

Моделирование электромагнитных переходных процессов в управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторах производства ПАО «Запорожтрансформатор» в условиях заводских испытаний и в условиях эксплуатации

Л.Н. Конторович, технический директор ПАО «ЗТР», к.т.н.;

И.А. Широков, начальник бюро разработки систем управления реакторов ПАО «ЗТР»

В настоящее время в электрических сетях высокого напряжения для управления потоками электрической энергии в нормальных и аварийных режимах работы энергосистемы широко применяются управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы (УПШР).

Режимы работы реакторов в условиях заводских испытаний и в условиях эксплуатации существенно отличаются. Отличия обусловлены отсутствием на заводах-изготовителях необходимых мощных источников высокого напряжения различной величины, следствием чего является применение при заводских испытаниях резонансных схем питания реакторов. Кроме того, на заводах-изготовителях отсутствуют устройства, эквивалентирующие при испытаниях оборудование электрических сетей и подстанций.

Для оценки работы УПШР в различных режимах в условиях заводских испытаний и в условиях эксплуатации в ПАО «Запорожтрансформатор» проводится разработка математических моделей УПШР, испытательного оборудования, оборудования электрических сетей и подстанций. Создание адекватных моделей позволит отрабатывать и оптимизировать алгоритмы работы систем автоматизированного управления УШР, а также производить проверку новых конструктивных решений электромагнитной части и полупроводниковых преобразователей УШР. Разработка моделей проводится в программном комплексе MATLAB/Simulink/SimPowerSystem [1,2].

В настоящей статье приведены описания моделей электромагнитных частей УШР различного конструктивного исполнения, моделей испытательного оборудования, моделей, имитирующих различные виды заводских испытаний электромагнитных частей. Приведены экспериментальные данные и результаты расчетов работы УШР в условиях заводских испытаний и в условиях эксплуатации.

На рис.1 приведена схема электрическая принципиальная электромагнитной части РОДУ-60000/500 трехфазного реактора РТУ-180000/500 конструктивного исполнения А.

В электромагнитной части реактора данного исполнения имеется обмотка управления (ОУ), состоящая из четырех секций, расположенных попарно вокруг двух полустержней магнитной системы (ОУ11 и ОУ12, ОУ21 и ОУ22), а также сетевая обмотка (СО), охватывающая оба полустержня. Особенностью данного конструктивного исполнения является отсутствие у реактора отдельной компенсационной обмотки (КО). Для подавления третьей гармонической составляющей тока реактора и питания полупроводникового преобразователя используются вводы «а» и «х», а для управления – вводы «+» и «-» обмотки управления реактора. Шунтирующий резистор R, подключенный к вводам обмотки управления предназначен для образования цепи разряда индуктивности обмотки и для снижения уровня перенапряжений на вводах обмотки.

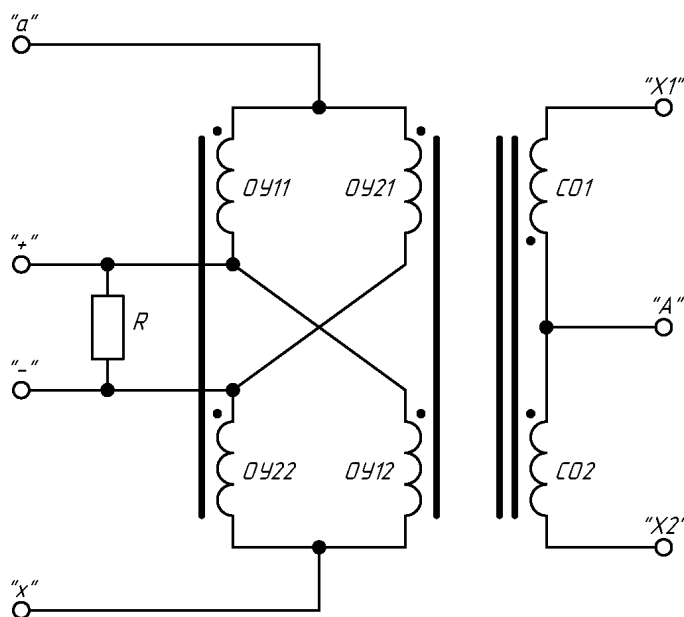


Рис.1. Схема электрическая принципиальная РОДУ-60000/500 исполнения А

На рис.2 приведена схема электрическая принципиальная электромагнитной части РОДУ-60000/500 трехфазного реактора РТУ-180000/500 конструктивного исполнения Б.

В электромагнитной части реактора данного исполнения имеется компенсационная обмотка (КО) и обмотка управления (ОУ), состоящие из двух секций, расположенных вокруг двух полустержней магнитной системы, а также сетевая обмотка (СО), охватывающая оба полустержня.

