

МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ РЕАКТОРА ДЛЯ
РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНИЯХ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

A model of a magnetically controlled reactor for system simulation of
processes in electrical power grid

Гусев С.И., Столяров Е.И. - ОАО «ФСК ЕЭС»;
Мустафа Г.М., Сеннов Ю.М., Луганская И.Б. - ФГУП «ВЭИ имени В.И.
Ленина»

A model of a magnetically controlled shunt reactor for system simulation of processes in electrical power grid is considered. For an adequate reflection of processes the model is constructed on a base of an equivalent nonlinear magnetic circuit reflecting basic magnetic fluxes of the reactor. An algorithm of parallel calculation of a nonlinear magnetic circuit and an electrical circuit connected with it is realized on a base of ELTRAN - a program of analysis of static converters

Keywords: magnetically controlled shunt reactor, electrical grid, long-distance transmission line, nonlinear model, system simulation

Рассматривается модель управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора, предназначенная для системного моделирования процессов в линиях электропередачи. Для адекватного отображения процессов модель строится на основе схемы замещения нелинейной магнитной цепи, представляющей основные магнитные потоки в реакторе. Реализация алгоритма параллельного расчета нелинейной магнитной цепи и электрической цепи, с ней связанной, осуществлена на базе программы анализа ELTRAN.

Ключевые слова: управляемый подмагничиванием шунтирующий реактор, линия электропередачи, нелинейная модель, системные расчеты

Несмотря на впечатляющий прогресс в области создания силовых полупроводниковых приборов и преобразователей на их основе, в электроэнергетике сверхвысоких напряжений находят применение управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы (УШР) [1, 2]. Ряд таких реакторов класса 110-500 кВ установлен в электроэнергетической системе России и работы по их усовершенствованию и использованию для компенсации реактивной мощности электрической сети продолжают [3].

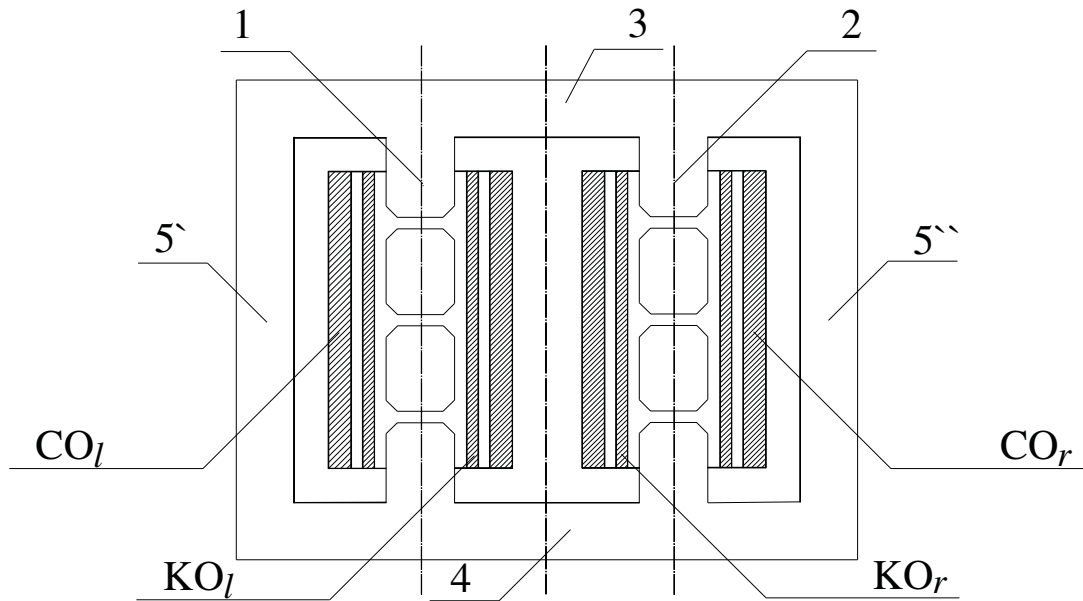
Управляемый подмагничиванием реактор является специфическим, существенно нелинейным элементом с мощностью достаточно большой для того, чтобы специфичность его проявлялась. Принцип действия и характеристики УШР с выделенной обмоткой подмагничивания были детально рассмотрены в работах Брянцева А.М., Лейтеса Л.В. и др. Однако

использованные в [1] приемы анализа были рассчитаны в основном на решение задач конструирования реактора и на простые тестовые условия, когда реактор питается от источника электродвижущей силы. В то же время при анализе процессов в энергосистеме, где существенно взаимодействие реактора и линии, использовались часто чрезмерно упрощенные модели управляемых реакторов, не отображающие их действие должным образом [4, 5].

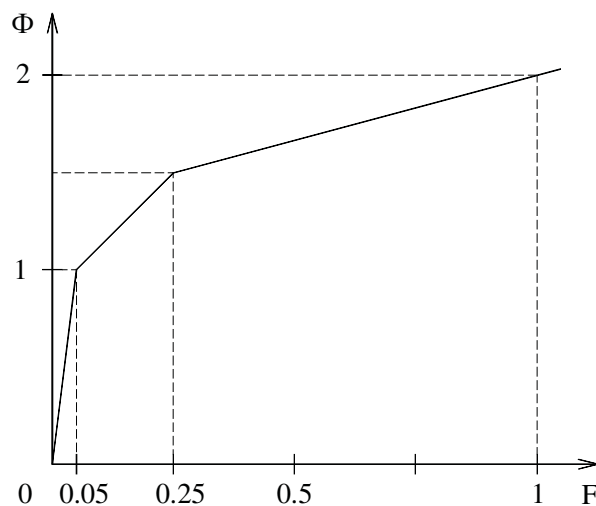
В настоящей работе описывается модель управляемого реактора, изготавливаемого ОАО «ХК Электрозавод». В отличие от решения, рассмотренного в [1, 2], в реакторе конструкции Электрозавода отсутствует обмотка подмагничивания, которое осуществляется здесь по расщепленной сетевой обмотке. Рассматриваемая модель строится на основе схемы замещения нелинейной магнитной цепи реактора. После синтеза адекватной (и достаточно простой) схемы магнитной цепи остается чисто формальная задача параллельного расчета электрической цепи и связанной с нею магнитной цепью. При наличии в электрической цепи других электромагнитных элементов, они также отображаются с уровня магнитной цепи. Эта задача была решена при разработке программ анализа вентильных преобразователей, которые часто содержат нелинейные магнитные элементы. Одна из таких программ (ELTRAN, [6, 7]) применяется в настоящей работе при иллюстрации взаимодействия реактора и линии электропередачи. Такой подход, с одной стороны, адекватно описывает поведение реактора в системе, а с другой – достаточно прост для использования при системных расчетах, поскольку игнорирует те детали процессов в магнитопроводах, зазорах и обмотках, которые существенны только при проектировании реактора.

