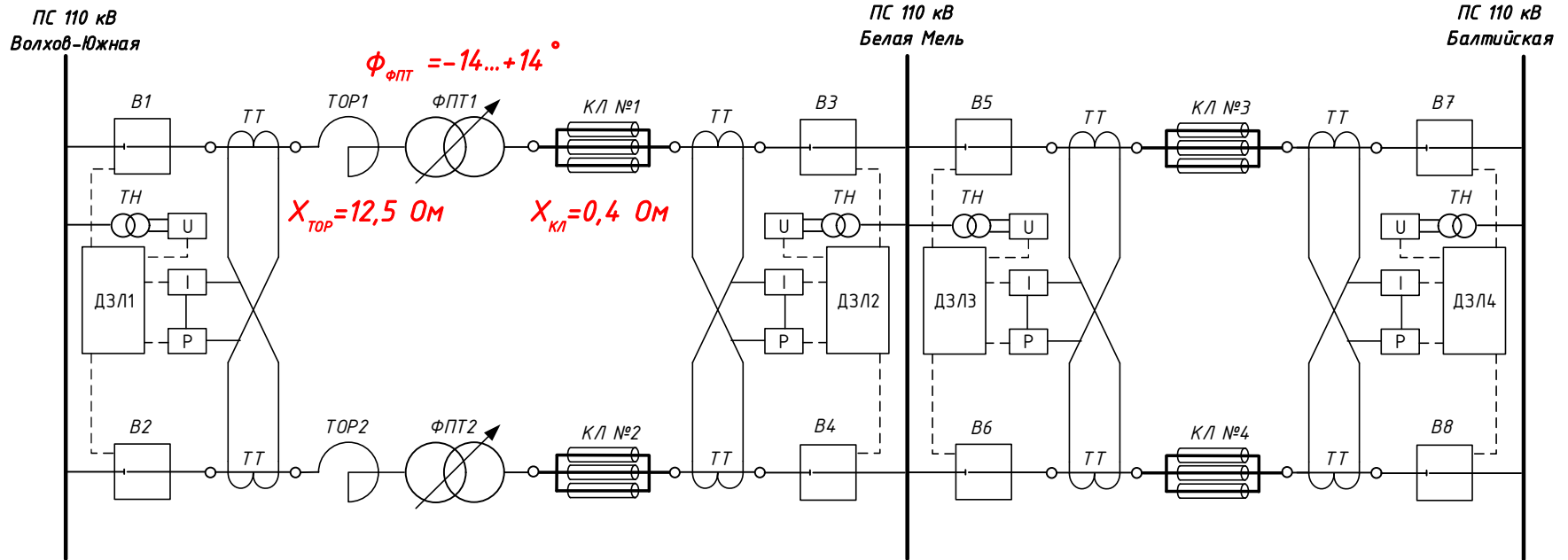


Рисунок 28 – Схема направленной поперечной дифференциальной защиты  
 электропередачи 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная с ФПК

Проведем оценка эффективности направленной поперечной дифференциальной защиты с учетом установки ФПК на электропередаче 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная.

При расчете тока срабатывания защиты необходимо проводить оценку тока небаланса для избегания ложного срабатывания защит.

Токи небаланса делятся на:

1. Погрешность измерительных трансформаторов тока.

Это наибольшая составляющая тока небаланса.

$$I_{нб\ ТТ} = k_{одн} \cdot \xi \cdot k_a \cdot I_{КЗ}, \text{ где}$$

$k_{одн}$  – коэффициент однотипности ТТ ( $k_{одн} = 0,5$  при одинаковых типах ТТ и  $k_{одн} = 1$  – при разных);

$k_a$  – коэффициент увеличения тока КЗ из-за наличия в нем апериодической составляющей ( $k_a = 2$ );

$\xi$  – допустимая погрешность ТТ для защиты ( $\xi = 0,1$ );

$I_{КЗ}$  - максимальный ток трехфазного КЗ.

$$I_{нб\ ТТ} = 0,5 \cdot 0,1 \cdot 2 \cdot 5100 = 510\text{ А}$$

2. Ток небаланса, вызванный неравенством сопротивлений параллельных линий.

$$I_{нб\ Ком} = \frac{\Delta Z\%}{100} \cdot I_{КЗ}, \text{ где } \Delta Z\% = \frac{Z_{w1} - Z_{w2}}{Z_{w1}} \cdot 100 \text{ – разница между}$$

сопротивлениями двух линий

$$Z_{w1} = Z_{w2}, \text{ следовательно, } I_{нб\ Ком} = 0$$

3. Ток небаланса, вызванный наличием тока намагничивания ФПК.