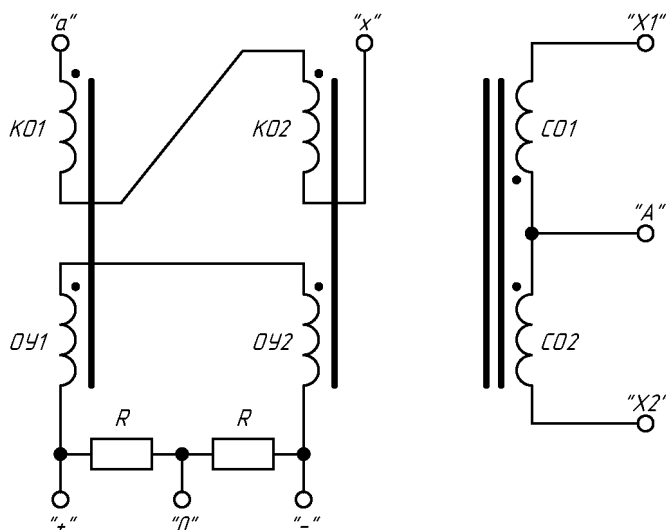


Рис.2. Схема электрическая принципиальная РОДУ-60000/500 исполнения Б

Модели электромагнитных частей УПШР разрабатывались двумя способами. Первый способ – построение моделей на основе эквивалентной схемы замещения магнитной системы реактора (схема ЭМ модели).

В моделях на основе эквивалентной схемы замещения магнитной системы реактора связь между электрическими и магнитными цепями реализовывалась при помощи источника магнитного потока. Принцип реализации такой связи показан на рис.3. Нелинейные участки магнитной цепи реализовывались при помощи источников магнитного напряжения, пример которых приведен на рис.4.

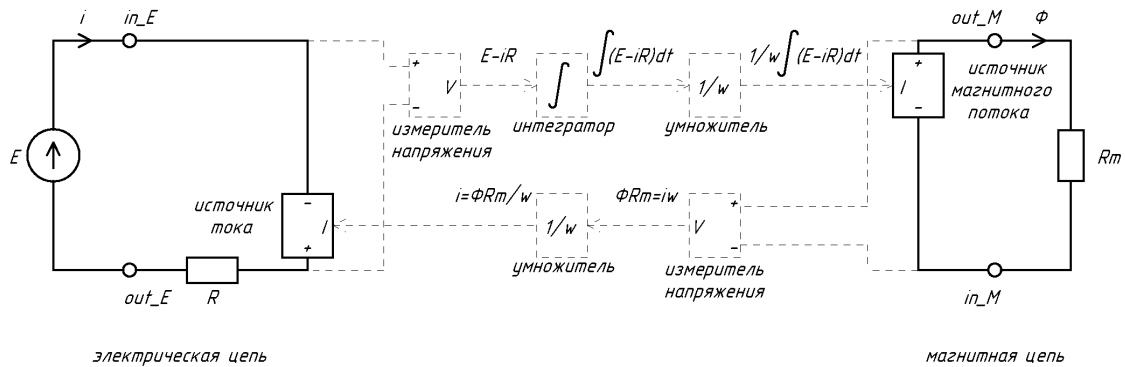


Рис.3. Принцип реализации связи между электрическими и магнитными цепями

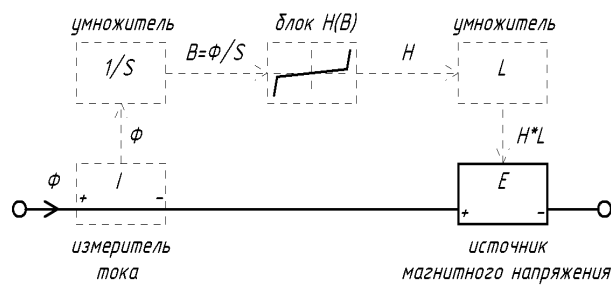


Рис.4. Принцип реализации нелинейного участка магнитной цепи

Эквивалентная схема замещения магнитной системы реактора РОДУ-60000/500 исполнения А приведена на рис.5, схема ЭМ модели электромагнитной части реактора – на рис.6, а результаты моделирования ЭМ модели при подаче на СО переменного, а на ОУ постоянного напряжения – на рис.7.