Магнитная цепь реактора и организация расчетов

Устройство управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора иллюстрируется рисунком *1а*. Реактор имеет два стержня 1, 2 с зазорами переменного сечения, верхнее и нижнее ярма 3, 4, а также одно или два боковых ярма 5',5". Изменяющееся вдоль зазора сечение дает криволинейную характеристику намагничивания стержня, которая достаточно точно отображается тремя линейными участками (рисунок *1б*). На первом участке характеристики весь стержень ненасыщен; на втором участке насыщены суженные места стержня, а на третьем участке насыщен весь стержень. Каждый стержень имеет расщепленную сетевую (основную) обмотку (CO_1 , CO_r), удаленную от стержня, и дополнительную (компенсационную) обмотку (KO_1 , KO_r), тесно охватывающую стержень. В реакторе конструкции Электрозавода других обмоток нет; функцию управляющей обмотки в нем выполняет сетевая обмотка.



a)

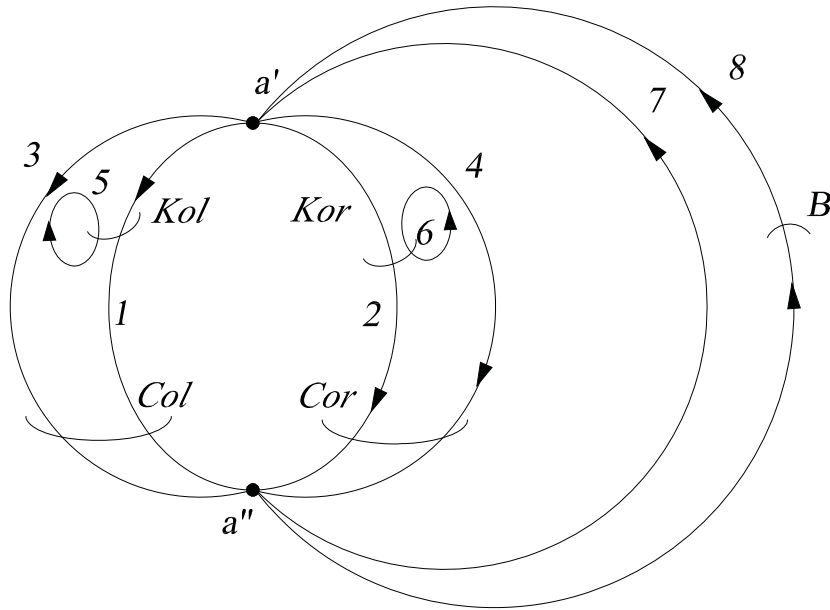


б)

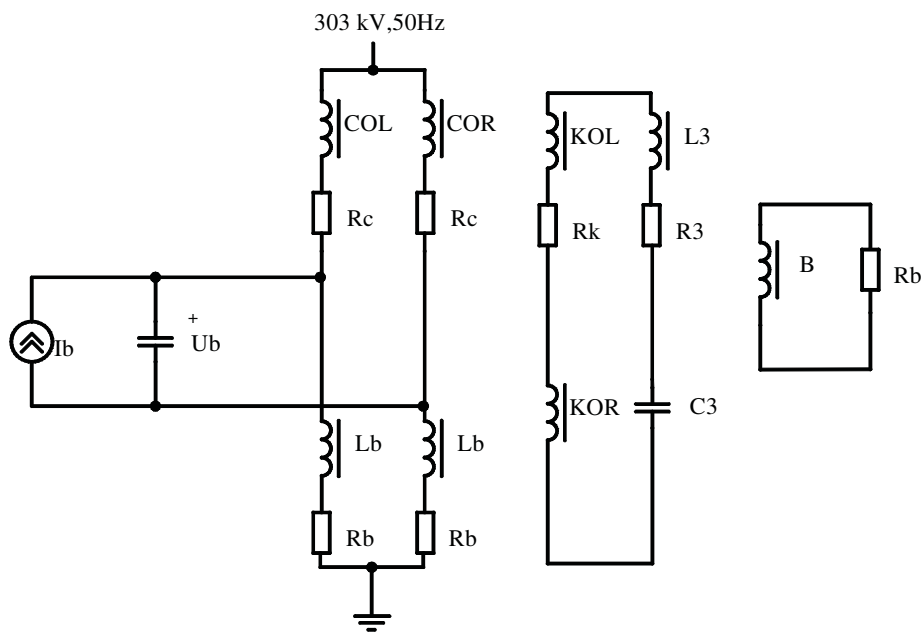
Рис.1. *a)* Устройство реактора (схематично); *б)* характеристика намагничивания стержня (в относительных единицах): Φ – магнитный поток; F – намагничивающая сила.

Схема замещения магнитной цепи реактора, предназначенная для применения при системных расчетах, должна быть предельно упрощенной. В ней учитываются только ветви, отображающие стержни, ярма и каналы рассеяния, т.е. ветви, которые непосредственно влияют на внешние характеристики реактора. Такая упрощенная схема магнитной цепи реактора представлена на рисунке **2a**. Магнитные сопротивления верхнего и нижнего ярм в ней приняты равными нулю, так что эти ярма сводятся к узлам магнитной цепи a' , a'' . Стержням реактора сопоставляются ветви магнитной цепи 1, 2. Эти ветви имеют кусочно-линейные вебер-амперные характеристики в соответствии с рисунком **1в**. Потокам между ярмами через

каналы рассеяния между сетевой и компенсационной обмотками сопоставляются ветви 3,4. Поток рассеяния, которые не могут быть отнесены к межяремным, отображены ветвями-петлями 5, 6. Пара боковых ярем совместно отображается ветвью 7 магнитной цепи. Характеристика этой ветви кусочно-линейна и отображается двумя линейными участками вебер-амперной характеристики. В нормальных процессах она ненасыщенна, но в аномальных процессах может насыщаться. Параллельно ей присоединена ветвь 8, отображающая поток между верхним и нижним ярмами. С ней сцеплена одновитковая обмотка, отображающая бак.



a)



б)

Рис. 2 Магнитная цепь фазы реактора (а) и пример электрической схемы соединения ее обмоток (б).

Связи между магнитной цепью и обмотками описываются совокупностью надрезов [5]. Надрез магнитной цепи суть совокупность ветвей магнитной цепи (выделены дугами на рис. 2а), охваченных соответствующей обмоткой. Сумма магнитных потоков выделенных ветвей образует поток, пронизывающий обмотку. Каждой обмотке реактора (или трансформатора) сопоставляется пара элементов в модели: надрез в магнитной цепи и обмотка в ветви электрической цепи. Если поток обмотки неоднороден, ее нужно разделить на части, тогда одной физической обмотке в модели сопоставляются несколько ветвей-обмоток в электрической цепи и несколько надрезов в магнитной цепи. В рассматриваемом случае этого не требуется, достаточно сопоставить каждой физической обмотке один надрез в магнитной цепи и одну ветвь-обмотку в электрической цепи. Пример электрической цепи, сцепленной с магнитной цепью, дан на рисунке 2б. В реакторе конструкции ОАО «ХК Электрозавод» подмагничивание осуществляется через сетевые обмотки реактора CO_1 , CO_r . В электрической цепи сетевые обмотки представлены ветвями-обмотками и активными сопротивлениями. Заземляются сетевые обмотки через вспомогательный реактор с индуктивностями обмоток L_b и активными сопротивлениями R_b ; магнитная связь между обмотками вспомогательного дросселя незначительна. Компенсационные обмотки стержней KO_1 , KO_r соединены последовательно. В трехфазном реакторе компенсационные обмотки соединяются в треугольник, чтобы уменьшить гармоники фазных токов, кратные трем. На рисунке 2б компенсационная обмотка замкнута на резонансный фильтр L_3 , C_3 (пример имеет несколько искусственный характер, поскольку в реакторе Электрозавода активные сопротивления заземляющего реактора должны быть много больше активных сопротивлений основных обмоток и длительная работа в однофазном или несимметричном трехфазном режиме невозможна). Однако нетрудно увидеть, как доработать систему, чтобы обеспечить длительную работу с ненулевым током нейтрали.

