

На правах рукописи



ШЕСКИН Евгений Борисович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ
С УПРАВЛЯЕМЫМИ ШУНТИРУЮЩИМИ РЕАКТОРАМИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

Дмитриев Михаил Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Зеленохат Николай Иосифович

кандидат технических наук

Герасимов Юрий Александрович

Ведущая организация:

ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический

институт повышения квалификации»,

г. Санкт-Петербург

Защита состоится «13» декабря 2013 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 федерального государственного политехнического университета высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29., Главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке федерального государственного политехнического университета высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан 11 ноября 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.11

кандидат технических наук, доцент



Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

В настоящее время развитие Единой энергетической системы России идет по пути внедрения инновационных технологий и построения так называемых «интеллектуальных сетей». Одним из важнейших компонентов таких сетей являются управляемые средства компенсации реактивной мощности – статические тиристорные компенсаторы (СТК), управляемые шунтирующие реакторы или трансформаторного типа (УШРТ), или с подмагничиванием (УШР), а также статические компенсаторы (СТАТКОМ).

По разным причинам, в основном, связанным с высокой стоимостью изготовления и эксплуатации, такие средства компенсации реактивной мощности как СТК, СТАТКОМ и УШРТ, имеющие в своем составе силовые тиристоры, выполненные на полную мощность устройства, не нашли широкого применения в сетях ЕЭС России.

В управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторах, мощность преобразователя, выполненного на основе силовых тириستоров, составляет лишь 1-2% от полной мощности реактора, а стоимость всего комплекса сопоставима со стоимостью обычного двух- или трехобмоточного трансформатора. Указанные особенности определяют существующее на сегодняшний день преимущество управляемого реактора перед аналогичными по назначению устройствами компенсации реактивной мощности, что позволило ему занять лидирующие позиции среди всех управляемых средств компенсации, устанавливаемых в сетях ЕЭС России.

Несмотря на то, что исследования процессов, происходящих в самом устройстве, ведутся достаточно долгое время, многие важнейшие вопросы, связанные с влиянием УШР на процессы в электрических сетях, на сегодняшний день не исследованы, что затрудняет проектирование.

Цель работы

Целью работы являлась разработка математической модели управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора и выполнение всего комплекса расчетов электромагнитных процессов с целью определения влияния УШР на величину напряжений и токов в элементах электрической системы и характер изменения этих параметров в переходных процессах.

Задачи исследования

1. Разработка математической модели реактора РТУ-180000/500 и универсального алгоритма решения полученной системы уравнений, реализация моделей УШР и его системы автоматического управления (САУ) в программном комплексе ЕМТР/АТР.
2. Выполнение расчетов коммутационных процессов при включении высоковольтных линий с УШР для определения требований к быстродействию УШР.
3. Выполнение расчетов цикла однофазного автоматического повторного включения линий сверхвысокого напряжения с УШР для определения влияния управляемого реактора на величину восстанавливающегося напряжения и тока подпитки дуги замыкания.
4. Выполнение расчетов коммутационных процессов включения линии совместно с УШР с целью выявления влияния УШР на способность элегазовых выключателей отключать ВЛ с

УШР в цикле «включение-быстрое отключение».

Научная новизна диссертационной работы

1. Сформулированы требования к быстродействию УШР для обеспечения сохранности электротехнического оборудования в режимах, сопровождающихся перенапряжениями или повышенными токовыми нагрузками.
2. Исследовано влияние быстродействия УШР на требования к нелинейным ограничителям перенапряжений.
3. Исследовано влияние УШР на величину тока подпитки и восстанавливающегося напряжения в цикле ОАПВ.
4. Исследовано влияние УШР на апериодические токи выключателей ВЛ и опасность их повреждения.

Достоверность результатов

Математическая модель верифицирована по величине напряжения короткого замыкания, току и индукции в стержнях магнитопровода УШР в режиме холостого хода, а также с помощью натуральных осциллограмм процессов, записанных на введенных объектах.

Практическая ценность работы

1. Описан алгоритм создания моделей управляемых реакторов произвольной конструкции и их реализации в виде программ на ЭВМ.
2. Созданы математические модели управляемого подмагничиванием реактора РТУ-180000/500 и его системы управления, которые реализованы в программном комплексе ЕМТР/АТР.
3. Разработаны аналитические выражения, положенные в основу методики расчета цикла однофазного автоматического повторного включения ВЛ с УШР, позволяющие оценить ток подпитки и восстанавливающееся напряжение и выбрать необходимые меры для обеспечения успешности ОАПВ.
4. Разработаны аналитические выражения, положенные в основу методики расчета характеристик компенсированной ВЛ, позволяющая определить степень опасности апериодических компонент тока и на основании этих расчетов выбрать эффективные меры по обеспечению успешного отключения линии в цикле «включение-быстрое отключение».

Реализация результатов работы

Разработанные математические модели используются на кафедре «Электрические системы и сети» ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», научно-исследовательскими организациями и производителями управляемых реакторов для проведения исследований и расчетов электрических параметров сетей, оснащенных управляемыми подмагничиванием шунтирующими реакторами.

Апробация работы

Положения работы обсуждались на 3-й Всероссийской молодежной конференции «Энергетика глазами молодежи» (г. Екатеринбург, 2012 г.). Основные положения работы также обсуждались на технических семинарах, проводимых проектными организациями и производителями оборудования.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 4 печатных работы, в том числе 3 научных статьи

в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ. Материалы диссертации стали основой для монографии.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованных источников. Работа изложена на 167 страницах, включая 11 таблиц, 85 рисунков и список литературы из 71 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, раскрывается научная новизна и практическая значимость выполненной работы.