В нормальном режиме ток намагничивания не превышает 1...5% от номинального тока; при к. з. ток намагничивания уменьшается. Поэтому в режиме нагрузки и при расчете к.з. ток намагничивания обычно не учитывается из-за малой величины.

$$I_{нб\ Нам\ ФПК} = (1...5)\% \cdot I_{ном\ ФПК} = 50\text{ А}$$

4. Ток небаланса, вызванный погрешностью при изменении коэффициента трансформации ФПК.

$$I_{нб\text{Рез}} = \frac{\Delta N\%}{100} \cdot I_{КЗ}, \text{ где } \Delta N\% = \pm 10...15\% \text{ для устройств с РПН.}$$

$$I_{нб\text{Рез}} = 0,1 \cdot 5100 = 510 \text{ A}$$

Ток небаланса составит:

$$I_{нб} = I_{нб\text{ТТ}} + I_{нб\text{Ком}} + I_{нб\text{НамФПК}} + I_{нб\text{Рез}} = 510 + 0 + 50 + 510 = 1,07 \text{ кА}$$

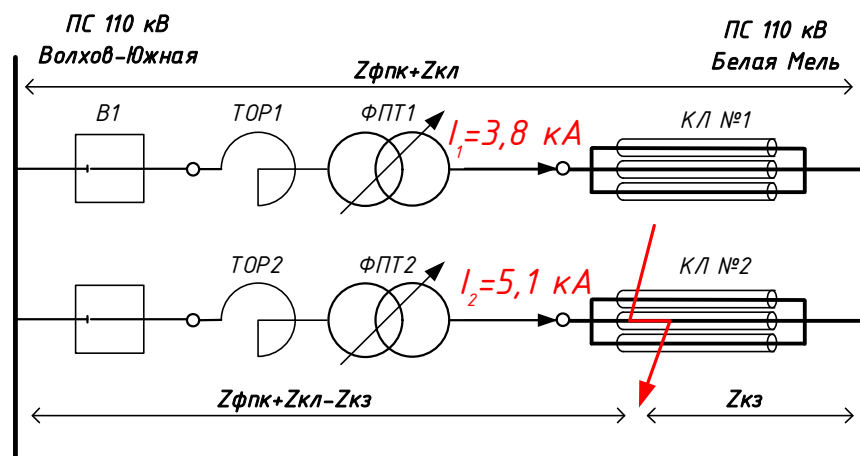


Рисунок 29 – Мертвая зона направленной поперечной дифференциальной защиты с учетом подключения ФПК

Допустим, что комплект направленной поперечной дифференциальной защиты установлен только на ПС 110 кВ Волхов-Южная (рисунок 29). При повреждениях на участке электропередачи рядом с ПС 110 кВ Белая Мель разность токов может оказаться меньше тока срабатывания защит, защиты не реагируют на повреждения. Мертвая зона представляет собой участок электрической цепи при КЗ на котором ток недостаточен для срабатывания защит. Защита не в состоянии охватывать защищаемые линии полностью. Поэтому рекомендуется устанавливать комплекты направленной поперечной дифференциальной защиты с обеих сторон защищаемой электропередачи.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_{\text{ФПК}} + Z_{\text{КЛ}} + Z_{\text{КЗ}}}{Z_{\text{ФПК}} + Z_{\text{КЛ}} - Z_{\text{КЗ}}}$$

$$(Z_{\Phi PK} + Z_{KL}) \cdot (I_1 - I_2) = Z_{K3} \cdot (I_1 + I_2)$$

$$I_{C3} = I_1 - I_2$$

$$I_{K3} = I_1 + I_2$$

$$(Z_{\Phi PK} + Z_{KL}) \cdot I_{C3} = Z_{K3} \cdot I_{K3}$$

$$I_{C3} = \frac{Z_{K3}}{(Z_{\Phi PK} + Z_{KL})} \cdot I_{K3} > I_{HB}$$

$$I_{C3} = \frac{1,9}{(12,5 + 0,4)} \cdot 8,9 = 1,3 \text{ кА} > I_{HB} = 1,07 \text{ кА}$$

При КЗ в точке близкой к ПС 110 кВ Волхов-Южная, защита на ПС 110 кВ Белая Мель не сработает, однако защита на ПС 110 кВ Волхов-Южная сработает и отключит выключатель В2. После этого ток КЗ отправится к месту повреждения по работающей линии от шин ПС 110 кВ Волхов-Южная. После чего защита ПС 110 кВ Белая Мель сработает и отключит выключатель В4.