Программа ELTRAN [6, 7] предназначена для отображения электроэнергетических устройств, содержащих вентильные преобразователи электрической энергии, трансформаторы и реакторы. Общая теоретическая модель таких устройств – это кусочно-линейная расщепленная система (КЛРС) [8], состоящая из:

- цепей с непрерывными (аналоговыми) переменными и кусочно-постоянными параметрами;
- компараторов с аналоговыми входами и дискретными выходами;
- конечных автоматов с дискретными входами и дискретными выходами и дискретными же внутренними состояниями.

Структура связей КЛРС показана на рисунке 3. Компараторы анализируют аналоговые переменные и переключаются, когда кусочно-линейные элементы достигают граничных значений, которые вызывают необходимость их переключений; переключения компараторов инициируют переключения автоматов (с учетом их памяти); состояния автоматов

определяют состояния ключей цепей. Цепи описываются параметрами ветвей и соединениями ветвей. Модель управляемого подмагничиванием реактора в виде многоконтурной кусочно-линейной магнитной цепи с системой обмоток (надрезов) естественным образом отображается в виде КЛРС. После получения описания магнитной цепи реактора, он отображается автоматически и точно, без каких бы то ни было дополнительных упрощений и допущений.

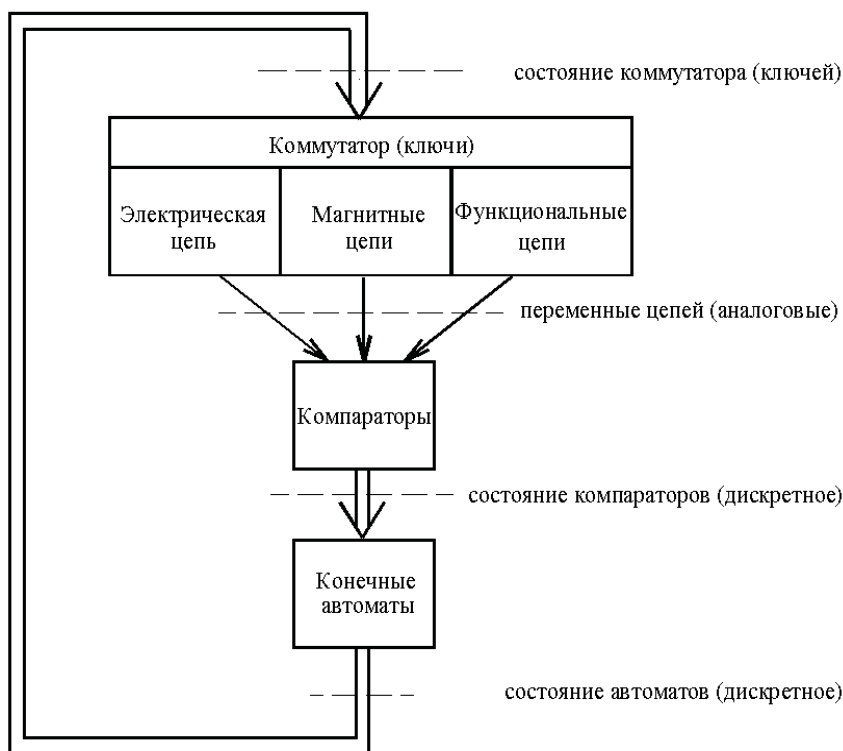


Рис 3. Структура связей КЛРС

Магнитная цепь рассчитывается параллельно с электрической цепью. Компараторы контролируют изменения потоков ветвей, и при достижении граничных значений потоков инициируют изменение характеристики ветви и перерасчет взаимоиндуктивностей, после чего продолжается расчет до следующего переключения.

Выполненные далее расчеты процессов производились с помощью программы ELTRAN, но могли бы быть выполнены и любой другой программой, имеющей соответствующие возможности (см., например, аналогичное использование известной программы SIMULINK [9]). Существенно лишь, чтобы точно отображались процессы в нелинейной многоконтурной магнитной цепи реактора. На всех последующих осциллограммах напряжение приведено в кВ, ток - в амперах, время - в миллисекундах.

Характеристики стационарных режимов

Далее рассматривается трехфазный управляемый подмагничиванием реактор конструкции ОАО «ХК Электрозавод», составленный из трех идентичных фаз. Источник подмагничивания один, общий для трех фаз и включен параллельно основным обмоткам через расщепленную нейтраль. Подмагничивание выполняется источником напряжения (выпрямитель, зашунтированный конденсатором). Расщепленная нейтраль реактора и полюсы выпрямителя заземлены через двухобмоточный вспомогательный реактор, имеющий большие активные сопротивления обмоток. Компенсационные обмотки в нормальных режимах соединены в треугольник. Опробование модели в стационарных режимах проводилось по схеме рис. 4, где реактор запитан источниками трехфазного напряжения, и подмагничивается источником постоянного тока.

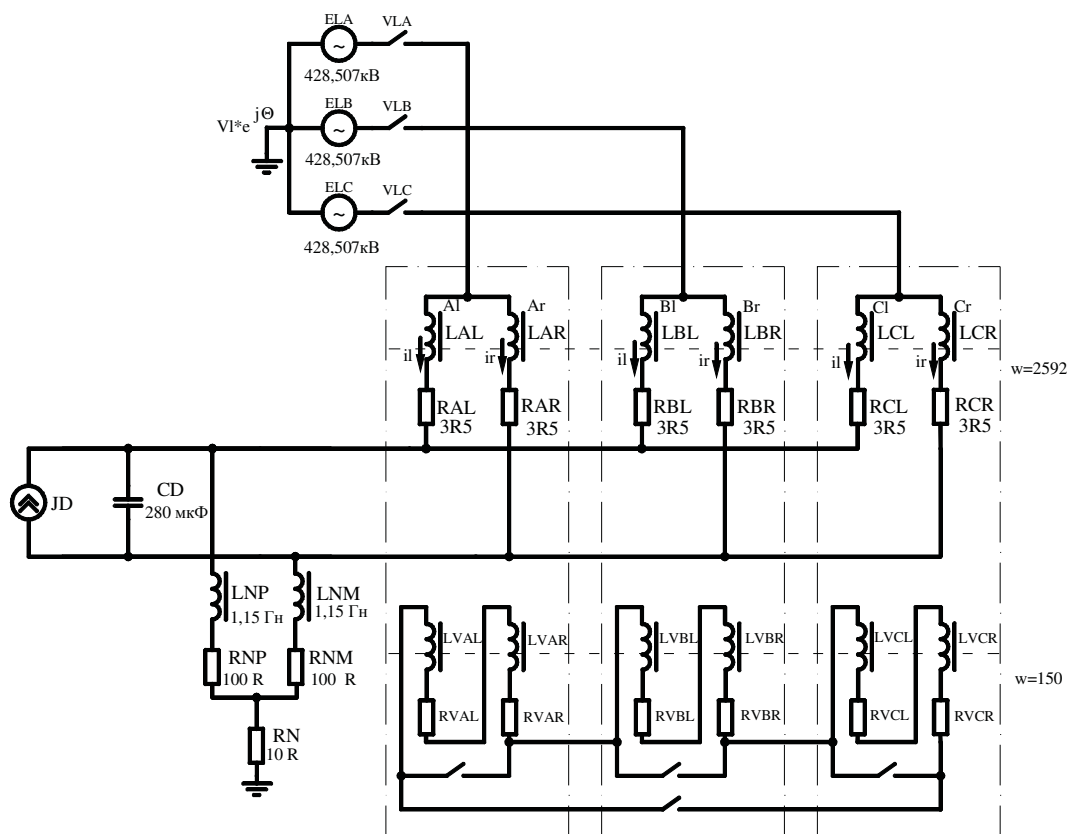


Рис.4.