В первой главе приводится описание принципа работы и конструктивных особенностей, состав и назначение электрических обмоток реактора, управляемого подмагничиванием, на примере УШР 500 кВ серии РТУ-180000/500.

На рисунке 1 приведена принципиальная схема магнитного вентиля, предполагающая расщепление центрального стержня на два так называемых «полустержня», охваченные сетевой обмоткой (СО) и обмоткой управления (ОУ). Принцип магнитного вентиля положен в основу УШР.

Сетевая обмотка (СО) охватывает оба полустержня и подключается непосредственно к шинам высокого напряжения или проводам ВЛ. Протекающий в ней переменный ток создает переменный магнитный поток, который замыкается по полустержням и боковым ярмам магнитопровода реактора.

Обмотка управления (ОУ) разделена на две секции, включенные встречно, и подключена к управляемому источнику постоянного напряжения. Протекающий в ОУ постоянный ток создает постоянный магнитный поток, который замыкается по полустержням, верхнему и нижнему ярму. Направления постоянных потоков в полустержнях оказываются противоположными вследствие встречного включения секций ОУ. Встречное включение секций позволяет также исключить влияние процессов, происходящих во внешней сети, на процессы в ОУ.

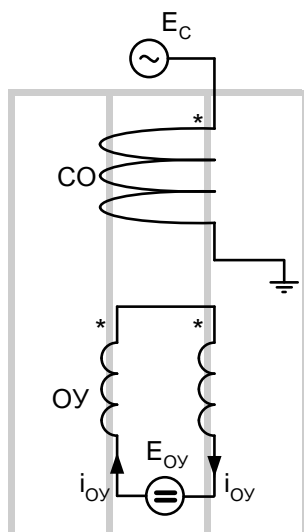


Рисунок 1 - Принципиальная схема магнитного вентиля

Таким образом, переменный и постоянный магнитные потоки в стержнях суммируются (см. рисунок 2). Регулируя ток в ОУ, можно изменять постоянную составляющую индукции, тем самым уменьшая или увеличивая долю периода, в течение которой каждый из стержней находится в состоянии насыщения.

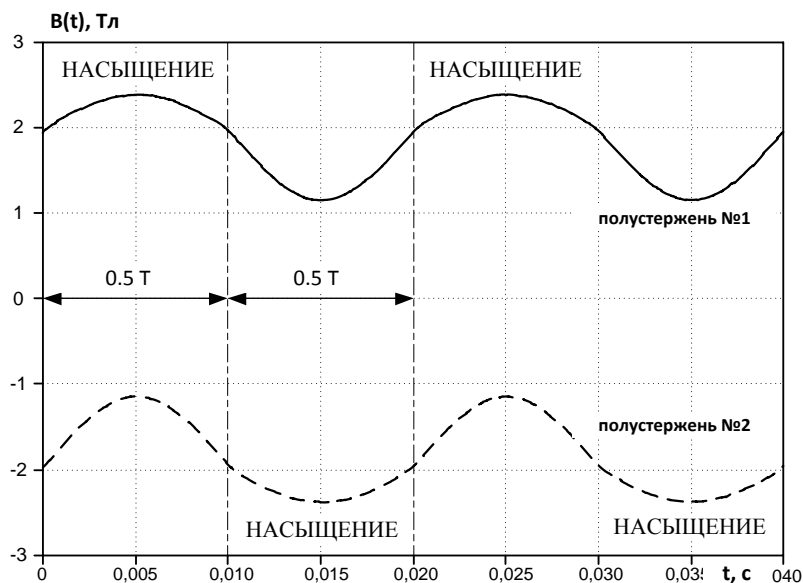


Рисунок 2 - Сложение магнитных потоков (индукций), создаваемых сетевой обмоткой и обмоткой управления, в полустержнях в номинальном режиме

Очевидно, что переход из состояния, когда один или оба стержня насыщены в состояние, когда ни один из стержней не насыщен, сопровождается искажением формы кривой тока СО. Это приводит к появлению в сети высших гармонических составляющих. Для улучшения формы кривой тока и снижения тока искажения применяется компенсационная обмотка (КО), фазы которой соединяются по схеме «треугольник». Таким образом, применение КО позволяет компенсировать гармоники, кратные трем, и радикально снизить коэффициент искажения формы кривой тока сетевой обмотки (см. рисунок 3).

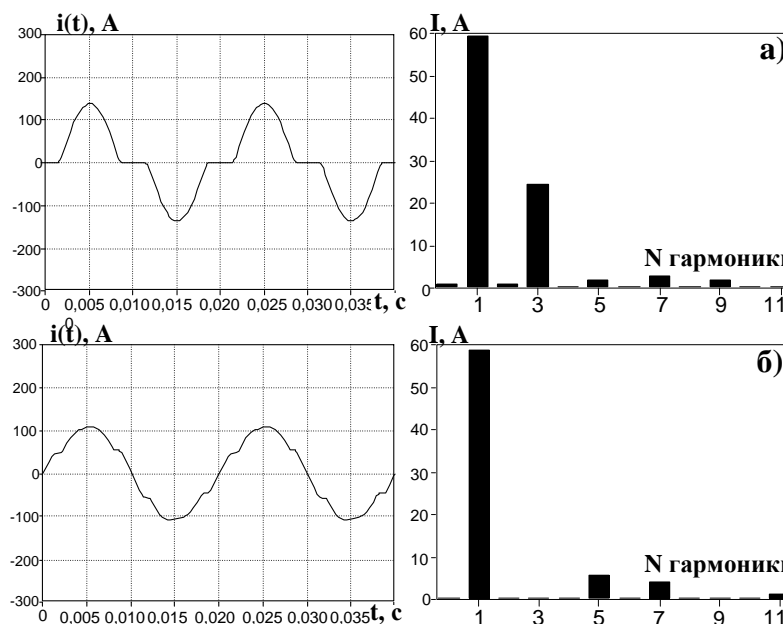


Рисунок 3 - Токи сетевой обмотки и их гармонический состав в режиме потребления 40% от номинальной мощности УШР:
а) – КО разомкнута; б) – КО замкнута

Первую главу завершает обзор вариантов конструктивного исполнения управляемых реакторов и сопутствующего оборудования, необходимого в эксплуатации.

