

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем  
(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Разработка и исследование имитационной модели управляемого шунтирующего реактора в составе электроэнергетической системы»

Студент

В.М. Венжанов

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

Научный

В.Н. Кузнецов

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

руководитель

Руководитель программы д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Тольятти 2017

## Содержание

Введение.....	3
1 Анализ существующих управляемых шунтирующих реакторов и процессов происходящих в их электрической части .....	9
2 Разработка имитационной модели управляемого шунтирующего реактора.....	18
3 Исследование влияния УШР на процессы, протекающие в цикле автоматического повторного включения линии.....	49
4 Разработка мероприятий по увеличению эффективности применения УШР 110 кВ в электрической сети.....	65
Заключение .....	85
Список использованных источников .....	87

## Введение

С момента промышленного изготовления и внедрения первого управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора (УШР) прошло уже более пятнадцати лет. На данный момент опыт поставок УШР насчитывает более 80 единиц на различные классы напряжения. В то же время обычные реакторы могут отрицательно влиять на работу системы из-за увеличения потерь активной мощности. Основным недостатком традиционных реакторов является проблема, связанная с низкой способностью переключения. Предотвращение перенапряжений делает необходимым включение реакторов независимо от передаваемой мощности, что приводит к снижению пропускной способности системы. Длительное расширение с улучшенными экономическими характеристиками и повышенной пропускной способностью. К настоящему времени в России разработан принципиально новый тип шунтирующих реакторов, контролируемых намагничиванием, мощностью до 180 МВА с напряжением до 500 кВ. Конструкция реакторной фазы представляет собой трансформатор с разнесенным стержнем. Из-за потери и потребления материалов реактор мало чем отличается от двухмоторного трансформатора сопоставимой мощности и напряжения. Основным технологическим принципом, связанным с разработкой управляемого реактора, является то, что этот реактор представляет собой трансформаторное устройство, которое дополнительно выполняет функции полупроводникового ключевого устройства из-за работы магнитных стержней реактора в области насыщения. Техничко-экономические анализы показывают, что наиболее эффективным способом компенсации реактивной мощности, поддержания необходимого уровня напряжения на линиях сверхвысокого напряжения и снижения потерь является использование контролируемых шунтирующих реакторов (УШР), а также СШП в комбинации с конденсаторными батареями, которые позволяют создавать гибкие передачи переменного тока. В силу значительной протяженности линий электропередач и специфики построения

электрических сетей в России управляемые шунтирующие реакторы находят широкое применение на всей ее территории.

Большая протяженность электрических сетей России и СНГ и их графики изменения нагрузки вызывают значительное увеличение напряжения относительно номинального значения в режиме минимальной нагрузки из-за избыточной реактивной мощности, генерируемой линиями передачи. В связи с этим имеются значительные потери мощности, принудительное переключение оборудования и старение его изоляции. Неконтролируемые шунтирующие реакторы (ШР) являются одним из важнейших элементов протяженных линий электропередач,

Кроме того, следует отметить, что не только неправильная оценка соотношения параметров линии и параметров реактора, но и неправильная разработка алгоритмов управления УШР может привести к нежелательным последствиям, к которым можно отнести не только неуспешное автоматическое повторное включение линии с УШР, но и повреждение оборудования, входящее в состав реактора. Встроенный принцип позволил использовать оптимальный способ существования существующих как в области трансформаторной конструкции, так и в области силовой электроники. Использование двунаправленных шунтирующих реакторов позволяет использовать систему передачи энергии с приемлемым пределом устойчивости как для однонаправленной, так и обратной передачи энергии. UBR можно рассматривать как одно из простейших и наиболее важных устройств технологии FACTS. Взаимодействие в области поддержки и поддержки его пропускной способности (с соответствующим контролем напряжения). Реактивная мощность, потребляемая контролируемой энергией в любом режиме работы силовой линии, может быть согласована с потоком мощности по линии. В этом случае пропускная способность линии ограничивается только допустимым значением тока, протекающим через проводники. Практика эксплуатации УШР на линии свидетельствует о том, что применение универсальных алгоритмов управления, которые традиционно закладываются в

автоматизацию реактора, может привести к неудачной АПВ линии. Связано это с тем, что необходимый уровень предварительного подмагничивания для включения УШР в сеть достигается за гораздо большее время, нежели время бестоковой паузы. Увеличение времени АПВ линии может приводить к нарушению динамической устойчивости электрической системы. В отличие от традиционного решения - трансформатор связи, а также противоположный тиристорный клапан на полную мощность - в УШР имеется только определенное трансформаторное устройство, в котором индуктивность обмоток играет роль реактора, поскольку, А также противоположный тиристорный клапан - насыщаемый стержень. В результате вместо трех силовых элементов происходит одно. УШР, в отличие от СТК, не требует установки мощных фильтров с высокой гармоникой для обеспечения качества напряжения. Надежность работы УШР выше, а затраты на обслуживание ниже, чем для СТК, то есть практически такие же, как при эксплуатации трансформаторного оборудования. В результате себестоимость УШР также значительно ниже, чем у СТК. Таким образом, магнитоуправляемые шунтирующие реакторы представляют собой высоковольтные (до нескольких сотен МВА) высоковольтные (до 500 кВ) трехфазные ферромагнитные катушки с переменным индуктивным сопротивлением. Изменение индуктивности УШР для достижения магнитной системы, контролируемой величиной магнитных потоков. Ограничить использование синхронных генераторов в качестве контролируемых источников реактивной мощности. В последние годы Россия освоила производство контролируемой намагниченности реакторов в диапазоне мощности от 190 кВА до 180 МВА для всех классов напряжений от 6 до 500 кВ. Шунтирующие реакторы, управляемые смещением, представляют собой мощный трехфазный магнитный усилитель, в котором ядерный магнитный сердечник широко распространен. В то же время конструктивно и технологически электромагнитная часть УШР представляет собой обычный трехфазный трансформатор, аналогичный по производству, монтажу и

техническому обслуживанию в эксплуатации на маслonaполненном наружном оборудовании - трансформаторах или неконтролируемых реакторах класса напряжения и класс мощности. образом, разработка алгоритма управления УШР, позволяющего снизить время обеспечения готовности реактора к включению, либо разработка мероприятий, позволяющих отказаться от запрета завода изготовителя на включение реактора без его предварительного подмагничивания.

В результате плавное регулирование количества потребления энергии получается от номинальной стоимости, а также обратно во времени от 0,3 с или более в соответствии с режимами. Допускается допустимая избыточная мощность реактора до 120% и кратковременная перегрузка реактора до 200% от номинального значения. Основные функциональные возможности трехфазного управляемого смещения шунтирующих реакторов с максимальным насыщением магнитной цепи включают в себя следующее:

- Широкий диапазон плавного управления (от холостого до номинального или максимально допустимого) с неограниченным количеством переходов до требуемого значения потребления энергии.

- Возможность длительной перегрузки на 20% и кратковременная перегрузка на 100%.

- Степень нелинейного искажения в сетевом процессоре в зависимости от требований и уровня техники может быть уменьшена с 4% до 1% от номинального тока сетевой обмотки.

- Такой комплекс представляет собой полную замену синхронного компенсатора, что может привести к тому, что он будет заменен.

- При соответствующем увеличении мощности вторичной обмотки, подключенной к треугольнику, нагрузку собственных нужд или другую активную нагрузку подстанции можно подключить к ее клеммам (то есть, реактор объединяет функции трансформатора).

– При использовании реактора в качестве линейного на линии с ОАВ его выполнение заменяется на фазу с возможностью демпфирования дуги емкостного тока.

– Состав реакторного оборудования в зависимости от цели и требований к полной, включая дополнительное оборудование (фильтры, переключатели, конденсаторные установки, средства дугогашения и т. д.).

– Постоянная времени для регулирования мощности (скорость) по желанию заказчика или места подключения может варьироваться от 0,1 до 1 с. При необходимости набор мощности при включении или двойном нажатии выполняется без инерции (в течение одного периода промышленной частоты).

Для обеспечения возможности исследования обозначенных проблем должна быть создана математическая модель УШР, отражающая реальные процессы, протекающие в реакторе и энергосистеме. Таким образом, разработка имитационной модели УШР в среде Simulink, верифицированной по натурным испытаниям, является актуальной задачей.

Связано это с тем, что необходимый уровень предварительного подмагничивания для включения УШР в сеть достигается за гораздо большее время, нежели время бестоковой паузы. Увеличение времени АПВ линии может приводить к нарушению динамической устойчивости электрической системы. Таким образом, разработка алгоритма управления УШР, позволяющего снизить время обеспечения готовности реактора к включению, либо разработка мероприятий, позволяющих отказаться от запрета завода изготовителя на включение реактора без его предварительного подмагничивания. Для управления магнитным усилителем требуется мощность, на 2-3 порядка меньше первичной мощности, смещение представляет собой трехфазный трансформатор с тиристорной выпрямительной мощностью 1-2% от номинальной мощности УШР. Трансформатор с преобразователем, как и электромагнитная часть реактора, представляет собой заполненное маслом наружное оборудование, которое не требует особых условий или подготовки персонала при проектировании, монтаже и эксплуатации оборудования.

Система автоматического управления СШП посредством выполнения микропроцессора в стандартном шкафу внутренней системы, которая обеспечивает требуемые алгоритмы управления для обеспечения стабилизации напряжения в точке подключения реактора или его заданной мощности (или другого алгоритма управления, указанного мощностью система). В соответствии с функциональностью реактора (СТК), состоящего из тиристорно-реакторной группы, подключенной к высоковольтной сети через соединительный трансформатор.

Для обеспечения возможности исследования обозначенных проблем должна быть создана математическая модель УШР, отражающая реальные процессы, протекающие в реакторе и энергосистеме. Разработка имитационной модели УШР в среде Simulink, верифицированной по натурным испытаниям, является актуальной задачей.

Пятнадцатилетний опыт применения управляемых реакторов 110 кВ позволяет утверждать, что на начальных этапах применения УШР, они устанавливались исключительно с целью стабилизации напряжения в точке подключения.

#### **Цель работы.**

Целью работы является разработка способов и алгоритмов более эффективного использования в электрической сети на основе математического моделирования, управляемого шунтирующего реактора.

#### **Задачи исследования:**

1. Разработать имитационные модели УШР 110 Кв в программе Matlab.
2. Исследовать влияние УШР на электросистему. Разработать аналитические выражения, определяющих эффективность.
3. Исследовать процессы в реакторе и разработать на их основе действия, позволяющие обеспечить надежность оборудования реактора.

## 1 Анализ существующих управляемых шунтирующих реакторов и процессов происходящих в их электрической части

На рисунке 1.1 показана магнитная система трехфазного шунтирующего реактора, а на рисунке 1.2 показана электромагнитная схема трехфазного трёхполюсного реактора серии РТУ с напряжением 220 кВ и выше. Сердечники всех фаз магнитного сердечника разделены на два стержня, на каждом из которых расположены участки компенсационной обмотки, соединенные в треугольник. В верхней части секции управления расположены секции управляющей обмотки, включенные в каждую фазу последовательно с обмотками СО и КО (начало секций обмоток отмечено звездочкой). Выходы всех фаз операционного усилителя соединены параллельно и подключены к клеммам ТМП-преобразователей. Каждая фаза сетевой обмотки выполняется параллельными ветвями с вставкой посередине и наматывается поверх вторичных обмоток с охватом обеих стержней.

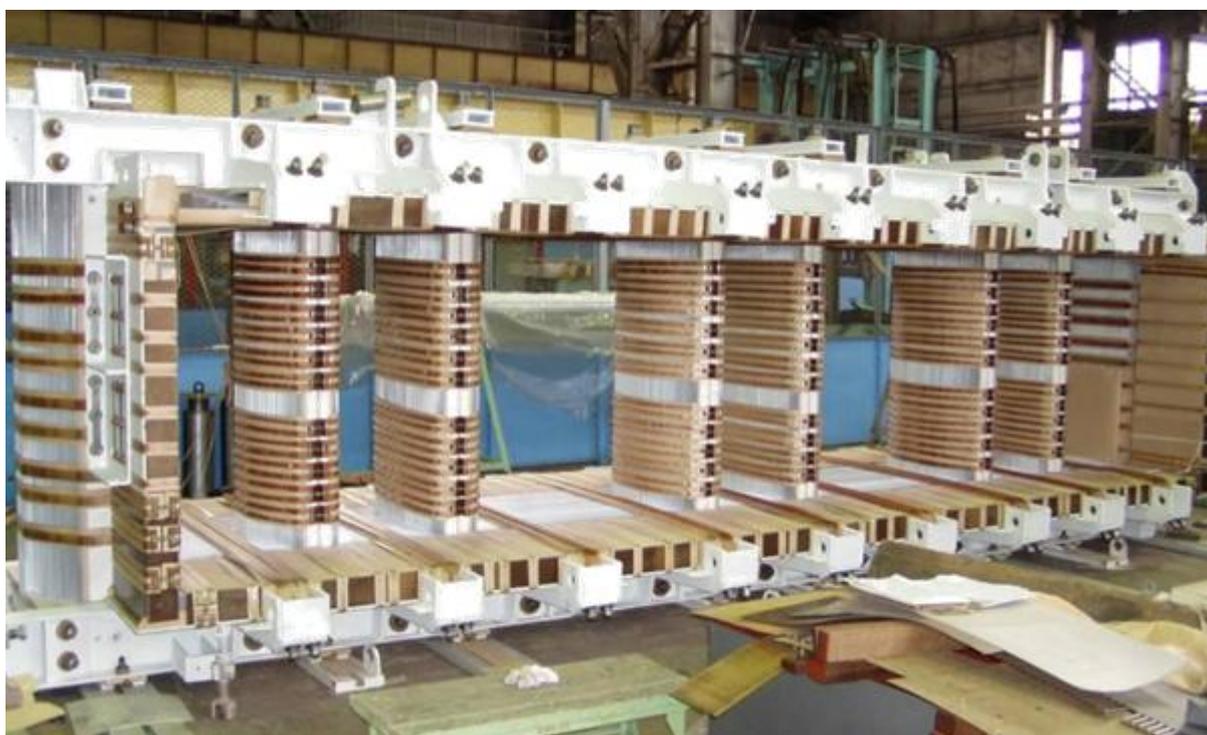


Рисунок 1.1 - Магнитная система УШР с подмагничиванием

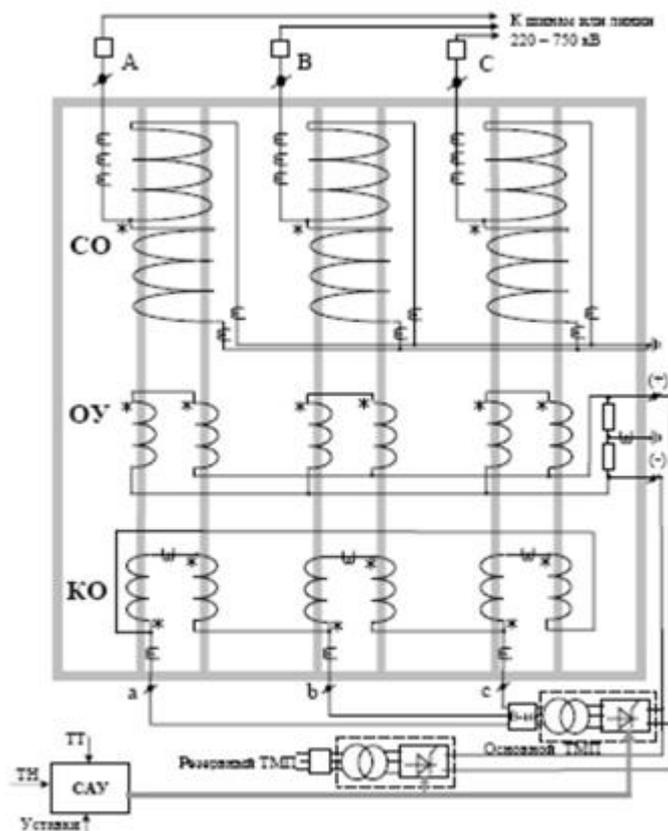


Рисунок 1.2 - Электромагнитная схема трехфазного трехобмоточного управляемого шунтирующего реактора, система автоматического управления; трансформатор с преобразователем; сетевая обмотка, обмотка управления, компенсационная обмотка

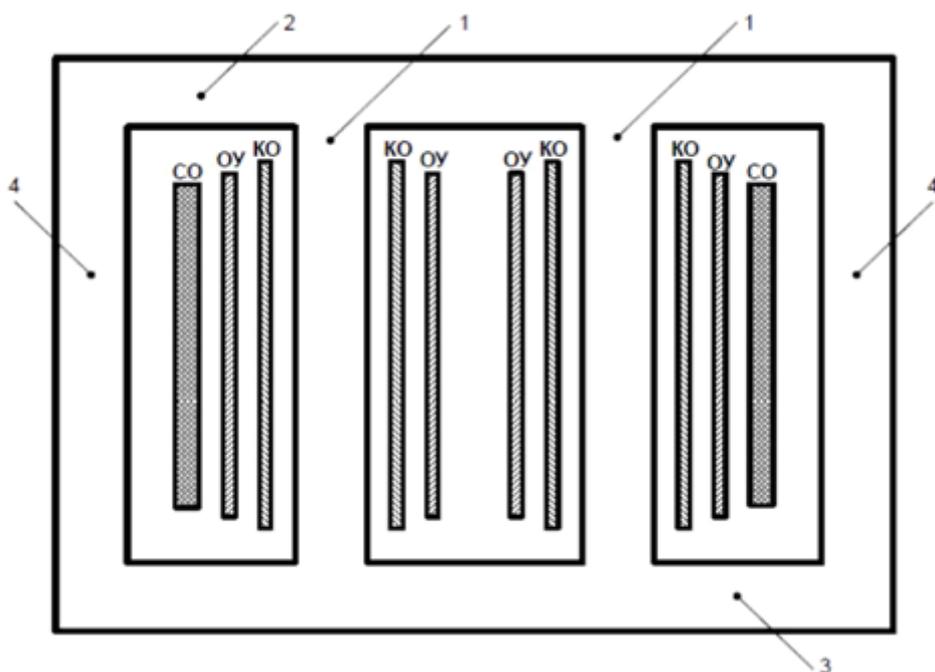


Рисунок 1.3 - Разрез магнитной системной одной фазы УШР 500 кВ

Как у тиристоров, ток смещения в секциях управляющих обмоток увеличивается, что приводит к насыщению сердечников магнитной цепи и росту потребляемого тока реактора. Тиристоры основного и в случае его предотвращения или неисправности) управляются из цифровой системы автоматического управления в соответствии с выбранным алгоритмом стабилизации напряжения или для предоставления заданного значения потребляемой мощности. Для реализации этих алгоритмов АСУ принимает сигналы от трансформаторов напряжения и тока, а также от систем управления. После выбора режима и установки требуемого количества действий в автоматическом режиме работы реактора не требуется. На рисунке 1.4 приведена полная схема электрических соединений реактора 500 кВ однофазного исполнения.

Магнитная система не показана, но, как и на рисунке 1.4, изображена, система намагничивания трех ТМП (в трансформаторе ТМ и тиристоре Преобразователь ПП) и системы управления. Кроме того, поставка включает выпрямленные датчики тока и напряжения (ДПТ и ДПН).

На схеме, приведенной на рисунке 1.4 представлено следующее оборудование, входящее в состав комплекса УШР серии РТУ-180000/500-УХЛ1:

- 1 РОДУ-600000/500 - электромагнитная часть РТУ-180000/500;
- 2 ТМД- трансформатор динамических режимов, 1000 кВА, 6(10)/1,1 кВ;
- 3 ТМО – основной трансформатор статических режимов 1000 кВА, 10/0,40 кВ;
- 4 ТМР – резервный трансформатор статических режимов 1000 кВА, 10/0,40 кВ;
- 5 ППО, ППС, ППД – полупроводниковые трехфазные управляемые преобразователи;
- 6 САУ – система автоматического управления;
- 7 ДПТ – датчик постоянного тока;
- 8 ДПН – датчик постоянного напряжения;

## 9 ОПН – защитное устройство.

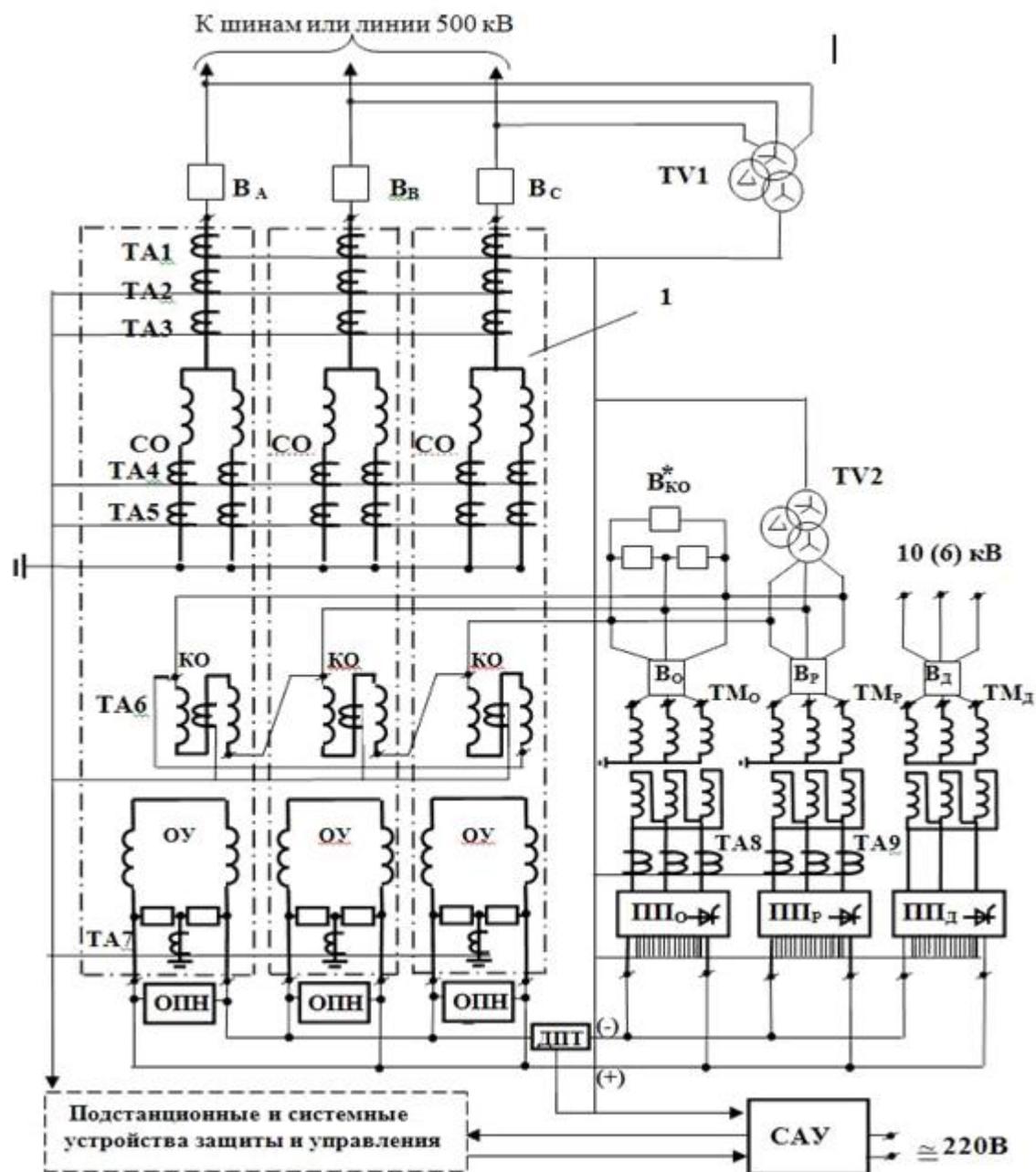


Рисунок 1.4 - Схема соединений УШР 500 кВ однофазного исполнения

На схеме, приведенной на рисунке 1.4 представлено следующее оборудование, входящее в состав комплекса УШР серии РТУ-180000/500-УХЛ1:

- 1 РОДУ-600000/500 - электромагнитная часть РТУ-180000/500;
- 2 ТМД- трансформатор динамических режимов, 1000 кВА, 6(10)/1,1 кВ;

3 ТМО – основной трансформатор статических режимов 1000 кВА, 10/0,40 кВ;

4 ТМР – резервный трансформатор статических режимов 1000 кВА, 10/0,40 кВ;

5 ППО, ППС, ППД – полупроводниковые трехфазные управляемые преобразователи;

6 САУ – система автоматического управления;

7 ДПТ – датчик постоянного тока;

8 ДПН – датчик постоянного напряжения;

9 ОПН – защитное устройство.

Датчик постоянного тока, включенный в вырез любого полюса шины, является выпрямителем тока между всеми ТМП и РОДУ и предназначен для управления и ограничения тока смещения САУ от любого работающего ТМП. Как упоминалось выше УШР 500 кВ могут быть изготовлены как в трехфазном исполнении мощностью 180 МВА, так и в виде группы однофазных реакторов мощностью 60 МВА.

Кроме основного состава оборудования УШР (ЭМЧ, САУ, ТМП) для линейных УШР при необходимости могут применяться компенсационный реактор (КР), устанавливаемый в нейтраль сетевой обмотки УШР, а также дополнительные пофазноуправляемые выключатели, устанавливаемые между фазами компенсационной обмотки. Необходимость КР и выключателей КО обусловлена участием ЛУШР в циклах АПВ, однако их выбор должен осуществляться только на основании расчетов неполнофазных режимов, а не применяться повсеместно.

Трансформаторы всех ТМП имеют одинаковую мощность и схемы соединения «звезда-нуль-треугольник», который позволяет включать их первичную обмотку как с изолированной, так и с заземленной нейтралью. Для ТМП, подключенных к компенсационной обмотке реактора, в большинстве случаев используется тупое заземление нейтрали первичной обмотки силового трансформатора, что обеспечивает высокие токи замыкания на землю и

чувствительность МТЗ как для межфазных, так и Однофазное короткое замыкание.

Встроенные тиристорные преобразователи ТМП в отдельном масляном баке выполняются по известной схеме «Ларионов» с дополнительной шунтовой ветвью, которая используется при работе трехфазного выпрямительно-инверторного преобразователя при работе на индуктивной нагрузке.

Необходимо отметить, что использование для регулирования мощности в УШР трансформаторно-преобразовательного блока малой мощности (1% номинальной мощности реактора), накладывает на оборудование, входящее в состав реактора и на алгоритмы его управления, особые требования при применении УШР на линии. Проведенные на ряде сетевых объектов эксперименты с участием и под руководством автора показывают, что коммутация реактора может вывести из строя полупроводниковый преобразователь ТМП.

