

МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ШУНТИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ЕГО РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

АВТОР:

Л.А. КОШКАРЕВА,
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Единая национальная электрическая сеть (ЕНЭС) России имеет ряд характерных особенностей: большой охват территории, наличие многоконтурных сетей нескольких классов напряжения (110, 220, 330, 500, 750 кВ), объединенных сложными трансформаторными связями. В современных рыночных условиях возрастают требования к максимальному ис-

пользованию пропускной способности электрических сетей с целью повышения надежности функционирования ЕНЭС России, что может обеспечиваться использованием управляемых (гибких) систем электропередач переменного тока (FACTS) и, в частности, управляемыми шунтирующими реакторами, необходимым условием использования которых является наличие надежной релейной защиты.

Ключевые слова: управляемый шунтирующий реактор; релейная защита; создание имитационной модели.



УШР типа РТУ-180000/500 трехфазного исполнения на ПС «Агадырь», Казахстан

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в электроэнергетике Европы, США, Китая, Кореи и других технологически развитых стран активно развиваются «интеллектуальные сети». Несмотря на отсутствие общепринятого термина, понимание характеристик, которыми должна обладать «интеллектуальная сеть», сформировано. К числу таких характеристик относят: адаптивность; способность самовосстанавливаться; устойчивость к любому рода вмешательствам; сочетание различных видов производств, накопления и потребления электроэнергии с обеспечением необходимых параметров надежности и качества передаваемой электроэнергии. Ввиду этого, большое значение придается созданию

активно-адаптивной сети как части «интеллектуальных сетей».

Одним из элементов активно-адаптивной сети являются «гибкие линии», или Flexible Alternative Current Transmission Systems (FACTS). Оборудование, применяемое для FACTS, — это сетевое оборудование, способное гибко менять характеристики передачи с целью оптимизации режимов сети сразу по нескольким критериям: уровень технологических потерь; пропускная способность; устойчивость; перераспределение потоков мощности; качество электроэнергии и др.

К числу оборудования FACTS относятся управляемые шунтирующие реакторы (УШР), применяемые для управления режимами по напряжению и реактивной мощности наряду с традиционным применением генераторов, синхронных и статических компенсаторов, коммутируемых реакторов и конденсаторных батарей [1].

ОСНОВНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ УШР

УШР обеспечивают возможность плавного регулирования потребляемой реактивной мощности, имеют трансформаторное исполнение для открытой установки для любого класса напряжения, могут подключаться к воздушным или кабельным линиям высокого напряжения, а также к шинам подстанций. Все перечисленные обстоятельства позволяют устанавливать их в любой части энергосистемы и обеспечивать оптимизацию перетоков реактивной мощности, стабилизацию напряжения, повышение пропускной способности электропередачи, снижение потерь, числа коммутаций выключателей и действий РПН трансформаторов [2].

На сегодняшний день число вводимых в эксплуатацию УШР в электрических сетях всех классов напряжения от 35 до 500 кВ непрерывно растет, приближаясь к 150, большая часть из которых — это УШР с подмагничиванием серии РТУ (в том числе более 20 реакторов мощностью 180 МВАр напряжением 330 и 500 кВ) [3].

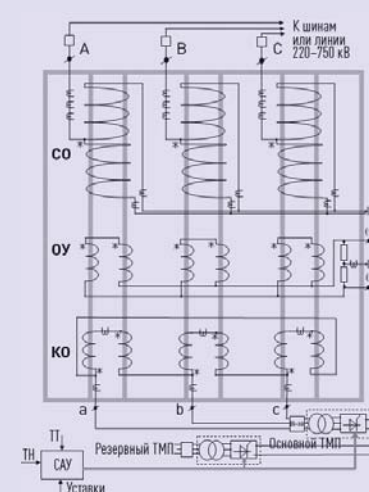
КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА УШР

В Западной Европе и Северной Америке применяются реакторы с переключением отпаек. В России, Казахстане, Белоруссии, Анголе, Китае и ряде других стран получают все большее распространение реакторы, в которых плавное изменение потребляемой реактивной мощности обеспечивается путем либо насыщения участков магнитной системы (УШР с подмагничиванием), либо изменения угла управления тиристорных вентилей, шунтирующих вторичную вентильную обмотку реактора (УШРТ, или УШР трансформаторного типа) [3].