Вторая глава работы посвящена методике компьютерного моделирования управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов.

Разрез электромагнитной части одной фазы УШР серии РТУ-180000/500 с обозначением условно положительных направлений токов в обмотках i и магнитных потоков Φ в стержнях и каналах рассеяния показан на рисунке 4.

По законам Кирхгофа составляется система уравнений для магнитных цепей, которая дополняется уравнениями, описывающими схемы соединения обмоток УШР, и уравнениями, записанными с помощью закона электромагнитной индукции, позволяющими учесть связь между токами в обмотках и магнитными потокам в стержнях магнитопровода реактора.

Связь между напряженностью H и индукцией магнитного поля B задается аналитическим выражением, аппроксимирующим экспериментально полученную характеристику намагничивания электротехнической стали, из которой набран магнитопровод УШР.

Полученная таким образом полная система уравнений линеаризуется с помощью метода неявного интегрирования Эйлера и преобразуется в систему уравнений (1), которая решается в явном виде (для улучшения сходимости расчета) относительно токов в обмотках и производных магнитных потоков Φ' в стержнях.

$$U_j^{(n+1)} = -\Phi_j^{\prime(n+1)} \cdot R_j^{(n+1)} \cdot \Delta T + \sum_{p=1}^{N_1} i_p \cdot W_{jp} - H_j^{(n)} l_j \quad (1)$$

$$U_k^{(n+1)} = i_k^{(n+1)} \cdot R_k + \sum_{m=1}^{N_2} \Phi_m^{\prime(n+1)} \cdot W_{mk} - E_k^{(n+1)},$$

где j – номер магнитного стержня, охваченного обмоткой p ; k – номер обмотки, охватывающей стержень m ; R_j – магнитное сопротивление стержня j ; R_k – активное сопротивление обмотки k ; W – число витков обмотки, охватывающей стержень; E – эдс источника, который подключен к обмотке; ΔT – шаг интегрирования.

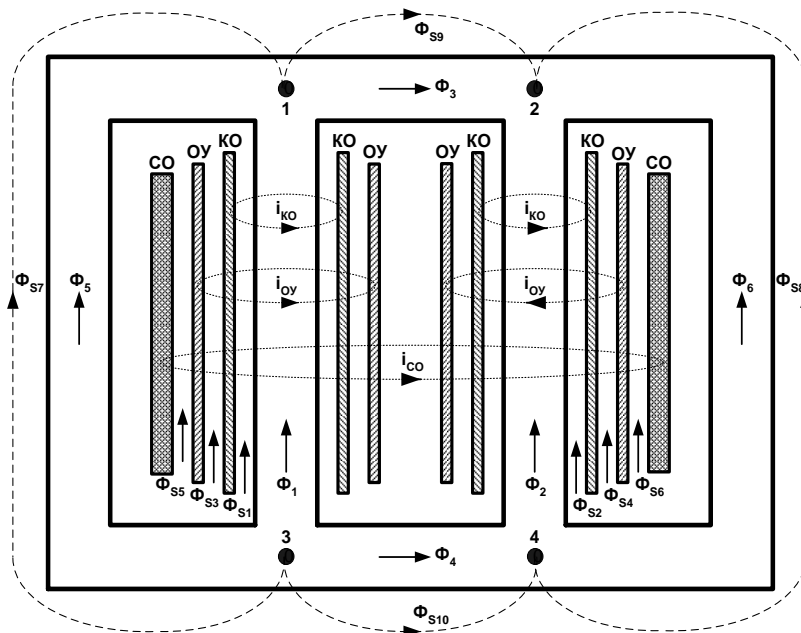


Рисунок 4 – Разрез электромагнитной части фазы УШР

С использованием полученных на предыдущем n шаге расчета производных потоков $\Phi^{(n+1)}$ выполняется численное интегрирование. Новые значения магнитных потоков становятся исходными данными для выполнения следующего $n+1$ шага расчета и так далее.

В третьей главе приводится описание системы автоматического управления УШР серии РТУ-180000/500, алгоритмов ее работы, даются примеры осциллограмм переходных процессов, полученных с помощью моделей САУ и УШР.

В диссертации работа САУ проиллюстрирована в схеме, приведенной на рисунке 5. Схема содержит источник переменного напряжения E_C , сопротивление сети X_C , воздушную линию электропередачи ВЛ длиной 100 км с УШР и САУ в ее конце, шунтирующий реактор ШР, конденсаторную батарею КБ и три выключателя для осуществления коммутаций.

Последовательность коммутаций элементов схемы видна из рисунка 6. При работе в режиме автоматической стабилизации напряжения система автоматического управления УШР представляет собой пропорциональный регулятор с возможностью задания коэффициента усиления (статизма) и автоматическим переходом в режим форсированного набора/сброса мощности при превышении отклонения напряжения от уставки на заданную коэффициентом статизма величину.