На рисунке 5 приведены графики токов обмоток и тока подмагничивания, полученные в модели; вид их соответствует тому, что ожидалось. Ток подмагничивания пульсирует с частотой $6f_s$, где f_s – частота сети. Его уровень чуть выше амплитуды фазного тока.

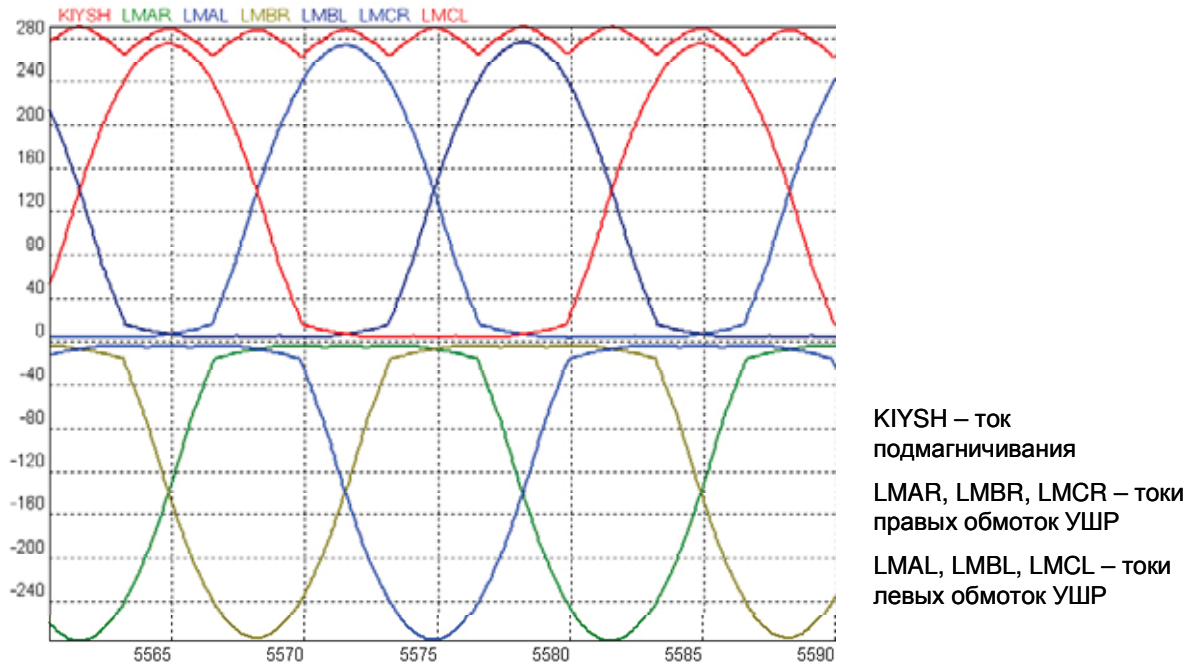


Рис.5. Токи сетевых обмоток и ток подмагничивания в установившемся симметричном режиме.

На рис. **6а** показана рассчитанная регулировочная характеристика реактора (зависимость тока реактора $I_{УШР}$ от тока подмагничивания I_d), полученная на модели; она почти линейна, с небольшим смещением, соответствующим току холостого хода реактора.

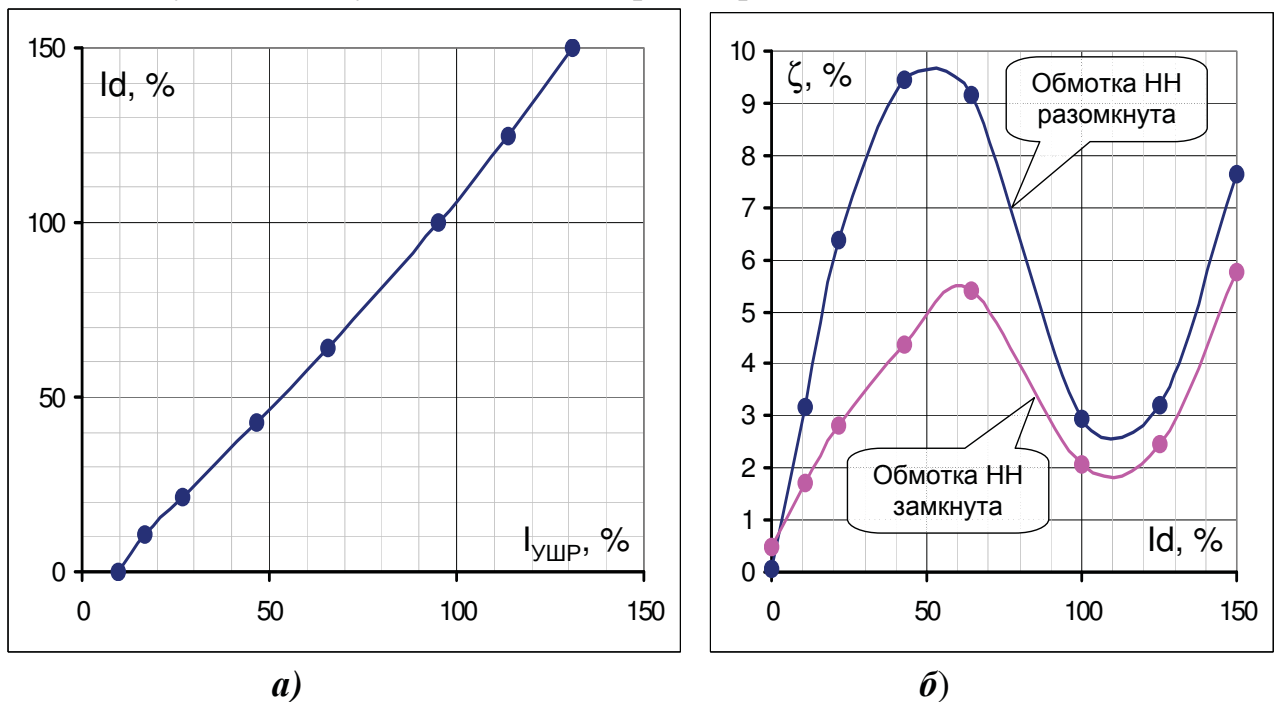


Рис. 6. Характеристики реактора: регулировочная(**а**) и искажений(**б**)

На рисунке **6б** показаны зависимость коэффициента нелинейных искажений ζ тока трехфазного реактора от тока подмагничивания I_d при

разомкнутых компенсационных обмотках и при замыкании их в треугольник. Обе характеристики имеют два экстремума (максимум и минимум). Реактор сконструирован так, что минимум искажений лежит вблизи номинального режима. Максимум искажений достигается в промежуточной точке. Замыкание компенсационной обмотки почти вдвое уменьшает максимальное искажение тока (с $\approx 9,5\%$ до $\approx 5,5\%$). В номинальном режиме ее действие менее заметно (с $\approx 3\%$ до $\approx 2\%$).