Подобное называется каскадным действием защит, а зона срабатывания – зоной каскадного действия.

С учетом возможности каскадного срабатывания необходимо проводить проверку чувствительность пусковых реле.

Проверка чувствительности осуществляется для:

1. КЗ на границах зон каскадного действия всех комплектов установленных защит после отключения электропередачи с противоположной стороны. Например, выключатель В2 для защиты на ПС 110 кВ Волхов-Южная (рисунок 30).

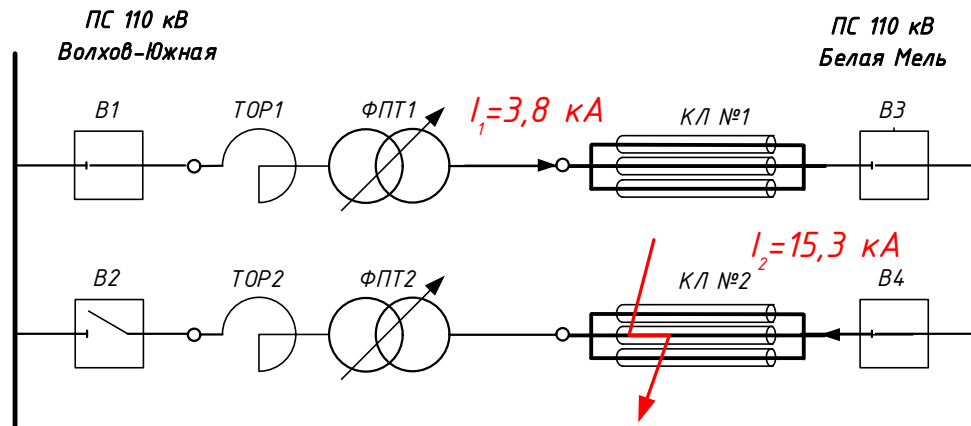


Рисунок 30 – Проверка чувствительности на границе зоны каскадного действия направленной поперечной дифференциальной защиты

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{расч}}}{I_{\text{сз}}} = \frac{I_1 + I_2}{I_{\text{сз}}} \geq 1,5$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{3,8 + 15,3}{1,3} = 14,7 \geq 1,5$$

2. КЗ в точке чувствительности обеих защит в при наличии направленных поперечных дифференциальных защит с обеих сторон электропередачи (рисунок 31).

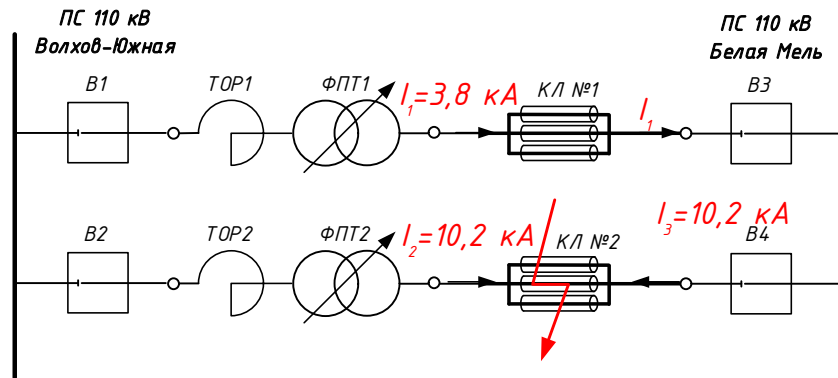


Рисунок 31 – Проверка чувствительности в точке равной чувствительности при защите линии электропередач с обеих сторон направленной поперечной дифференциальной защитой

$$\text{Для ПС 110 кВ Волхов-Южная: } k_{\text{Ч}} = \frac{I_{\text{Расч1}}}{I_{\text{СЗ1}}} = \frac{I_2 - I_1}{I_{\text{СЗ1}}} \geq 2$$

$$k_{\text{Ч}} = \frac{10,2 - 3,8}{1,3} = 4,9 \geq 2$$

$$\text{Для ПС 110 кВ Белая Мель: } k_{\text{Ч}} = \frac{I_{\text{Расч2}}}{I_{\text{СЗ2}}} = \frac{I_1 + I_3}{I_{\text{СЗ2}}} \geq 2$$

$$k_{\text{Ч}} = \frac{3,8 + 10,2}{1,3} = 10,8 \geq 2$$

На основании расчетов по существующей методике проверки эффективности направленной поперечной дифференциальной защиты для электропередач из параллельных линий, установка ФПК в электропередачу не приводит к снижению эффективности защит. Направленная поперечная дифференциальная защита может применяться для транзитных электропередач с установленным ФПК.