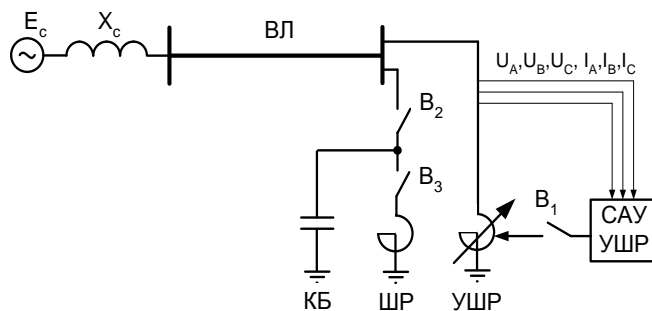


Рисунок 5 - Тестовая схема для иллюстрации работы РТУ-180000/500 совместно с конденсаторной батареей

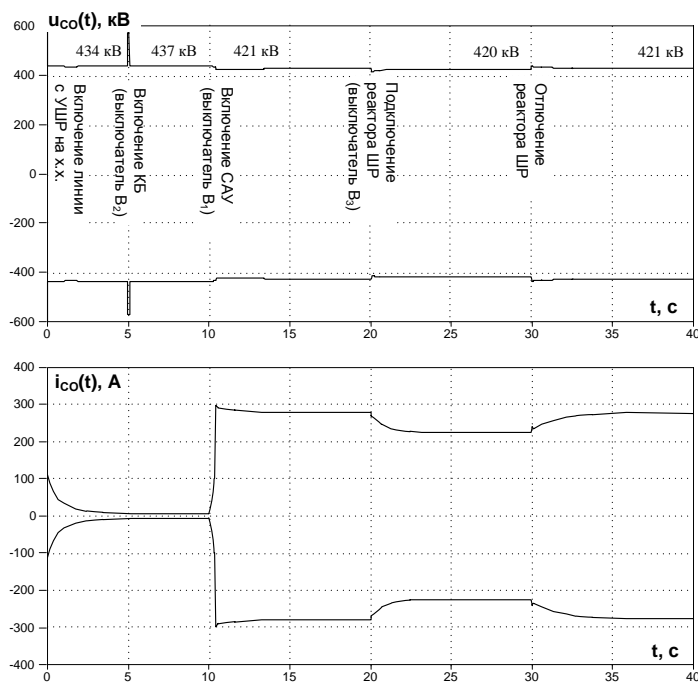


Рисунок 6 – Огибающие по амплитудам напряжения и тока СО УШР при работе САУ в режиме автоматической стабилизации напряжения

Работа САУ в той же схеме в режиме автоматической стабилизации тока СО осуществляется путем периодического приложения к ОУ трех возможных уровней напряжения, то есть реализован алгоритм широтно-импульсной модуляции (ШИМ) (см. рисунок 7). Последовательность коммутаций сохранена.

Четвертая глава посвящена исследованиям внутренних перенапряжений на ВЛ с управляемыми подмагничиванием реакторами.

В диссертации показано, что при одностороннем включении, в том числе на однофазное КЗ, быстрогодействия управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора оказывается достаточно для обеспечения безопасной работы нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН).

На рисунке 8 приведены кривые действующего значения фазного напряжения в случае возникновения однофазного КЗ при одностороннем включении ВЛ длиной 500 км. В момент времени $t = 2.9$ с происходит однофазное короткое замыкание, напряжение на неповрежденных фазах возрастает. В момент времени $t = 3$ с в одном случае происходит подключение ШР, а в другом – УШР начинает форсированно набирать мощность. Следует отметить, что в случае с УШР на время короткого замыкания напряжение оказывается ниже за счет меньшей величины сопротивления нулевой последовательности управляемого реактора по сравнению с обычным ШР.

Оценка воздействия показанного на рис. 8 напряжения на ОПН позволяет заключить, что, несмотря на более плавное снижение напряжения в случае установки УШР, с учетом характеристики «напряжение-время» ОПН риск повреждения аппарата отсутствует.

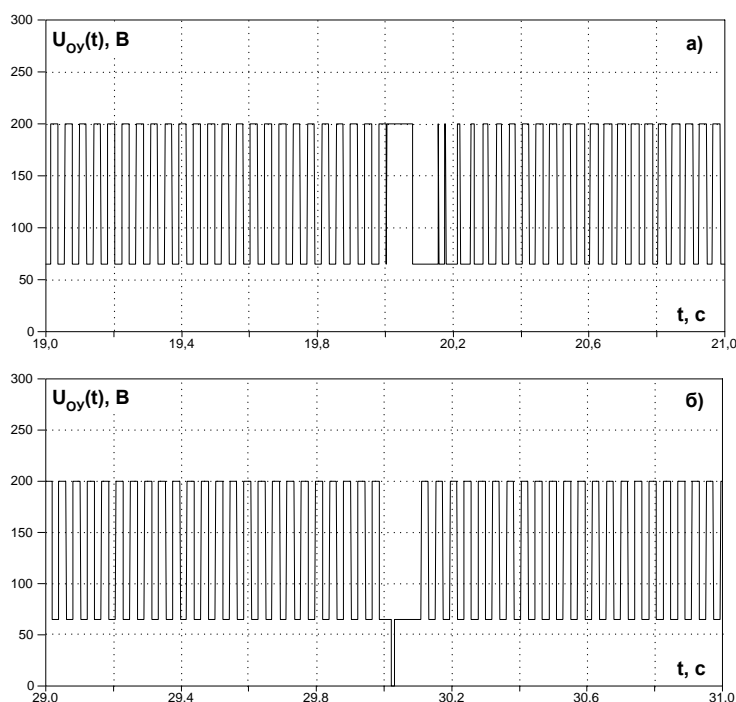


Рисунок 7 – Регулирование приложенного к ОУ напряжения:

- а) вблизи от момента $t = 20$ с, когда был подключен реактор ШР;
- б) вблизи от момента $t = 30$ с, когда реактор ШР был отключен

Это связано с тем, что при однофазном коротком замыкании даже ненагруженный УШР ограничивает перенапряжения сильнее, чем обычный ШР. Кроме того, с учетом

характеристики «напряжение-время» ОПН, допустимая длительность воздействия перенапряжений такой величины значительно превышает время набора реактором мощности или время срабатывания основной или резервной защиты линии.