Переходные процессы в линии электропередачи

Опробование модели УШР при анализе переходных режимов производилось в схеме сети, изображенной на рисунке 7.

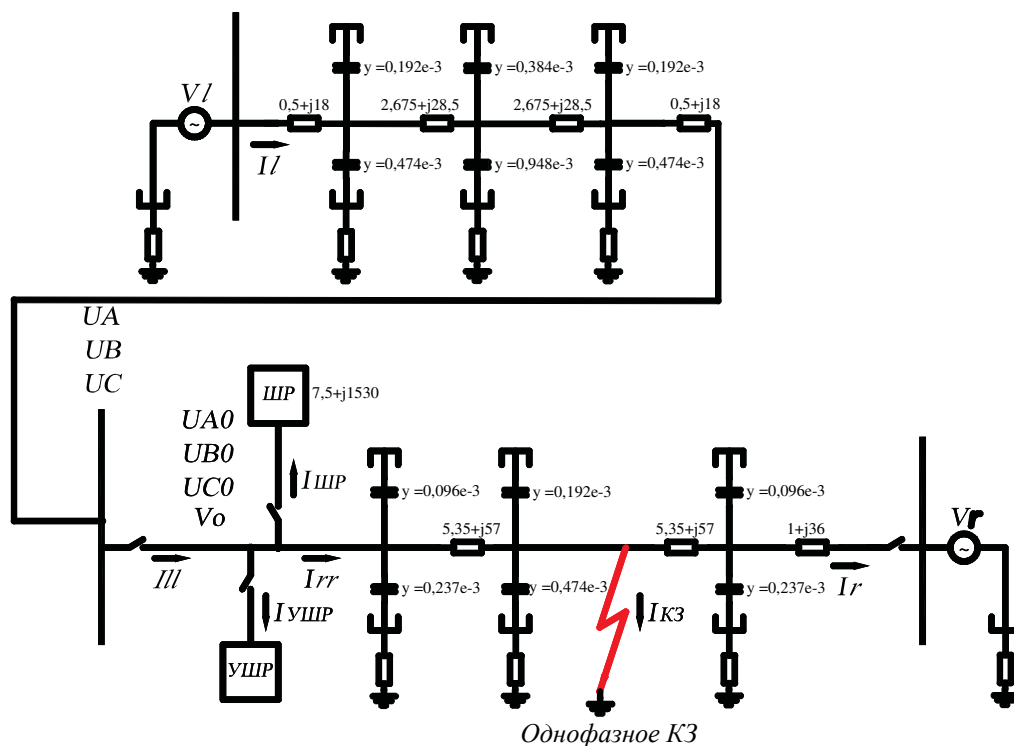


Диаграмма переключений

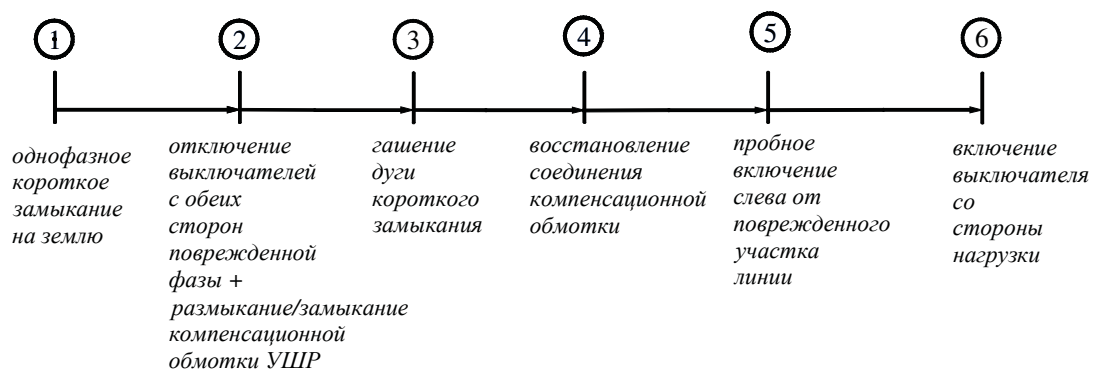


Рис.7. Управляемый реактор в линии электропередачи. Моделирование ОАПВ в линии (схема замещения и диаграмма переключений)

УШР установлен на промежуточной подстанции параллельно с нерегулируемым шунтирующим реактором (ШР), что соответствует условиям его предполагаемого использования. Левый и правый отрезки линий передачи отображены П-образными схемами замещения: по две на каждую сторону. В замещающих схемах по отдельности учтены межфазовые емкости и емкости на землю, чтобы рассчитывать ток дуги при однофазном коротком замыкании. Трансформаторы представлены реактансами короткого замыкания, а примыкающие подстанции представлены источниками напряжения и реактансами короткого замыкания. В некоторых расчетах отображались насыщающиеся ветви магнитной цепи силовых трансформаторов.

Управляющий подмагничиванием реактора выпрямитель выполнен по двенадцатипульсной схеме. В модели он представлен подробно, с детальным отображением питающего трансформатора, каждого вентиля, системы фазового управления, а также автоматических регуляторов. Базовым контуром регулирования является контур регулирования тока подмагничивания, который обрабатывает задание тока подмагничивания. Для ускорения процессов изменения реактивной мощности УШР управляющий выпрямитель имеет кратность форсировки около 20: при возникновении рассогласования тока напряжение выпрямителя может достигать 13-14 кВ, тогда как требуемое для поддержания тока подмагничивания стационарное напряжение равно лишь 0,66 кВ. На базовый контур регулирования может накладываться тот или иной внешний контур регулирования:

- реактивной мощности реактора;
- напряжения в точке присоединения реактора.

Все внешние контуры регулирования действуют через базовый контур регулирования тока подмагничивания.

Далее рассматривается несколько процессов, характеризующих действие реактора в линии электропередачи.

Переходной процесс изменения реактивной мощности реактора из режима холостого хода к номинальному

Характерные осциллограммы показан на рис. 8.