В качестве резервных защит электропередачи из параллельных линий предлагается дистанционная защита. Однако для проверки дистанционной

защиты необходимо учитывать максимальное и минимальное сопротивление ФПК, которое может меняться с учетом работы регулятора поддержания заданного потока активной мощности, который описан выше.

**В пятой главе** приведены результаты исследования возможности снятия ограничения на выдаваемую мощность схемы выдачи мощности (СВМ) электростанции при помощи ФПТ на примере СВМ Саратовской ГЭС (рисунок 33).

В состав СВМ Саратовской ГЭС входят:

- ВЛ 500 кВ Балаковская АЭС – Саратовская ГЭС,
- ВЛ 500 кВ Саратовская ГЭС – Курдюм,
- ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская,
- ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Центральная,
- ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Саратовская,
- ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Терешка с отпайкой на ПС Вольская,
- ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Буровка–тяг с отпайкой на ПС Вольская,
- ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение.

СВМ Саратовской ГЭС в нормальной схеме и в схеме ремонта одной отходящей от шин электростанции линии электропередачи или автотрансформатора должна обеспечивать выдачу всей располагаемой мощности с учетом отбора нагрузки на собственные нужды. Располагаемая мощности Саратовской ГЭС на текущий момент составляет – 1427 МВт. При перемаркировке генерирующего оборудования величина генерируемой мощности Саратовской ГЭС может сильно увеличиться.

Тем не менее, с учетом перспективного роста нагрузки ввиду развития энергосистемы Средней Волги возникают ограничения на выдаваемую мощность Саратовской ГЭС из-за перегрузок ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение входящей в СВМ электростанции. В качестве средства снятия ограничения может применяться установка разработанного ФПК последовательно с перегружаемой линией электропередачи, однако ввиду большого дополнительного индуктивного сопротивления вносимого ТОР из ФПК, токовая загрузка перегружаемой линии электропередачи СВМ снизится до допустимых значений без влияния ФПТ из ФПК, что снимет

ограничения на выдаваемую мощность станции. Однако в данных сетях отсутствуют проблемы с ограничением ТКЗ, поэтому установка ТОР не является целесообразной, ТОР будет создавать ненужные дополнительные потери в сети. Поэтому для снятия ограничения предлагается осуществлять управление потоками активной мощности через перегружаемую линию электропередачи за счет установки ФПТ из разработанного ФПК без ТОР.

Подобное решение было реализовано ранее в энергосистеме Республики Казахстан (ПС 500 кВ Ульке) [12] и энергосистеме Средней Волги (Волжская ГЭС) [13]. Однако эти фазоповоротные комплексы представляли собой связь автотрансформатора и вольтодобавочного трансформатора (рисунок 32). Данное решение позволяло перераспределять потоки активной мощности между сетями двух классов напряжения СВМ электростанций.

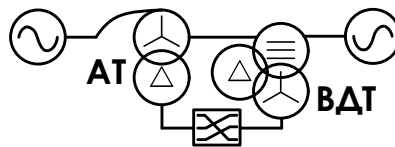


Рисунок 32 – Фазоповоротный комплекс, состоящий из АТ и ВДТ

Особенностью предлагаемого решения является установка ФПТ последовательно с перегружаемой линией электропередачи, что позволяет снизить конкретную токовую перегрузку СВМ, равномерно перераспределяя активную мощность электростанции между остальными линиями электропередач СВМ, а не разгружать линии электропередачи низкого класса напряжения, перегружая линии электропередачи высокого класса напряжения. Более того, так как ФПТ подключается в СВМ по низкому классу напряжения, другим преимуществом данного устройства является более простая схема подключения ввиду отсутствия необходимости модернизаций защит ошинок и защит автотрансформаторов и вольтодобавочных трансформаторов, которые обладают более сложной схемой соединения.