На рис. 1 приведена электромагнитная схема УШР серии РТУ трехобмоточного исполнения, а на рис. 2 и 3 на с. 46 — расчетные осциллограммы изменения токов во всех обмотках реактора и индукций в полустержнях одной из фаз в процессе набора потребляемой реактивной мощности от минимального (холостого хода) до номинального значения.

Поскольку установленная мощность трансформатора с преобразователем (ТМП) составляет 1 МВА, компенсационная обмотка рассчитывается на длительное протекание макси-

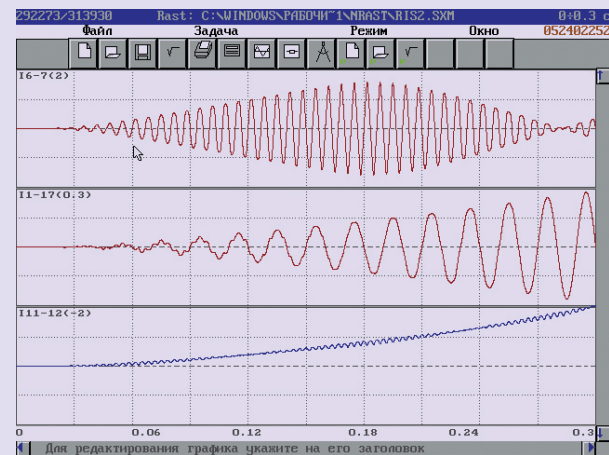
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СХЕМА ТРЕХФАЗНОГО ТРЕХОБОМОТЧНОГО УШР



Примечания: САУ — система автоматического управления; ТМП — трансформатор с преобразователем; СО — сетевая обмотка; ОУ — обмотка управления; КО — компенсационная обмотка

Рис. 1

ИЗМЕНЕНИЕ ТОКОВ В КО ПРИ НАБОРЕ МОЩНОСТИ УШР



Сверху вниз: ток КО; ток СО; ток подмагничивания

Рис. 2

мального тока третьей гармоники и выполняется уменьшенного сечения (если на КО не предусматривается другая дополнительная нагрузка).

При расположении обмотки КО первой на полустержнях магнитопровода воздушные зазоры между обмотками переменного тока СО и КО значительны, и напряжение короткого замыкания (КЗ) между ними находится в диапазоне 55...60 %. Это приводит в свою очередь к небольшим токам включения УШР и токам сквозных КЗ (менее $2 I_{ном}$) по сравнению с силовыми трансформаторами.

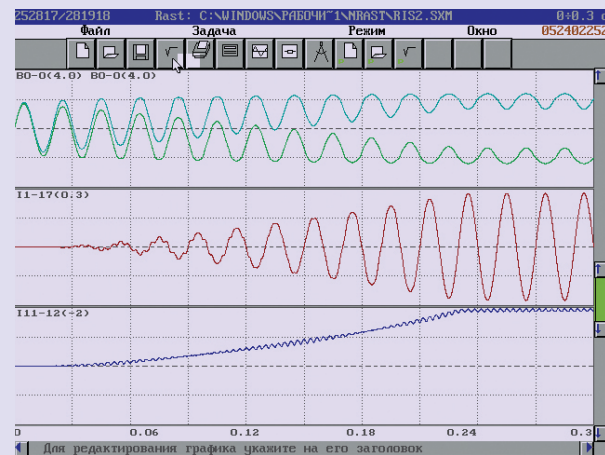
По характеру изменений токов в обмотках реактора, показанных на рис. 2, можно понять, что, несмотря на конструктивную схожесть с силовым трехобмоточным трансформатором, для УШР исполнение релейной защиты будет иметь ряд особенностей, однако выполняется она с использованием серийных или специализированных микропроцессорных терминалов, при-

меняемых для трансформаторного оборудования.