Проведенные в диссертации исследования также показали, что УШР сильнее ограничивает коммутационные перенапряжения, возникающие на ВЛ (см. рисунок 9).

В частности, это означает, что энергия, которую необходимо рассеять ОПН, устанавливаемому для защиты реактора, оказывается меньше, чем в случае установки обычного ШР при всех рассмотренных коммутациях: одностороннем включении (в том числе на однофазное к.з.) и разрыве нагруженного транзита. Компьютерное моделирование процесса с использованием моделей ОПН и УШР показало, что максимальная энергия, выделяемая ОПН в случае использования ШР, составила 2150 кДж, а в случае использования УШР – 1600 кДж.

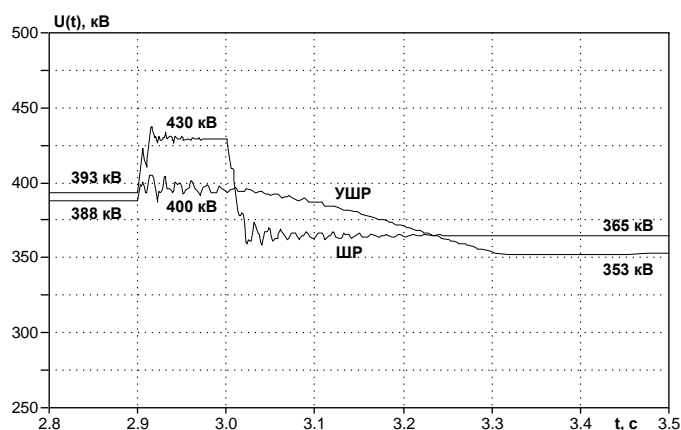


Рисунок 8 - Действующее значение фазного напряжения при включении линии на однофазное КЗ

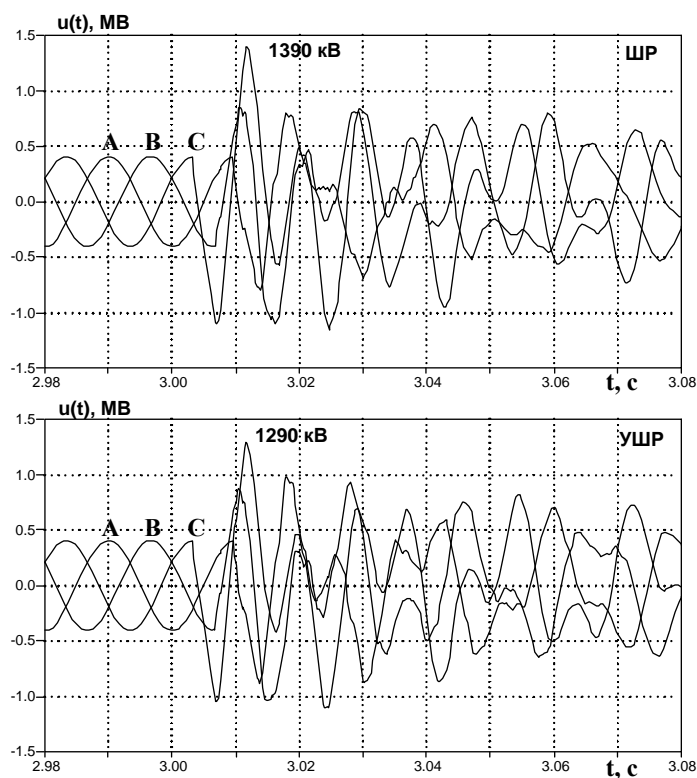


Рисунок 9 - Неограниченные действием ОПН перенапряжения в конце ВЛ при разрыве нагруженного транзита

Таким образом, результаты, приведенные в четвертой главе диссертационной работы, позволяют сделать вывод о достаточности быстродействия УШР для обеспечения надежной работы даже такого чувствительного к квазистационарным перенапряжениям элементам сети, как ОПН. При этом, использование УШР вместо ШР позволяет снизить требования к энергоемкости ОПН.

В пятой главе приводятся результаты исследования процессов в цикле однофазного автоматического повторного включения ВЛ с УШР, в частности, влияние УШР на величину тока подпитки дуги замыкания на землю и восстанавливающегося после ее гашения напряжения на отключенной фазе.

Известно, что основными составляющими тока подпитки являются: электростатическая (от междуфазных емкостей линии), электромагнитная (от тока, протекающего в оставшихся в работе фазах линии), и от реакторов, присоединенных к линии.

Величина тока подпитки с учетом всех составляющих определяется выражением (2).

$$I_{\text{СУМ}} = (I_{\text{ЭС}} + N_{\text{УШР}} I_{\text{УШР}} + N_{\text{ШР}} I_{\text{ШР}}) + (I_{\text{ЭМ}}), \quad (2)$$

где N – число реакторов.

В работе показано, что УШР увеличивает ток подпитки дуги замыкания на землю за счет наличия электромагнитной связи между фазами реактора через треугольник компенсационной обмотки, что снижает вероятность успешности ОАПВ.