В качестве критерия оценки наличия ограничения на выдаваемую мощность предлагается расчет максимально допустимого перетока через сечение ограниченное СВМ Саратовской ГЭС. Для определения максимально допустимого перетока через сечение необходимо выполнить расчеты предельных допустимых перетоков активной мощности для нескольких основных критериев. Соблюдение коэффициента запаса по статической устойчивости в нормальном и послеаварийных режимах нормальной и ремонтных схем, отсутствие токовых перегрузок электросетевого оборудования в нормальном и послеаварийных режимах нормальной и ремонтных схем, отсутствие нарушений динамической устойчивости. Все расчеты произведены с учетом амплитуды нерегулярных колебаний активной мощности в сечении. Проведённые расчеты учитывают требования нормативных документов [14].

Исследовано влияние схемно-режимных параметров электрической сети 220 кВ и выше на изменение величины максимальной выдаваемой мощности Саратовской ГЭС (таблица 1). Согласно проведенным расчетам для схемы выдачи мощности Саратовской ГЭС объем ограничения генерации будет находиться в диапазоне 13-634 МВт.

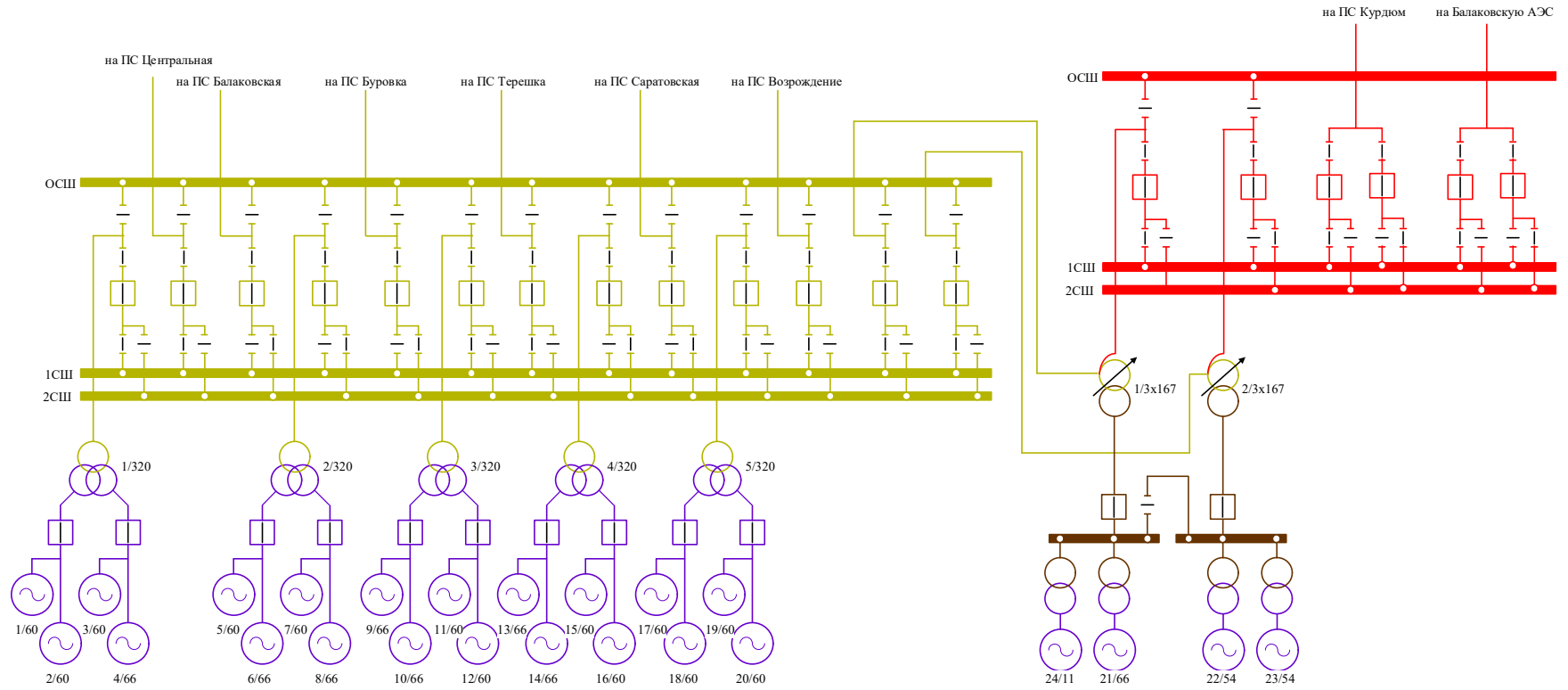


Рисунок 33 – Принципиальная схема сети 220 кВ и выше Саратовской ГЭС

Таблица 1 – Максимально допустимый переток кругового сечения Саратовской ГЭС без установки ФПТ