В отличие от силовых трансформаторов, ток нагрузки первой гармоники во вторичной обмотке реактора отсутствует. Преобладающая в треугольнике КО третья гармоника имеет максимум (около 1 кА действующее значение для УШР 500 кВ) в области 50 % нагрузки, а в режиме номинального питающем напряжении практически равна нулю, как и остальные высшие гармоники в токе СО. Это объясняется тем, что реакторы серии РТУ проектируются с номинальной мощностью в так называемом полупредельном режиме насыщения, когда постоянный поток номинального подмагничивания поочередно в каждом полустержне магнитопровода вытесняет переменный поток в область насыщения ровно на время половины периода частоты сети (см. рис. 3) [3, 4].

Для ОУ трудности реализации дифференциальных или максимальных

В ПРОЦЕССЕ НАБОРА МОЩНОСТИ ДО НОМИНАЛЬНОЙ



Сверху вниз: индукция в полустержнях магнитопровода; ток СО; ток подмагничивания

Рис. 3

защит еще больше ввиду отсутствия трансформаторов тока (ТТ) и протекания по ней выпрямленного тока подмагничивания от преобразователя ТМП. Единственная максимальная токовая защита (МТЗ) на ТТ вывода средней точки встроенных резисторов ОУ защищает ее только от замыканий на магнитопровод, которые являются крайне маловероятными, поскольку ОУ располагается в середине между секциями КО и СО [4].

Таким образом, продольной и поперечной дифференциальными защитами охватывается только сетевая обмотка реактора, а обмотки КО и ОУ должны защищаться отдельно, в том числе от наиболее вероятных витковых замыканий. Особенности исполнения РЗ УШР подробно описаны в работах А.Г. Долгополова и соавторов [4, 5], а на рис. 4 приведена схема размещения электрических защит всех обмоток реактора на встроенных трансформаторах тока.

Указанная МТЗ на ТТ внутри треугольника КО является наиболее чувствительной защитой от всех видов повреждений в обмотках, включая витковые КЗ. Это связано с отсутствием необходимости отстраивать ее параметры настройки от токов номинальной нагрузки, а токи третьей гармоники и выше исключаются фильтрами при выделении первой гармоники.

При правильном подключении (подключении реле в каждой фазе КО на полный ток, т.е. по схеме «полной звезды», без предварительной сборки токовых цепей в треугольник), наличии блокировок от внешних КЗ и коммутационных режимов (при их отсутствии МТЗ КО имеет недопустимо большую выдержку времени), параметры срабатывания МТЗ КО могут составлять менее 0,1 о. е. по току и 0,5 с по времени. При витковых КЗ с малым числом замкнувшихся витков и указанными параметрами настройки рассма-

триваемая защита является более чувствительной, чем дифференциальные.

Для УШР с подмагничиванием газовая защита менее эффективна при витковых КЗ, чем для силовых трансформаторов аналогичной мощности, в связи с тем, что объем бака и масла, напряжение КЗ между обмотками у УШР существенно выше. Поэтому в работе А.Г. Долгополова и соавторов [5] был предложен вариант реализации чувствительной и быстродействующей защиты с абсолютной селективностью, по принципу действия отстроенной от внешних КЗ и несимметричных режимов в сети — ограниченной дифференциальной защиты нулевой последовательности обмоток КО и СО (ДЗНП СО-КО).

ДЗНП СО-КО, по принципу действия обладающая абсолютной селективностью, а значит, минимальной выдержкой времени, при соизмеримой с МТЗ КО чувствительности так же, как и последняя, требует блокировки или торможения второй и пятой гармониками либо суммой гармоник по аналогии с дифференциальной защитой трансформатора, которые всегда присутствуют в коммутационных режимах, но отсутствуют в режимах КЗ.

Однако в процессе эксплуатации УШР были выявлены неправильные действия релейной защиты, связанные с некорректным выбором параметров срабатывания вследствие отсутствия ясного понимания физических процессов, происходящих в обмотках реактора при различных режимах работы сети. Более подробно случаи неправильного действия защит были рассмотрены в работах А.Г. Долгополова и соавторов [3, 7]. Ввиду этого, для исследования поведения релейной защиты появилась необходимость разработать модель реального УШР.