Для снижения тока подпитки и обеспечения гашения дуги могут использоваться такие методы, как отключение фазы СО УШР, одноименной с поврежденной фазой линии, установка нейтрального реактора сопротивлением X_N в нейтраль УШР, шунтирование и размыкание треугольника КО УШР.

В таблице 1 приведены разработанные формулы для расчета подпитки дуги в каждом из рассмотренных случаев с учетом установки нейтрального реактора в нейтрали УШР.

Анализ приведенных выражений позволил сформулировать рекомендации по снижению подпитки от УШР для обеспечения гашения дуги:

1. Отсутствие коммутаций УШР

приемлемо для линий длиной менее 200 км, но только при обеспечении перегрузки УШР по мощности за счет использования форсировки; для более длинных ВЛ кроме форсировки потребуется нейтральный реактор.

2. Размыкание треугольника обмоток УШР

применимо для линий длиной менее 400-500 км; для более длинных линий требуется форсировка мощности УШР и нейтральный реактор.

3. Шунтирование треугольника КО

применимо для линий длиной менее 400-500 км; для более длинных линий требуется нейтральный реактор.

4. Отключение от линии фазы УШР, одноименной с поврежденной фазой ВЛ

применимо для линий длиной менее 400-500 км; при этом использование нейтрального реактора бесполезно, поскольку здесь он не влияет на ток подпитки.

Известно, что после гашения дуги на отключенной фазе начинает восстанавливаться напряжение. Кратность перенапряжений определяется соотношением емкостной проводимости B линии (междуфазной и на землю) и индуктивного сопротивления X реактора.

В таблице 2 приведены аналитические выражения для случаев отключения фазы УШР и шунтирования треугольника КО при наличии нейтрального реактора, установленного в нейтрали УШР.

Таблица 1 - Ток подпитки от УШР в различных схемно-режимных условиях

Без принятия дополнительных мер	$\dot{i}_{\text{УШР}} = j \frac{\dot{E}_A}{3} \left[\frac{1}{X_1^{\text{УШР}}} - \frac{1}{X_0^{\text{УШР}} + 3X_N^{\text{УШР}}} \right]$
Шунтирование КО	$\dot{i}_{\text{УШР}} = j \frac{\dot{E}_A}{X_0^{\text{УШР}}} \cdot \frac{X_N^{\text{УШР}}}{X_0^{\text{УШР}} + 3X_N^{\text{УШР}}}$
Размыкание КО	$\dot{i}_{\text{УШР}} = j \frac{\dot{E}_A}{X_1^{\text{УШР}}} \cdot \frac{X_N^{\text{УШР}}}{X_1^{\text{УШР}} + 3X_N^{\text{УШР}}}$
Отключение фазы УШР	$\dot{i}_{\text{УШР}} = 0$

Таблица 2 – Восстанавливающееся напряжение на отключенной фазе линии с УШР

Отключение фазы УШР	$\left \frac{\dot{U}_A}{\dot{E}_A} \right = \frac{B_M}{B_0 + 2B_M}$
Шунтирование КО	$\left \frac{\dot{U}_A}{\dot{E}_A} \right = \frac{\left(\frac{X_N^{\text{УШР}}}{X_0^{\text{УШР}} + 3X_N^{\text{УШР}}} \cdot \frac{1}{X_0^{\text{УШР}}} \right) - B_M}{\left(\frac{X_0^{\text{УШР}} + 2X_N^{\text{УШР}}}{X_0^{\text{УШР}} + 3X_N^{\text{УШР}}} \cdot \frac{1}{X_0^{\text{УШР}}} \right) - (B_0 + 2B_M)}$

Разработанные выражения позволяют оценить величину восстанавливающегося напряжения при наличии или отсутствии нейтрального реактора.

По результатам, полученным в процессе исследования цикла ОАПВ с УШР, были разработаны общие рекомендации для случаев, когда после обеспечения требуемой величины тока подпитки восстанавливающееся напряжение оказывается неприемлемым:

1. Необходимо скорректировать место установки нейтрального реактора и его параметры, сохранив при этом ток подпитки на допустимом уровне.
2. Для линий 500 кВ длины 400-500 км изменить способ снижения тока подпитки, сохранив при этом ток подпитки на допустимом уровне.
3. Использовать возможность отключения фазы ШР, одноименной с поврежденной фазой ВЛ.

В шестой главе рассматривается актуальный вопрос обеспечения успешного отключения элегазовыми выключателями линии с присоединенными к ней шунтирующими реакторами в циклах «включение-быстрое отключение».

Показано, что опасность аperiodической составляющей тока во многом зависит от степени компенсации емкости ВЛ шунтирующими реакторами.

Разработана методика расчета компенсированной ВЛ, позволяющая оценить необходимость применения мероприятий по обеспечению быстрого перехода тока линейного выключателя через ноль после включения ВЛ, а также выбрать наиболее подходящее из них.

В качестве мер могут использоваться, предвключаемые резисторы включение линии с меньшим числом линейных реакторов или управляемая коммутация.

Предвключаемые резисторы. В настоящее время для уменьшения величины аperiodической составляющей тока предлагается оснащать линейные выключатели предвключаемыми резисторами (см. рисунок 10). Такой выключатель имеет главные контакты (ГК) и вспомогательные контакты (ВК).

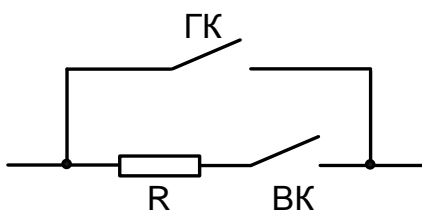


Рисунок 10 - Принципиальная схема выключателя с предвключаемым резистором

При включении выключателя, оснащенного резистором, переходные процессы возникают дважды: первый раз при замыкании ВК и второй раз – при замыкании ГК. Большое сопротивление R даст хорошее демпфирование на первом этапе включения, но зато интенсивными окажутся переходные процессы на втором этапе включения.