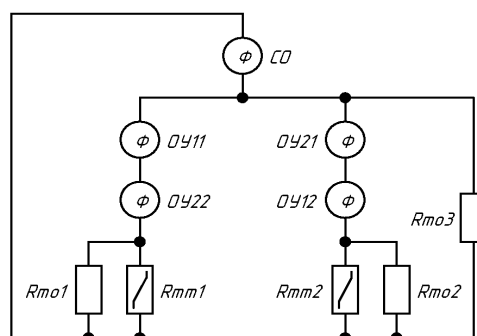


Рис.5. Схема замещения магнитной системы реактора исполнения А

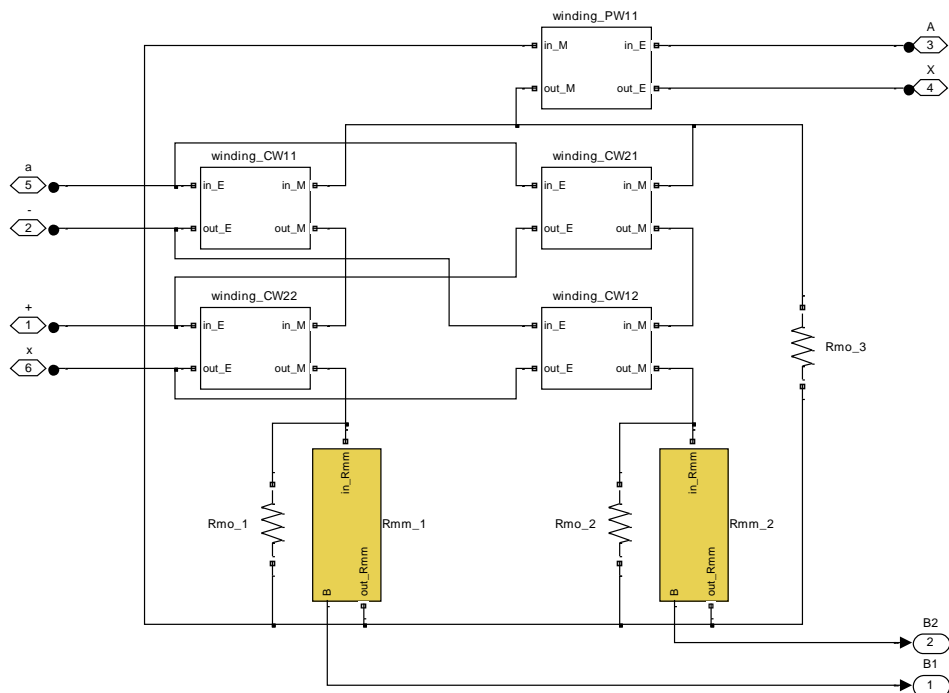


Рис.6. Схема ЭМ модели ЭМЧ реактора исполнения А

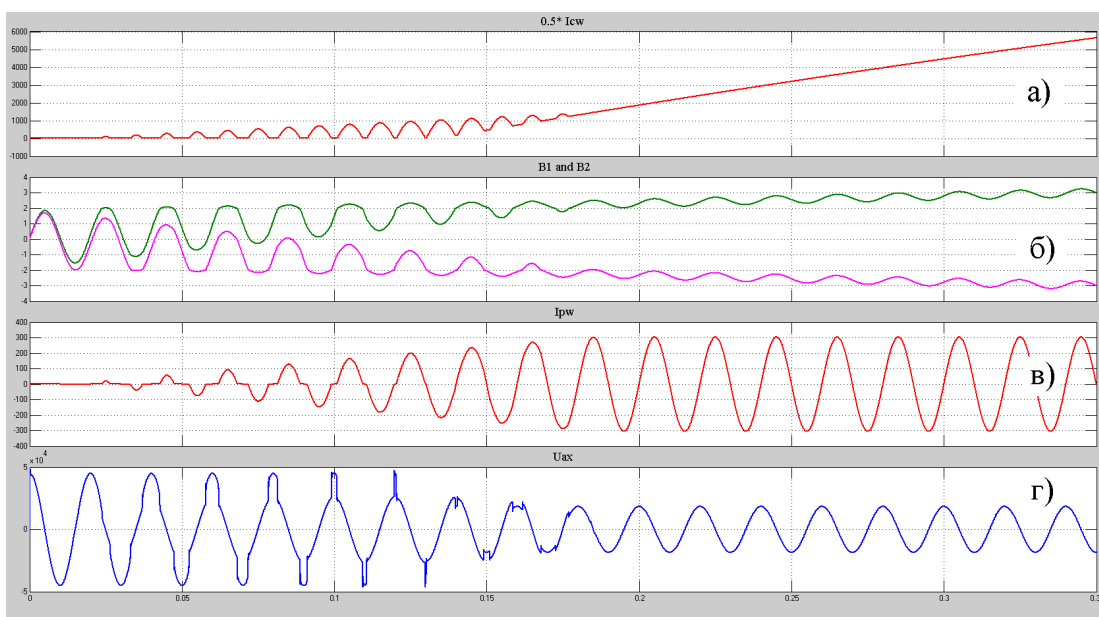


Рис.7. Результаты моделирования ЭМ модели реактора исполнения А

а) ток в ОУ; б) индукции в полустержнях; в) ток в СО; г) напряжение на КО

Второй способ – построение моделей электромагнитных частей УШР на основе электрической схемы замещения реактора (ЭТ модели). Такие модели разрабатывались путем использования SimPowerSystem-блоков Saturable Transformer, основанных на Т-

образной схеме замещения трансформатора.