ИЗ ИСТОРИИ

Управляемые шунтирующие реакторы (УШР) — электромагнитные реакторы, индуктивность которых можно регулировать, что позволяет стабилизировать напряжения на воздушных линиях с большой зарядовой мощностью. В комбинации с батареями конденсаторов, включаемых параллельно, УШР являются аналогами статических тиристорных компенсаторов.

Широко применяются в сетях Единой национальной электрической сети (ЕНЭС), начиная с 2002 г. Имеется ряд типоразмеров: 110 кВ, 25 Мвар; 220 кВ, 100 Мвар; 330 кВ, 180 Мвар; 500 кВ, 180 Мвар;

История создания управляемых реакторов (УР) насчитывает несколько десятилетий, первые попытки создания управляемой силовой индуктивности относятся к 20-м (в Японии) и 30-м (в Германии) годам.

В нашей стране интенсивные разработки управляемых реакторов с продольным и поперечным подмагничиванием различных конструкций велись в Москве, Ленинграде, Таллинне, Кишиневе, Алма-Ате, Челябинске и других городах многими известными специалистами в области электротехники (Г.Н. Александров, А.М. Брянцев, В.М. Либкинд Сорокин, Ю.Ю. Теллиннен, Л.Л. Федосова, Я.Я. Ярвика и др.). В 80-х годах XX в. были созданы конструкции нового типа управляемых подмагничиванием реакторов с предельным насыщением магнитной цепи.

СХЕМА РАССТАНОВКИ ЗАЩИТ ТРЕХОБМОТОЧНОГО УШР

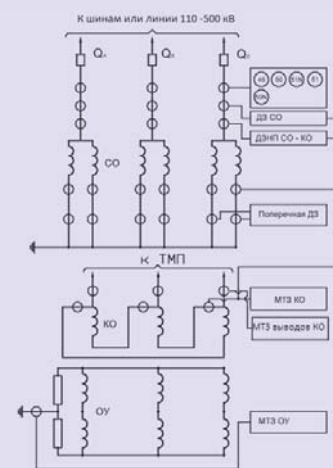


Рис. 4

СОЗДАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

На сегодняшний день создано большое число программных комплексов для целей расчета электромагнитных переходных процессов. Одним из таких современных программных комплексов является MathLab с возможностью моделирования в среде Simulink.

Процессы в любой электромагнитной системе могут быть описаны системой дифференциальных уравнений. Одной из возможностей среды Simulink является реализация имитационного моделирования магнитосвязанной цепи посредством записи решений системы уравнений при помощи стандартных элементов (блоков) из библиотеки. Имитационное моделирование позволяет рассчитывать переходные процессы в магнитосвязанных электрических цепях с учетом конфигу-

ПРОСТЕЙШАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЦЕПЬ И СХЕМЫ ЕЕ ЗАМЕЩЕНИЯ

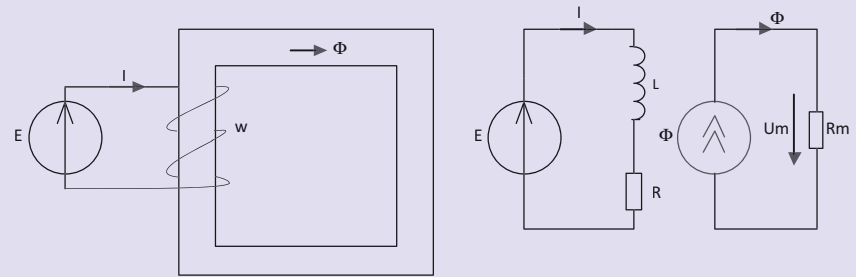


Рис. 6

рации магнитной и электрической систем моделируемого устройства. Также применение данного метода исключает необходимость записи системы уравнений большой размерности. В качестве примера разработки моделей УШР можно привести работы Д.В. Кондратенко, В.Н. Карпова, А.Г. Долгополова и Т.Г. Климова [8, 9, 10]. Однако стоит отметить различия методов, подходов к созданию, конструкций УШР, а также различия решаемых задач и целей реализаций моделей. Для целей изучения поведения релейной защиты УШР необходимо воссоздать с максимально высокой

точностью конструкцию устройства и происходящие внутри него электромагнитные процессы (их наличие и динамические свойства), протекающие в результате внешних возмущений.