№ п/п	Пределный переток по критерию токовой загрузки, МВт	Ограничивающий элемент	Величина длительно допустимой токовой нагрузки, А	Пределный переток по статической устойчивости, МВт	$P_{пр} * 0,8 - \Delta P_{нк}$ , МВт	$P(U) - \Delta P_{нк}$ , МВт	Переток в доаварийной схеме по критерию токовой загрузки, МВт	Перегружаемый элемент	Величина аварийно допустимой нагрузки, А	Пределный переток по статической устойчивости, МВт	$P(U) - \Delta P_{нк}$ , МВт	Допустимый переток, МВт	Установленная мощность Саратовской ГЭС, МВт	Ограничение на выдаваемую мощность, МВт
Нормальная схема							ВЛ 500 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская АЭС						1427	-
Режим зимних максимальных нагрузок рабочего дня (-25 градусов Цельсия)														
1	1870	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение	839	2821	2252	2346	1520	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение	839	2438	2145	1520		
Режим зимних минимальных нагрузок выходного дня (-25 градусов Цельсия)														
2	1555	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение	839	2883	2301	2443	1084	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение	839	2472	2230	1084		343
Режим зимних максимальных нагрузок рабочего дня (+5 градусов Цельсия)														
3	1597	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение	780	2843	2269	2391	1159	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение	780	2447	2154	1159		268
Режим зимних минимальных нагрузок выходного дня (+5 градусов Цельсия)														
4	1523	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение	780	2808	2241	2293	793	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение	780	2401	1993	793		634
Режим летних максимальных нагрузок рабочего дня (+22,3 градусов Цельсия)														
5	1636	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение	668	2795	2231	2293	1412	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение	668	2178	2286	1179		248
Режим летних минимальных нагрузок выходного дня (+22,3 градусов Цельсия)														
6	1559	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение	668	3162	2524	2818	1150	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение	668	2717	2710	1150		277
Режим летних максимальных нагрузок рабочего дня (+30 градусов Цельсия)														
7	1559	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение	611	2992	2389	2728	1534	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение	611	2581	2682	1414		13

Выдача мощности Саратовской ГЭС ограничена допустимой токовой нагрузкой ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение. Логичным решением в данной ситуации будет произвести замену провода перегружаемой линии электропередачи, однако этого будет не достаточно ввиду неравномерного потокораспределения между линиями электропередачи СВМ станции. Замену провода предлагается осуществить вместе с установкой ФПТ последовательно с ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Возрождение (таблица 2).

Установка ФПТ с заменой провода в СВМ Саратовской ГЭС позволяет снять ограничения по выдаче располагаемой мощности. Согласно проведенным расчетам после установки ФПТ выдача мощности Саратовской ГЭС осуществляется без ограничений.

Таблица 2 – Максимально допустимый переток кругового сечения Саратовской ГЭС после установки ФПТ и замены провода

№ п/п	Пределный переток по критерию токовой загрузки, МВт	Ограничивающий элемент	Величина длительно допустимой токовой нагрузки, А	Пределный переток по статической устойчивости, МВт	$P_{пр*0,8-\Delta P_{нк}}$ , МВт	$P(U)-\Delta P_{нк}$ , МВт	Переток в доаварийной схеме по критерию токовой загрузки, МВт	Перегружаемый элемент	Величина аварийно допустимой нагрузки, А	Пределный переток по статической устойчивости, МВт	$P(U)-\Delta P_{нк}$ , МВт	Максимально допустимый переток, МВт	Установленная мощность Саратовской ГЭС, МВт	Ограничение на выдаваемую мощность, МВт	
Нормальная схема							ВЛ 500 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская АЭС						1427	–	
Режим зимних максимальных нагрузок рабочего дня (-25 градусов Цельсия)															
1	2318	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская	1000	2814	2246	2304	1891	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская	1000	2437	2062	1891			–
Режим зимних минимальных нагрузок выходного дня (-25 градусов Цельсия)															
2	2082	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская	1000	2878	2297	2408	1598	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская	1000	2472	2143	1598			–
Режим зимних максимальных нагрузок рабочего дня (+5 градусов Цельсия)															
3	2034	1АТ Саратовская ГЭС	644	2834	2262	2345	1652	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская	1000	2445	2064	1652			–
Режим зимних минимальных нагрузок выходного дня (+5 градусов Цельсия)															
4	1754	1АТ Саратовская ГЭС	644	2801	2236	2242	1606	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская	1000	2401	1908	1606			–
Режим летних максимальных нагрузок рабочего дня (+22,3 градуса Цельсия)															
5	2022	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская	982	2840	2267	2242	1635	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская	991	2178	2252	1635			–
Режим летних минимальных нагрузок выходного дня (+22,3 градуса Цельсия)															
6	1975	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская	982	3161	2524	2794	1524	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская	991	2725	2686	1524			–
Режим летних максимальных нагрузок рабочего дня (+30 градуса Цельсия)															
7	1625	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская	891	2989	2387	2706	1523	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская	921	2582	2663	1523	–		