Схема ЭТ модели электромагнитной части реактора РОДУ-60000/500 исполнения А приведена на рис.8, а результаты моделирования ЭТ модели при подаче на СО переменного, а на ОУ постоянного напряжения – на рис.9.

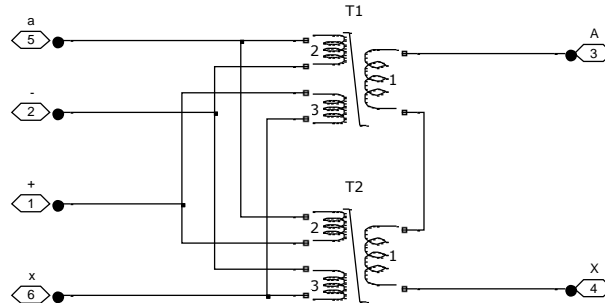


Рис.8. Схема ЭТ модели ЭМЧ реактора исполнения А

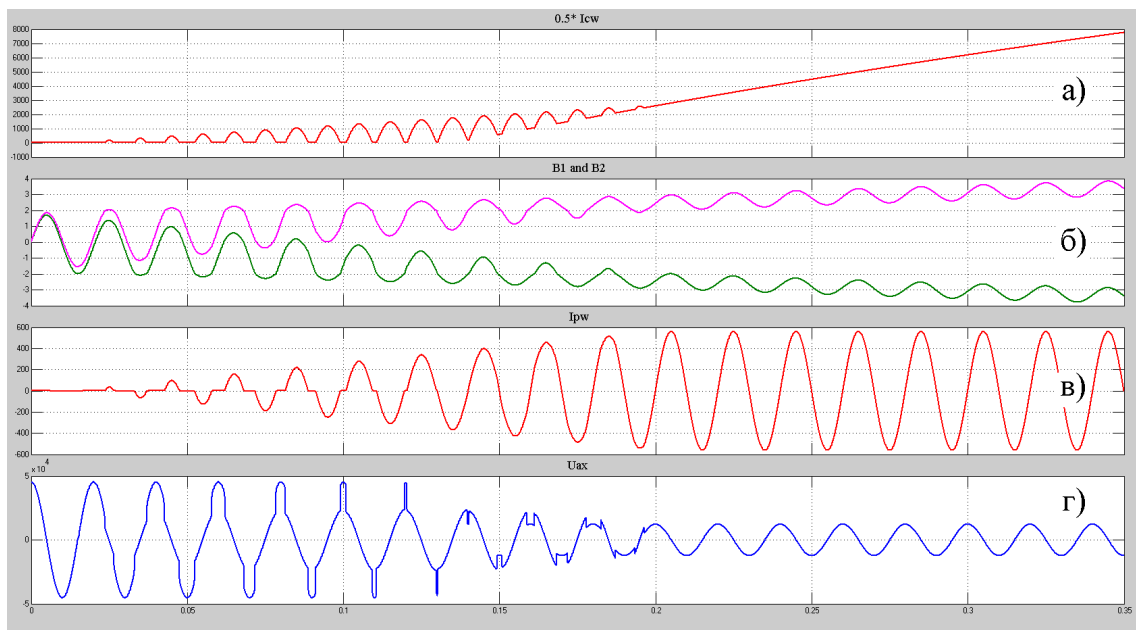


Рис.9. Результаты моделирования ЭТ модели реактора исполнения А

а) ток в ОУ; б) индукции в полустержнях; в) ток в СО; г) напряжение на КО

В отличие от ЭМ моделей, параметры ЭТ моделей определяются на основе расчета или измерения собственных и взаимных индуктивностей обмоток и их частей, расчетных или измеренных потерь в обмотках, магнитопроводе и элементах конструкции. Для учета нелинейности используется зависимость $B(H)$ для эквивалентной магнитной цепи реактора (по результату расчета или измерения).

То есть параметры ЭТ модели более полно отражают характеристики реального реактора. Далее в докладе рассматриваются результаты расчетов по моделям типа ЭТ.

На рис.10 приведена функциональная схема модели измерения потерь реактора исполнения А в режиме холостого хода (ХХ). На рис.11 – схема модели измерения потерь реактора в режиме короткого замыкания (КЗ). На рис.13 – схема модели испытаний для проверки мощности реактора. Результаты моделирования и результаты, полученные при заводских испытаниях реакторов (заводской номер 157982, 157983, 157984), приведены в таблицах 1-3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о достаточной точности разработанной модели электромагнитной части реактора РОДУ-60000/500-У1 исполнения А.