Качество напряжения в энергосистеме зависит от ряда факторов: значение используемой мощности не постоянно, по крайней мере, в течение года и в течение дня. В соответствии с этим требуется изменение режима выработки электроэнергии и ее передачи по линии. В случае передачи мощности по линии, ее поле компенсируется. При передаче мощности, меньшей естественной линии, она генерирует избыточную реактивную мощность. В незанятой фазе генирирует максимальное количество реактивной мощности. По мере того как мощность, передаваемая по линии, возрастает, ток увеличивается и, соответственно, увеличивается сила магнитного поля. При передаче естественной энергии по линии мощность его электрического и магнитного полей одинакова, что обеспечивает взаимную компенсацию. Когда мощность передается сверх естественной, мощность магнитного поля линии превышает мощность ее электрического поля, и линия становится потребителем реактивной мощности. Реактивную мощность генерируемую линиями, необходимо компенсировать энергосистемой.

В режимах с низкой нагрузкой - с емкостной природой реактивных токов - напряжение в энергосистеме возрастает. В режимах максимальной нагрузки - индуктивных реактивных токов - напряжение уменьшается. Важными задачами при проектировании и эксплуатации энергосистем являются минимизация этих колебаний.

Проблема стабилизации напряжения и увеличения пропускной способности передающей сети актуальна во всем мире, особенно в странах с протяженными территориями, с большой протяженностью соединений между соседними подстанциями. Для решения этой проблемы был разработан ряд устройств, предназначенных для компенсации реактивной мощности. Шунтирующие реакторы относятся к таким устройствам.

Работа линий электропередач - это связь между электростанциями и потребителями электроэнергии. Все линии электропередачи относятся к распределительным, системообразующим и межсистемным линиям. По распределительным линиям электричество передается на относительно короткие расстояния, обычно не превышающие нескольких десятков километров, что значительно меньше - до ста километров и более. По ВЛ электричество передается на сотни километров. Длина межсистемных воздушных линий передач может быть более тысячи километров. Напряжение линий распределения не превышает 220 кВ, магистральных - 500 кВ, а также напряжение межсистемных линий, соответственно, 750 кВ и выше, в зависимости от длины линий.

Основными показателями энергопотребления потребителей являются надежность и качество электроэнергии. Они определяют основные требования к линии электропередач.

1. Линии передач требуется осуществлять передачу мощности в нормальном и после аварийном режимах. В соответствии с нормативными документами и стандартами,

В режиме после аварии передача по линии электропередачи может значительно увеличиться (например, при отсоединении параллельной линии).

Изменение напряжения от предусмотренного значения ограничено. Увеличение напряжения на линиях в их нормальных режимах использования должно быть ограничено из-за износа и нарушения изоляционных свойств электрооборудования.

Недостаточное напряжение в нормальных условиях работы должно быть ограничено для лучших условий эксплуатации электрооборудования.

2. Падение напряжения вдоль линии недопустимо.

3. Плотность тока в проводах в нормальном режиме выбирается экономическим состоянием передачи, в режиме после сбоя - в соответствии с условиями нагрева проводов.

4. Как в нормальном, так и в пост-аварийном режиме необходимо обеспечить баланс реактивной мощности в системе.

5. Потери на короне, а также радиопомехи на линии должны быть минимальными. Воздушные

линии составляют как электрические, так и магнитные поля. У нас есть следующие функции. Электрическое поле линии мало меняется при изменении нагрузки в течение дня, а также из-за ограниченных интервалов изменения напряжения. Магнитное поле изменяется в пределах вместе с изменением тока. Это определяет основные принципы работы ЛЭП.

Другая особенность заключается в том, что при большой длине линии напряжение и ток изменяются на всём протяжении линий. Фазовый сдвиг вдоль линии определяется скоростью распространения электромагнитной волны  $v$ , работающей с параметрами линии отношения:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$$

где  $L_0$  – погонная индуктивность,  $C_0$  – погонная емкость линии.

Явление передачи электроэнергии по ЛЭП имеет волновую природу, что создаёт необходимость рассмотрения волновых процессов при исследовании работы линий электропередач.

Пропускная способность линий электропередач – максимальная мощность, передаваемая по линии без ограничений по длительности передачи электроэнергии, поддержания плотности тока не более допустимых значений, а также соблюдения прочих требований. Основные среди них:

- точное ограничение критической плотности тока;
- контролирование изменения напряжения;
- обеспечение устойчивости режима.

Обеспечение первого требования достигается оптимальным выбором активного сечения проводов на этапе проектирования линии.

Требования подразумевает обеспечение баланса реактивной мощности, который может быть достигнут, в большей или меньшей степени, с помощью использования специальных компенсирующих устройств.

Условия определяют дополнительные требования к параметрам линии и компенсирующим устройствам. При нормальной работе переменные напряжения ограничены допустимым уровнем напряжения - самым высоким рабочим напряжением. Предполагается, что номинальное напряжение является минимальным напряжением в нормальном режиме. Кроме того, выше уровня напряжения линии электропередачи, чем меньше разница между долгосрочным и номинальным напряжениями. Такое ограничение сложилось ввиду повышения добротности линии (увеличения отношения индуктивного и активного сопротивления линий) при повышении класса напряжения. Но увеличение длины линий электропередач сверхвысоких классов напряжения создаёт существенные трудности обеспечения данного ограничения.

## 2 Разработка имитационной модели управляемого шунтирующего реактора

Расчеты в выбранном современном программном комплексе основываются на имитационном моделировании магнитосвязанной цепи, который является методом математического моделирования, при котором запись и решение системы уравнений, отличия конструкций моделируемых реакторов, а также различия решаемых задач.

В силу того, что управляемый подмагничиванием реактор является сложным электротехническим устройством, которое характеризуется нелинейными свойствами электротехнической стали, то учет всех физических явлений, происходящих в магнитной системе реактора, неизбежно приведёт к ухудшению численного расчета модели, что вызовет недопустимо большую длительность вычислений. Очень важно на начальном этапе создания модели определить ряд основных допущений, которые с одной стороны приведут к снижению времени расчета, а с другой – не приведут к искажению результатов расчета.

### 2.1 Основные допущения

Основные допущения, принятые при моделировании управляемого ректора следующие:

1. Ярма магнитопровода, которые служат для замыкания магнитного потока обмоток и как следствие предотвращения его выхода за пределы магнитопровода, не насыщаются, во всех рассматриваемых режимах их магнитная проницаемость бесконечна ( $\mu=0$ ). Практика изготовления УШР показывает, что конструкцией реактора предусмотрено применение приставных к боковым ярмам шунтов, спроектированных таким образом, чтобы даже двойной номинальный магнитный поток не приводил к насыщению ярма.

2. Магнитная индукция везде в стержне до его насыщения одинакова.

3. Плоские поверхности широких ненасыщенных ярем прилегают к торцам стрежней и концентрических равномерных равновысоких обмоток.

4. Обмотки тонкие. При расчете обмоток и потокосцеплений учитывается одна и та же площадь, охваченная эквивалентным средним витком обмотки.

5. Не учитываются потери в стали от вихревых токов и явление гистерезиса.

6. Не учитывается модель преобразовательного блока, который в представленных моделях заменяется регулируемым источником постоянного напряжения. Данное допущение не сказывается на результатах моделирования, однако значительно снижает время расчета.

7. Длина пути потоков рассеяния принимается равной высоте окна магнитной системы автотрансформатора;

## 2.2 Конструкция фазы УШР

Полное описание особенностей конструкции управляемого подмагничиванием реактора УШР 500 кВ было изложено выше, однако стоит детально остановиться на рассмотрении тех моментов, которые играют принципиальную роль при создании компьютерной модели.

Сетевая обмотка (СО) имеет только одну часть, охватывающую оба стержня, что позволяет обойтись без сложных соединений, сокращает расход материалов и упрощает конструкцию. В трехфазной группе однофазных реакторов СО разных фаз соединяются в звезду с заземляемой нейтралью.

Обмотка управления (ОУ) состоит из двух частей, каждая из которых охватывает один из стержней. Две части операционного усилителя включены, чтобы заставить магнитодвижущую силу (МДС), генерируемую током, протекающим через них, быть направленными в разные стороны.

Компенсирующая обмотка (КО) состоит из двух частей, каждая из которых охватывает один из стержней. Две части нокаута включены. В

трехфазной группе однофазных реакторов КО разных фаз соединены в треугольнике

Исходя из вышеизложенных особенностей УШР, а также сделанных предположений (2.1) создана схема замещения магнитной системы одной фазы УШР 110 кВ (рисунок 2.3)

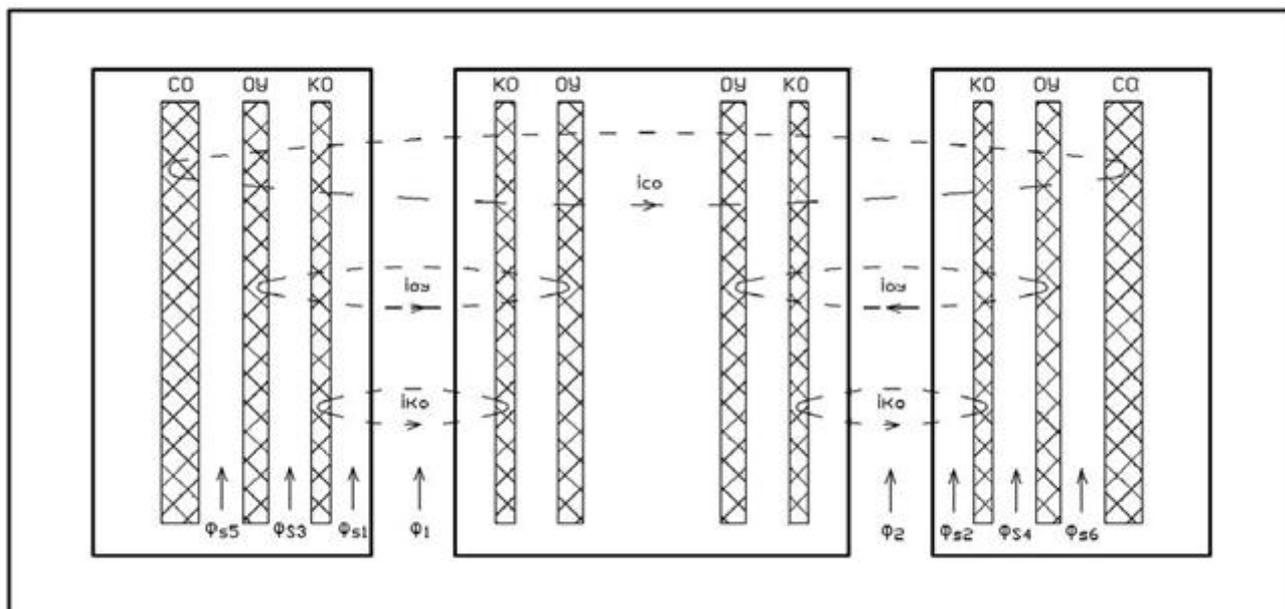


Рисунок 2.1 - Магнитная система одной фазы УШР

### 2.3 Разработка модели УШР в среде Simulink (Matlab)

Графическая среда Simulink является одной из наиболее широко используемых имитационных сред моделирования на сегодняшний день, позволяющих при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные, нелинейные и др. системы.

Рассмотрим простейшую неразветвленную замкнутую магнитную цепь, целиком состоящую из ферромагнитных материалов, на которую намотана обмотка с числом витков  $w$  (рисунок 2.4.). Приложенное к обмотке переменное ЭДС  $E$  вызывает протекание тока  $I$  в обмотке с числом витков  $w$ , который в свою очередь создает магнитный поток  $\Phi$ , циркулирующий в сердечнике.

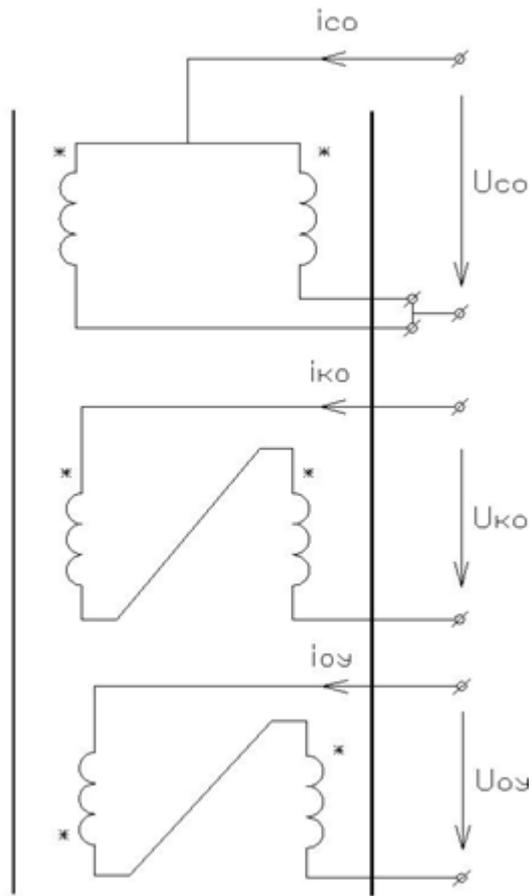


Рисунок 2.2 - Электрическая схема соединения обмоток одной фазы реактора

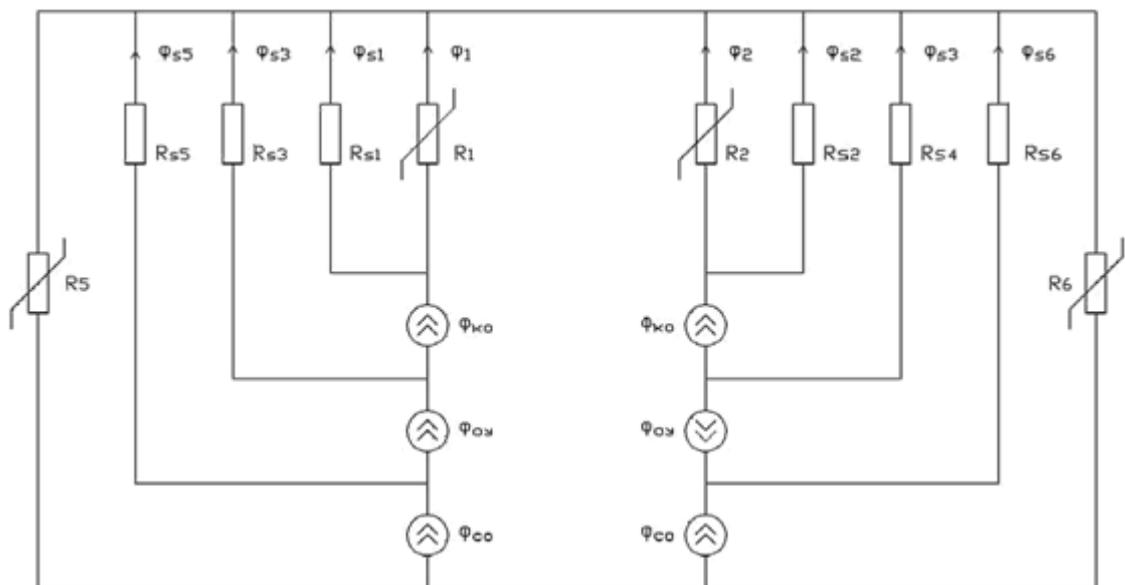


Рисунок 2.3 - Схема замещения магнитной цепи одной фазы УШР 110 кВ

Простейшую неразветвленную магнитную цепь можно представить в виде двух схем замещения - электрической (рисунок 2.4, а) и магнитной (рисунок 2.4, б).

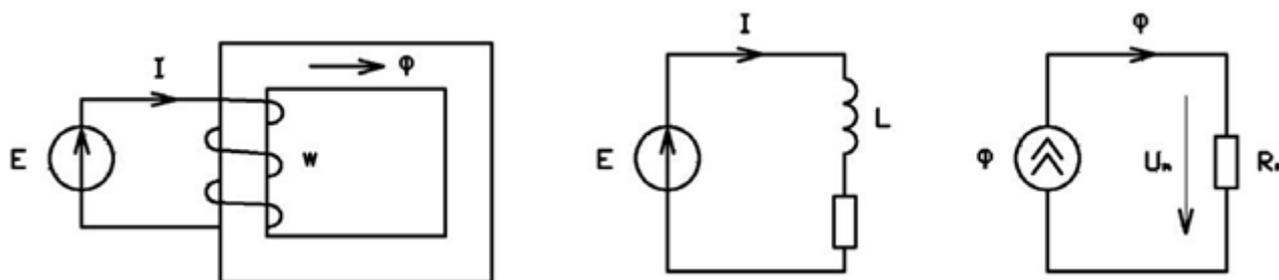


Рисунок 2.4 - Простейшая магнитная цепь и ее схемы замещения

Электрическая схема замещения рассматриваемой цепи содержит последовательно соединенные источник ЭДС, индуктивность обмотки  $L$  и сопротивление  $R$ , которое учитывает активные потери в обмотке.

Тогда для электрической схемы замещения рисунок 2.4, б.

$$\Phi = \frac{1}{w} \int \mathcal{E} - R \cdot I \sum d \quad (2.2)$$

Для схемы замещения магнитной цепи рисунок 2.4 в), которая состоит из одного участка ферромагнитного материала, где магнитный поток создается одной обмоткой с числами витков  $w$  и током  $I$  справедливо выражение:

$$U_m = I \cdot w = \Phi \cdot R_m \quad (2.3)$$

где  $U_m$  - магнитное напряжение;

$\Phi$  - поток, протекающий по магнитной системе;

$R_m$  - магнитное сопротивление ферромагнитного материала.

Основная суть моделирования магнитосвязанных цепей в среде Simulink сводится к созданию моделей электрической и магнитной цепи, которые связаны друг с другом посредством источника потока  $\Phi$ .

На рисунке 2.5 представлена структурная схема расчета электрической и магнитной цепи посредством источника потока.

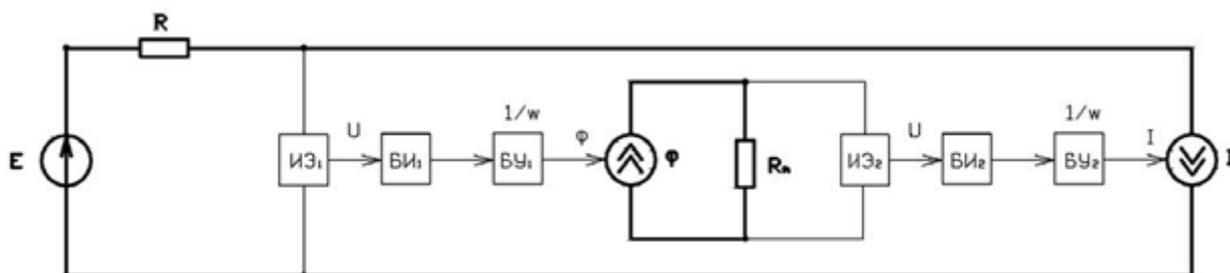


Рисунок 2.5 - Структурная схема расчета электрической и магнитной цепи посредством источника потока

В электрической части схемы расчета электромагнитных процессов (рисунок 2.5) посредством измерительного элемента ИЭ<sub>1</sub> происходит измерение напряжение на индуктивности, которое интегрируется в блоке интегрирования БИ<sub>1</sub>, полученное значение потокосцепления делится на число витков  $w$  в блоке усиления БУ<sub>1</sub>. Далее происходит переход к расчету процессов в магнитной цепи для чего сигнал, сформированный на выходе БУ<sub>1</sub> посредством управляемого источника тока, формирует магнитный поток, протекающий в магнитной цепи  $R_m$ . Падение магнитного напряжения на элементе  $R_m$ , вызванное протеканием потока  $\Phi$  в магнитной цепи, измеряется с помощью измерительного элемента ИЭ<sub>2</sub>, интегрируется в блоке БИ<sub>2</sub> и делится на число витков  $w$ , тем самым происходит обратный переход от расчета магнитной цепи к электрической. Сигнал, полученный на выходе БУ<sub>2</sub> подается на управляемый источник тока, что обеспечивает протекание тока  $I$  в катушке индуктивности.

На рисунке 2.6 представлена структура модели электротехнического блока связи электрической и магнитной цепи путем использования источника потока в среде Simulink.

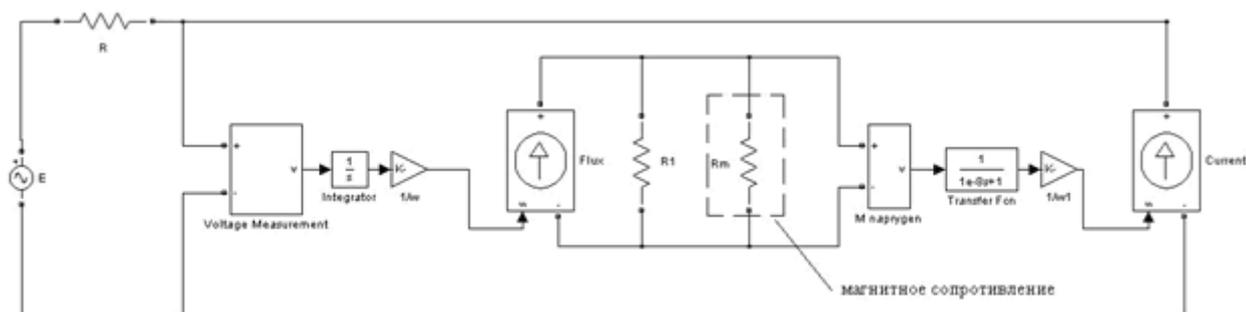


Рисунок 2.6 - Структура модели расчета электрической и магнитной цепи посредством источника потока в среде Simulink.

Стоит отметить наличие в модели дополнительных элементов, таких как сопротивления  $R1$  и фильтра с малой постоянной времени  $10^{-8}$ . Необходимость в схеме  $R1$  обусловлена тем, что при создании моделей магнитносвязанных цепей с несколькими обмотками, источники тока, которые в данном случае моделируют магнитный поток.

Алгебраические контуры рассчитываются в Simulink с помощью итерационной процедуры на каждом шаге расчета, что замедляет общее время расчета. Для исключения алгебраического контура в схему введен фильтр с малой постоянной времени. Значение постоянной времени должно быть таким, чтобы наличие фильтра не приводило к изменению динамических свойств модели.

Принцип работы данных устройств имеет некоторые различия. В устройствах первого типа ток ВО регулируется изменением угла открытия тиристорov, включенных встречно-параллельно. Неполное открытие тиристорov неизбежно приводит к ухудшению гармонического спектра тока. Четные гармоники и гармоники кратные трем исключаются. Для компенсации остальных гармоник (5-ой, 7-ой, 11-ой) могут быть применены

соответствующие фильтры. Однако данное техническое решение ведёт к дополнительным затратам.

Устройства второго типа имеют преимущества по чистоте спектра тока. Снижение уровня высших гармоник в токе достигается с помощью регулирования мощности УШРТ, осуществляемого следующим образом:

При рабочей мощности от минимальной до  $0,5S_{\text{ном}}$  ВО, соединенная в звезду, разомкнута. Ток обмотки, соединенной в треугольник, регулируется тиристорами.

При рабочей мощности от  $0,5S_{\text{ном}}$  до  $S_{\text{ном}}$  ВО, соединенная в треугольник, замкнута накоротко. Ток ВО, соединенной в звезду, регулируется с помощью тиристорov. Тем самым, в замкнутой накоротко ВО высшие гармоники не генерируются, общий уровень высших гармоник снижается примерно в 2 раза по сравнению с устройствами первого типа.

Таким образом, использование УШРТ с разделёнными обмотками позволяет отказаться от фильтров и снизить общую стоимость компенсирующего устройства.

Избыточная зарядная мощность длинных линий электропередач приводит к снижению их пропускной способности. Для компенсации зарядной мощности применяются различные устройства. Одним из наиболее перспективных направлений является использование компенсаторов с управляемыми шунтирующими реакторами трансформаторного типа (УШРТ), которые отличаются высоким быстродействием, и способностью пофазного регулирования реактивной мощности.

Известны два типа данных устройств, используемых в трехфазных линиях электропередач, которые отличаются конструктивно.

У первого типа сетевая обмотка (СО) соединяется в звезду с глухозаземленной нейтралью, а вентиляная обмотка (ВО) – в треугольник. У второго типа СО состоит из электрически связанных в каждой фазе одинаковых обмоток, включенных параллельно и соединенных в звезду с глухозаземленной нейтралью. ВО разделена на две части, электрически не связанные друг с

другом. Одна часть обмоток соединяется в звезду, а другая в треугольник. Конструктивно пары частей ВО и СО располагаются концентрически друг относительно друга. Вентильные обмотки располагаются внутри.

В зависимости от поставленной задачи, а также от схемы магнитной системы изучаемых устройств, сопротивление  $R_m$  может представлять собой как эквивалентное сопротивление участка магнитной цепи, так и участка воздушного зазора, которые в большинстве случаев задаются геометрическими размерами – площадью поперечного сечения  $S$  и длиной участка  $L$ .

Следует отметить, что подход к определению эквивалентных сопротивлений  $R_m$  для магнитного и немагнитного (воздушный зазор) участков разнится. Данный факт обусловлен тем, что характеристика ферромагнитного материала носит нелинейный характер и зависит от кривой намагничивания стали  $B(H)$ , в то время как сопротивление воздушного участка линейно.

Одной из задач создания компьютерной модели управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа (УШРТ), отражающей особенности его работы в составе энергосистемы, является разработка системы формирования управляющих импульсов для тиристоров, которая должна отвечать следующим требованиям:

- Формирование управляющего импульса в данный момент времени с высокой точностью (не более  $0,5^\circ$ ) с синхронизацией из сети;
- Длительность управляющего импульса должна превышать время разблокировки тиристора;
- Максимальная крутизна переднего фронта напряжения управляющего импульса - для быстрого увеличения управляющего тока, т. е. Импульс должен быть как можно ближе к прямоугольному.
- Возможность задания угла управления до  $180^\circ$ .
- Подача пары импульсов со сдвигом в  $180^\circ$  (ввиду встречно-параллельно включенных тиристоров), синхронизированных от одной синусоиды напряжения.

Модель УШРТ реализуется в программе Matlab (пакет Simulink). Система управления (СУ), используемая в данной модели. Разработанная модели СУ приведена на рисунке 2.7.