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализов существующих устройств выявлены наиболее эффективные способы регулирования потоков активной мощности и ограничения токов короткого замыкания;
2. Создана компьютерная модель ФПК для расчета переходных процессов и установившихся режимов в ЭЭС, учитывающая емкости обмоток и свойства материала магнитопровода;
3. На основании проведенных расчетов ПВН даны рекомендации по ограничению скорости нарастания ПВН ниже допустимых пределов;
4. Обоснована необходимость проведения при включении электропередачи с ФПК под напряжение для расчетов максимальной величины броска тока намагничивания;
5. Выполнено компьютерное моделирование работы алгоритма автоматического поддержания заданного потока мощности с помощью регулирования отпаяк РПН ФПК на электропередаче 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная при различных схемно-режимных ситуациях в энергосистеме города Санкт-Петербурга и Ленинградской области;
6. Разработаны рекомендации по организации РЗ электропередачи с ФПК на примере электропередачи 110 кВ Балтийская – Белая Мель – Волхов-Южная;
7. Показана эффективность применения ФПТ в схеме выдачи мощности Саратовской ГЭС.

**ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ, В КОТОРЫХ ОТРАЖЕНЫ  
РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ:**

Статьи в изданиях из перечня ВАК:

1. Совместное регулирование потоков мощности и ограничение токов короткого замыкания с помощью фазоповоротного трансформатора [Текст] / Брилинский А.С., Евдокунин Г.А., Мингазов Р.И., Петров Н.Н., Чудный В.С. // Электрические станции. - 2017. - № 7. - С. 20-29.

2. Исследование эффективности применения фазоповоротного трансформатора для повышения динамической устойчивости электростанции / Бадур М.А., Брилинский А.С., Евдокунин Г.А., Крицкий В.А., Мингазов Р.И. // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2019. - №2(81). – с. 23-33.

Статьи в других изданиях:

1. S. V. Smolovik, A. S. Brilinskiy, V. S. Chudny, R. I. Mingazov and N. N. Petrov, "Phase-shifting transformer as short-circuit current-limiting device," 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), St. Petersburg, 2017, pp. 1585-1589.

2. A. S. Brilinskiy, G. A. Evdokunin, V. S. Chudny, R. I. Mingazov and T. A. Ponomarev, "Investigation of causes of dry-type transformer on-load tap-changer insulation," 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), Moscow, 2018, pp. 591-597.

3. A. S. Brilinskiy, M. A. Badura, G. A. Evdokunin, V. S. Chudny and R. I. Mingazov, "Phase-Shifting Transformer Application for Dynamic Stability Enhancement of Electric Power Stations Generators", 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), St. Petersburg, 2020, pp. 1176 – 1178.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C.M. Arturi. Transient simulation and analysis of three-phase five-limb step-up transformer following an out-of-phase synchronization. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 1, January 1991.89.
2. Eilert Bjerkan. HIGH FREQUENCY MODELING OF POWER TRANSFORMERS. Doctoral Thesis. С. 202 – 207.
3. Демирчан К.С., Бутырин П.А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей: Учеб. пособие для электр. и электроэнерг. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1988
4. Брилинский А.С., Плохих М.И., Смоловик С.В. Координация токов короткого замыкания в сетях высокого напряжения мегаполиса (на примере энергосистемы Санкт-Петербурга и Ленинградской области) // Электро. 2012. №1. С. 11-16.
5. Артемьев М.С., Брилинский А.С., Паршина Н.И., Смоловик С.В. Математическое моделирование токоограничивающего устройства, использующего эффект насыщения магнитопровода // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2012. №2(67). С. 51-66.
6. Артемьев М.С., Брилинский А.С., Паршина Н.И., Смоловик С.В. Модель токоограничивающего устройства, использующего эффект насыщения магнитопровода / Материалы научно-практической конференции «Energy2012. Повышение эффективности энергетического оборудования»: в 2 т. Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2012. Т. 2. 514 с.
7. Артемьев М.С., Брилинский А.С., Паршина Н.И., Смоловик С.В. Разработка математической модели токоограничивающего устройства, использующего эффект насыщения магнитопровода // Энергоэксперт. 2012. №6(35). С. 34-41.
8. Брилинский А.С., Евдокунин Г.А. Моделирование и анализ токоограничивающих свойств реактора, управляемого подмагничиванием // Известия РАН. Энергетика. 2013. №4. С. 37-48.