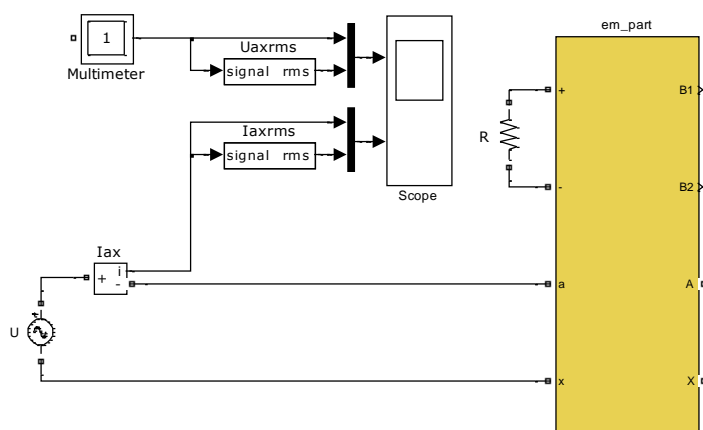


Рис.10. Модель измерения потерь реактора исполнения А в режиме ХХ

Таблица 1. Результаты моделирования и измерения потерь ХХ реактора (А)

Наименование объекта	U_{ax} , кВ	I_{ax} , А
Модель	31,8	3,90
РОДУ-60000/500 (157982)	31,8	3,72
РОДУ-60000/500 (157983)	31,8	3,65
РОДУ-60000/500 (157984)	31,8	3,60

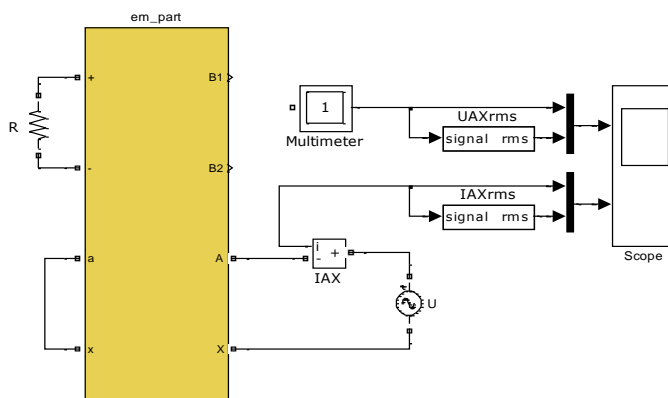


Рис.11. Модель измерения потерь реактора исполнения А в режиме К3

Таблица 2. Результаты моделирования и измерения потерь К3 реактора (А)

Наименование объекта	$U_{AX}, \text{кВ}$	$I_{AX}, \text{А}$
Модель	35,70	48,2
РОДУ-60000/500 (157982)	36,96	49,5
РОДУ-60000/500 (157983)	35,70	48,2
РОДУ-60000/500 (157984)	36,30	49,5

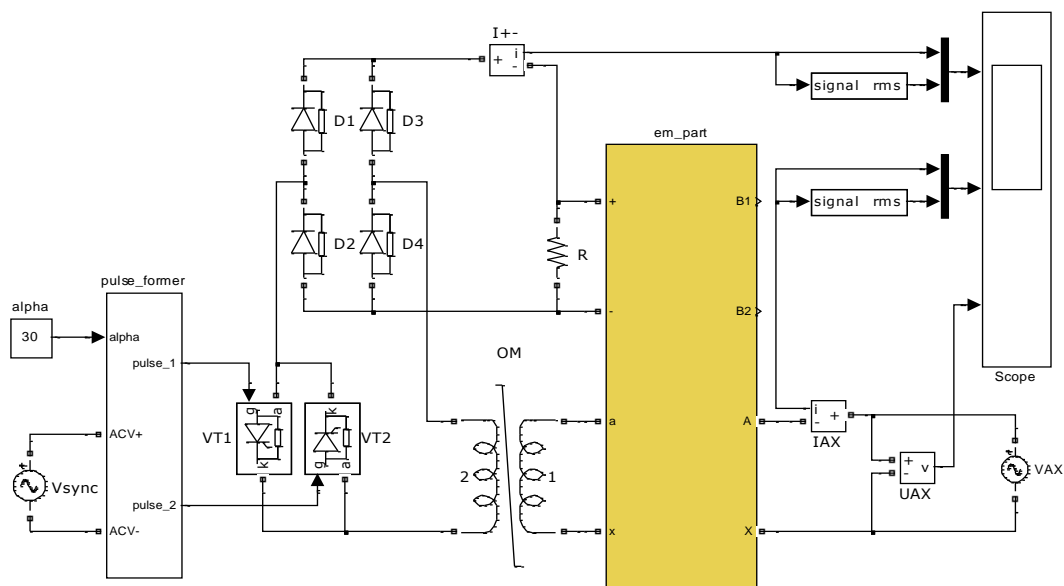


Рис.12. Модель испытаний реактора исполнения А для проверки мощности

Таблица 3. Результаты моделирования и проверки мощности реактора (А).