Ранее было представлено описание конструкции и особенностей работы трехфазного трехобмоточного УШР, из которого видно, что данное устройство можно отнести к категории сложных, характеризующихся нелинейными свойствами электро-технической стали. Таким образом, учет всех физических явлений, происходящих в УШР, приведет к недопустимо большой длительности вычислений, а необходимость их учета для обозначенной цели отсутствует. Поэтому при создании модели были приняты допущения, ранее описанные в работе А.Г. Долгополова и соавторов [6].

Начать разработку модели было решено с разработки схемы для одной фазы устройства. Электромагнитная схема фазы УШР (рис. 5) представляет собой электротехническую конструкцию, состоящую из двух обмоток, одна из которых подключается к сети, а другая к источнику подмагничивания. Обмотка КО в данной ситуации не рассматривается, поскольку, исходя из ее

назначения и схемы соединения, она будет работоспособна только при трехфазной реализации модели. Таким образом, моделирование сводится к рассмотрению и созданию простейшей неразветвленной замкнутой магнитной цепи, представленной на рис. 6.

Простейшая электромагнитная цепь представляет собой ферромагнитный замкнутый сердечник, на который намотана катушка с числом витков w , а к ней приложена ЭДС, вызывающая протекание тока, создающего магнитный поток, замыкающийся по сердечнику.

Для электрической схемы замещения справедливо следующее выражение:

$$E = R \times I + L \times \frac{dI}{dt} = R \times I + \frac{d\psi}{dt} = R \times I + w \times \frac{d\Phi}{dt} \Rightarrow \Phi = \frac{1}{w} \times \int (E - R \times I) \times dt$$

Для участка магнитной цепи справедливо выражение:

$$U_m = I \times w = \Phi \times R_m$$

Таким образом, суть моделирования сводится к созданию моделей электрической и магнитной цепей, которые связаны между собой посредством источника потока Φ .

В магнитной схеме замещения, представленной на рис. 6, присутствует магнитное сопротивление R_m . Данное сопротивление должно отдельно рассчитываться для линейного и нелинейного участков.

Для линейного участка справедливо выражение:

$$R_m = \frac{L_B}{\mu_0 \times S_B};$$

для напряжения на линейном участке справедливо выражение:

$$U_m = \Phi \times R_m = \Phi \times \frac{L_B}{\mu_0 \times S_B}$$

Основное отличие для нелинейного участка заключается в учете аналитическими выражениями характеристики намагничивания стали:

$$U_m = \Phi \times R_m = H(B) \times L_{ст} = H \frac{\Phi}{S_{ст}} \times L_{ст}$$

Таким образом, для совместного расчета электрической и магнитной цепей, представленных на рис. 6, необходимо будет измерить напряжение на индуктивности L , затем измеренное напряжение интегрируется и делится на число витков. Управляемый источник тока имитирует магнитный поток, протекающий по сопротивлению R_m , обеспечивая переход к расчету магнитной части цепи.

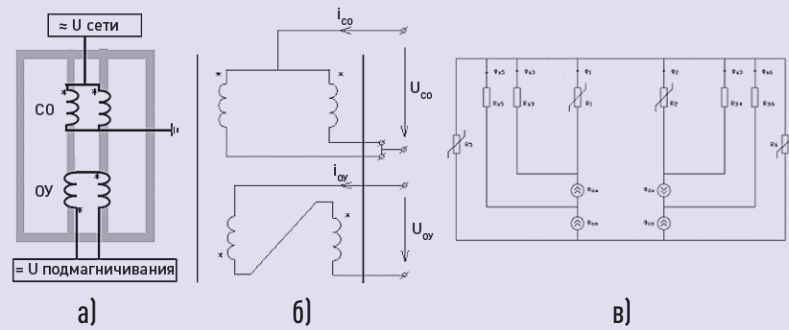
После измерения падения магнитного напряжения, интегрирования и деления на число витков, формируется управляющий сигнал для управляемого источника тока, который обеспечивает протекание тока в катушке индуктивности и обратный переход к расчету электрической цепи. Описанный алгоритм представлен на рис. 7.