Величина сопротивления резистора должна быть такой, чтобы за время его работы резистора (с момента замыкания ВК до момента замыкания ГК) аperiodическая составляющая затухла.

Аperiodическая составляющая вызвана наличием на линии N реакторов. Постоянная времени затухания тока реакторов может быть найдена по (3).

$$\tau_R = \frac{L_{PЭ}}{R}, \quad (3)$$

где $L_{PЭ} = x_{PЭ} / \omega$, $x_{PЭ} = x_P / N$, $x_P = U_P^2 / Q_P$, N – число реакторов на ВЛ.

Полное затухание аperiodической составляющей произойдет за время $3\tau_R$. Величина сопротивления R , которая обеспечит за время ΔT полное затухание аperiodической составляющей тока одного реактора: $3\tau_R \leq \Delta T$, определяется неравенством (4).

$$R \geq \frac{3}{\omega \Delta T} \cdot \frac{U_P^2}{NQ_P}, \quad (4)$$

В работе показано, что определенный таким образом резистор впоследствии должен быть проверен на допустимость энергетических нагрузок при коммутациях.

Включение линии с меньшим числом линейных реакторов. Поскольку опасность повреждения выключателей линии существует лишь при высоком значении степени компенсации емкости линии индуктивностью реакторов, в качестве крайней меры может быть рекомендовано включение линии с меньшим числом реакторов.

Управляемая коммутация. При разработке методики выбора мероприятий по борьбе с периодическими токами вводится понятие точности коммутации $\Delta\psi$, которая представляет собой выраженную в мс разность между моментом фактического замыкания контактов выключателя и моментом перехода напряжения через максимум в миллисекундах.

Для применения методики необходимо построить зависимость точности коммутации ВЛ от степени ее компенсации $\Delta\psi = f(K)$, воспользовавшись уравнениями (5). При этом точность коммутации $\Delta\psi = 5$ мс отвечает самому неблагоприятному случаю включения в ноль напряжения.

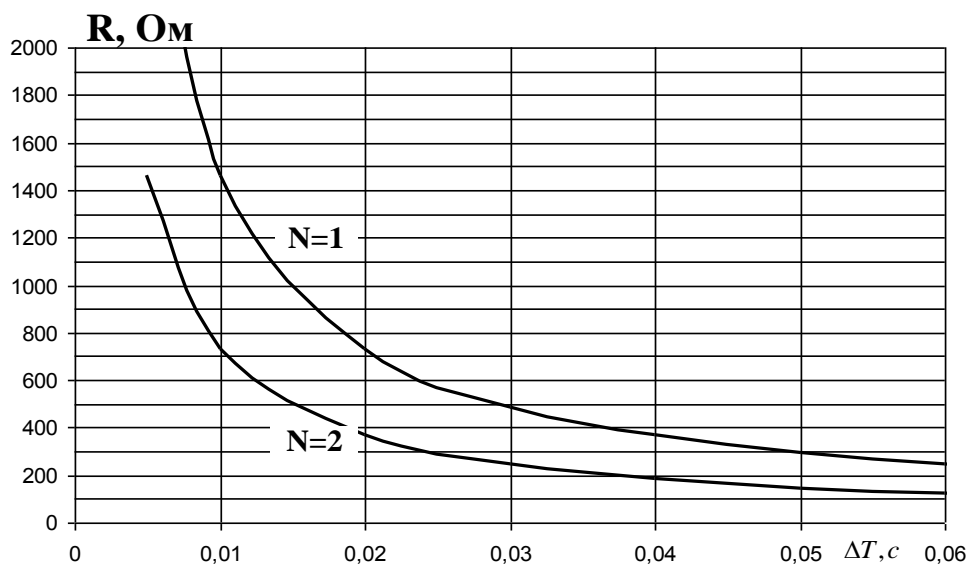


Рисунок 11 - Требования к величине сопротивления резистора, обеспечивающего полное затухание аperiodической составляющей тока ВЛ 500 кВ с N реакторами, за время ΔT своей работы

$$\begin{cases} 0 \leq K \leq \frac{1}{1 + \exp(-T_B/\tau) \cdot \sin \Delta\psi} \\ \frac{1}{1 - \exp(-T_B/\tau) \cdot \sin \Delta\psi} \leq K < \infty \end{cases} \quad (5)$$

Пример такой зависимости для линии с УШР приведен на рисунке 12. При построении зависимости учтено, что напряжение короткого замыкания УШР составляет примерно 50%, следовательно, шунтирование треугольника КО приводит к увеличению потребляемой реактором мощности вдвое.

Проанализировав рисунок 12, можно отметить следующие характерные области:

Зона 1. При $0 \leq K \leq 0.53$ аperiodические токи не опасны при любом $\Delta\psi$.

Зона 2. При $K > 0.53$ существует опасность отказа гашения межконтактной дуги, и необходимы мероприятия по ограничению аperiodической составляющей. Эффект от использования управляемой коммутации существенно зависит от точности $\Delta\psi$ ее работы.

Зона 3А. Требуется использование предвключаемых резисторов или же коммутация ВЛ без опасного числа реакторов. Следует отметить, что при точности управляемой коммутации $\Delta\psi = 1$ мс зона 3А вырождается, то есть использование УШР позволяет

обеспечить переход тока через ноль без использования предвключаемых резисторов или коммутации с отключенными реакторами.