Наименование объекта	U_{AX} , кВ	I_{AX} , А	I_{\pm} , А
Модель (расчет)	302	200,1	1845,3
РОДУ-60000/500 (157982)	302	203,3	1713,0
РОДУ-60000/500 (157983)	304	201,6	1682,5
РОДУ-60000/500 (157984)	303	200,1	1665,2

Схема ЭТ модели электромагнитной части реактора РОДУ-60000/500 исполнения Б приведена на рис.13, а результаты расчета ЭТ модели при подаче на СО переменного, а на ОУ постоянного напряжения – на рис.14.

Схемы функциональные моделей, имитирующих заводские испытания реактора исполнения Б аналогичны приведенным выше для реактора исполнения А. результаты моделирования и результаты, полученные при заводских испытаниях реактора РОДУ-60000/500-УХЛ1 исполнения Б (заводской номер 160714) приведены в таблицах 4÷8.

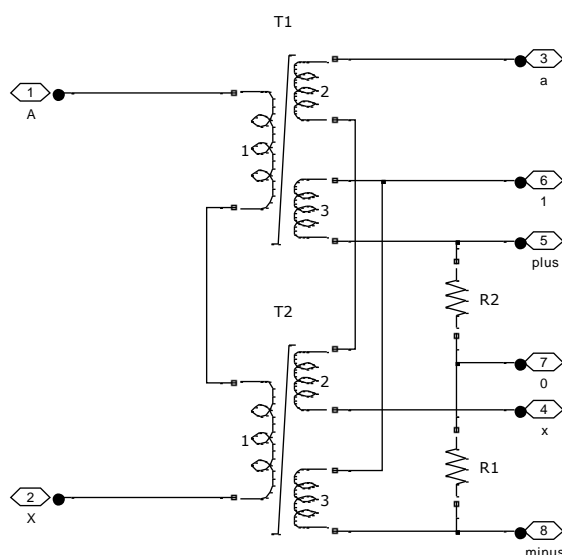


Рис.13. Схема функциональная ЭТ модели ЭМЧ реактора исполнения Б

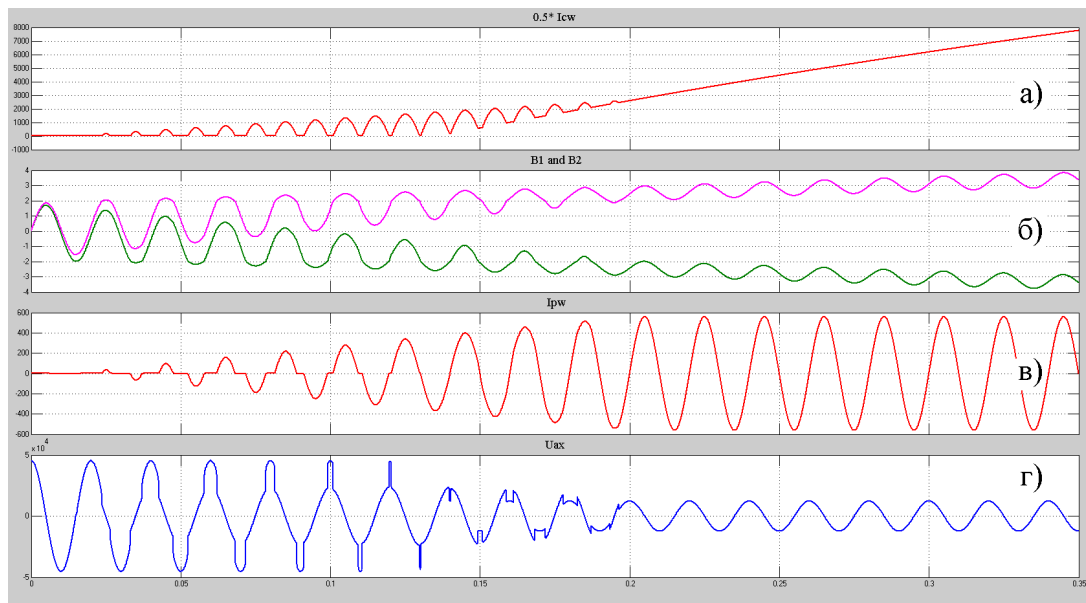


Рис.14. Результаты расчета ЭТ модели реактора исполнения Б

а) ток в ОУ; б) индукции в полустержнях; в) ток в СО; г) напряжение на КО

Таблица 4. Результаты моделирования и измерения потерь XX реактора исполнения Б при номинальном напряжении, подаваемом на обмотку КО