Согласно изложенной логике и данным завода-изготовителя, была создана модель для одной фазы реактора 500 кВ (рис. 8 на с. 50), которая далее может быть масштабирована для создания полной схемы устройства. Модель состоит из трех блоков: совместного расчета электрической и магнитной цепей, а также блоков для линейных и нелинейных участков магнитного сопротивления, соединенных между собой на основании приведенных на рис. 5 схем замещения.

Результаты корректности расчетов созданной модели можно оценить по представленной на рис. 9 на с. 50 осциллограмме индукции в полустержнях магнитопровода, тока СО, тока подмагничивания, в процессе набора мощности до номинальной.

Из представленных осциллограмм видно, что значения токов и индукции в стержнях совпадают

СХЕМА ДЛЯ ОДНОЙ ФАЗЫ УСТРОЙСТВА



а) электромагнитная схема фазы УШР; б) электрическая схема соединения обмоток фазы реактора (без учета КО); в) схема замещения магнитной цепи одной фазы УШР (без учета КО)

Рис. 5

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ ЦЕПЕЙ ПОСРЕДСТВОМ УПРАВЛЯЕМОГО ИСТОЧНИКА ПОТОКА

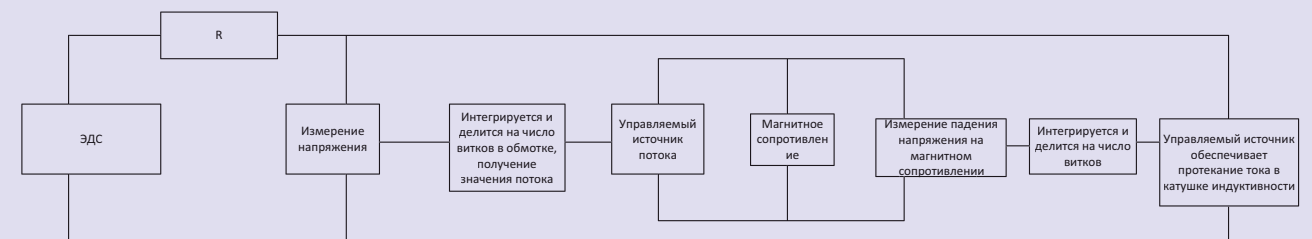


Рис. 7

МОДЕЛЬ 1 ФАЗЫ УШР В SIMULINK

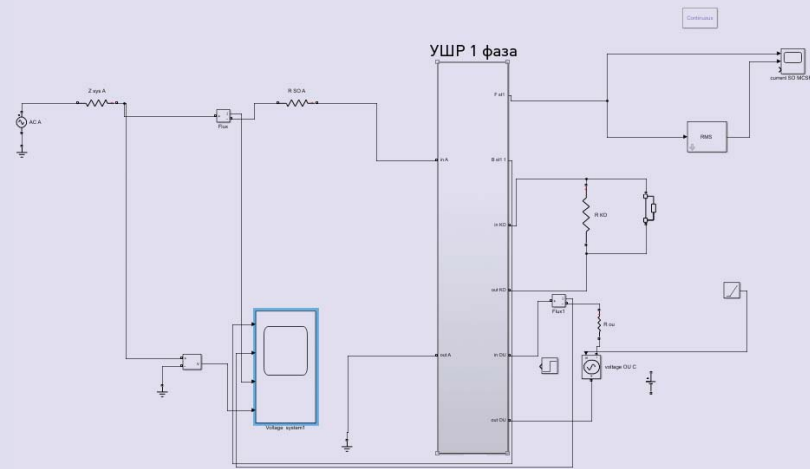


Рис. 8

ИЗМЕНЕНИЕ ТОКА СО, ИНДУКЦИИ В ПОЛУСТЕРЖНЯХ МАГНИТОПРОВОДА И ТОКА ОУ В ПРОЦЕССЕ НАБОРА МОЩНОСТИ ДО НОМИНАЛЬНОЙ

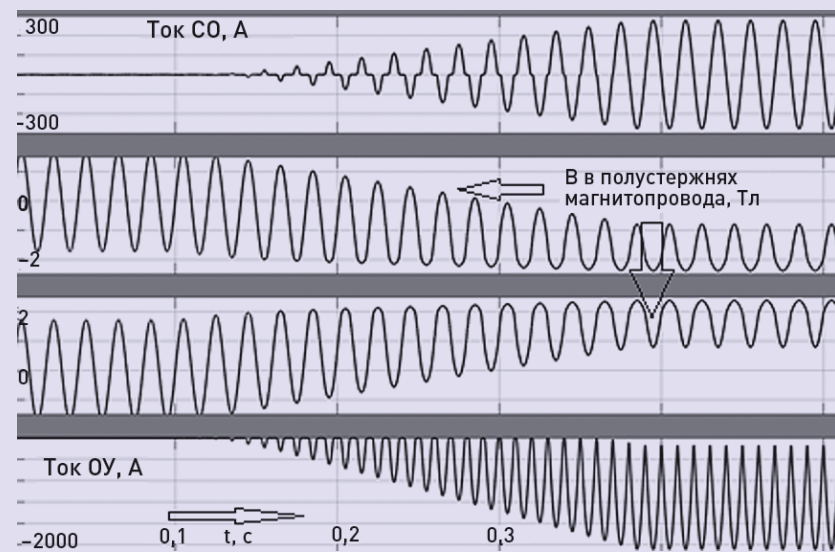


Рис. 9

с результатами моделирования аналогичного УШР в программном комплексе HPACT, которые были представлены на рис. 3 на с. 46, а также, что отклонения результатов моделирования от результатов, полученных в ходе эксплуатации, не превышают 5 %. По эксплуатационным данным значения токов в СО и ОУ равны 274 А и 2079 А соответственно, а время набора мощности составляет 0,268 с. По расчетам в Simulink ток в СО и ОУ равен 285 А и 2018 А соответственно, а время набора мощности составляет 0,281 с.