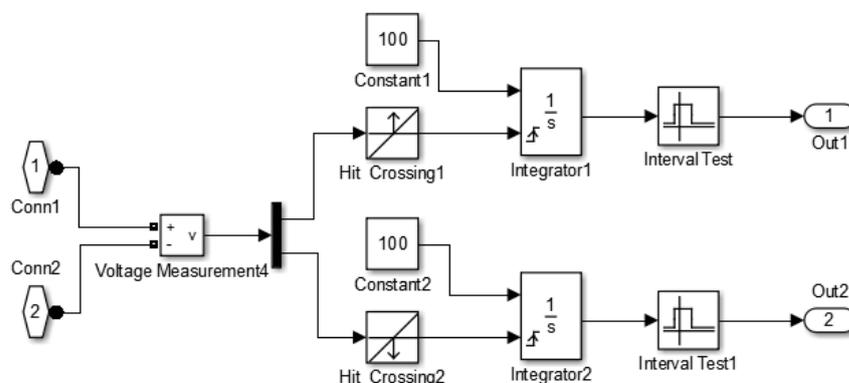


Рисунок 2.7 – Модель СУ

Входы Conn1 и Conn2 подключаются к напряжению синхронизации (рисунок 2.8, а). После сигнал разделяется на две части (для обеспечения сдвига по фазе в  $180^\circ$  управляющих импульсов); подача на входные блоки; Один блок настроен на увеличение, другой - на уменьшение сигнала. Исходящие сигналы поступают на вход интеграторов, работающих с нарастающим сигналом. Постоянный блок, подключенный к интегратору, выдает пилообразные сигналы с длительностью  $180^\circ$ , выходящей из интегратора на соответствующий уровень. Амплитуду выходного сигнала удобно устанавливать на уровне 360. Угол разблокировки тиристоров можно установить, установив желаемый интервал в блоках. Внутренне: нижний предел соответствует заданному углу разблокировки тиристора, верхнему пределу до конца управляющего импульса. Например, угол разблокировки принимается под углом  $45^\circ$ , длительность импульса составляет  $10^\circ$  (рисунок 2.8). Разработанная схема отвечает требованиям: генерирует прямоугольные импульсы с синхронизацией от сетевого напряжения, отличается по возможности длительностью управляющего импульса. Разработанная модель позволяет исследовать реактор во всех режимах.

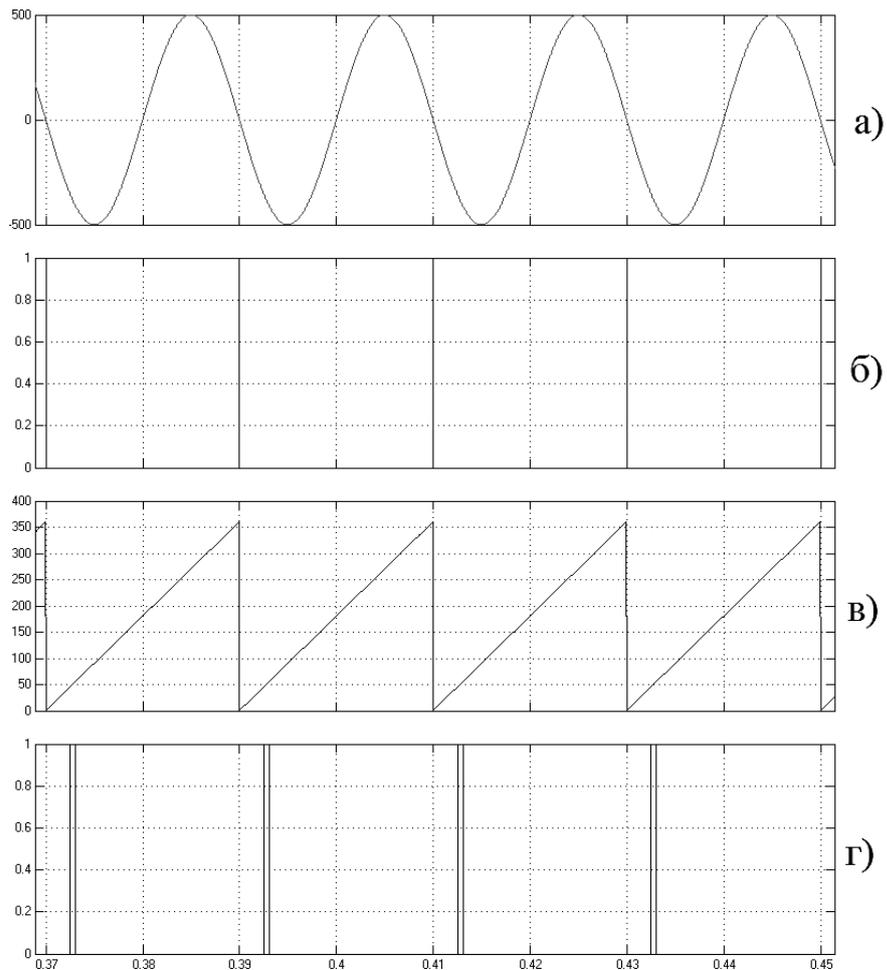


Рисунок 2.8 – Выходные сигналы

Известно, что для определения магнитного сопротивления воздушного промежутка можно воспользоваться следующим выражением:

$$R_m = \frac{L_B}{m_p \cdot S_B}$$

Тогда для схемы замещения магнитной цепи (рисунок 2.4, в) справедливо выражение (2.4) в соответствии с которым может быть найдено падение напряжение  $U_m$  на магнитном сопротивлении  $R_m$ .

$$U_m - \Phi \cdot R_m = \Phi \cdot \frac{L_B}{m_p \cdot S_B} \quad (2.4)$$

На рисунке 2.9 приведена структурная схема линейного магнитного участка (воздушного промежутка), которая реализует закон Ома для магнитной цепи.

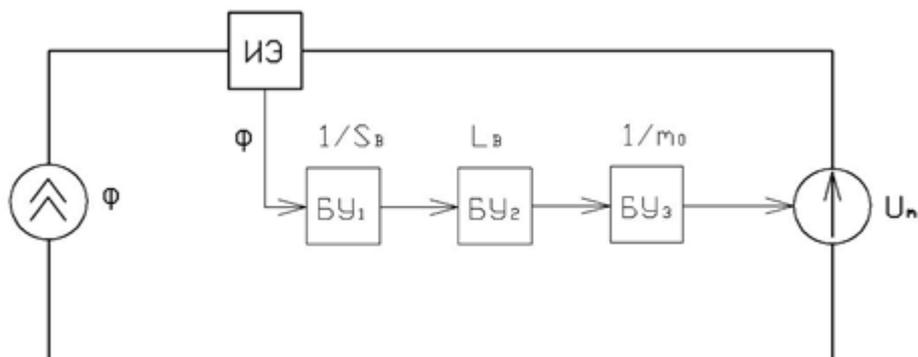


Рисунок 2.9 - Структурная схема линейного магнитного участка

В представленной схеме реализован механизм определения падения магнитного напряжения на эквивалентном линейном магнитном сопротивлении, характеризующем воздушный зазор, для чего посредством измерительного элемента ИЭ происходит измерение значения магнитного потока с последовательным преобразованием полученного сигнала  $\Phi$  в блоках усиления  $БУ_1$ ,  $БУ_2$ ,  $БУ_3$  в магнитное напряжение  $U_m$  в соответствии с выражением (2.4).

Похожим образом может быть создана модель нелинейного участка магнитной цепи. Как уже было отмечено выше, основным отличием моделей линейного и нелинейного участка цепи является необходимость учета кривой намагничивания стали, которая характеризуется зависимостью  $B(H)$ . С учетом этого фактора, выражение для определения падения магнитного напряжения на нелинейном сопротивлении  $R_m$  записано следующим образом:

$$U_m = \Phi \cdot R_m = H \oint L_C \quad (2.5)$$

Для определения напряжения  $U_m$ , приведенную на рисунке 2.8 кривую намагничивания стали 3408, представленную зависимостью  $B(H)$ , необходимо преобразовать в  $H(B)$  (рисунок 2.10).

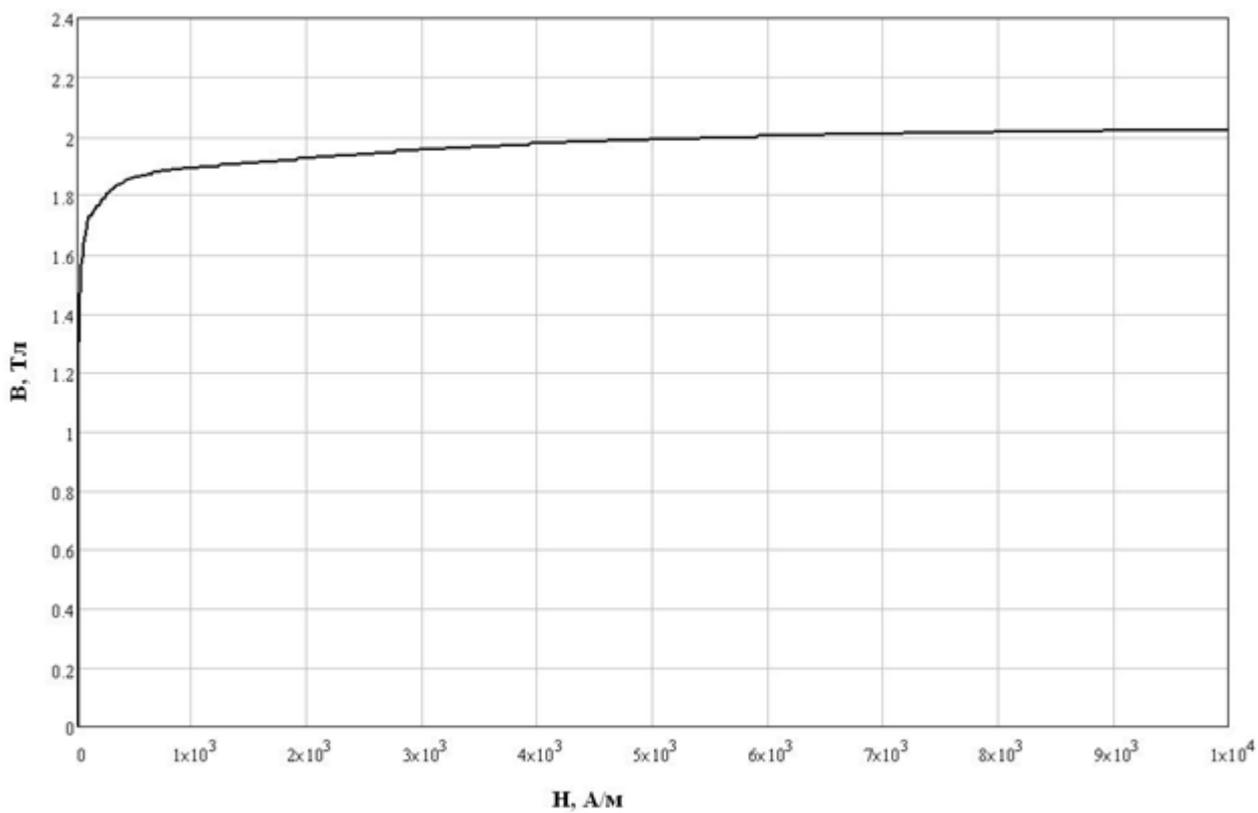


Рисунок 2.10 - Кривая намагничивания стали 3408

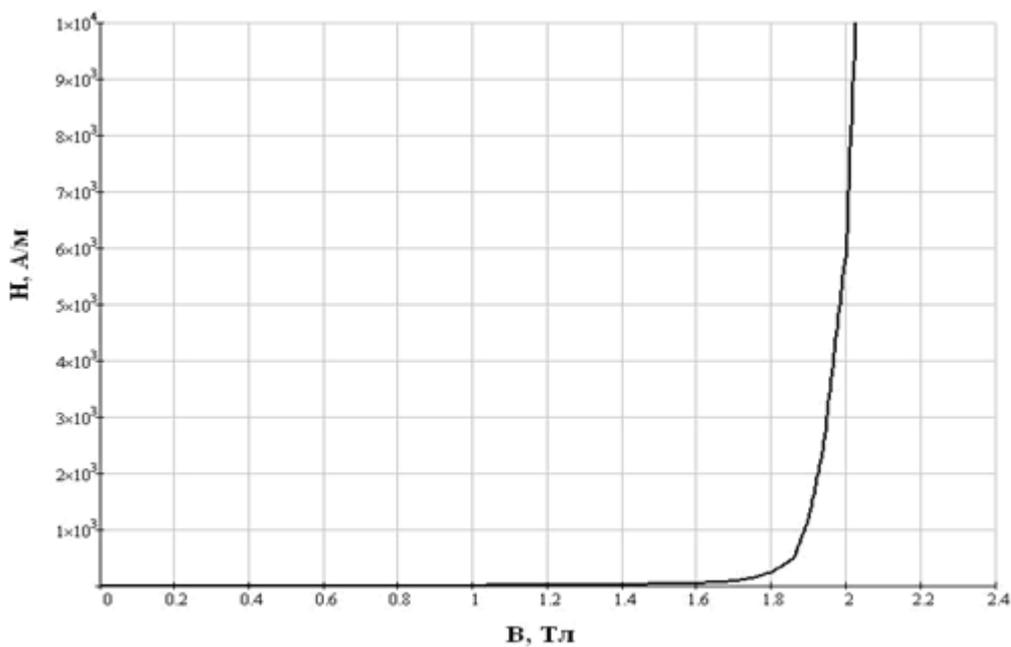


Рисунок 2.11 - Характеристика  $H(B)$  стали 3408

Учитывая вышесказанное, структурная схема нелинейного магнитного участка (ферромагнитного материала) представлена в соответствии с рисунком 2.12.

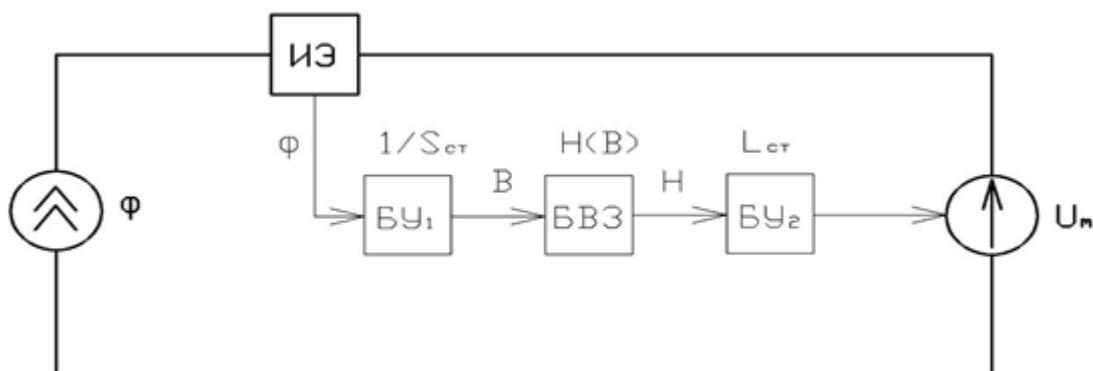


Рисунок 2.12 - Структурная схема нелинейного магнитного участка

По аналогии с описанным выше механизмом определения магнитного напряжения на эквивалентном линейном магнитном сопротивлении,  $U_m$  на нелинейном  $R_m$  может быть найдено путем измерения значения магнитного потока в измерительном элементе ИЭ с дальнейшим преобразованием полученного сигнала  $\Phi$  в индукцию  $B$  в блоке усиления БУ<sub>1</sub>, далее сигнал, характеризующий  $B$ , подается в блок выбора значения БВЗ, в котором происходит выбор значения напряженности магнитного поля  $H$  в соответствии с кривой  $H(B)$  изображенной на рисунке 2.12 с последующим ее преобразованием в  $U_m$  в блоке усиления БУ<sub>2</sub>, где значение  $H$  умножается на длину магнитного участка  $L_{СТ}$ . Значение  $U_m$ , полученное на выходе БУ<sub>2</sub> подается на управляемый источник напряжения, которое формирует значение падения напряжения в магнитной цепи на нелинейном сопротивлении  $R_m$ .

Правила, по которым работает блок, описываются следующим образом:

Если входное значение напряжения равно одному из элементов вектора выходных значений напряженности магнитного поля, то выходное значение блока будет равно соответственно элементу вектора  $H$ .

На рисунке 2.13 и рисунке 2.14 приведены расчетные модели блоков линейного и нелинейного блоков магнитного сопротивления соответственно.

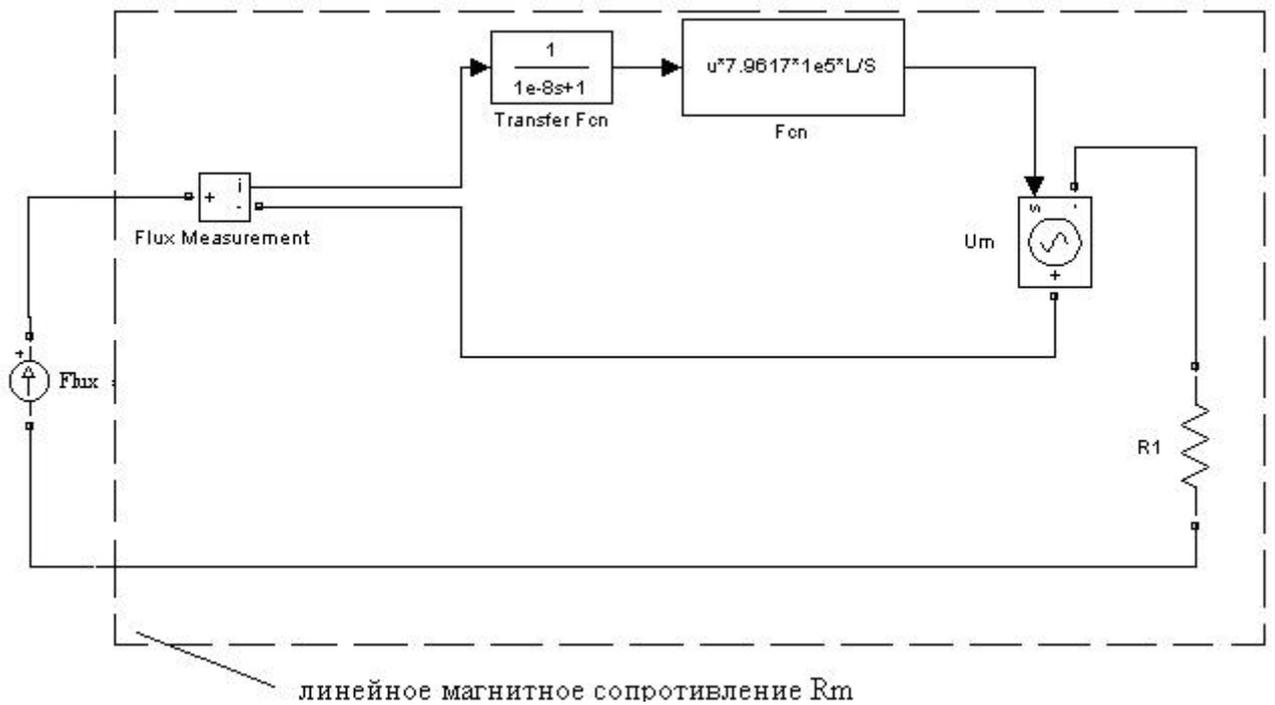


Рисунок 2.13 - Модель линейного магнитного сопротивления в среде Simulink

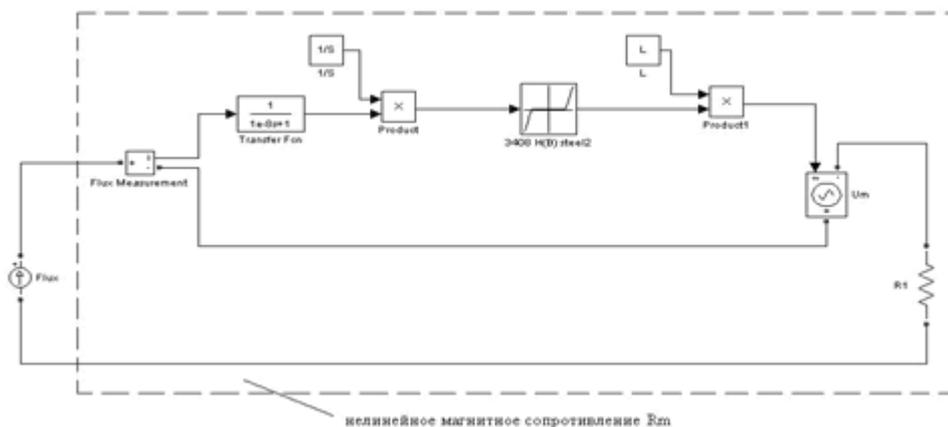


Рисунок 2.14 - Модель нелинейного магнитного сопротивления в среде Simulink

Используя блоки линейных и нелинейных магнитных сопротивлений (рисунок 2.13 и рисунок 2.14), блок совместного расчета электрической и магнитной цепи (рисунок 2.6), а также учитывая схемы соединения обмоток и магнитной системы, могут быть разработаны любые модели

электротехнических устройств (трансформатор, реактор, управляемый реактор и др.).

Разработанная имитационная модель (ИМ) фазы УШР РОДУ-60000/500 показана на рисунке 2.15.

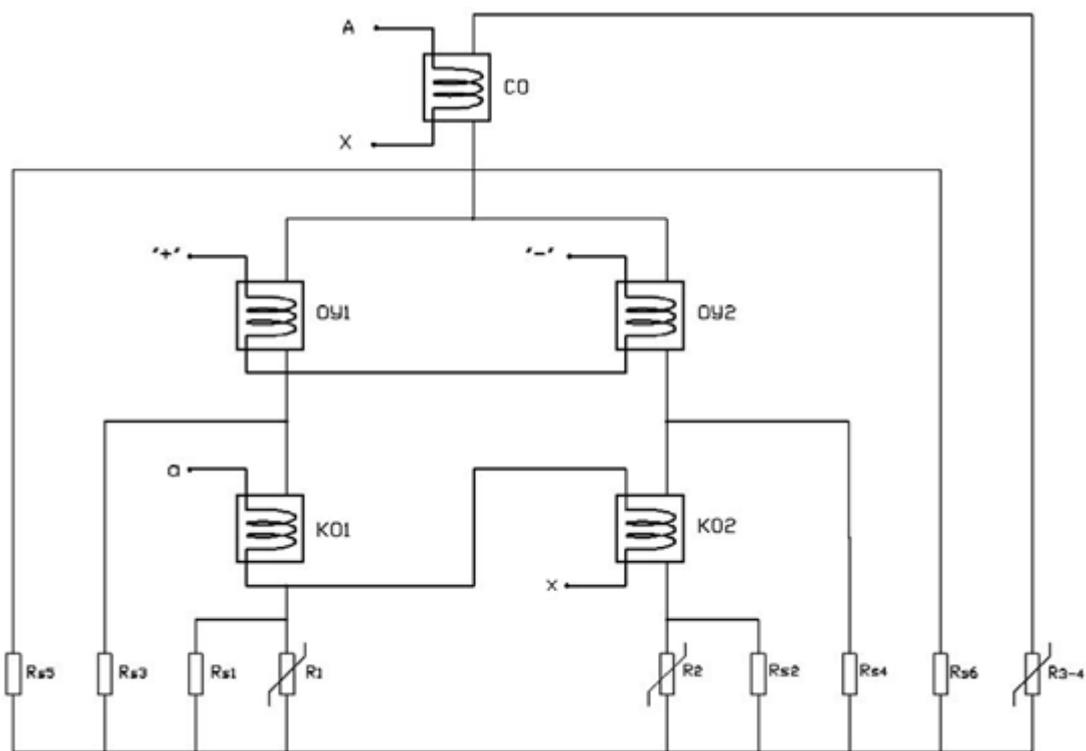


Рисунок 2.15 - Имитационная модель фазы РОДУ-60000/500

На представленной на рисунке 2.13 ИМ УШР 500 кВ показаны нелинейные магнитные сопротивления стержней и ярем ( $R_1$ – $R_4$ ), линейные сопротивления каналов рассеяния магнитного потока:

- между секциями КО и стержнем –  $R_{s1}$ – $R_{s2}$ ;
- между секциями обмоткой КО и ОУ –  $R_{s3}$ – $R_{s4}$ ;
- между обмоткой СО и ОУ –  $R_{s5}$ – $R_{s6}$ .

На рисунке 2.17 – программная реализация имитационной модели фазы УШР в среде Simulink.

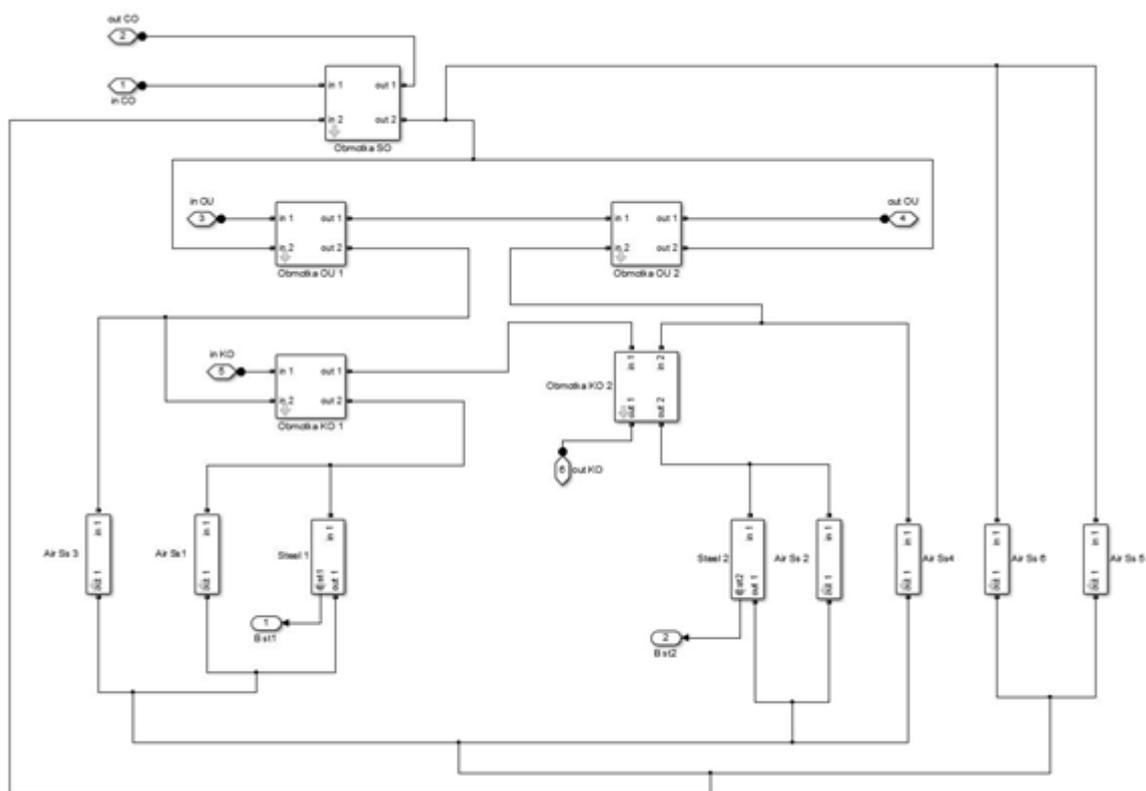


Рисунок 2.17 - Модель фазы РОДУ-60000/500 в среде Simulink (Matlab)

Наиболее опасным режимом для электрической сети является режим короткого замыкания. Так как наиболее распространенной трехфазной цепью для напряжений до 1000 В является трехфазная цепь соединенная по схеме "звезда" с нулевым проводом, то в дальнейшем, все процессы будут рассматриваться для такой цепи. Расчётная электрическая схема работы цепи в номинальном режиме показана на рисунке 1 где  $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$ , – фазные напряжения;  $R_1$ ,  $L_1$  – параметры линии, включая сопротивление обмоток питающего трансформатора;  $R_n$ ,  $L$  – параметры нагрузки;  $Q$  – контакты автоматического выключателя;  $R_{10}$ ,  $L_{10}$  – параметры нулевого провода;  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$ ,  $i_0$  – токи соответствующих фаз и нулевого провода.