Зона 3Б. Для точек из этой зоны рекомендуется совместное применение управляемой коммутации и предварительного (перед включением ВЛ под напряжение) шунтирования КО УШР. Область применения такого решения существенно зависит от точности $\Delta\psi$.

Зона 4. В эту зону необычно высоких коэффициентов линия попадает лишь на время шунтирования КО.

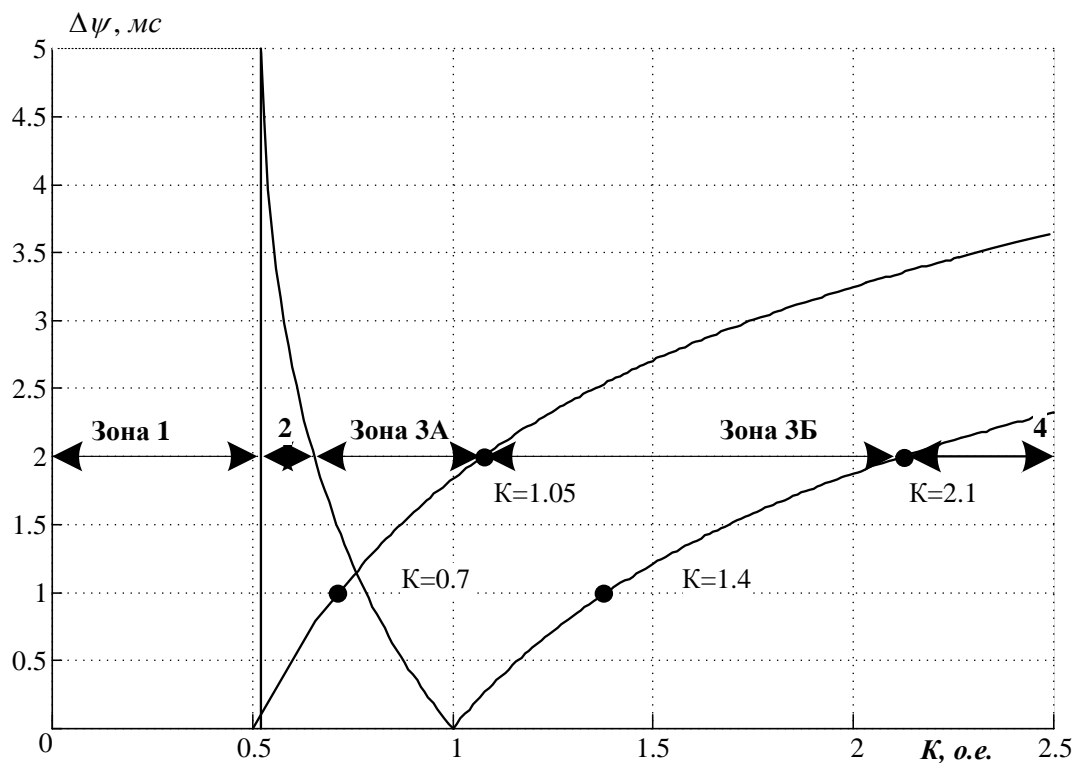


Рисунок 12 – Зависимость точности коммутации от степени компенсации ВЛ

Таким образом, если обеспечить на ВЛ с УШР точность управляемой коммутации $\Delta\psi = 1$ мс, то можно дать следующие общие рекомендации по проблеме аperiodических токов:

- при $0 \leq K \leq 0.53$ мероприятия не требуются;
- при $0.53 < K \leq 0.78$ рекомендуется применение УК;
- при $K > 0.78$ целесообразно применение УК совместно с шунтированием КО.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Представленный в работе алгоритм создания математических моделей управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов может быть использован для разработки и реализации имитационных моделей реакторов любой конструкции. Полученные таким образом модели имеют хорошую сходимость и точность.

Расчеты электромагнитных процессов, выполненные с использованием разработанной модели УШР 500 кВ серии РТУ-180000/500, позволили решить целый комплекс проблем, связанных с проектированием сетей, в которые устанавливаются управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы.

В работе на примере ОПН показано, что быстродействия, которым обладает УШР, достаточно для обеспечения безопасной работы электротехнического оборудования в условиях существования квазистационарных перенапряжений.

Кроме того, за счет более глубокого ограничения коммутационных перенапряжений при использовании УШР по сравнению с ШР той же мощности, требования к энергоемкости ОПН могут быть снижены.

По результатам исследования процессов, протекающих в цикле однофазного автоматического повторного включения ВЛ с УШР разработаны аналитические выражения, учитывающие особенности реакторов, управляемых подмагничиванием, и их влияние на ток подпитки и восстанавливающееся напряжение.

Разработана методика выбора оптимальных мероприятий по обеспечению успешного отключения компенсированных ВЛ элегазовыми выключателями. Методика также учитывает особенности управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Шескин Е.Б. Компьютерное моделирование управляемых шунтирующих реакторов различного типа и сравнение их технических характеристик / Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А., Карпов А.С., Николаев Р.Н., Шескин Е.Б. // Энергетик. – 2011. – №3.– С. 27-30.

2. Шескин Е.Б. Однофазное автоматическое повторное включение на линиях с управляемым шунтирующим реактором / Дмитриев М.В., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А., Кондратенко Д.В., Шескин Е.Б. // Энергетик. - 2012. - № 4. - С. 19-24.

3. Шескин Е.Б. Вопросы быстродействия управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора / Дмитриев М.В., Шескин Е.Б. // Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика глазами молодежи»: сборник трудов. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012. – т.2.– С. 161-166.

4. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы / Е.Б. Шескин и др.; под ред. Г.А. Евдокунина. – СПб: Родная Ладога, 2013. – 280 с.