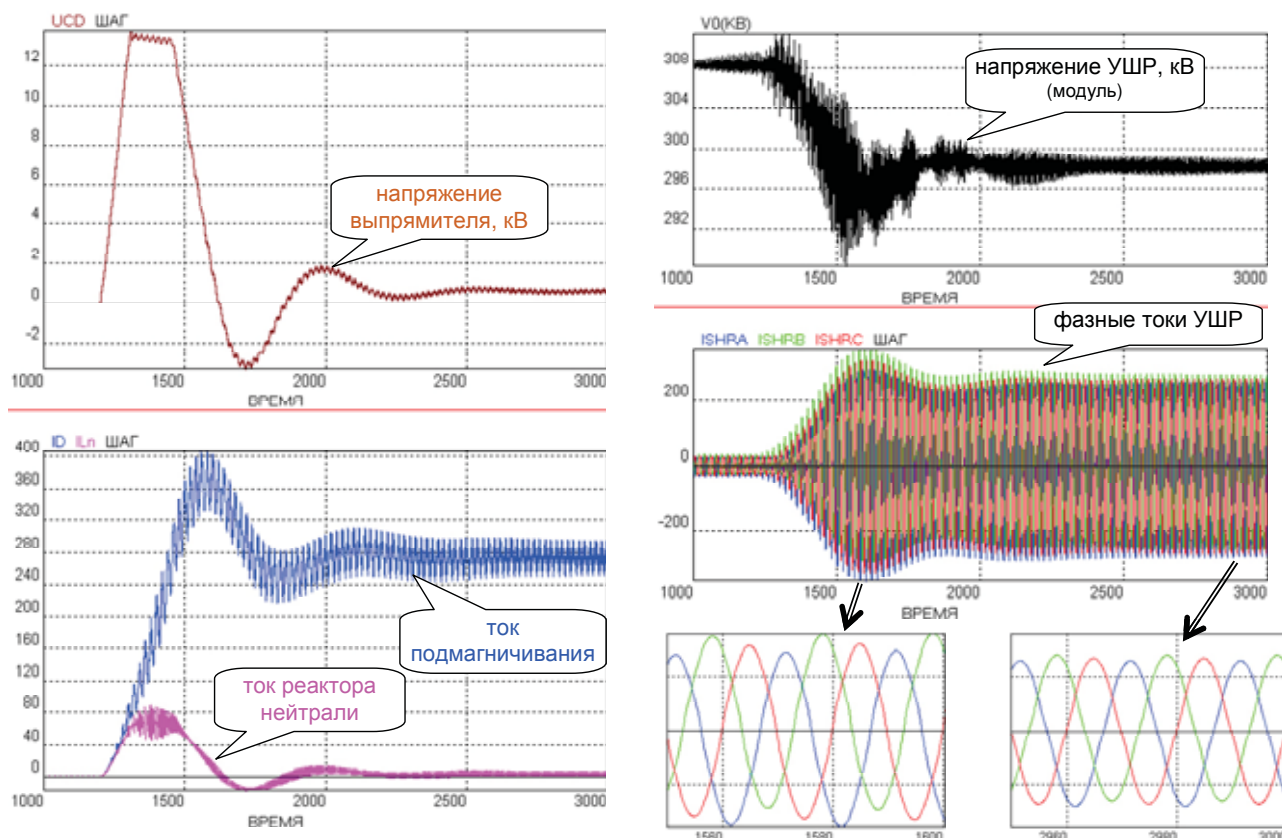


Рис 8. Осциллограммы переходного процесса изменения реактивной мощности реактора из режима холостого хода к номинальному

Левые осциллограммы рис.8 иллюстрируют действие регулятора. Напряжение выпрямителя форсированно поднимается до верхнего предела, равного 14 кВ, обеспечивая быстрое нарастание тока. После достижения заданного уровня тока, напряжение выпрямителя снижается до малой величины, требуемой для поддержания тока. Переходный процесс нарастания тока подмагничивания колебательный, но с достаточно хорошим демпфированием. Интервал набирания номинального тока составляет около 0,25 с. При этом полное время установления тока (вхождения в 10%-ную зону) значительно больше (около 0,5 с). Сколь-нибудь заметное улучшение показателей регулятора вряд ли возможно, поскольку он действует в условиях интенсивных шумов. На правой стороне рисунка 8 показаны процессы в точке присоединения реактора к линии электропередачи. Напряжение линии снижается вместе с ростом подмагничивания, а фазные токи растут. Нарастание фазных токов сопровождается появлением аperiodических составляющих. В модуле напряжения линии они проявляются как шум. Аperiodические составляющие неуправляемы в структуре с общим намагнивающим выпрямителем, в которой регулируется только одна координата из трех. Они затухают с естественной скоростью. На рисунке 8 за 1,5 с аperiodическая составляющая тока фазы снижается примерно в 5 раз.

Подключение к линии предварительно намагниченного реактора
 Осциллограммы при подключении к линии предварительно намагниченного реактора показаны на рисунке 9.

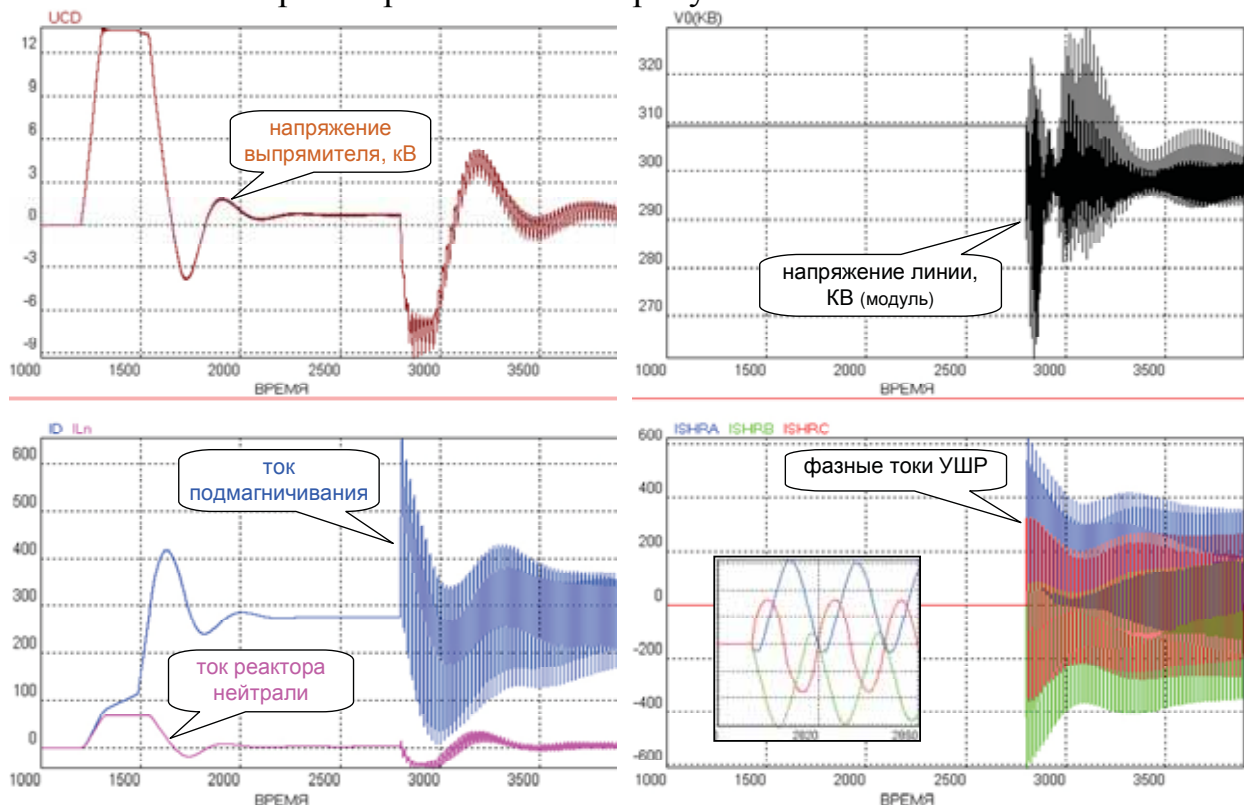


Рис. 9. Подключение реактора к линии электропередачи

Апериодические составляющие токов достигают почти 100-% величины, и затухание их обуславливается, в основном, активными сопротивлениями линии электропередачи. Провалы и выбросы напряжения линии весьма существенны и затухают синхронно с апериодическими составляющими фазных токов реактора.