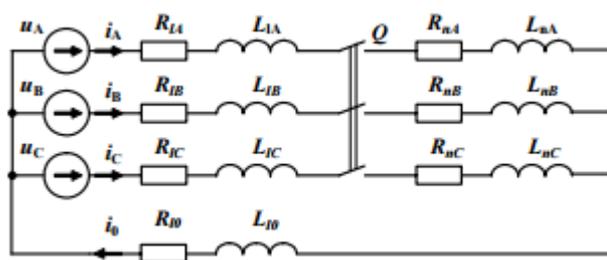


Рисунок 2.18 – Электрическая схема трёхфазной цепи с нулевым проводом

Расчет токов в случае одно-, двух- или трехфазного КЗ на выводах выключателя осуществляется для соответствующих электрических схем, показанных на рисунке 2.19.

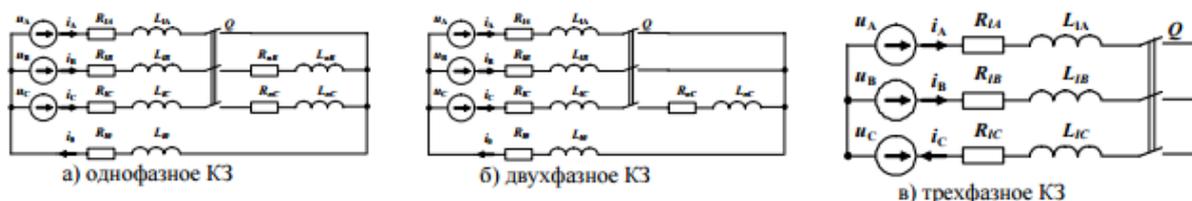


Рисунок 2.19 – Расчётные электрические схемы

Чтобы вычислить переходные процессы в входных данных должны быть указаны фазные напряжения, а также данные о сопротивлении и индуктивности линии, нагрузке и нулевом проводе. Сопротивление линии рассчитывается по фактическому и трехфазному короткому замыканию на выходе выключателя, равному 30, и коэффициенту мощности  $\cos(\phi_{КЗ}) = 0,1$ . Импеданс основан на эффективном значении номинального тока и  $\cos(\phi_n) = 0,8$ . Поскольку на принципиальной схеме 1, 2 Все параметры взаимосвязаны и влияют на значения токов в фазах, расчет токов короткого замыкания ведет на его решениях систему дифференциальных уравнений для данной начальной фазы напряжения.

Если цепь АВ тока без ограничения тока отключена, мы Начнем с того, что время контакта АВ установлено. Это время включает время достижения точного времени уставки, время задержки, время реакции механизма и время

выбора отказа контакта. Все контакты запускаются одновременно под воздействием пружины отключения или другого механизма. Напряжение на каждой фазе может быть аппроксимировано кусочно-линейной функцией. Дуга неподвижно зажигается на расходящихся контактах, пока расстояние между ними не достигнет соответствующих расчетных схем при решении систем дифференциальных уравнений с учетом напряжения на дуге. В этом случае необходимо учитывать, что напряжение на дуге совпадает по знаку с током. Кроме того, необходимо учитывать, что гашение дуги не происходит одновременно во всех трех фазах. В этом случае схема проектирования должна быть изменена, так как фаза, в которой она равна нулю, не будет рассчитываться в будущем рисунок 2.20, где  $R_{dA}$ ,  $R_{dB}$ ,  $R_{dC}$  – активные сопротивления дуги.

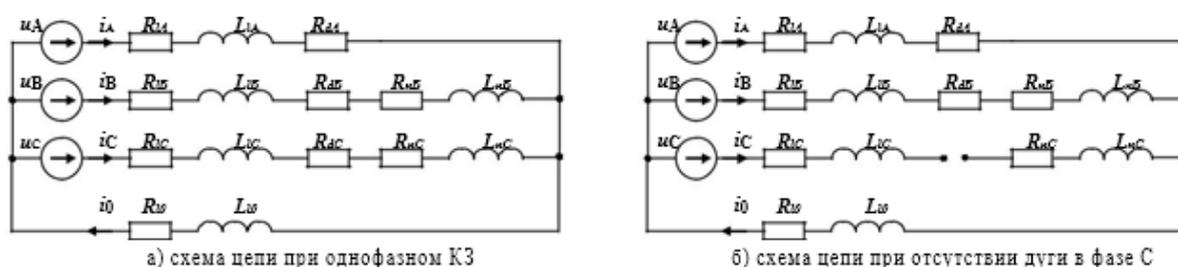


Рисунок 2.20 – Расчётные схемы электрической цепи

Разработанную в среде Simulink модель УШР 500 кВ необходимо проверить на соответствие оригиналу, для чего результаты расчетов, полученные на модели, сравниваются с результатами протоколов испытания завода-изготовителя ПАО «Запорожтрансформатор». Анализ результатов сравнения сведен в таблицы 2.1-2.3.

Как видно из таблиц 2.1-2.3, полученные на имитационной модели результаты расчетов с высокой точностью совпадают с протоколами испытания завода-изготовителя, что позволяет судить о достоверности модели.

Таблица №2.1 - Результаты расчета в режиме х.х. при номинальном напряжении на реакторе.

Наименование параметра	Результаты расчета модели	Данные из протокола	Отклонение, %
Напряжение сетевой обмотки, кВ		303,109	
Индукция в стержне, Тл	1,74	1,75	0,57
Напряжение обмотки управления одного стржня, кВ	39,7	40,3	1,48
Напряжение компенсационной обмотки, кВ	10,6	10,53	0,66

Таблица №2.2 - Результаты расчета в режиме к.з. компенсационной обмотки ( $U_k=55,5\%$ ).

Наименование параметра	Результаты расчета модели	Данные из протокола	Отклонение, %
Напряжение сетевой обмотки, кВ		168,23	
Ток сетевой обмотки, А	195,6	197,9	1,1
Ток обмотки управления, А	5520	5696	3,2

Таблица №2.3 - Результаты расчета в номинальном режиме.

Наименование параметра	Результаты расчета модели	Данные из протокола	Отклонение, %
Напряжение сетевой обмотки, кВ		303,0	
Ток сетевой обмотки, А	196,8	197,9	0,55
Ток обмотки управления, А	740	744,4	0,59

Помимо произведенного выше анализа, для проверки соответствия модели оригиналу проводилось сравнение результатов, полученных на модели в динамических и коммутационных режимах работы УШР, с полученными в ходе эксплуатации осциллограммами. При проведении исследований особое внимание было акцентировано на соответствие взаимосвязанных значениях токов в обмотке управления и сетевой обмотке в исследуемых режимах, а кроме того на соответствие скоростных характеристик в режимах форсированного набора и сброса мощности.

В качестве примера на рисунке 2.21 и рисунке 2.22 приведены реальная осциллограмма токов в ОУ и СО и результаты расчета на имитационной модели в режиме форсированного набора 5-100% мощности соответственно.

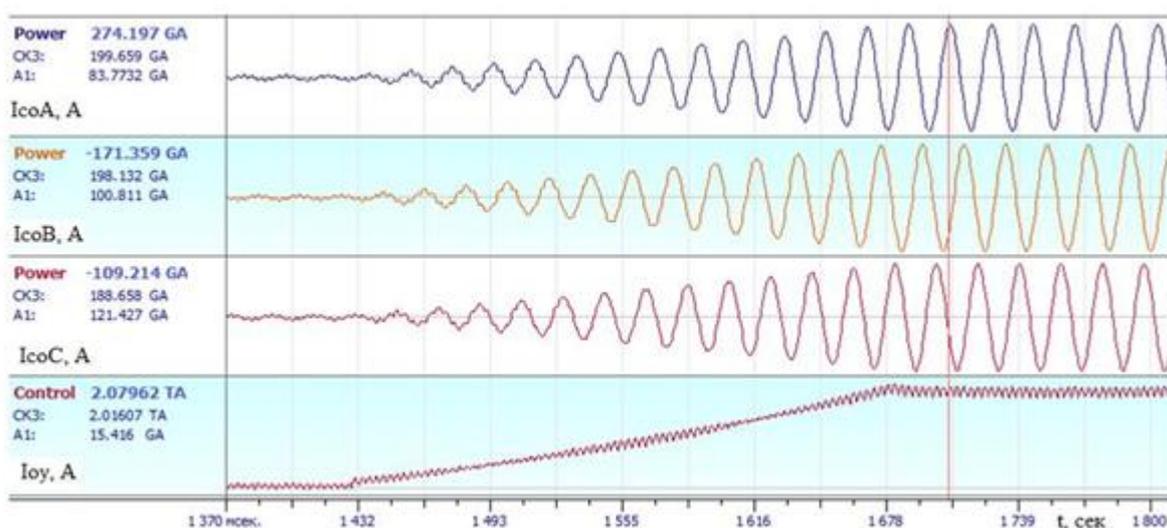


Рисунок 2.21 - Осциллограмма набора мощности, полученная в ходе эксплуатации УШР 500 кВ.

Анализ результатов моделирования процесса набора полной мощности с максимальным быстродействием (рисунок 2.22) показывает, что действующее значение установившегося тока в сетевой обмотке составляет 282 А, тока в ОУ – 2010 А, время набора мощности 5-100% - 0,279 сек. При проведении натурных испытаний (рисунок 2.21) аналогичные параметры составили 274 А,

2079 А и 0,268 сек соответственно. Отклонение результатов моделирования от результатов, полученных при испытаниях, не превышает 5%.

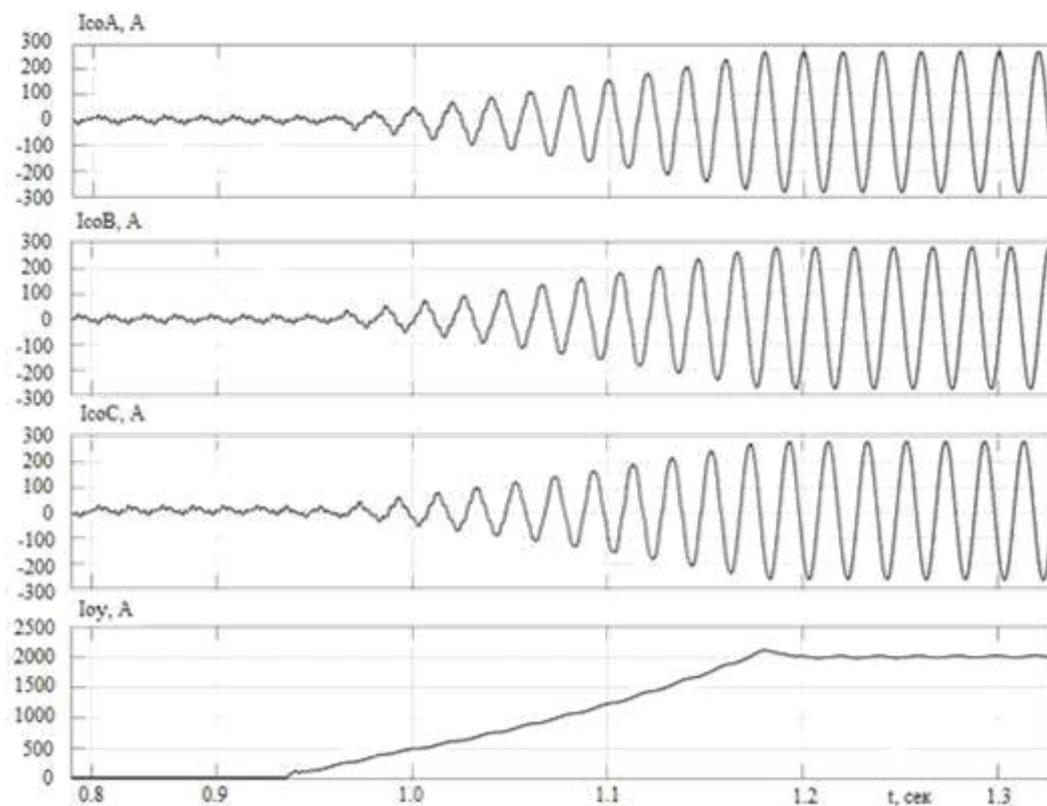


Рисунок 2.22 - Результат набора мощности, полученный на имитационной модели УШР 500 кВ.

Анализ результатов моделирования процесса набора полной мощности с максимальным быстродействием (рисунок 2.22) показывает, что действующее значение установившегося тока в сетевой обмотке составляет 282 А, тока в ОУ – 2010 А, время набора мощности 5-100% - 0,279 сек. При проведении натуральных испытаний (рисунок 2.21) аналогичные параметры составили 274 А, 2079 А и 0,268 сек соответственно. Отклонение результатов моделирования от результатов, полученных при испытаниях, не превышает 5%.

На основании проведенной верификации модели можно утверждать, что модель УШР типа РТУ-180000/500-УХЛ1, соответствует оригиналу и подходит

для анализа коммутационных процессов в реакторе, при его работе в системе. Модель создана на основе реальной конструкции УШР, применяемых в настоящее время схмотехнических решениях и учитывает характеристику намагничивания стали, которая используется в магнитной системе реактора.

Избыточная зарядная мощность длинных линий электропередач приводит к снижению их пропускной способности. Для компенсации зарядной мощности применяются различные устройства. Одним из наиболее перспективных направлений является использование компенсаторов с управляемыми шунтирующими реакторами трансформаторного типа (УШРТ), которые отличаются высоким быстродействием, и способностью пофазного регулирования реактивной мощности.

Известны два типа данных устройств, используемых в трехфазных линиях электропередач, которые отличаются конструктивно.

У первого типа сетевая обмотка (СО) соединяется в звезду с глухозаземленной нейтралью, а вентильная обмотка (ВО) – в треугольник (рисунок 2.23). У второго типа СО состоит из электрически связанных в каждой фазе одинаковых обмоток, включенных параллельно и соединенных в звезду с глухозаземленной нейтралью. ВО разделена на две части, электрически не связанные друг с другом. Одна часть обмоток соединяется в звезду, а другая в треугольник (рисунок 2.23). Конструктивно пары частей ВО и СО располагаются концентрически друг относительно друга. Вентильные обмотки располагаются внутри.

Принцип работы данных устройств имеет некоторые различия. В устройствах первого типа ток ВО регулируется изменением угла открытия тиристоров, включенных встречно-параллельно. Неполное открытие тиристоров неизбежно приводит к ухудшению гармонического спектра тока. Четные гармоники и гармоники кратные трем исключаются. Для компенсации остальных гармоник (5-ой, 7-ой, 11-ой) могут быть применены соответствующие фильтры. Однако данное техническое решение ведёт к дополнительным затратам.

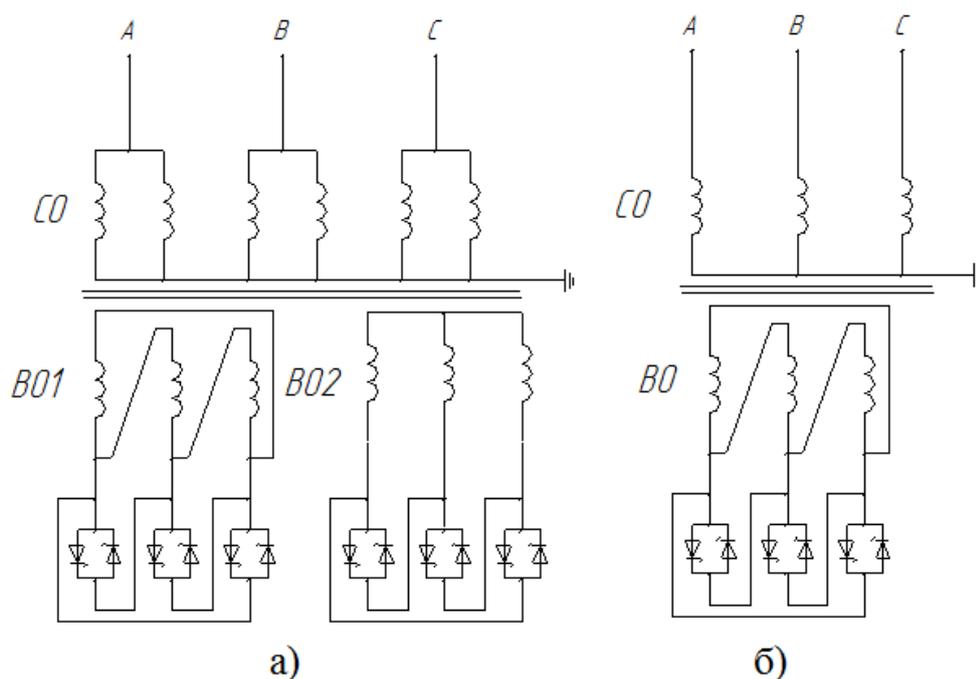


Рисунок 2.23 – Обмотки УШРТ

Устройства второго типа имеют преимущества по частоте спектра тока. Снижение уровня высших гармоник в токе достигается с помощью регулирования мощности УШРТ, осуществляемого следующим образом:

При рабочей мощности от минимальной до  $0,5S_{\text{ном}}$  ВО, соединенная в звезду, разомкнута. Ток обмотки, соединенной в треугольник, регулируется тиристорами.

При рабочей мощности от  $0,5S_{\text{ном}}$  до  $S_{\text{ном}}$  ВО, соединенная в треугольник, замкнута накоротко. Ток ВО, соединенной в звезду, регулируется с помощью тиристорov. Тем самым, в замкнутой накоротко ВО высшие гармоники не генерируются, общий уровень высших гармоник снижается примерно в 2 раза по сравнению с устройствами первого типа.

Использование УШРТ с разделёнными обмотками позволяет отказаться от фильтров и снизить общую стоимость компенсирующего устройства.

Для изучения параметров и режимов эксплуатации была разработана имитационная модель шунтирующегося реактора. Модель позволяет выразить увеличение и описание регулировочных характеристик, и т. д.

Разработанная модель реактора РКТВДЦ-50000/110 приведена на рисунке 2.24.

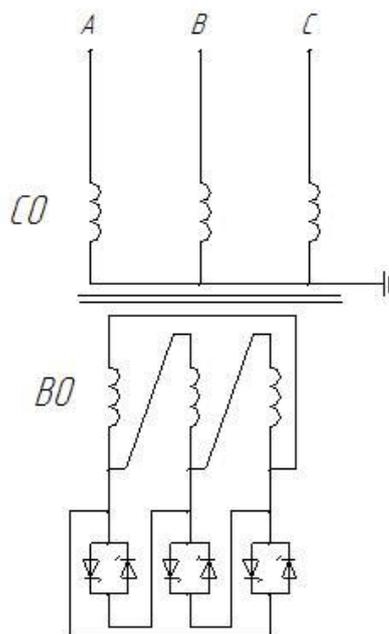


Рисунок 2.24 – Схема модели

Для имитации электромагнитной части используется трехфазный блок трансформатора в программе M a t l a b (пакет simulink). Параметры моделей с паспортными данными пересчитываются по формулам для расчета силовых трансформаторов. Используя исходные данные такие как: номинальная мощность  $S_{ном} = 50$  МВА; номинальный ток  $I_{1ном} = 251$  А; напряжение  $U_{вн} = 115$  кВ; ток холостого хода  $I_x = 0,25$ ; потери стали  $P_x = 22,5$  кВт; потери меди  $P_k = 237,087$  кВт, найдём основные параметры реактора: номинальный ток реактора (2,1), фазное напряжение сетевой первичной обмотки (2,2), фазное напряжение сетевой вторичной обмотки (2,3), коэффициент потерь холостого хода (2,5) ответвлений Импеданс намагниченности (2,6), коэффициент трансформации (2,9), мощность короткого замыкания (2.10), индуктивное сопротивление короткого замыкания (2.12), активное сопротивление первичной

обмотки реактора (2.13), реактивное сопротивление (2.14) и (2.15), сопротивление вторичной обмотки реактора (2.16), индуктивное сопротивление и индуктивность вторичных обмоток реактора (2.17 и 2.18)

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{вн}} = \frac{50000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 251 \text{ А.} \quad (2.1)$$

$$U_{1\phi} = \frac{U_{вн}}{\sqrt{3}} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 66395 \text{ В.} \quad (2.2)$$

$$U_{2\phi} = U_{нн} = 11 \text{ кВ.} \quad (2.3)$$

$$I_{x\phi} = I_{1ном} \cdot \frac{I_x}{100} = 251 \cdot \frac{0,25}{100} = 0,63 \text{ А.} \quad (2.4)$$

$$P_{x\phi} = \frac{P_x}{3} = \frac{22500}{3} = 7500 \text{ Вт.} \quad (2.5)$$

$$Z_0 = \frac{U_{1\phi}}{I_{x\phi}} = \frac{66395}{0,63} = 105389 \text{ Ом.} \quad (2.6)$$

$$K_{12} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{66398}{11000} = 6,035. \quad (2.7)$$

$$U_{\kappa\phi} = U_{1\phi} \cdot \frac{U_{\kappa}}{100} = 66398 \cdot \frac{106,19}{100} = 70508 \text{ В.} \quad (2.8)$$

$$Z_{\kappa} = \frac{U_{\kappa\phi}}{I_{1НОМ}} = \frac{70508}{251} = 281 \text{ Ом.} \quad (2.9)$$

$$P_{\kappa\phi} = \frac{P_{\kappa}}{3} = \frac{237087}{3} = 79029 \text{ Вт.} \quad (2.10)$$

$$R_{\kappa} = \frac{P_{\kappa\phi}}{(I_{1НОМ})^2} = \frac{79029}{251^2} = 1,25 \text{ Ом.} \quad (2.11)$$

$$X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2} = \sqrt{281^2 - 1,25^2} = 280,9 \text{ Ом.} \quad (2.12)$$

$$R_1 = \frac{R_{\kappa}}{2} = \frac{1,25}{2} = 0,625 \text{ Ом.} \quad (2.13)$$

$$X_1 = \frac{X_{\kappa}}{2} = \frac{280,9}{2} = 140,45 \text{ Ом,} \quad (2.14)$$

$$L_1 = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{140,45}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,447 \text{ Гн.} \quad (2.15)$$

$$R_2 = \frac{R_1}{(K_{12})^2} = \frac{0,625}{6,035^2} = 0,017 \text{ Ом.} \quad (2.16)$$

$$X_2 = \frac{X_1}{(K_{12})^2} = \frac{140,45}{6,035^2} = 15,25 \text{ Ом}, \quad (2.17)$$

$$L_2 = \frac{X_2}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{15,25}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,049 \text{ Гн}. \quad (2.18)$$

В этом УШР номинальное напряжение ВО составляет 11 кВ. Используются блоки последовательно соединенных тиристоров. Ввиду этого для минимизации времени разблокировки необходимо использовать тиристоры с достаточной скоростью. Например, Т273-1250 отечественного производства или импортных аналогов.

Блоки тиристоров соединены по фазе в противоположном направлении, схема соединения - треугольник. Для обеспечения работоспособности при напряжении 11 кВ - 1 МОм емкость схемы демпфирования составляет 0,25 нФ.

Модель блока тиристоров показана на рисунке 2.25.

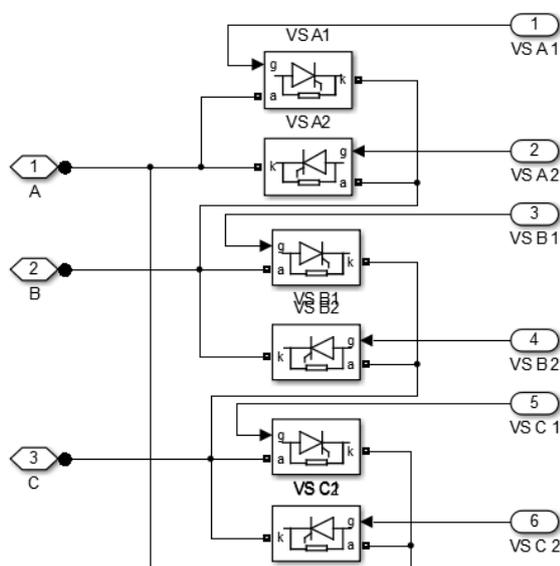


Рисунок 2.25 – Модель блока тиристоров

Система управления (СУ) должна отвечать следующим требованиям:

- синхронизация с сетью;
- формирование управляющего импульса в заданное время с высокой точностью (погрешность не более 0,5 °);

- длительность управляющего импульса должна превышать время разблокировки тиристора;
- максимальная крутизна переднего фронта напряжения управляющего импульса - для быстрого увеличения управляющего тока, т.е. импульс должен быть как можно ближе к прямоугольному;
- возможность установки управляющего угла  $\alpha$  на  $180^\circ$ ;
- подача пары импульсов со сдвигом на  $180^\circ$  (за счет встречно-параллельных тиристоров), синхронизированных от одного синусоидального напряжения.

Модель схемы управления (на одну фазу) показана на рисунке 2.26.