9. Брилинский А.С., Евдокунин Г.А., Смоловик С.В., Шепель Ю.И. Методика расчёта параметров основных элементов конструкции токоограничивающего реактора с подмагничиванием // Электрические станции. 2015. №11(1012). С. 42-46.
10. ГОСТ Р52565-2006 «Выключатели переменного тока. Общие технические условия», 2006.
11. СТО 56947007-29.130.10.095-2011 Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» «Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 1150 кВ. Указания по выбору», 2011.
12. Евдокунин Г.А., Николаев Р.Н., Искаков А.К., Оспанов Б.К., Утегулов Н.И. Фазоповоротный трансформатор впервые в СНГ применен в Казахстане//Новости электротехники, 6(48), 2008 г.
13. Особенности применения фазоповоротных комплексов в электроэнергетических системах/ Брилинский А.С., Крицкий В.А., Смирнова Л.С. // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2018. - №1(78). – с. 6-10.
14. Методические указания по устойчивости энергосистем, утверждённые приказом Минэнерго России от 03.08.2018 № 630.
15. Hingorani N.G., Gyugyi L., Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. IEEE Press, N.Y., 2000, 427 pp.
16. Евдокунин Г.А., Коршунов Е.В., Сеппинг В.А., Ярвик Я.Я. Метод расчета на ЭВМ электромагнитных переходных процессов в ферромагнитных устройствах с произвольной структурой магнитной и электрической цепей. - Электротехника, 1991. - № 2, с. 56-59.
17. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Моделирование переходных процессов в электрической сети, содержащей трансформаторы при учёте конфигурации их магнитной системы // Известия РАН. Энергетика, №2, 2009 г. –с.37-48.

18. Евдокунин Г.А., Николаев Р.Н. Моделирование и анализ переходных процессов в трансформаторах//Научно-технические ведомости СПбГПУ 4-1 (89), 2009 г., С.207-215.
19. Евдокунин Г.А., Брилинский А.С. Моделирование и анализ токоограничивающих свойств реактора, управляемого подмагничиванием // Известия РАН. Энергетика, №4, 2013 г. –с.36-46.
20. «Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования», утвержденные в 1999г. Министерством экономики РФ, министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике.
21. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. Учеб. пособие для вузов. Изд. 4-е, перераб. И доп. М., «Энергия», 1976, 544 с. с ил.
22. С.М. Arturi Transient simulation and analysis of three-phase five-limb step-up transformer following an out-of-phase synchronization. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 1, January 1991.
23. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.: ил.
24. Новгородцев А.Б. Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей: Учебное пособие. 2-е издание. СПб.: Питер, 2006. – 576 с.: ил.
25. Кулешов А.И., Прахин Б.Я. Расчет и анализ установившихся режимов электроэнергетических систем на персональных компьютерах: Учеб. пособие Иван. гос. энерг. ун-т – Иваново, 2001. – 171 с. ISBN
26. Зирка С.Е., Мороз Ю.И., Мороз Е.Ю., Тарчуткин А.Л. Моделирование переходных процессов в трансформаторе с учетом гистерезисных свойств магнитопровода//Техническая электродинамика. 2010. №2.
27. Петров Г.Н. Трансформаторы. М., ОНТИ, 1934. 446 с.
28. Серебряков А.С. Трансформаторы: учеб. пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – 360 с.: ил.

29. Карапетян И.Г., Файбисович Д.Л., Шапиро И.М. Справочник по проектированию электрических сетей. М.: НЦ Энас, – 2006 г. – 352 с.
30. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники, 4-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – Т.1. 424с. Т.2. 576с.
31. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.
32. Справочник по проектированию электроэнергетических систем. – 3-е изд. / под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 347с.
33. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. для вузов. СПб.: Питер, 2007.
34. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Спр. Книга. Л.: Энергоатомиздат ЛО, 1986. 488 с.