Масштабируемость описанного подхода была проверена на модели для трех фаз реактора 500 кВ. Результаты расчетов представлены на осциллограммах рис. 10 и в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что отклонения результатов моделирования от результатов, полученных в процессе эксплуатации, не превышают 5 %. Таким образом, результаты расчета трехфазной модели можно считать удовлетворительными, а модель — пригодной для дальнейших исследований.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАСТРОЙКЕ МОДЕЛИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При расчете модели могут возникать ошибки, связанные с наличием алгебраического контура между источником тока и блоком измерения магнитного напряжения. Данная проблема решается путем добавления в схему апериодического звена. Выбор постоянной времени производился таким образом, чтобы не ухудшались динамические свойства модели.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

	Эксплуатационные данные	Расчеты в Simulink	Погрешность, %
Ток СО, А	274	287	4,53
Ток ОУ, А	2079	2054	1,2025
Время набора мощности	0,268	0,282	4,96

Таблица 1

Чаще всего УШР работает в автоматическом режиме стабилизации напряжения в точке подключения посредством простого пропорционального регулятора по отклонению напряжения сети от заданной уставки со статизмом. Постоянная времени для регулятора может быть принята в размере 0,01 с [10]. С учетом этого, постоянную времени для апериодического звена рекомендуется выбирать в интервале 10^{-4} – 10^{-6} . Также может возникнуть ошибка, связанная с необходимостью соединения последовательно

источников тока (потока). Решить ее можно путем введения в схему сопротивления, в тысячи раз больше магнитного.