Параметр	$U_{КО}, \text{кВ}$	$I_{КО}, \text{А}$	$P_{КО}, \text{кВт}$
РОДУ-60000/500 (160714)	10,705	6,1200	33,494
Модель	10,705	6,1185	33,485

Таблица 5. Результаты моделирования и измерения потерь XX реактора исполнения Б при номинальном напряжении, подаваемом на обмотку СО

Параметр	$I_{СОХХ}, \text{А}$	$P_{СОХХ}, \text{кВт}$	$Q_{СОХХ}, \text{кВАр}$
РОДУ-60000/500 (160714)	0,2090	32,432	54,521
Модель	0,2092	32,409	54,501

Таблица 6. Результаты моделирования и измерения напряжения КЗ СО-КО реактора исполнения Б

Параметр	$U_{СО}, \text{кВ}$	$I_{СО}, \text{А}$	$P_{СО}, \text{кВт}$
РОДУ-60000/500 (160714)	15,087	17,874	2,966

Модель	15,087	17,875	2,972
--------	--------	--------	-------

Таблица 7. Результаты моделирования и измерения напряжения КЗ СО-ОУ
реактора исполнения Б

Параметр	U_{CO} , кВ	I_{CO} , А	P_{CO} , кВт
РОДУ-60000/500 (160714)	33,279	52,150	37,700
Модель	33,279	52,149	37,694

Таблица 8. Результаты моделирования и номинальные значения параметров
реактора исполнения Б

Параметр	Q_{CO} , МВАр	I_{CO} , А	I_{OY} , А
Номинальное значение	60,00	198,0	745,0
Модель	60,13	198,9	747,9

Сравнение расчетных и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о достаточной точности разработанной модели электромагнитной части реактора РОДУ-60000/500-УХЛ1 исполнения Б.

Возможности разработанной модели электромагнитной части реактора были опробованы путем моделирования различных процессов и различных режимов работы реактора при заводских испытаниях.

Например, на рис.15 приведена функциональная схема модели вывода реактора в номинальный режим при помощи разработанного и изготовленного ПАО «Запорожтрансформатор» оборудования испытательного комплекса для испытаний УПШР (ИК УПШР).

При выполнении этого вида испытаний питание реактора осуществляется по резонансной схеме, которую образуют синхронный генератор, повышающие трансформаторы и конденсаторная батарея.

Создание и регулирование тока намагничивания в обмотке управления реактора осуществляется при помощи полупроводникового преобразователя ИК УПШР, управляемого системой автоматизированного управления САУ УПШР.

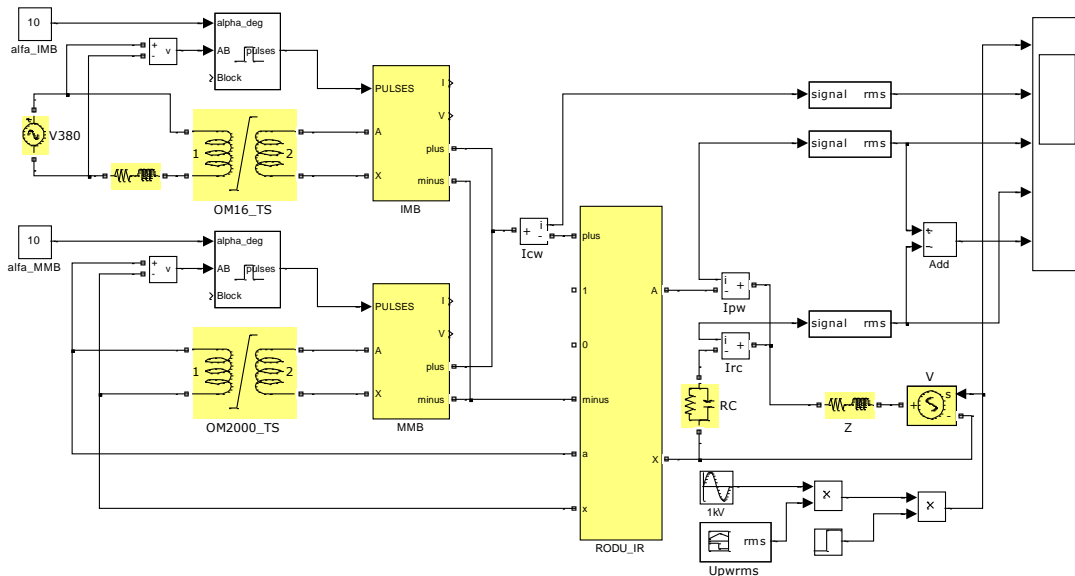


Рис.15. Модель вывода реактора в номинальный режим при помощи оборудования испытательного комплекса для испытаний УПШР

В состав полупроводникового преобразователя ИК УШР входят: однофазный мостовой регулируемый выпрямитель (элемент IMB на рис.15), однофазный мостовой регулируемый выпрямительно-инверторный преобразователь (элемент MMB на рис.15) и элементы шунтирующей цепи преобразователя (на рис.15 отсутствуют, так как не участвуют в работе при выполнении данного вида испытаний).