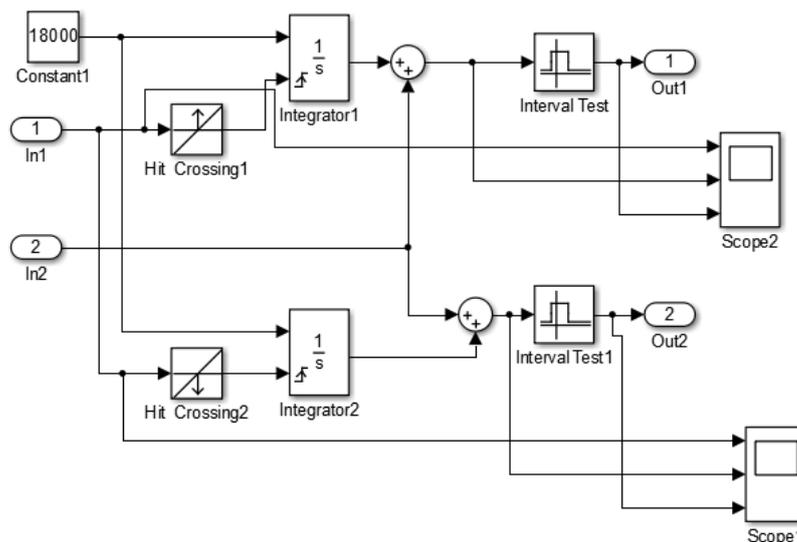


Рисунок 2.26 – Модель системы управления тиристорами

Принцип работы приведен ниже. Напряжение синхронизировано (рисунок 2.27), разделено на две части, которые подаются на входные блоки; Один блок настроен на увеличение, другой - на уменьшение сигнала. Это позволяет использовать автономные и отрицательные полуволновые синхронизирующие напряжения для обеспечения сдвига импульсов управления на  $180^\circ$ . Выходные сигналы поступают на вход интеграторов. Постоянный блок, подключенный к интегратору, передает пилот-сигналы длительностью

180 °, поступающие от интегратора на соответствующий уровень. Амплитуду выходного сигнала удобно устанавливать на уровне 360. Угол разблокировки тиристоров задается путем установки требуемых значений в постоянном блоке, подключенном к входу 2 (рисунок 2.27). Блок InterAlTest позволяет установить необходимую длительность управляющего импульса. Управляющий импульс на выходе прямоугольный; Например, угол разблокировки принимается равным 150 °, длительность импульса - 4 ° (рисунок 2.27).

Разработанная схема отвечает необходимым требованиям: генерирует прямоугольные импульсы с синхронизацией от сетевого напряжения, характеризуется способностью выполнять управляющие импульсы, то есть модель позволяет исследовать реактор во всех режимах.

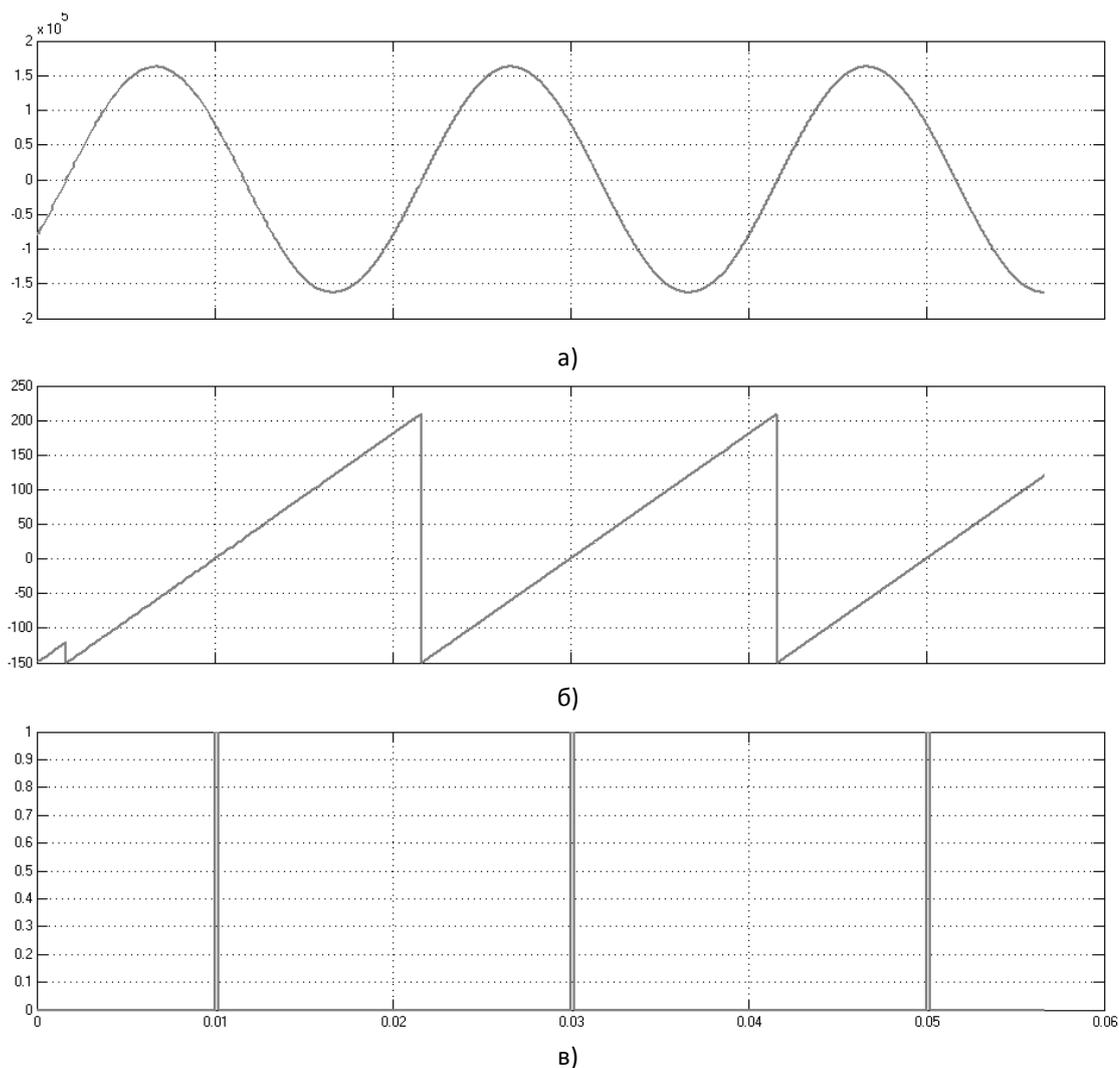


Рисунок 2.27 – Принцип работы СУ

В дополнение к вышеуказанному анализу, чтобы проверить согласованность модели для сравнения результатов, с осциллограммами, полученными во время работы. В ходе исследования особое внимание было уделено соответствию взаимосвязанных значений тем в управляющей обмотке и обмотке сети в исследуемых режимах, а также в зависимости от характеристик скорости в режимах принудительного набора и сброса мощности.

Анализ результатов моделирования полной готовности мощности с максимальной скоростью показывает, что эффективное значение установившегося тока в обмотке сети составляет 282 А, ток в ОУ составляет 2010 А, время силового набора составляет 5 -100% - 0,279 с. При проведении полномасштабных испытаний аналогичные параметры составляли 274 А, 2079 А и 0,268 секунды соответственно. Таким образом, отклонение результатов моделирования от результатов при тестировании не превышает 5%.

Основываясь на проверке модели, можно утверждать, что модель типа УШР, разработанная в ходе работы, соответствует оригиналу и пригодности для анализа коммутационных процессов и динамических процессов в реакторе во время его работы в энергосистеме. Модель создана на основе реальной конструкции УШР, используемых в настоящее время схемных решений, и учитывает характеристику намагничивания стали, которая используется в магнитной системе реактора.

### **3 Исследование влияния УШР на процессы, протекающие в цикле автоматического повторного включения линии**

Автоматическое повторное включение (АПВ) линий электропередачи является одним из наиболее простых и эффективных средств повышения надежности работы линий электропередач при коротких замыканиях.

Различают трехфазные АПВ и однофазные АПВ. При АПВ поврежденная ЛЭП независимо от вида КЗ (однофазное, двухфазное или трехфазное) отключается тремя фазами с обоих концов линии и по окончании заданной бестоковой паузы повторно включается с одной стороны, а затем если отключение не произошло, и с другой стороны. В случае неуспешного первого включения иногда включается двукратное АПВ.

#### **3.1. Упрощенная модель процессов в бестоковой паузе АПВ**

После отключения аварийной фазы воздушной линии с обоих концов на нее влияют емкостные и индуктивные соединения со стороны остальных фаз. Это влияние приводит к протеканию тока в месте замыкания на землю при подпитке дуги  $I_{кз}$ , а после погасания дуги - к появлению индуцированного (остановленного) напряжения в отключенной фазе  $U_v$ .

Значения  $I_{кз}$  и  $U_v$  зависят в первую очередь от номинального напряжения линии и длины ВЛ, а также от ее конструкции и количества, установленных на линии шунтирующих реакторов (в т.ч. управляемых). По мере увеличения номинального напряжения и длины линии возрастают ток подпитки, гашение дуги увеличивается, продолжительность горения дуги может превышать время, необходимое для поддержания динамической стабильности системы.

### 3.2. Влияние восстанавливающего напряжения отключенной фазы линии после погасания дуги на эффективность паузы АПВ

Расчеты режима бестоковой паузы при АПВ воздушных линий проводят не только для оценки возможности самопогасания тока подпитки дуги в месте КЗ и выбора специальных мер, обеспечивающих его гашение, а также и для проверки отсутствия появления недопустимого повышения напряжения на отключенной фазе (восстанавливающегося напряжения) после погасания дуги, что важно:

- для исключения повреждений изоляции присоединенного к ВЛ оборудования (ОПН, трансформаторов напряжения, реакторов, выключателей и др.;

- для исключения повторных пробоев в месте повреждения изоляции.

### 3.3 Оценка кратности восстанавливающего напряжения при отключении фазы УШР

Проведение расчета восстанавливающего напряжения, когда в качестве меры по снижению величины тока подпитки дуги рассматривается вариант отключения фазы УШР, целесообразно разделить на два случая – случай, когда на линии предусматривается установка УШР в качестве единственного средства компенсации реактивной мощности, а также случай, когда на линии помимо УШР устанавливается неуправляемый ШР.

Если на линии шунтирующий реактор не установлен, то для определения кратности восстанавливающего напряжения может быть использована схема замещения сети, представленная на рисунке 3.1.

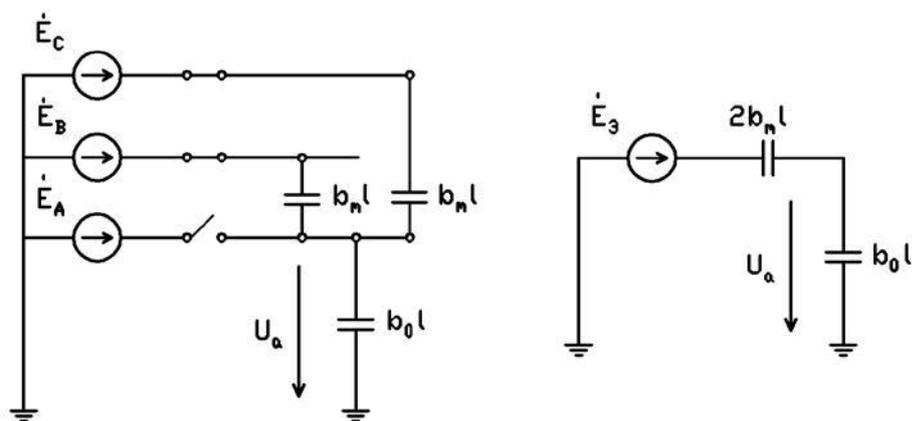


Рисунок 3.1 - Схема замещения сети для расчета восстанавливающего напряжения на отключенной фазе после гашения дуги в цикле АПВ на линии без реакторов

Кратность восстанавливающего напряжения 50 Гц на отключенной фазе (3.24) может быть получена на основании эквивалентной схемы, представленной на рисунке 3.2, .

$$\frac{U_a}{E_a} = \frac{b}{2 \cdot b_m + b_0} \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot e^{\frac{\delta}{2}} \quad (3.1)$$

На основании выражения (3.1) можно сделать вывод, что для линии, работающей с углом передачи мощности  $\delta < (5 \div 7)$  эл.градусов при отключении фаз(ы) УШР с целью исключения негативного влияния треугольника КО УШР на ток подпитки дуги в цикле ОПАВ, а также при отсутствии на линии ШР, кратность восстанавливающегося напряжения составляет 0.1, что является допустимым значением.

В том случае, если на линии помимо УШР имеется ШР с установленным компенсационным реактором в его нейтрали, кратность напряжения 50 Гц на отключенной фазе может быть определена на основании схемы рисунок 3.2, а. С учетом проведенных преобразований (рисунок 3.2, б) получена схема эквивалентная исходной (рисунок 3.2, в).

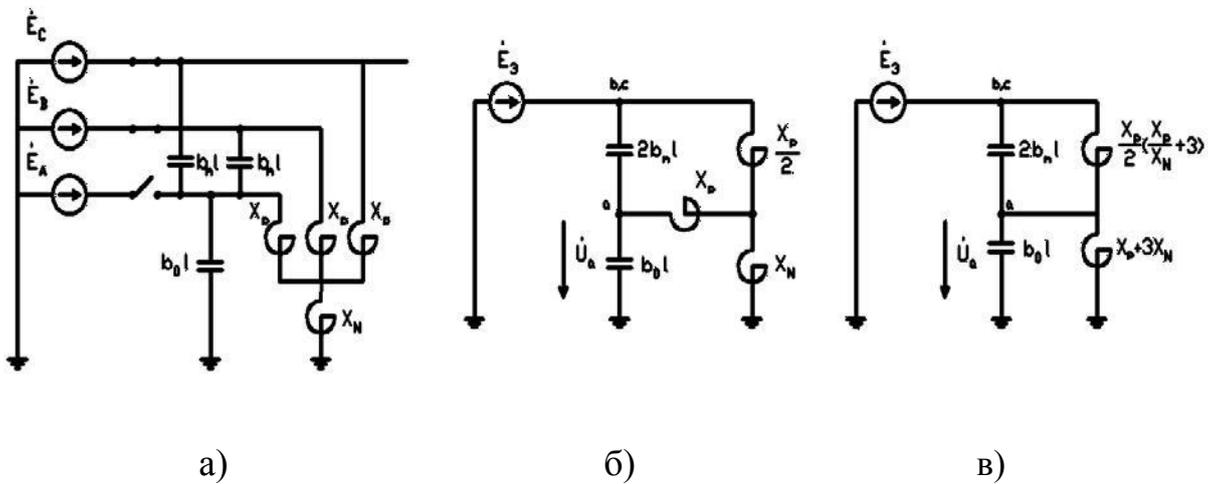


Рисунок 3.2 - Схема замещения сети для расчета восстанавливающего напряжения на отключенной фазе после погасания дуги в цикле АПВ с учетом установки ШР

Расчет эквивалентной схемы 3.2, в позволяет определить кратность повышения напряжения на отключенной фазе:

$$\frac{U_a}{E_a} = \frac{b_m \cdot \frac{X_N^{ШР}}{l - (X_1^{ШР} + 3X_N^{ШР}) \cdot X_1^{ШР}}}{\frac{x_1 + 2 \cdot X_N^{ШР}}{X_1^{ШР} + 3X_N^{ШР}) \cdot X_1^{ШР}} - \left( b \cdot l + b_m \cdot l \right)}{\cos\left(\frac{\delta}{2}\right)} \cdot e^{\frac{\delta}{2}} \quad (3.25)$$

Используя выражения (3.25) для рассматриваемой в работе линии 500 кВ, построена серия зависимостей на отключённой фазе от длины линии с учетом разных значений сопротивления компенсационного реактора, установленного в нейтрали ШР.

3.4 Оценка кратности восстанавливающегося напряжения при шунтировании треугольника компенсационной обмотки фазы УШР.

Выражение (3.26), определяющее кратность напряжения 50 Гц на отключенной фазе для рассматриваемого случая с учетом компенсационных

реакторов в ШР и УШР, может быть получено на основании расчета схемы рисунок 3.4, которая составлена по аналогии с рисунком 3.2.

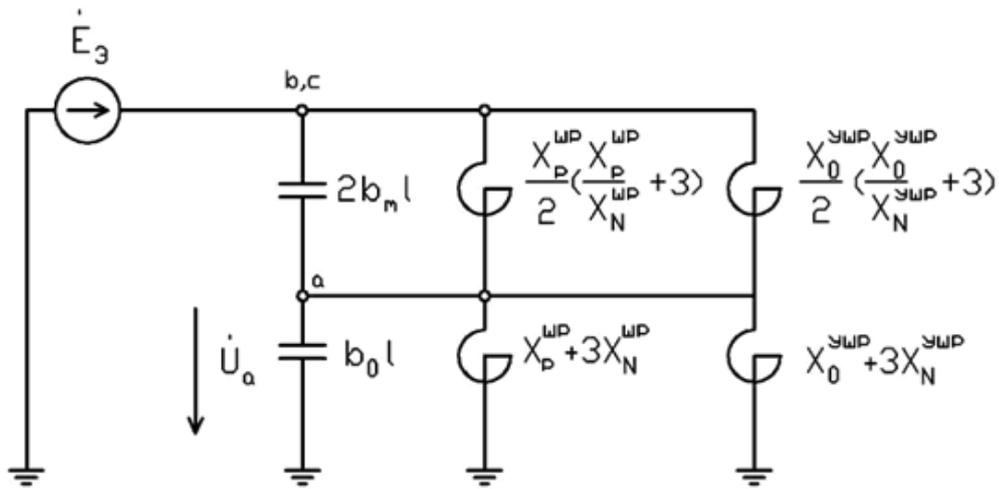


Рисунок 3.4 - Схема замещения сети для расчета восстанавливающегося напряжения на отключенной фазе после гашения дуги в цикле АПВ при наличии на линии ШР и УШР. Треугольник КО шунтирован.

$$\frac{U_a}{E_a} = \frac{b_m \cdot \frac{X_N^{\text{ШР}}}{l - (X_1^{\text{ШР}} + 3X_N^{\text{ШР}}) \cdot X_1^{\text{ШР}} - \frac{X_N^{\text{ШР}}}{(X_0^{\text{УШР}} + 3X_N^{\text{УШР}}) \cdot X_0^{\text{УШР}}} \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot e^{\frac{\delta}{2}}}{\frac{x_1 + 2 \cdot X_N^{\text{ШР}}}{(X_1^{\text{ШР}} + 3X_N^{\text{ШР}}) \cdot X_1^{\text{ШР}} + \frac{x_N^{\text{УШР}} + X_N^{\text{ШР}}}{(X_0^{\text{УШР}} + 3X_N^{\text{УШР}}) \cdot X_0^{\text{УШР}} - \left[ b \cdot l + b_m \cdot l \right]}} \quad (3.26)$$

На основании выражения (3.26) могут быть построены серии зависимостей кратностей восстанавливающегося напряжения с учетом различных сопротивлений компенсационных реакторов в нейтралях ШР и УШР (рисунок 3.3 – рисунок 3.4). На рисунках компенсационный реактор в нейтраль УШР не установлен.

Отметим, что данные графики построены для режима работы линии, близкого к режиму холостого хода.

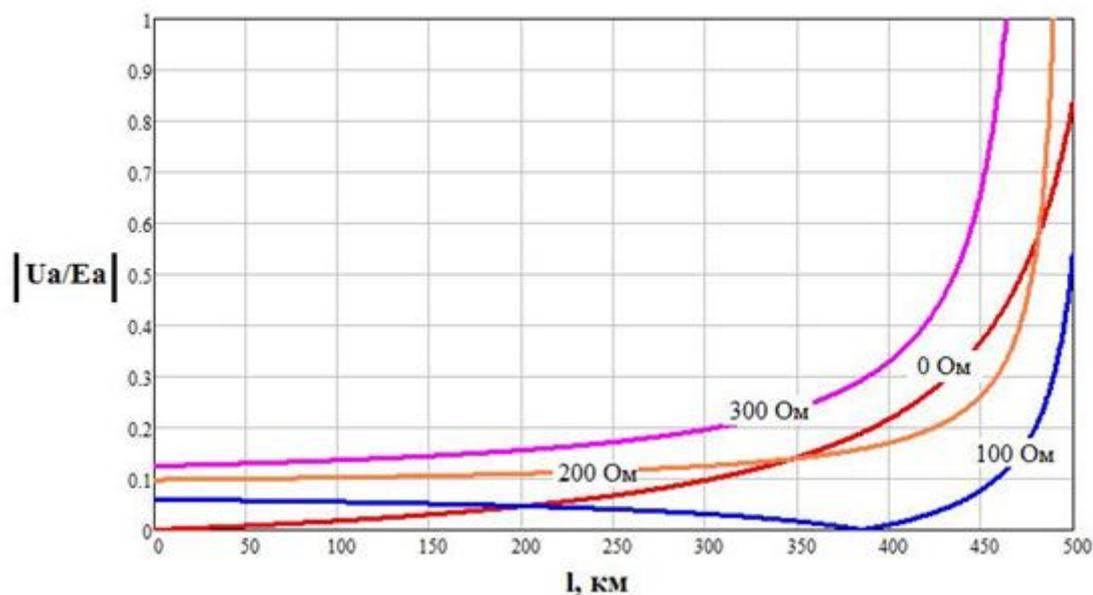


Рисунок 3.5 - Кратность восстанавливающегося напряжения 50 Гц на отключенной фазе после гашения дуги в цикле АПВ с установленными на линии ШР и УШР (треугольник КО шунтирован). Сопротивление компенсационного реактора ШР варьируется в пределах 0 -300 Ом

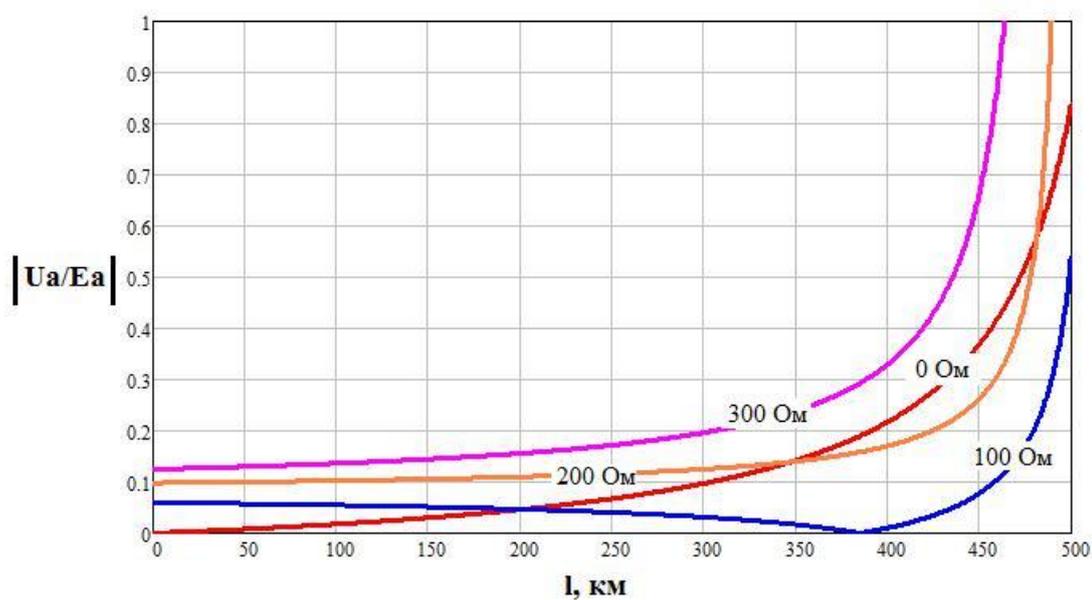


Рисунок 3.6 - Кратность восстанавливающегося напряжения 50 Гц на отключенной фазе после гашения дуги в цикле АПВ с установленными на линии ШР и УШР (треугольник КО шунтирован). Сопротивление компенсационного реактора УШР варьируется в пределах 0-300 Ом

Выражение для определения кратности восстанавливающего напряжения на отключенной фазе линии после гашения дуги в цикле АПВ для случая, когда для снижения величины тока подпитки дуги при установке на линии.

$$\frac{U_a}{E_a} = \frac{b_m \cdot \frac{X_N^{III P}}{l - (X_1^{III P} + 3X_N^{III P}) \cdot X_1^{III P}} - \frac{X_N^{III P}}{(X_0^{YIII P} + 3X_N^{YIII P}) \cdot X_0^{III P}}}{\frac{x_1 + 2 \cdot X_N^{III P}}{(X_1^{III P} + 3X_N^{III P}) \cdot X_1^{III P}} + \frac{x_N^{YIII P} + X_N^{III P}}{(X_0^{YIII P} + 3X_N^{YIII P}) \cdot X_0^{III P}} - \underbrace{e \cdot b \cdot l + b_m \cdot l}}{\cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot e^{\frac{\delta}{2}}} \quad (3.27)$$

Выражение для определения кратности восстанавливающегося напряжения (3.28).

$$\frac{U_a}{E_a} = 1 - \frac{3 \cdot Z_0}{2 \cdot Z_0 + Z_1} \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot e^{\frac{\delta}{2}} \quad (3.28)$$

Чтобы выяснить их возможные характеристики и недостатки, были удалены следующие характеристики:

- Характеристика регулирования (зависимость тока сетевой обмотки от угла  $\alpha$ );
- Зависимость коэффициента гармонических искажений от угла  $\alpha$ ;
- Гармонический спектр тока

Регулировочная характеристика

Эта характеристика (рисунок 3.16) берется по всему рабочему диапазону  $\alpha$ : от  $150^\circ$  до  $180^\circ$ . Номинальный ток при угле  $\alpha$ , равном  $150^\circ$ .

Эта зависимость показана на рисунке 3.17. Из графика видно, что гармонические искажения тока в этом реакторе очень велики, величина значений  $K_n$  составляет около 60 при  $172^\circ$ . Этот уровень искажения на порядок превышает предельно допустимое значение и, следовательно, абсолютно неприемлем для электрических сетей. Необходимо принимать меры для подавления высших гармоник тока.