Стабилизация напряжения в точке присоединения реактора

Осциллограммы, характеризующие процесс стабилизации напряжения в точке присоединения реактора, приведены на рисунке 10.

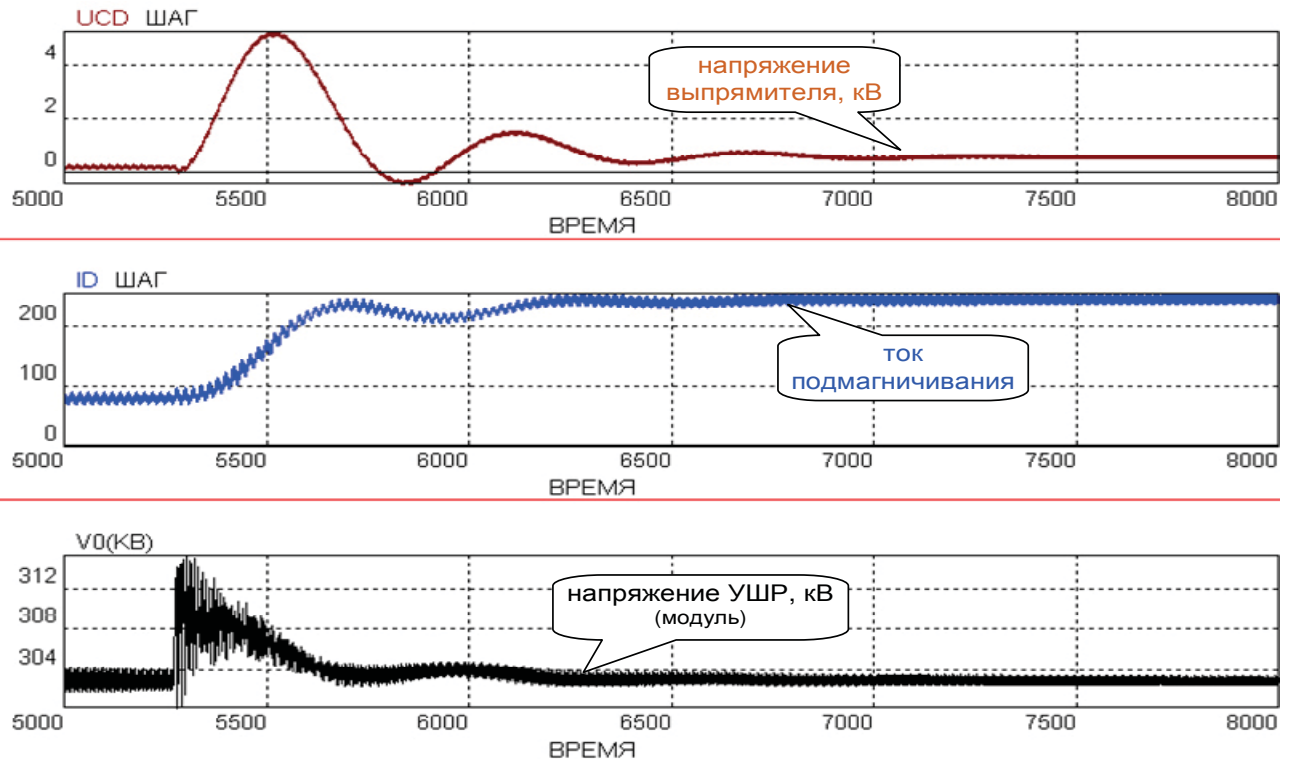


Рис. 10. Стабилизация напряжения в точке присоединения УШР при скачке напряжения V_1 : 300.5→310кV

В момент $t=5,3$ с скачком возрастает напряжение V_1 . Регулятор увеличивает напряжение выпрямителя, ток подмагничивания нарастает и напряжение в точке присоединения возвращается к заданному уровню. Переходный процесс занимает около 0,3 с и сопровождается шумом напряжения. Как уже отмечалось, шум порождается апериодическими составляющими тока по нерегулируемым координатам.

Моделирование процесса гашения дуги в паузе однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ)

Однофазное автоматическое повторное включение (ОАПВ) рассматривалось по схеме замещения и диаграмме переключений рисунка 7. На рисунке **11** процесс показан крупным планом.

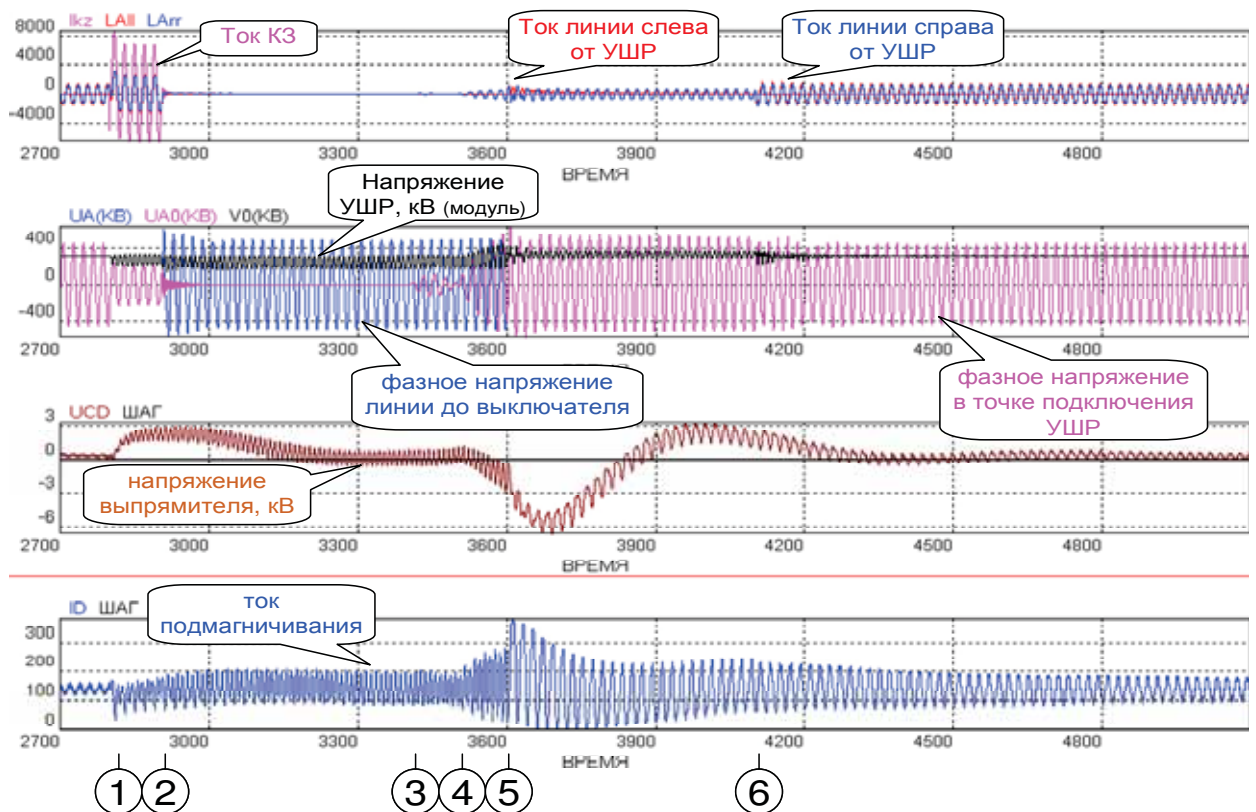


Рис 11. Режим ОАПВ. Компенсационная обмотка размыкается при $t=2,9$ с и замыкается при $t=3,5$ с

Одновременно с отключением короткозамкнутой линии (момент 2; $t=2,9$ с) размыкается треугольник компенсационных обмоток. После погасания дуги (момент 3; $t=3,4$ с) появляется заметное напряжение на отключенной фазе. В момент 4 ($t=3,5$ с) замыкается треугольник компенсационных обмоток. Индуктируемое неповрежденными фазами напряжение через реактанс рассеяния сетевых и компенсационных обмоток (около 60%) плавно поднимает напряжение на отключенной фазе. К моменту пробного выключения (момент 5, $t=3,6$ с) это напряжение близко к нормальной величине и перенапряжение при пробном включении незначительно. Возможность плавной подготовки к пробному включению является полезным свойством управляемого реактора.