Таким образом, описанный подход применим для создания модели любой сложности трансформаторного оборудования и изучения происходящих в нем электромагнитных процессов с возможностью получить значения токов, напряжений, индукции стержней и другие параметры, установить фильтры Фурье для проведения

ИЗМЕНЕНИЕ ТОКА СО И ТОКА ОУ В ПРОЦЕССЕ НАБОРА МОЩНОСТИ ДО НОМИНАЛЬНОЙ

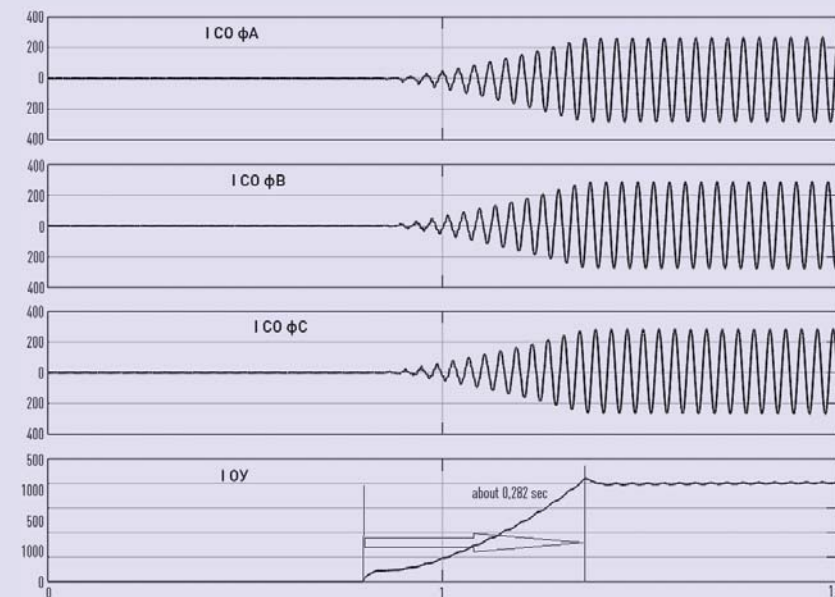


Рис. 10

спектрального анализа в необходимых точках для последующего изучения поведения релейной защиты УШР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долгополов А.Г., Соколов С.Е. Управляемые реакторы. Обзор технологий // Новости электротехники. 2012. № 3 (75).
2. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы / Дмитриев М.В., Шескин Е.Б., Карпов А.С., Кондратенко Д.В., Долгополов А.Г. / Под ред. Г.А. Евдокунина. СПб.: Родная Ладога, 2013. 280 с.
3. Долгополов А.Г., Кошкарева Л.А. Релейная защита управляемых подмагничиванием реакторов // Оперативное управление в электроэнергетике. 2017. № 6.
4. Долгополов А.Г. Управляемые шунтирующие реакторы. Принцип действия, конструкция, релейная защита и автоматика. 2-е доп. изд. М.: Изд. дом «Энергия», 2016. 282 с.
5. Долгополов А.Г., Кошкарева Л.А. Релейная защита от витковых коротких замыканий в обмотках управляемых подмагничиванием УШР // Энергетик. 2015. № 12.
6. Особенности дифференциальной защиты компенсационной обмотки управляемых шунтирующих реакторов. Долгополов А.Г., Мелюхов И.А., Писмарев В.М. Релейная защита и автоматизация. 2013. № 3.
7. Особенности выбора параметров настройки устройств релейной защиты управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов. Долгополов А.Г., Расцелляев А.И., Кошкарева Л.А. Релейщик, № 2, 2017 г.
8. Кондратенко Д.В. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. наук. Повышение эффективности применения УШР на ЛЭП 500 кВ и ЛС 110 кВ электроэнергетической системы.
9. Карпов В.Н. Разработка численно-аналитических моделей управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов для анализа электромагнитных процессов в нормальных и аварийных режимах электрических сетей. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. тех. наук.
10. Долгополов А.Г., Климова Т.Г. Моделирование управляемых шунтирующих реакторов при расчете статических и динамических режимов энергосистемы // Электро: электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2017. № 1.