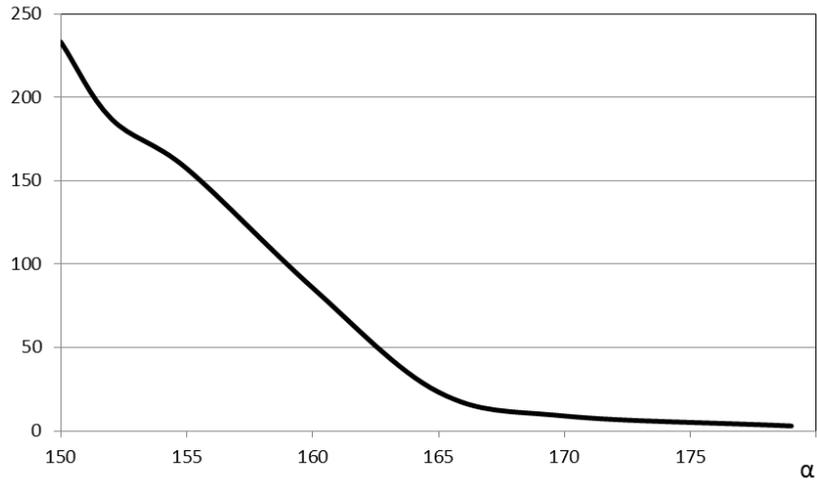


Рисунок 3.16– Регулировочная характеристика, зависимость  $K_n$  от угла отпирания тиристорov  $\alpha$

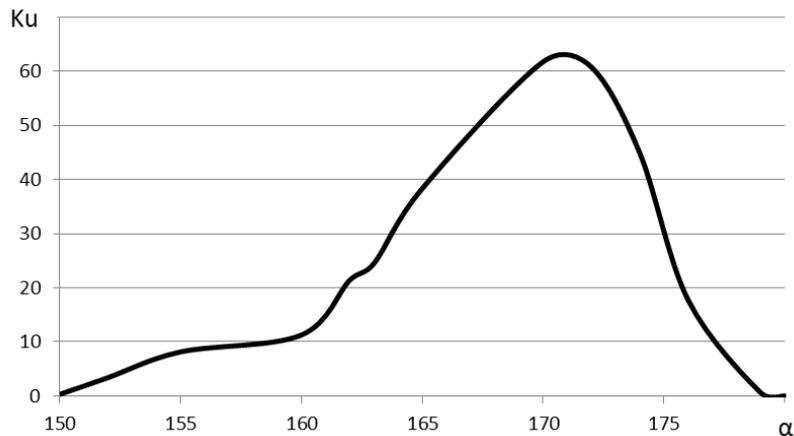


Рисунок 3.18 – Зависимость  $K_n$  тока сетевой обмотки от  $\alpha$

Отношение токов высшей гармоники к току основной частоты для различных  $\alpha$ .

На рисунке 3.19 показана зависимость отношения тока составляющей  $k$ -й гармоники к току основной частоты SCRT от угла размыкания тиристорov.

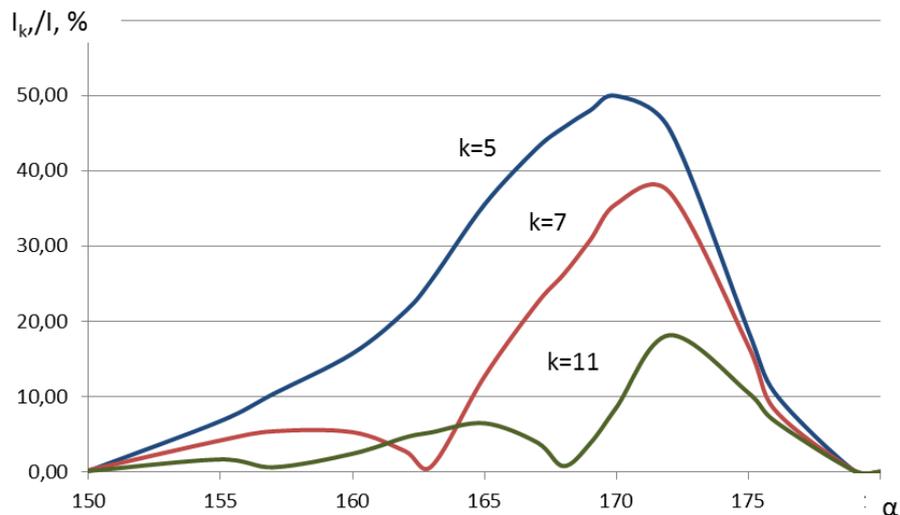


Рисунок 3.19 – Зависимость отношения тока k-той гармонической составляющей к току основной частоты УШРТ от  $\alpha$

Наибольшую величину составляет ток 5, 7, 11 гармоник. По графику видно, что наибольший вклад в искажение тока вносит 5-я гармоника, ее доля превышает долю любой другой гармоники. С увеличением угла  $\alpha$  её величина возрастает линейно практически до  $\alpha = 180^\circ$  (при  $\alpha = 180^\circ$  протекает ток холостого хода). Максимальное значение 7-й гармоники не превышает 1,5%, 11-й – 1%.

Для решения проблем, связанных с использованием двух вторичных (ворот) обмоток. Реактор такого типа был разработан ООО «Трансформатор» Русэлпром «совместно с ОАО« НТЦ ФСК ЕЭС »и ООО« Трансформатор Тольятти ». Он был установлен в Алтайском крае на узловой ПС« Светлая »220 кВ. Из-за отдаленности генерирующих мощностей электричество обеспечивается по линии электропередачи на большие расстояния, а близость электрифицированной железной дороги - мощная неуравновешенная нагрузка - также должна быть принята во внимание.

Разработана модель реактора РКТРВД-50000/220. Обозначение обозначения: Р - реактор, К - компенсатор, Т - трехфазный, Р - с разделенными обмотками, В - с обмотками клапана, Д - система охлаждения с

принудительной циркуляцией воздуха; 50000 - номинальная мощность, кВА, 220 - номинальное напряжение сетевой обмотки, кВ.

Реактор имеет две обмотки клапана. Структурно СО и ВО концентрические по отношению друг к другу, а ВО коаксиальные: один над другим. Соедините ВО со звездой, а с другой - с треугольником, количество поворотов в них определяется соотношением:

$$w_{2\Delta} / w_{2Y} = \sqrt{3}. \quad (3.1)$$

Электрическая схема реактора приведена на рисунке 3.20.

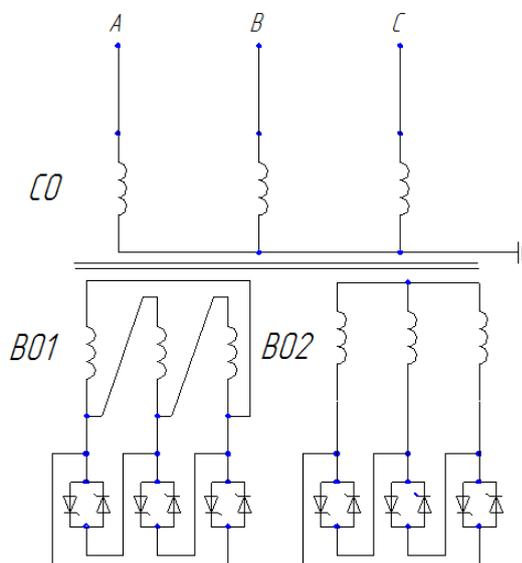


Рисунок 3.20 – Электрическая схема РКТРВД-50000/220

Вторичные напряжения смещены относительно друг друга на  $30^\circ$ , что дает возможность осуществлять управление тиристором по 12-импульсной схеме. Одним из основных преимуществ 12-импульсной схемы при использовании в этих условиях является отсутствие в токе, ПОМИМО третьего, гармоник с цифрами  $6(2n-1) \pm 1$  (т.е. 5, 7, 17 и т. Д.) [5]. Таким образом, общий уровень искажений значительно уменьшается.

Модель (Рисунок 3.21) была создана с использованием той же методологии, что и РКВДТ 50000/110. Для имитации электромагнитной части использовался трехфазный трехполюсный трансформатор. Системы управления

работают от одного общего постоянного блока – чтобы обеспечить одинаковый угол разблокировки для всех тиристоров.

В расчете используется - неявный метод Рунге-Кутта. Этот метод предназначен для решения жестких систем; И наиболее эффективен в этих условиях, его точность достаточна. При использовании других методов время расчета значительно увеличивается.

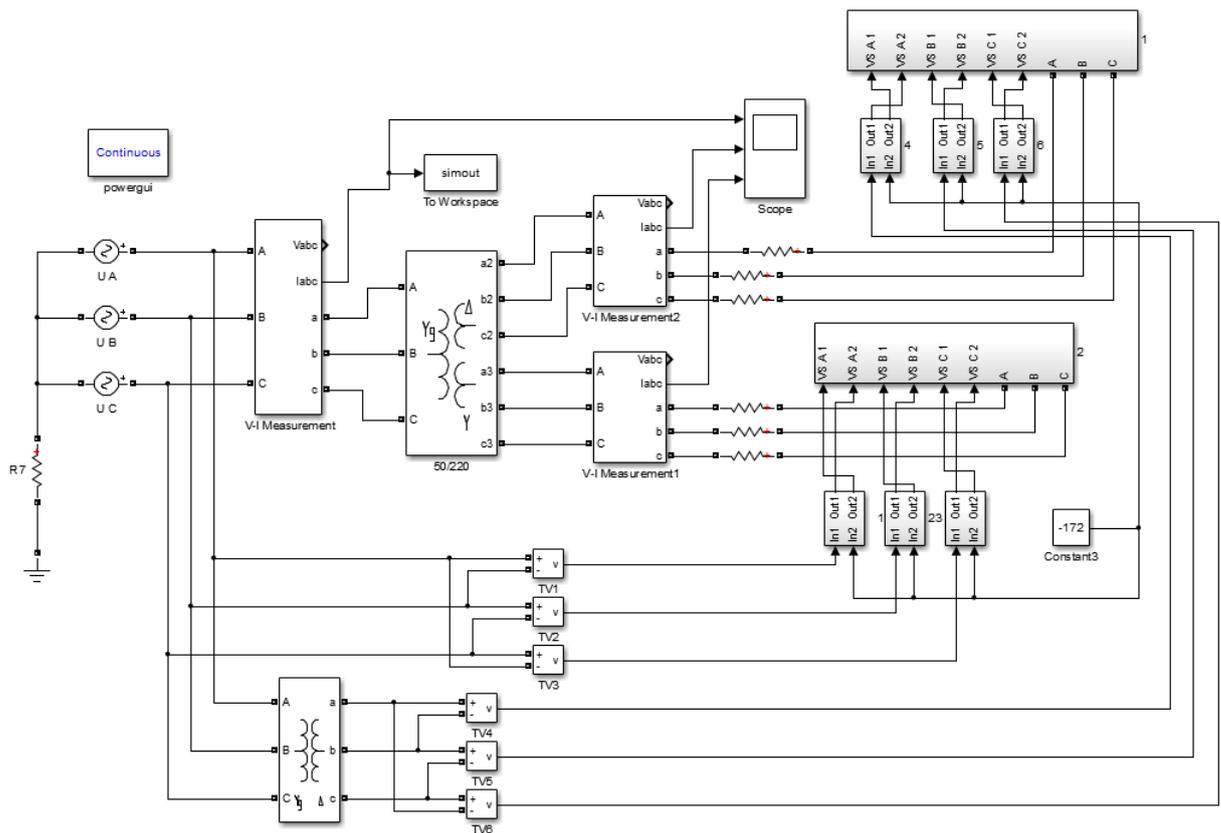


Рисунок 3.21 – Модель РКТРВД-50000/220

Данная характеристика (Рисунок 3.22) снята во всем рабочем диапазоне  $\alpha$ : от  $150^\circ$  до  $180^\circ$ . Вид характеристики аналогичен РКТВДЦ-50000/110.

Была снята зависимость  $K_i$  тока сетевой обмотки от  $\alpha$  – рисунок 3.22.

Максимальное гармоническое искажение при  $\alpha \approx 175^\circ$ . Уровень искажения в два раза ниже, чем в реакторе с двойной обмоткой, но он все еще слишком высок. Этот реактор также требует компенсации высших гармоник.

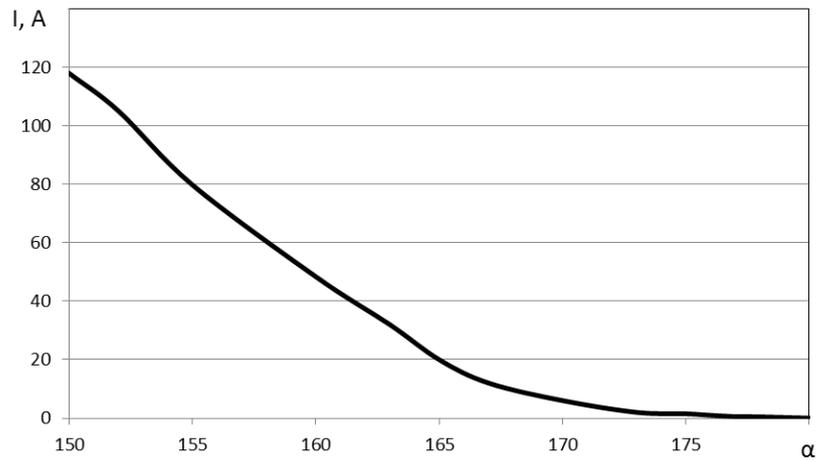


Рисунок 3.22 – Регулировочная характеристика РКТВДЦ-50000/110

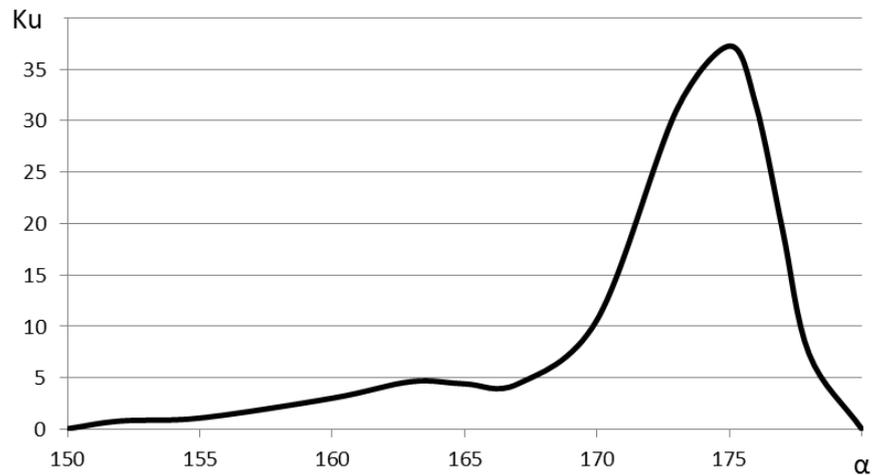


Рисунок 3.22 – Зависимость  $K_u$  тока сетевой обмотки от  $\alpha$

Как и ожидалось, гармонический анализ показал, что наибольшее значение имеет ток 11 и 13 гармоник.

Для решения этой проблемы параллельно тиристорным клапанам в каждой фазе подключаются нелинейные сопротивления (ОПН).

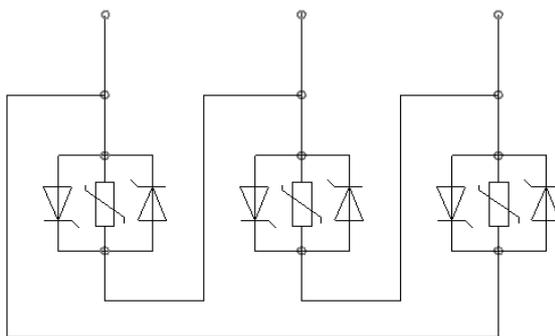


Рисунок 3.23 – Подключение ОПН к блокам тиристоров

Для сравнения была выбрана зависимость тока для подключенных ограничителей перенапряжений для реактора РКВДТС-50000/110 - рисунок 3.24.

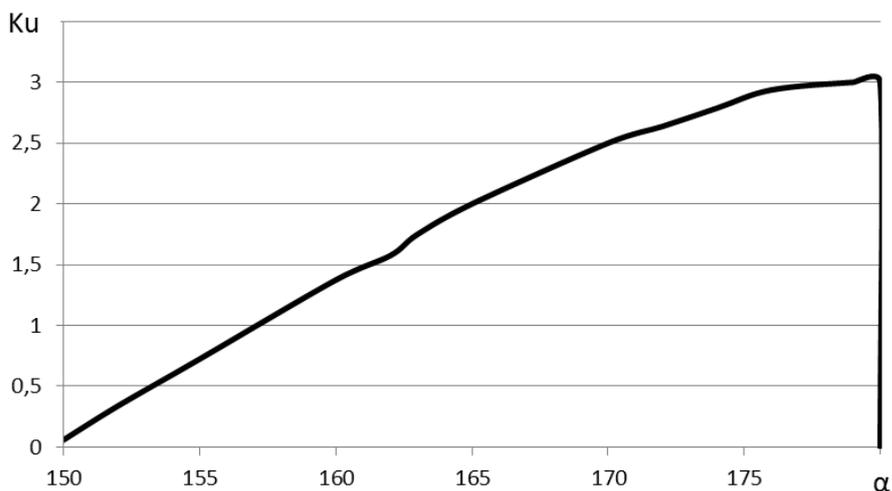


Рисунок 3.24 – Зависимость  $K_i$  тока сетевой обмотки от  $\alpha$  при подключенных ОПН

График показывает, что демпфер на клавише снижает уровень гармонических искажений, их уровень находится в пределах, определенных в ГОСТ Р 54149 2010. Следует также отметить, что с амортизаторами на клавише с увеличением  $\alpha$ , на рисунке 3.25 показана зависимость коэффициента тока  $k$ -й гармонической составляющей от тока основной частоты от угла размыкания тиристора при подключенном разряднике.

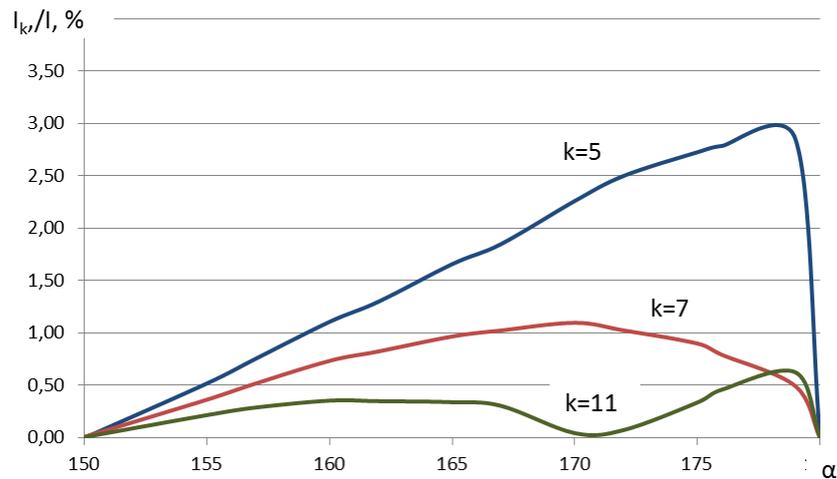


Рисунок 3.25 – Зависимость отношения тока  $k$ -той гармонической составляющей к току основной частоты УШРТ от  $\alpha$

Чтобы оценить эффект подключения ОПН в реакторе РКТРВД-50000/220, на рисунке 3.26 приводится зависимость  $K_u$  тока сетевой обмотки от  $\alpha$ .

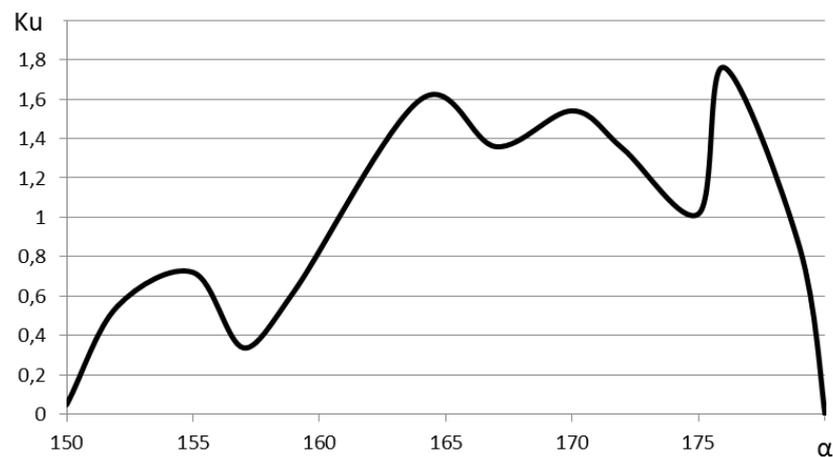


Рисунок 3.26 – Изменение коэффициента искажения тока обмотки от  $\alpha$  при подключении ОПН

### Выводы по главе 3

Были рассмотрены модели двух типов реакторов: двухобмоточные РКВДТС-50000/110 и трехмоторные РКВДТР 50000/220 и проведен анализ их работы. Поступило: характеристика регулирования, зависимость коэффициента гармонического искажения от угла  $\alpha$ , зависимость отношения тока  $k$ -й гармонической составляющей к току основных частот УШРТ от угла  $\alpha$ . Эксперимент подтвердил теоретические данные: отсутствие в РКТРВД-50000/220 гармоник, кратных трём, и порядка  $6(2n-1)\pm 1$ . Анализ спектра гармонического тока показал, что уровень искажения тока в реакторе может быть почти в два раза ниже, чем в реакторе с двумя обмотками. Но все же этот документ не является исчерпывающим, установленным в ГОСТ Р 54149 2010.

Один из самых простых и эффективных способов решения этой проблемы - подключение ограничителей перенапряжения параллельно тиристорам. Это позволяет снизить искажения до уровня, регулируемого ГОСТом. Кроме того, это технически наилучший путь, так как ограничитель перенапряжений подключен со стороны низкого напряжения. Сравнивая различные варианты мероприятий воздействия на УШР в цикле АПВ, которые применяются для ограничения величины тока подпитки дуги КЗ, следует отметить, что возможные резонансные перенапряжения на отключенной фазе после гашения дуги возникают при разных длинах линий. Установка компенсационных реакторов в нейтралях ШР или УШР существенным образом влияет на появляющиеся на линии напряжения после погасания дуги. Кроме того, выбранный вариант, который эффективен с точки зрения снижения величины тока подпитки дуги для рассматриваемой длины линии, может быть недопустим с точки зрения существенного значения восстанавливающего напряжения и, как следствие, большой вероятности повторных пробоев дугового промежутка.

Так, например, при рассмотрении варианта, когда на линии длиной менее 300 км устанавливаются два компенсирующих устройства (ШР и УШР), отключение фазы УШР эффективно с точки зрения снижения величины тока дуги, однако, как показывают кривые кратностей восстанавливающего напряжения, при длинах линий 150-250 км (в зависимости от сопротивления компенсационного реактора) опасно с точки зрения возникновения резонансных перенапряжений.

Дополнительно стоит отметить, что в ряде рассматриваемых случаев диапазон возникновения резонансного повышения напряжения достаточно узок, поэтому при выборе того или иного мероприятий для обеспечения эффективного АПВ, учитывая возможные погрешности, связанные с принятыми допущениями, целесообразно провести расчеты для длин линий, близких к рассматриваемой.

#### **4 Разработка мероприятий по увеличению эффективности применения УШР 110 кВ в электрической сети**

На рисунке 4.1 приведена схема электрических соединений типового управляемого подмагничиванием реактора типа РТУ-25000/110.

На схеме, представлено следующее оборудование, входящее в состав УШР серии РТУ-25000/110-УХЛ1:

1. РТДУ – электромагнитная часть реактора типа РТДУ-25000/110 со встроенными ТТ;
2. ПП – полупроводниковый трехфазный преобразователь ППМ-200/750;
3. САУ – система автоматического управления реактора;
4. ОМ - трансформатор преобразователя типа ОМ-200/22/0,22;
5. ТМО – трансформатор начального подмагничивания ТМО-2,5/0,4/0,012;
6. Предохранитель типа ПКТ 101-10-31,5-12,5;
7. УЗП – устройство защиты от перенапряжений;
8. ДПТ – датчик постоянного тока;
9. ДПН – датчик постоянного напряжения.

Реактор состоит из трёхфазной электромагнитной части РТДУ с двумя обмотками (СО и ОУ), системы подмагничивания из двух одинаковых однофазных трансформаторов преобразователя ОМ-200/22/0,22 и самого полупроводникового преобразователя ППМ-200/750 в единой конструкции, подключаемой через предохранители к выводам переменного тока РТДУ, а также системы автоматического управления (САУ). В состав системы подмагничивания (для предварительного подмагничивания реактора при включении) входят трансформаторы начального подмагничивания ТМО-2,5/0,4/-0,012 мощностью 2,5 кВт, питаемые от собственных нужд подстанции 0,4 кВ через автоматы или контакторы.

В этих реакторах первичная СО выполняется параллельными ветвями с вводом в середину обмотки и соединяется по схеме «двойной звезды с заземлённой нейтралью» (для реакторов 110 кВ в сетях с глухозаземлённой нейтралью) по аналогии с УШР более высоких классов напряжения. Однако ТТ со стороны нейтрали СО установлены только на общем выводе заземления, т.е. фактически в цепи циркуляции токов нулевой последовательности (НП), которые появляются только при однофазных КЗ.

Секции ОУ, расположенные под соответствующими секциями СО, соединены последовательно для групп правых и левых стержней магнитопровода и объединены параллельно в схему «двойного разомкнутого треугольника». Последняя позволяет одновременно компенсировать в «треугольнике» третью гармонику (и кратные ей), исключая её из потребляемого реактором сетевого тока, а также обеспечивать подмагничивание реактора от преобразователей через эквипотенциальные по переменному напряжению вершины «двойного треугольника» ОУ. Помимо полупроводникового преобразователя к эквипотенциальным точкам обмотки управления УШР подключаются два активных сопротивления, средняя точка которых заземлена. Номинальные значения каждого сопротивления составляют 1,7 Ом. Назначение указанных резисторов заключается в обеспечении пути протекания тока при нештатном обрыве цепи постоянного тока в нагрузочных режимах.

Выводы объединённых вершин «треугольника» ОУ, не находящиеся под напряжением, соединены с выходами однофазных выпрямителей и со встроенными заземляющими резисторами. Промежуточные точки ветвей «треугольника» ОУ, на которых присутствует переменное напряжение (примерно 22 кВ в режиме ХХ), имеют выводы для подключения однофазных трансформаторов ОМ-200/22/0,22 системы подмагничивания.