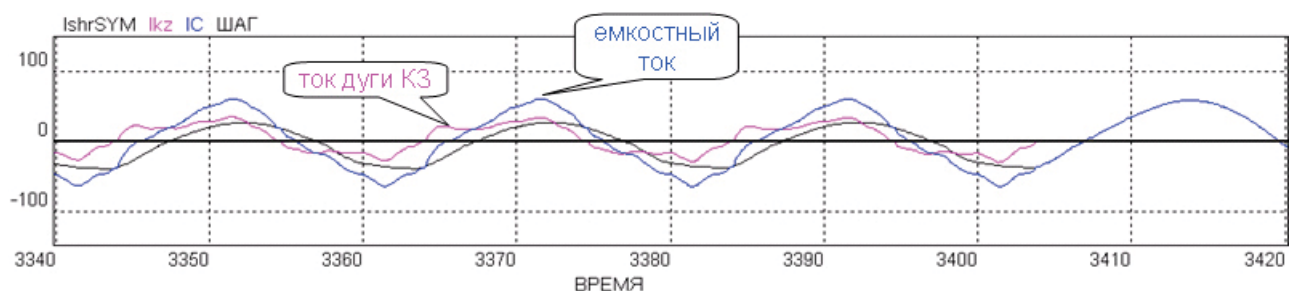


Рис. 12. Ток дуги при однофазном коротком замыкании. Компенсационная обмотка разомкнута.

На рисунке **12** показаны токи в короткозамкнутой фазе на стадии горения дуги. Отдельно показаны емкостной ток и ток реакторов. Ток реакторов вычитается из емкостного тока и уменьшает ток дуги; его амплитуда снижается до уровня менее 20 А и дуга погасает. Емкостной ток имеет амплитуду около 50А, так что без поддержки реакторов дуга могла бы и не погаснуть.

Для проведения заводских испытаний реакторов при ограниченной мощности испытательной станции используется схема с последовательной емкостной компенсацией. Однако при испытании УШР в последовательной схеме следует ожидать возникновения автоколебаний. Что подтверждается модельным экспериментом. Возникают установившиеся автоколебания феррорезонансного типа с частотой около 4 Гц; они возникают и при плавном вхождении в режим и весьма устойчивы. Может быть возможно их подавление регулятором источника подмагничивания, но только весьма сильного действия и специфическим.

Заключение

Рассмотренная в настоящей работе модель управляемого подмагничиванием реактора базируется на ясном физическом представлении о магнитной цепи и отображает поведение реактора в широком диапазоне: от генерации гармоник до темпов перемагничивания и затухания аperiodических составляющих. Модель достаточно проста и компактна для того, чтобы использовать ее при исследованиях процессов в линиях. История применения управляемых реакторов сравнительно коротка, и далеко не все связанные с ними вопросы решены. Прямые эксперименты с мощным оборудованием линий электропередачи весьма трудны и дорогостоящи. Все это вместе позволяет надеяться на то, что рассмотренная модель будет использоваться при исследованиях, а также выработке и проверке технических решений.

Литература:

1. Бики М.А., Бродовой Е.Н., Брянцев А.М., Лейтес Л.В и др. «Электромагнитные процессы в мощных управляемых реакторах». Журнал «Электричество», № 6, 1994 г., стр. 1-9.
2. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы. Сборник статей под редакцией Брянцева А.М., М., «Знак», 2004 г.
3. Гусев С.И., Карпов В.Н., Киселев А.Н., Кочкин В.И. Результаты системных испытаний шинного управляемого шунтирующего реактора 500 кВ на подстанции Таврическая. Журнал «Электрические станции», № 7, 2009 г., стр. 46-53.
4. Евдокунин Г.А., Смолоник С.В., Беляев А.Н., Чудный В.С. Расчет режимов, обоснование эффективности применения, разработка алгоритмов гашения дуги ОАПВ и технических требований к управляемым шунтирующим реакторам 110-500кВ. Отчет по научно-

- технической работе ассоциации центра инжиниринга и автоматизации, Санкт-Петербург, 2004 г.
5. Мустафа Г.М. Матрицы для описания топологии трансформаторов. Журнал «Электричество», №10, 1977 г., стр. 34-39.
 6. Мустафа Г.М., Шаранов И.М. Математическое моделирование тиристорных преобразователей. Журнал «Электричество», №1, 1978, стр. 40-45.
 7. Мустафа Г.М., Федотов Ю.Б. и др. Основные характеристики программного комплекса ЭЛТРАН, опыт применения и перспективы развития. В сборнике «Моделирование силовых вентильных преобразователей». Издательство ИЭД АН УССР, Киев, 1989, стр. 118-129.
 8. Мустафа Г.М., Шаранов И.М. Расщепленная кусочно-линейная система как модель устройств преобразовательной техники. В книге «Электронные цепи, передача и переработка информации», Киев, Наукова думка, 1979г., стр. 193-209.
 9. Киселев А.Н., Карпов В.Н. Разработка моделей управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора // Всероссийская конференция по итогам конкурса молодых специалистов организаций НПК ОАО РАО «ЕЭС России». Секция II. — с. Дивноморское. — 2007.

Авторы: Гусев Станислав Иванович - главный эксперт Департамента систем передачи и преобразования ОАО "ФСК ЕЭС". Окончил в 1972 г. электромеханический факультет Московского энергетического института. С 1972 по 2004 г. работал во Всесоюзном (ныне Всероссийском) электротехническом институте (ВЭИ имени В.И. Ленина). В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию по вопросам создания трансформаторных генераторов высокого напряжения для ускорителей прямого действия.

Столяров Евгений Игоревич- заместитель начальника Департамента систем передачи и преобразования электроэнергии ОАО «ФСК ЕЭС» В 2005г. окончил Московский энергетический институт по специальности «Электрические системы и сети»

Мустафа Георгий Маркович- начальник отдела Всероссийского Электротехнического Института им. Ленина, кандидат технических наук, окончил Харьковский политехнический институт

Сеннов Юрий Михайлович- начальник сектора ВЭИ им. Ленина, окончил Московский Электротехнический институт в 1999г

Луганская Ирина Борисовна- старший научный сотрудник ВЭИ им. Ленина, Окончила МИЭМ в 1980г по специальности «прикладная математика»