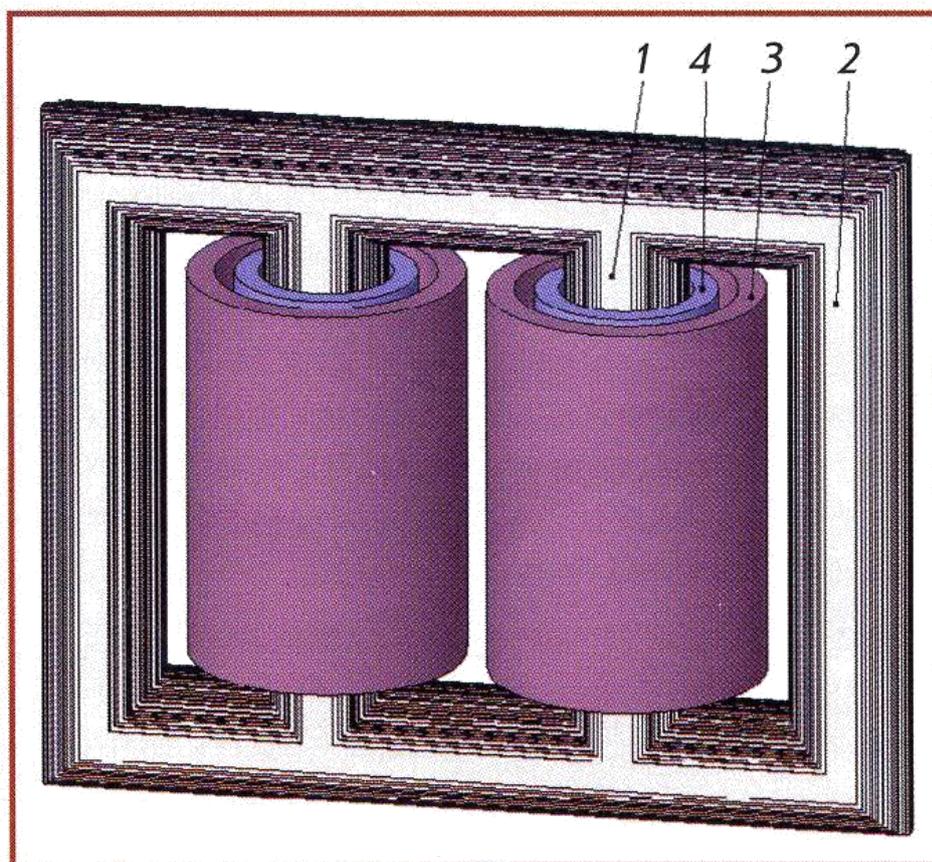


Рисунок 4.2 - Конструкция фазы УШР 110 кВ: 1 – основной (рабочий стержень); 2– боковое ядро; 3 – сетевая (реакторная) обмотка

#### 4.1 Разработка мероприятий, позволяющих увеличить быстродействие УШР 110 кВ

Обратной стороной совмещения обмоток является относительно низкое быстродействие устройства, обусловленное наличием указанных прямых электромагнитных связей между обмотками, что приводит к появлению уравнительных выпрямленных токов в сетевой обмотке в переходных режимах, которые препятствуют быстрому изменению тока СО УШР, а, соответственно, изменению мощности реактора. Кроме того, исполнение УШР с единственной

вторичной обмоткой негативно влияет на возможность установки в параллельных ветвях СО трансформаторов тока и реализации для неё продольных и поперечных дифференциальных токовых защит.

Уставка напряжения для УШР установлена на 0,98 о.е. Усиление напряжения в зоне управления. Уравнение (26) для поддержания точного напряжения в данных узлах. Постоянная времени СШП для установки и сброса мощности при расчетах в достаточно широком диапазоне (0,1-1,0 с). Результаты расчетов переходных процессов показали, что использование СКРМ на основе УШР с постоянной времени менее 1 с позволяет нам повысить уровень динамической устойчивости, т.е. Допустимая продолжительность короткого замыкания не менее 1,5 раз. Нарушение динамической устойчивости происходит с первой осцилляцией углов при длительности короткого замыкания (0,1 с вместо 0,04 с).

Уменьшение напряжения при управлении двигателем приводит к появлению асинхронного режима работы генератора и синхронного двигателя и, соответственно, к неудачному запуску асинхронной нагрузки. Использование СШП в сочетании со статическими конденсаторными батареями позволяет обеспечить успешный групповой запуск артериального давления. Требование скорости УШР для рассматриваемого случая составляет 0,3-0,5 с.

Кроме того, следует подчеркнуть, что согласно разработанному в 2004 году ОАО «ФСК ЕЭС» Технические характеристики скорости пополнения / разгрузки мощности реактора для класса напряжения 110 кВ не должны превышать 1 с.

Процесс настройки мощности с максимальной скоростью конструкции типа УШР типа РТУ-25000/110 показан на рисунке 5.3.

На рисунке 4.3 поле 1 представляет собой ток одной фазы обмотки сети, поле 2 - ток в обмотке управления УШР.

Увеличение выходного напряжения преобразователя, например, 500 кВ УШР, не приводит к увеличению скоростных характеристик 110 КВ УШР. Увеличение значения  $U_{ou}$  ускоряет только набор токенов в управляющей обмотке, однако ток обмотки сети незначителен.

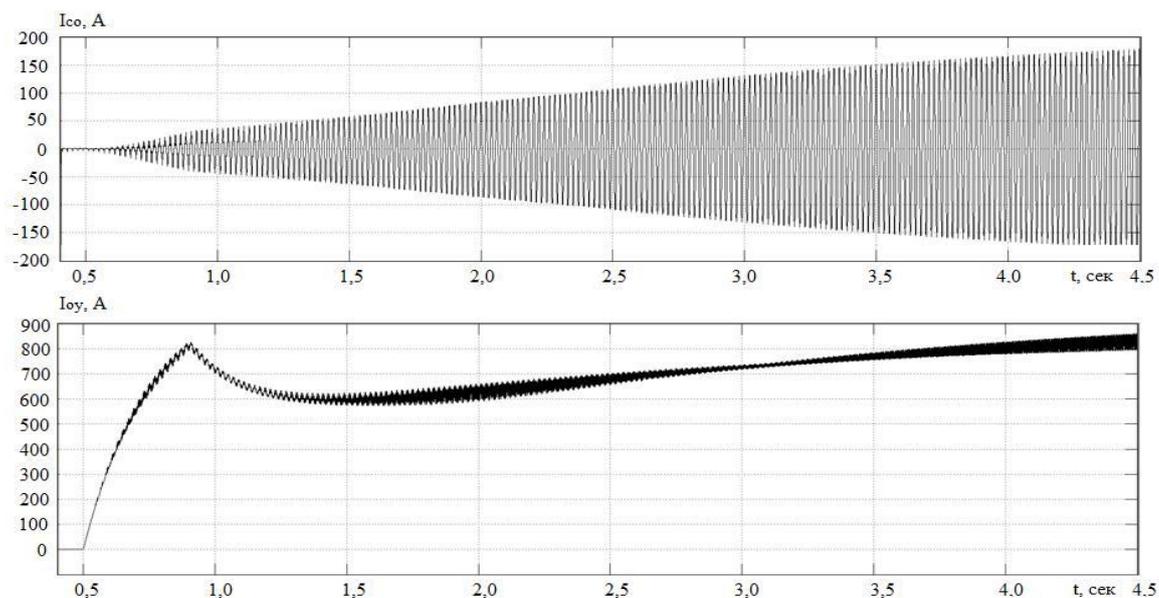


Рисунок 4.3 -Токи в сетевой обмотке и обмотке управления при наборе мощности УШР типовой конструкции

Проведенные на разработанной модели УШР 25 Мвар 110 кВ исследования свидетельствуют о том, что непропорциональное увеличение тока в ОУ и СО вызвано переходными процессами, которые возникают в секциях сетевой обмотки, а, соответственно, и в нейтралях СО, при наборе реактором мощности.

На рисунке 4.4 показан процесс изменения действующего значения тока в одной из нейтралей сетевой обмотки при наборе реактором мощности с максимальным быстродействием. Процесс во второй нейтрали полностью аналогичен, но противоположен по знаку. Таким образом, суммарное значение тока нейтрали СО близко к нулевому значению.

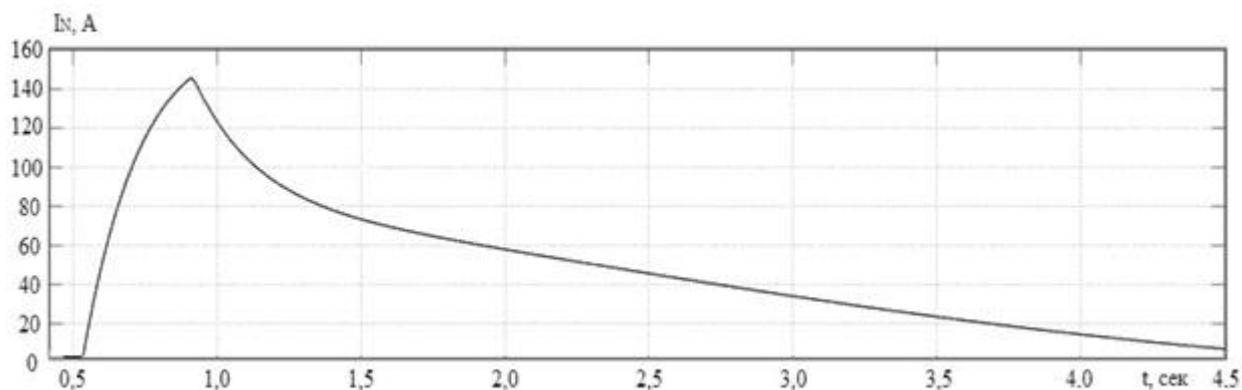


Рисунок 4.4 - Изменение действующего значения тока в нейтрали сетевой обмотки при изменении УШР мощности 5-100% с максимальным быстродействием.

Из представленного выше процесса изменения тока в нейтрали сетевой обмотки видно, что характеры изменения токов в ОУ и нейтрали СО на интервале [0,5; 0,9] очень схожи, далее при переходе работы преобразователя на номинальный угол управления, который происходит в момент времени 0,9 сек., а также по мере приближения тока сетевой к своему номинальному значению, ток  $I_N$  снижается.

Проведенные на разработанной компьютерной модели УШР 110 кВ расчеты показывают, что наиболее оптимальным с точки зрения увеличения быстродействия реактора, является установка в нейтрали СО активных сопротивлений, номинальное значение которых составляет 10 Ом. Увеличение номинального значения сопротивления свыше указанного значения не приводит к значительному улучшению результата, что будет показано ниже.

Упрощенная схема электромагнитной части УШР 25 Мвар 110 кВ с учетом установленных в нейтралях СО резисторов 10 Ом представлена на рисунке 4.5.

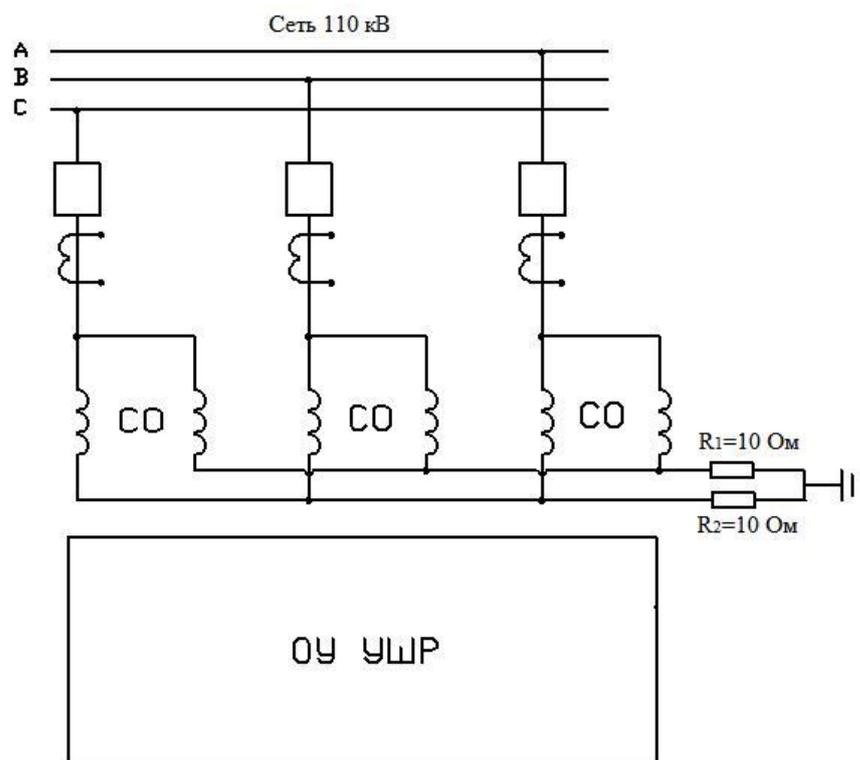


Рисунок 4.5 - Упрощенная схема электромагнитной части УШР 25 Мвар 110 кВ с учетом установленных в нейтралях СО активных сопротивлений.

Ниже, на рисунке 4.6, представлен процесс набора управляемым шунтирующим реактором мощности 5-100 % с максимальным для данного типа УШР быстродействием, а также с учетом установки активных сопротивлений 10 Ом в каждой из нейтралей сетевой обмотки. Выпрямленное напряжение преобразователя полностью соответствует напряжению ПП, которое было приложено в выводах обмотки управления при исследовании процессов в реакторе без учёта установки резисторов. Из рисунка видно, что установка демпфирующих сопротивлений в сетевой обмотке позволило сократить время набора реактором мощности 5-100% более чем в 4 раза (составило 0,75 с.), при этом нарастание тока сетевой обмотки до номинального значения пропорционально увеличению тока в обмотке управления.

На рисунке 4.6 поле 1- ток одной фазы сетевой обмотки, поле 2 – ток в обмотке управления УШР, поле 3 – действующее значение ток в нейтрали сетевой обмотки.

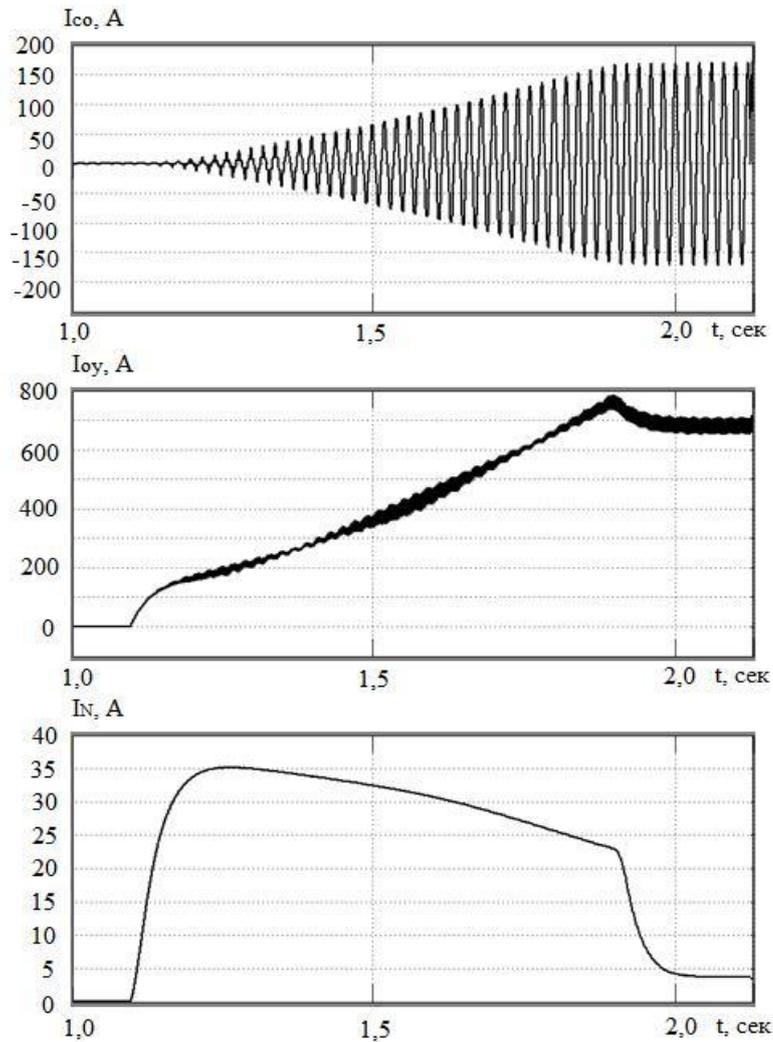


Рисунок 4.6 - Процесс набора УШР 110 кВ мощности 5-100% с максимальным быстродействием с учетом установки активных сопротивлений 10 Ом в нейтралях СО

Выше было отмечено, что установка активных сопротивлений в нейтралях сетевой обмотки является наиболее оптимальным как с точки зрения увеличения скоростных характеристик УШР, так и с точки зрения выбора номинальных значений указанных резисторов. Покажем несколько примеров, на основании чего были сделаны такие выводы. На рисунках 4.7. и 4.8. проиллюстрированы процессы набора мощности УШР 110 кВ с максимальным

для данного типа реактора выходным напряжением ПП и установкой в нейтралях СО активных сопротивлений 5 Ом и 20 Ом соответственно.

На рисунках 5.7-5.8 поле 1- ток одной фазы сетевой обмотки, поле 2 – ток в обмотке управления УШР, поле 3 – действующее значение ток в нейтрали сетевой обмотки.

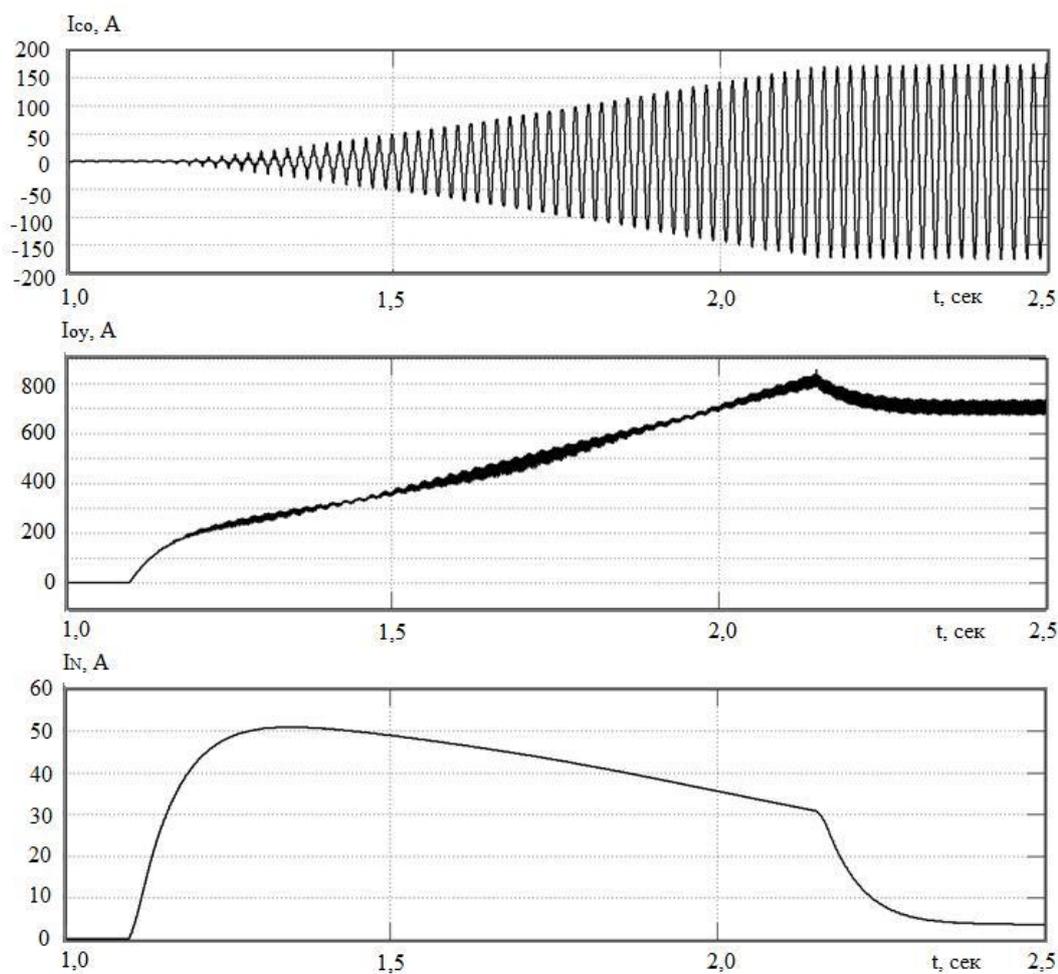


Рисунок 4.7 - Процесс набора УШР 110 кВ мощности 5-100% с максимальным быстродействием с учетом установки активных сопротивлений 5 Ом

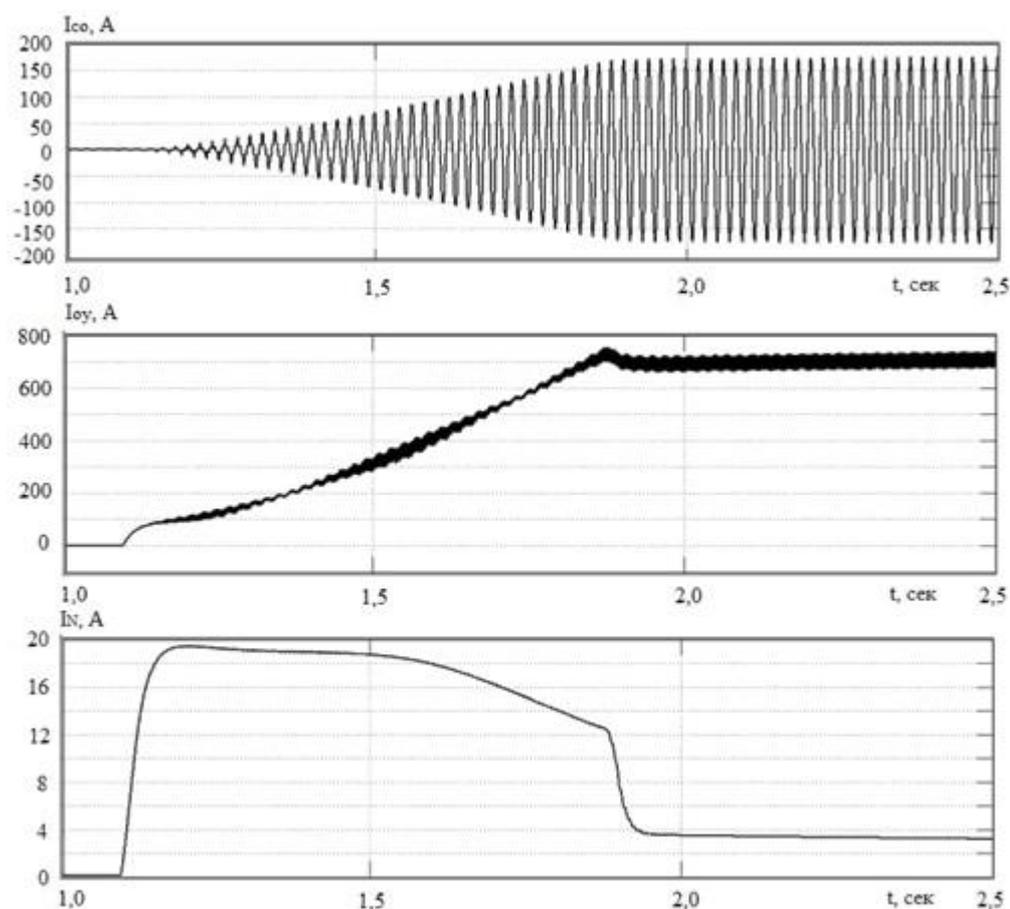


Рисунок 4.8 - Процесс набора УШР 110 кВ мощности 5-100% с максимальным быстрым действием с учетом установки активных сопротивлений 20 Ом в нейтральных СО

Анализ приведенных процессов показывает, что для случая с установкой в нейтральных сетевой обмотки сопротивлений 5 Ом характерны большие, нежели чем для случая установки сопротивлений 10 Ом, максимальные значения переходных токов в резисторах - 50 и 35 соответственно. Однако основным характерным отличием указанных случаев является время набора мощности 5-100% или обратно, которое в случае применения сопротивления 5 Ом составляет 1,1 с.

На основании выше изложенного, а также с учетом того, что расчеты процессов набора УШР мощности были проведены для широкого диапазона значений сопротивления, следует утверждать, что установка в нейтральной СО резистора 10 Ом является оптимальной.

Эти меры с использованием демпфирующих сопротивлений вносят вклад не только в пропорциональное изменение токов в обмотках, но и позволяют. Показан процесс установки реактора с активными сопротивлениями 10 Ом, мощностью 5-100%, установленными в нейтральных СО, с учетом выпрямленного значения напряжения, увеличенного до 540 В. Время, в течение которого реактор получает мощность от 5 % До 100% составляет 0,3 секунды.

На рисунке 5.7 поле 1- ток одной фазы сетевой обмотки, поле 2 – ток в обмотке управления УШР, поле 3 – действующее значение тока в нейтрали сетевой обмотки.

Отдельно необходимо остановиться на требованиях к мощности устанавливаемых резисторов. Из рисунков 4.6-4.7 видно, что характер изменения тока в нейтральных с подключенными активными сопротивлениями зависит от приложенного к выводам ОУ выпрямленного напряжения. На интервале времени [1.1; 1.4] (рисунок 4.7), когда выпрямленное напряжение имеет форсированное значение, ток  $I_N$  значительно больше значения тока, когда напряжение на ОУ соответствует номинальному углу управления.

Исходя из вышесказанного, следует сделать вывод о том, что в режиме регулирования напряжения в точке подключения УШР без учета применения режима форсированного набора/сброса мощности, токи в нейтральных УШР будут незначительны. Максимальное действующее значение тока в нейтральных СО в указанных режимах составляет 10 А.

На рисунке 4.8 поле 1- ток одной фазы сетевой обмотки, поле 2 – ток в обмотке управления УШР, поле 3 – действующее значение тока в нейтрали сетевой обмотки.

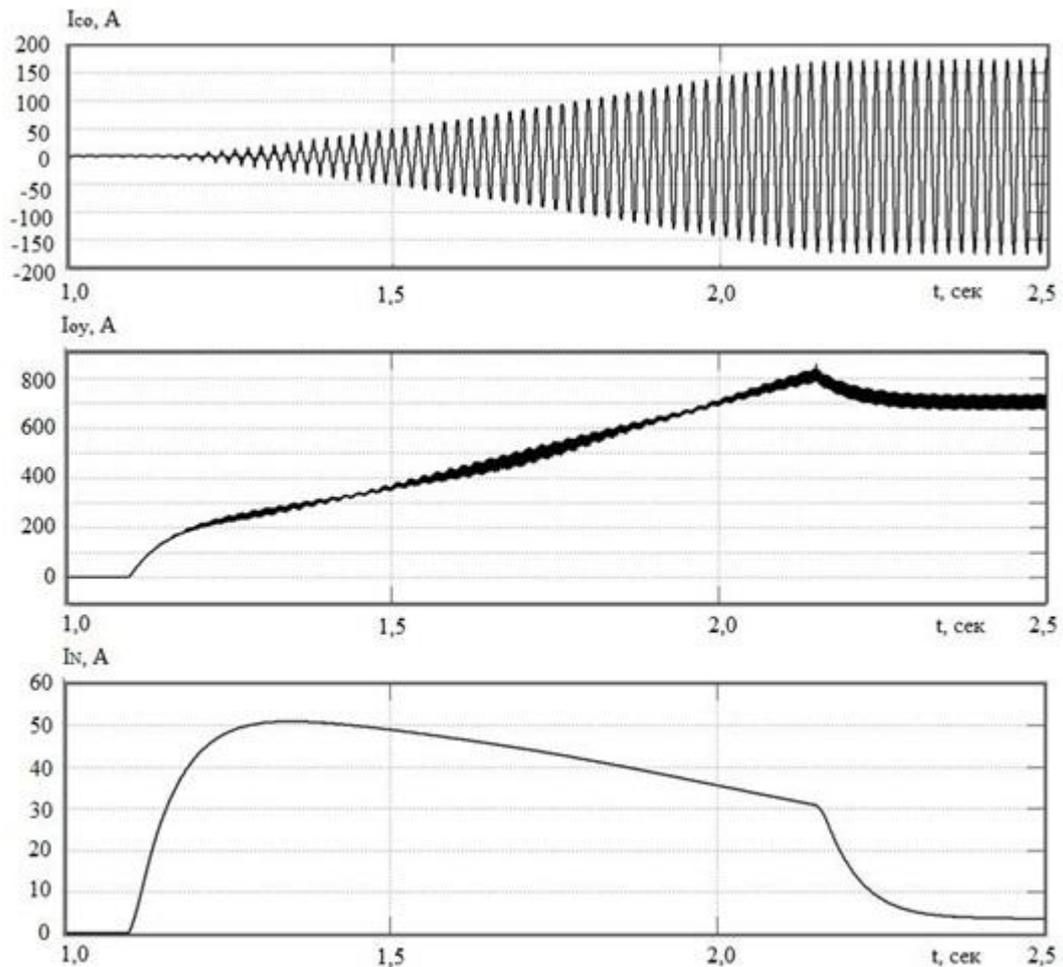


Рисунок 4.7 - Процесс набора УШР 110 кВ мощности 5-100% с максимальным быстродействием с учетом установки активных сопротивлений 10 Ом в нейтрали СО и увеличенным до 500 В выходным напряжением преобразователя.

На рисунке 4.8 поле 1- ток одной фазы сетевой обмотки, поле 2 – ток в обмотке управления УШР, поле 3 – действующее значение тока в нейтрали сетевой обмотки.

Помимо токов, которые возникают в режимах регулирования, в том числе форсированного набора/сброса мощности, резисторы нейтралей СО должны быть рассчитаны на протекающие токи при однофазных коротких замыканиях вблизи реактора.

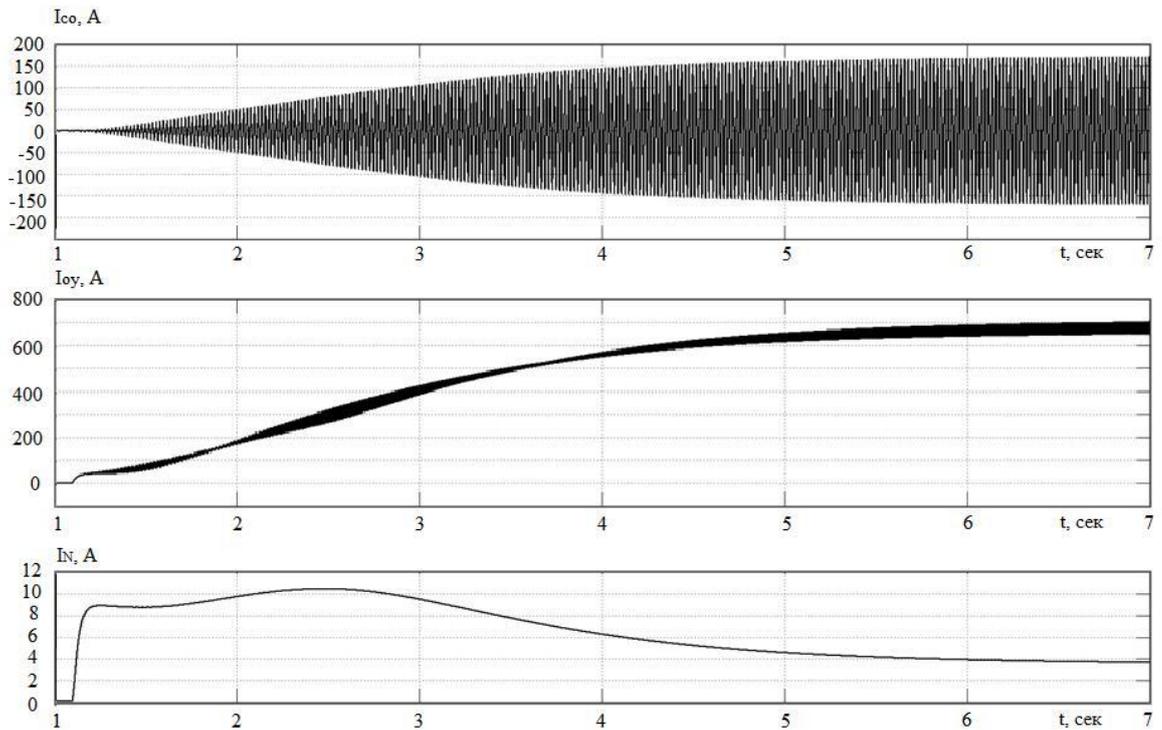


Рисунок 4.8 - Процесс набора УШР 110 кВ мощности 5-100% с номинальным углом управления, а также с учетом установки активных сопротивлений 10 Ом в нейтралях СО.

Оценить ток в резисторах при близком к УШР однофазном коротком замыкании можно на основе опыта нулевой последовательности. Составим систему уравнений для этого случая:

$$\begin{aligned}
 U_A - U_N &= jX_0^{\text{УШР}} \cdot I_0 \\
 U_B - U_N &= jX_0^{\text{УШР}} \cdot I_0 \\
 U_C - U_N &= jX_0^{\text{УШР}} \cdot I_0 \\
 U_N &= Z_N^{\text{УШР}} \cdot 3I_0
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

где  $X_0^{\text{УШР}}$  - индуктивное сопротивление реактора по нулевой последовательности, которое с учетом того, что напряжение короткого замыкания СО-ОУ УШР составляет 33%, может быть рассчитано как:

$$X_0^{УШР} = \frac{U_{\kappa}}{100\%} \cdot \frac{U_{ном}^2}{Q_{ном.УШР}} = 1930 \text{ Ом};$$

При расчете схем нулевой последовательности справедливо выражение:

$$U_A + U_B + U_C = 3U_0 \quad (4.2)$$

С учётом того, что  $U_A = 0; U_B = E_B; U_C = E_C$  выражение (4.2) может быть преобразовано:

$$U_0 = \frac{1}{3} U_A + U_B + U_C = -\frac{E_A}{3} \quad (4.4)$$

Тогда совместное решение системы уравнения (4.1) и (4.3) позволит определить ток  $I_0$ , протекающий в фазах реактора при однофазном КЗ:

$$I_0 = \frac{E}{3 \cdot (jX_0^{УШР} + 3 \cdot Z_N^{УШР})} \quad (4.4)$$

где  $Z_N^{УШР}$  - эквивалентное сопротивление нейтрали УШР.

Т.к. в настоящей главе рассматриваются мероприятия по увеличению быстродействия УШР с использованием установки резистивных сопротивлений в каждой из нейтралей УШР, номинальные значения которых составляют 10 Ом, то тогда для рассматриваемого случая справедливо, что  $jX_0^{УШР} + 3 \cdot Z_N^{УШР} \approx jX_0^{УШР}$ , следовательно, (4.4) может быть записано как:

$$I_0 = \frac{E_A^{УШР}}{3 \cdot (jX_0)} \quad (4.5)$$

С учетом вышесказанного, ток, протекающий в каждой из нейтралей СО может быть найден как:

$$I_N = \frac{3}{2} I_0 = \frac{E_A}{2 \cdot jX_0^{УШР}} = 181A$$

4.2. Анализ напряжений, возникающих на выводах обмотки управления, при подаче напряжения на УШР 110 кВ.

Отметим, что наибольшие значения появляющихся перенапряжений на ОУ возникали при включении УШР 500 кВ в момент прохождения напряжения одной из фаз через 0 после отключения реактора из режима потребления номинальной включения (АПВ) в котором участвует линейный УШР 500 кВ.

Случаи с возникновением перенапряжения на ОУ реактора при участии УШР 110 кВ в цикле АПВ линии маловероятны, т.к. УШР 110 кВ не применяются на линии. Данное обстоятельство связано с отсутствием необходимости ограничения перенапряжений, возникающих в результате одностороннего включения линии 110 кВ. Однако полностью режим включения УШР без нагрузки, через автотрансформатор за счет включения питающей линии 220 кВ значительной длины (см. рисунок 4.9).

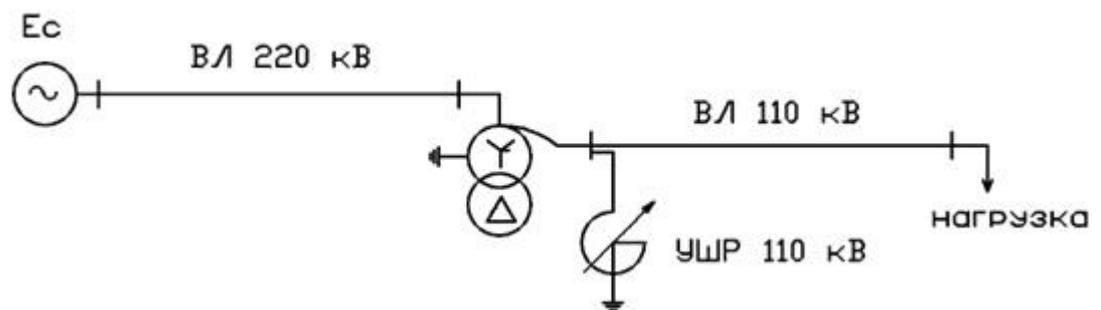


Рисунок 4.9 - Упрощенная однолинейная схема сети с установкой УШР 110 кВ.

В качестве одного из примеров подобной ситуации можно привести схему электроснабжения Актогайского горно-обогатительного комбината (ГОК), питание которого обеспечивается от ПС 220 кВ Балхаш по ВЛ 220 кВ Балхаш-Актогайский ГОК длиной 370 км.

Включение УШР без привязки к условиям его эксплуатации является одним из критических критериев эффективности использования УШР.

Оценим возможность появления перенапряжения на ОУ, а также их уровень при включении УШР 110 кВ при отсутствии его предварительного подмагничивания. Ранее, при исследовании процессов при коммутациях УШР 500 кВ было показано, что максимальный уровень перенапряжений на обмотке управления возникает при остаточной индукции в стержнях реактора соответствующей индукции номинального режима (2 Тл). Расчеты соответствующего режима включения для УШР 110 кВ свидетельствуют о том, что максимально возможный уровень перенапряжения на ОУ для данного реактора составляет менее 3 кВ (см. рисунок 4.9).

На рисунке 4.10 поле 1- индукции стержней фазы А, поле 2 – напряжение на выводах обмотки управления.

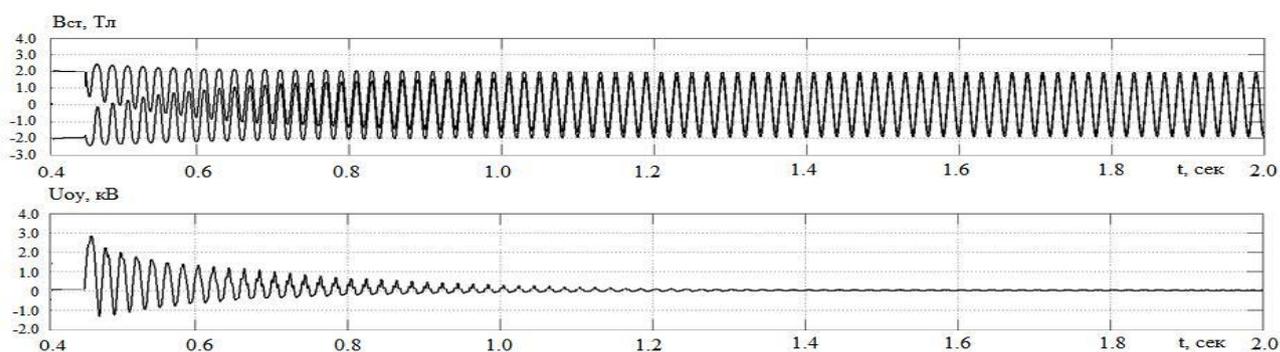


Рисунок 4.10 - Процессы при включении УШР в сеть с остаточной индукцией, соответствующей номинальной, без использования режима предварительного под-магничивания.

Анализ процессов при включении УШР без учета его предварительного подмагничивания показывает, что на выводах обмотки управления напряжение (2,95 кВ) ниже, чем допустимое напряжение полупроводникового преобразователя, которое составляет 3,5 кВ.

Стоит подчеркнуть, что остаточная индукция, значение которой соответствует индукции реактора в номинальном режиме, возможна только для случая применения УШР 110 кВ на линии в цикле АПВ, когда реактор был отключен из номинального режима. На сегодняшний день на практике отсутствует опыт применения УШР 110 кВ на линии, что объясняется спецификой ВЛ 110 кВ, которая заключается в незначительной зарядной мощности линии.

Напряжение, появляющееся на выводах ОУ при включении УШР 110 кВ без предварительного подмагничивания, будет существенно меньше 3 кВ и не приведет к повреждению полупроводникового преобразователя.

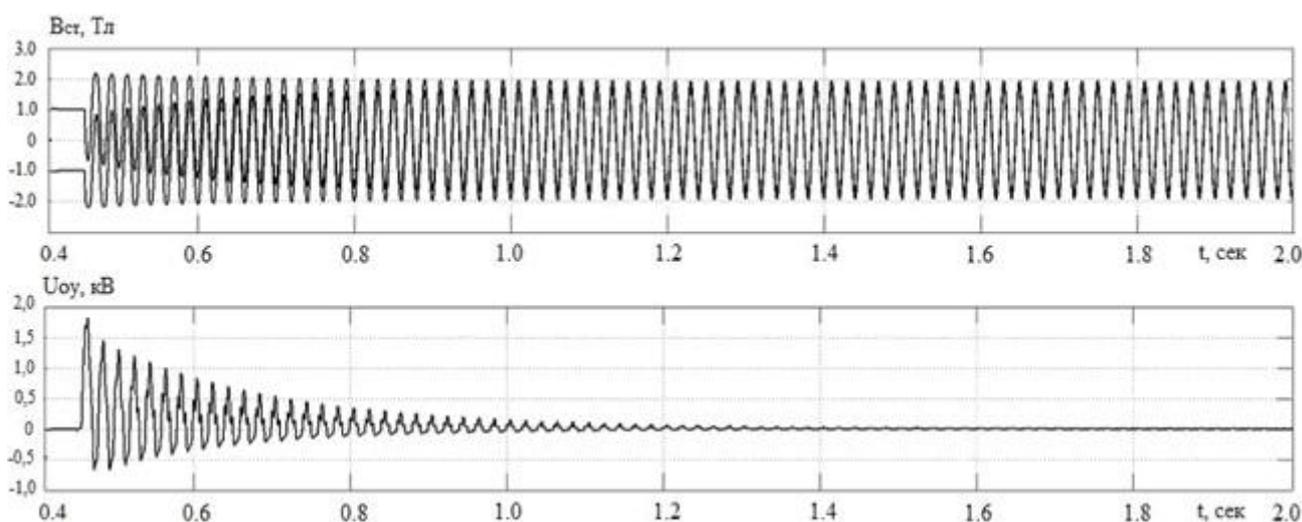


Рисунок 4.11 - Процессы при включении УШР в сеть с остаточной индукцией 1,0 Тл без использования режима предварительного подмагничивания.

На рисунке 4.11 приведены процессы при включении УШР 110 кВ без использования предварительного подмагничивания с остаточной индукцией в стержнях реактора 1 Тл. Максимальное значение напряжения, появляющегося на выводах ОУ, составляет 2 кВ

На рисунке 4.10 поле 1- индукции стержней фазы А, поле 2 – напряжение на выводах обмотки управления.

Дополнительно следует отметить, что проведение расчетов указанного режима проводилось для бесконечно мощной системы, т.е. сопротивления питающей системы не учитывалось. Проведение расчетов с учетом реальных параметров системы приведет к дополнительному снижению напряжения на выводах ОУ.

На основании вышеизложенного, имеет место сделать вывод о том, что для безопасного, с точки зрения полупроводникового преобразователя, включения управляемого реактора типа РТУ-25000/110 в сеть без учета предварительного подмагничивания не требуется разработки дополнительных мероприятий. Объясняется данное обстоятельство значительно меньшей номинальной мощностью УШР 110 кВ относительно УШР 500 кВ и схемой соединения обмотки управления, которая представляет собой двойной разомкнутый треугольник, к эквипотенциальным точкам которого подключен полупроводниковый преобразователь.

#### Выводы по главе 4

Анализ результатов показывает, что непропорциональное увеличение тока в обмотке приводит к переходу процессов, происходящих на участках обмотки сети, когда реактор рекрутируется мощностью.

На основании исследований, проведенных в работе, в отношении увеличения скорости СШП 110 кВ, что позволяет проводить активные токи в нейтральном режиме СО, что позволяет затухать переходные токи в сечениях обмотки сети. Номинальные значения сопротивлений 10 Ом.

Увеличение величины приложенного выпрямленного напряжения не приводит к увеличению скорости реактора, а также только к увеличению скорости нарастания тока до его номинального значения в управляющей обмотке. Время установки 5-100% мощности составляет около 4 секунд.С

учетом того, что предложенный в настоящей главе способ позволят увеличить быстродействие УШР 110 кВ более чем в десять раз без каких-либо существенных доработок электромагнитной части, а затраты на его реализацию минимальны, то следует считать это действительно актуальным.

Данные действия позволяют увеличить быстродействие реактора и, с значением выпрямленного напряжения 500 В, которое приложено к выводам обмотки управления, создать набор мощности реактора 5-100% за время 0,3 секунды.

Резисторы, которые должны быть установлены, должны быть разработаны только для переходных токов, которые вступают в силу и выходят за пределы мощности, а максимальное значение составляет около 85 А, но также и для токов, которые будут протекать через резисторы для однофазного короткого замыкания Рядом с реактором. Максимальный ток через резистор, установленный в нейтрали при однофазном коротком замыкании вблизи реактора, составляет 181 А.

## Заключение

Анализ результатов показывает, что непропорциональное увеличение тока в обмотке приводит к переходу процессов, происходящих на участках обмотки сети, когда реактор рекрутируется мощностью.

На основании опытов, которые были получены в работе, увеличение скорости набора мощности УШР, позволяет увеличить прохождение активногго тока в номинальном режиме сетевой обмотки, что позволяет уменьшать переходные токи в обмотках при значении сопротивлений 10 Ом.

Один из самых простых и эффективных способов решения проблемы возникновения восстанавливающегося напряжения, следуя из полученных выражений - это подключение ограничителей перенапряжения параллельно тиристорам. Это позволяет снизить искажения до уровня, регулируемого ГОСТом. Кроме того, это технически наилучший путь, так как ограничитель перенапряжений подключен со стороны низкого напряжения. Сравнивая различные варианты мероприятий воздействия на УШР в цикле АПВ, которые применяются для ограничения величины тока подпитки дуги КЗ, следует отметить, что возможные резонансные перенапряжения на отключенной фазе после гашения дуги возникают при разных длинах линий. Установка компенсационных реакторов в нейтралях ШР или УШР существенным образом влияет на появляющиеся на линии напряжения после погасания дуги. Кроме того, выбранный вариант, который эффективен с точки зрения снижения величины тока подпитки дуги для рассматриваемой длины линии, может быть недопустим с точки зрения существенного значения восстанавливающегося напряжения и, как следствие, большой вероятности повторных пробоев дугового промежутка.

Так, например, при рассмотрении варианта, когда на линии длиной менее 300 км устанавливаются два компенсирующих устройства (ШР и УШР), отключение фазы УШР эффективно с точки зрения снижения величины тока дуги, однако, как показывают кривые кратностей восстанавливающегося

напряжения, при длинах линий 150-250 км (в зависимости от сопротивления компенсационного реактора) опасно с точки зрения возникновения резонансных перенапряжений.

Дополнительно стоит отметить, что в ряде рассматриваемых случаев диапазон возникновения резонансного повышения напряжения достаточно узок, поэтому при выборе того или иного мероприятий для обеспечения эффективного АПВ, учитывая возможные погрешности, связанные с принятыми допущениями, целесообразно провести расчеты для длин линий, близких к рассматриваемой.

## Список использованных источников

1. Дьяконов, В. П. MATLAB 7. Самоучитель / В.П. Дьяконов. – М: ДМК Пресс, 2008.
2. Курбатова, Е. А. MATLAB 7. Самоучитель / Е. А Курбатова. – М.: Диалектика, 2005.
3. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2009.
4. Лучко, А.Р. Принципы математического моделирования динамических процессов в управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторах в SimPowerSystems (Matlab) / А.Р. Лучко, М.А. Ебадиан. – М.: Электричество, 2008.
5. Евдокунин, Г.А. Электрические системы и сети: учеб. пособие / Г.А. Евдокунин. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2010.
6. СТО 56947007-29.240.10.028-2009. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ.
7. СТО 56947007-29.180.02.140-2012. Методические указания по проведению расчетов для выбора типа, параметров и мест установки устройств компенсации реактивной мощности в ЕНЭС.
8. Reichert, K.J. Controllable reactor compensator for more extensive utilization of high voltage systems / K.J. Reichert, J. Kauferle, H. Glavitsh // CIGRE. 25 Session. Report 32-17. – 1974.
9. Fisher, F. Controlled 100 MVA reactor / F. Fisher, E. D. Friedlander // GEC Journal. – 1955. – Vol. 22. – № 2.
10. Правила устройства электроустановок. 7-е издание / Ред. А.М. Меламед. – М.: НЦ ЭНАС, 2011.
12. Правила технической эксплуатации электроустановок (ПТЭЭП) – М., 2003.
13. ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках.

14. ГОСТ Р 50571.15-97. Электроустановки зданий. Часть 5. Выбор и монтаж электрооборудования.
15. ГОСТ 14209-97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов.
16. СНиП 3.05.06-85. Электротехнические устройства.
17. Конюхова, Е.А. Электроснабжение объектов / Е.А. Конюхова. – М.: Академия, 2004.
18. Шеховцов, В.С. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению / В.С. Шеховцов. – М.: Инфра-М, 2006.
19. Шеховцов, В.С. Расчет и проектирование схем электроснабжения / В.С. Шеховцов. – М.: Форум, 2014.
20. Ополева, Г.И. Схемы и подстанции электроснабжения. Справочник / Г.И. Ополева. – М.: Инфра-М, 2006.
21. Сибикин, Ю.А. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий / Ю.А. Сибикин. – М.: Академия, 2006.
22. Киреева, Э.В. Электроснабжение и электрооборудование цехов промышленных предприятий / Э.В. Киреева. – М.: КноРус, 2011.
23. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В.А. Андреев. – М.: Высшая школа, 2006.
24. Андреев, В.А. Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах / В.А. Андреев. – М.: Высшая школа, 2008.
25. Шехцов, В.С. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению. 2-е издание / В.С. Шехцов. – М.: Форум, 2011.
26. Куско, А.М. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии / А.М. Куско, М. Томпсон. – М.: Додэка XXI, 2010.
27. Хорольский, В.Г. Надежность электроснабжения / В.Г. Хорольский, М.А. Таранов. – М.: Форум, 2013.
28. Сибикин, Ю.А. Электроснабжение. Учебное пособие / Ю.А. Сибикин, М.А. Сибикин. – М.: РадиоСофт, 2012.

29. Киреева, Э.В. Электроснабжение и электрооборудование организаций и учреждений. Учебное пособие / Э.В. Киреева. – М.: КноРус, 2015.
30. Дубинский, Г.Д. Наладка устройств электроснабжения выше 1000 В. Издание 2-е, переработанное и дополненное / Г.Д. Дубинский, Л.А. Левин. – М.: Солон-Пресс, 2014.
31. Шербаков, Е.В. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях: учебное пособие / Е.В. Шербаков, Д.А. Александров, Д.Е. Дубов. – М.: Форум, 2012.
32. Коробов, Г.А. Электроснабжение. Курсовое проектирование. Учебное пособие. Издание третье, исправленное и дополненное / Г.А. Коробов, В.С. Картавец, Н.А. Черемесинова. – СПб.: Лань Спб, 2014.
33. Кононенко, В.Н. Электротехника и электроника / В.Н. Кононенко. – М.: Феникс, 2008.
34. Евдокимов, Ф.А. Общая электротехника / Ф.А. Евдокимов. – М.: Высшая школа, 2004.
35. Куликов, Ю.А. Переходные процессы в электрических системах / Ю.А. Куликов. – М.: Мир, 2003.
36. BHEL (Bharat Heavy Electricals Limited) Transformers, First Edition. – McGraw Hill Education, 2000.
37. BHEL (Bharat Heavy Electricals Limited) Transformers, Second Edition. – McGraw Hill Education, 2003.
38. Pooler, H. Electrical Power, 3 edition / H. Pooler. – Fairmont Press, 2005.
39. Vodovozov, V. Electric Drive Systems and Operation / V. Vodovozov. – Fairmont Press, 2014.
40. Protheroe, R.J. Essential Electrodynamics / R.J. Protheroe. – Fairmont Press, 2012.
41. Protheroe, R.J. Essential Electromagnetism / R.J. Protheroe. – Fairmont Press, 2014.
42. Glover, J.D. Power system analysis and design / J.D. Glover. – CRC Press, 2012.

43. Pansini, A. Guide to electrical power distribution systems / A. Pansini. – Fairmont Press, 2005.
44. Degeneff, R.C. Principles of power engineering and analysis / R.C. Degeneff, M.H. Hesse. – CRC Press, 2012.
45. Charles, I. Electric machines: theory, operation, applications, adjustment, and control / I. Charles. – NJ: Prentice Hall, 2002.
46. Fitzgerald, A.E. Electric machinery / A.E. Fitzgerald, Ch. Kingsley. – New York: Mc Graw-Hill Companies, 2014.
48. Farouk, A. M., Highvoltage engineering / A.M. Farouk. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.
49. Bayliss, C. Transmission and Distribution Electrical Engineering / C. Bayliss. – London: Elsevier Science, 2014.
50. Harlow, J. H. Electric power transformer engineering / J. H. Harlow. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
51. Александров, Г.Н. Передача электрической энергии / Г.Н. Александров. – 2-е изд. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2009.
52. Запорожтрансформатор, ЗТР - трансформатор, автотрансформатор, силовой масляный трансформатор, шунтирующий реактор, управляемый шунтирующий реактор, УШР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ztr.com.ua/>.
53. Брянцев, А.М. Ввод в эксплуатацию уникального управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора / А.М. Брянцев, А.Г. Долгополов, А.И. Лурье, С.В. Уколов // Электричество. - 2004. - №4. - С. 64-68.