В качестве моделей тиристоров и диодов преобразователя используются SimPowerSystem-блоки Thyristor и Diode, которые позволяют задавать следующие параметры элементов: сопротивление элемента в открытом состоянии, индуктивность элемента в открытом состоянии, прямое падение напряжения на открытом элементе, сопротивление снабберного резистора, емкость снабберного конденсатора.

Функциональная схема модели однофазного мостового регулируемого выпрямителя приведена на рис.16, однофазного мостового регулируемого выпрямительно-инверторного преобразователя – на рис.17.

Выпрямитель состоит из двух тиристоров и двух диодов, каждый из которых защищен снабберным резистором и конденсатором. Выпрямитель предназначен для создания и регулирования тока начального намагничивания реактора. Питание выпрямителя осуществляется от сети 0,4 кВ через трансформатор мощностью 16 кВА (элемент OM16_TS на рис.15).

Выпрямительно-инверторный преобразователь состоит из четырех тиристоров, каждый из которых защищен снабберным резистором и конденсатором. Преобразователь предназначен для создания и регулирования тока намагничивания реактора в основных режимах работы величиной от 0 до 2500 А. Питание преобразователя осуществляется от компенсационной обмотки реактора через трансформатор мощностью 2000 кВА (элемент OM2000_TS на рис.15).

Так как в используемых моделях тиристоров входы управления являются функциональными, то в моделях выпрямителя и преобразователя отсутствуют имитационные элементы формирования сигналов управления.

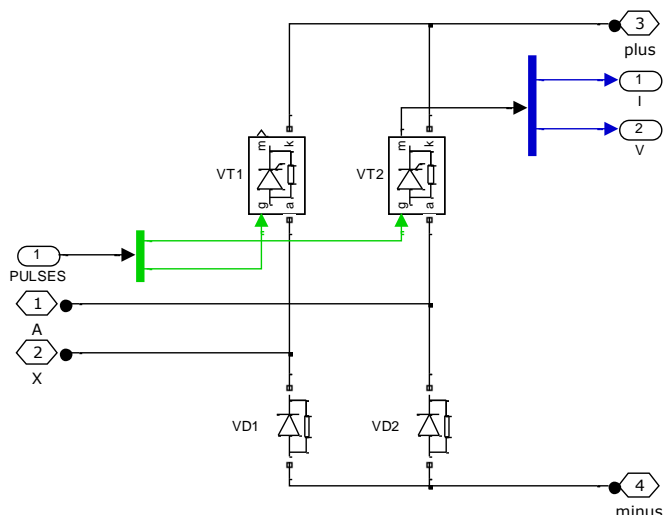


Рис.16. Модель регулируемого выпрямителя

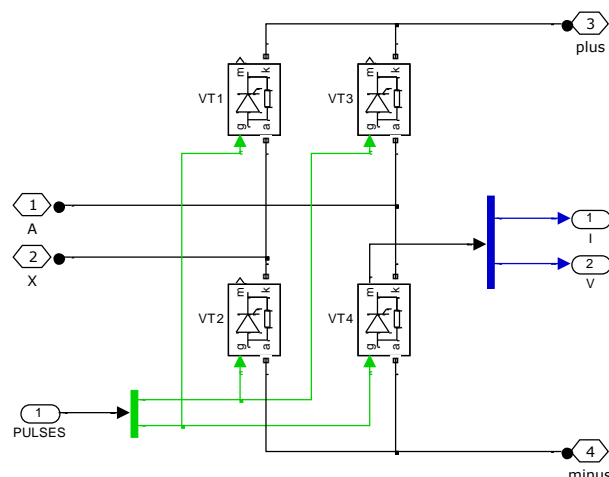


Рис.17. Модель регулируемого выпрямительно-инверторного преобразователя

Результаты моделирования вывода реактора в номинальный режим приведены рис.18.

На первом этапе данного вида испытаний осуществляется начальное намагничивание реактора (время расчета от 0 до 10 сек. на рис.18). После установления заданного для испытываемого реактора тока начального намагничивания осуществляется ступенчатое повышение напряжения на СО реактора и одновременное регулирование тока намагничивания реактора (время расчета от 10 до 30 сек. на рис.18).

Сложность проведения испытания определяется с одной стороны ограниченной мощностью генератора, а с другой стороны – возможностью самовозбуждения генератора в случае превышения величиной емкостного тока, потребляемого от генератора конденсаторной батареей, величины индуктивного тока, потребляемого реактором. То есть неправильный выбор параметров оборудования, используемого при испытании, или параметров режимов работы в процессе испытаний может привести к аварийному прекращению испытания и необходимости его повторного проведения.

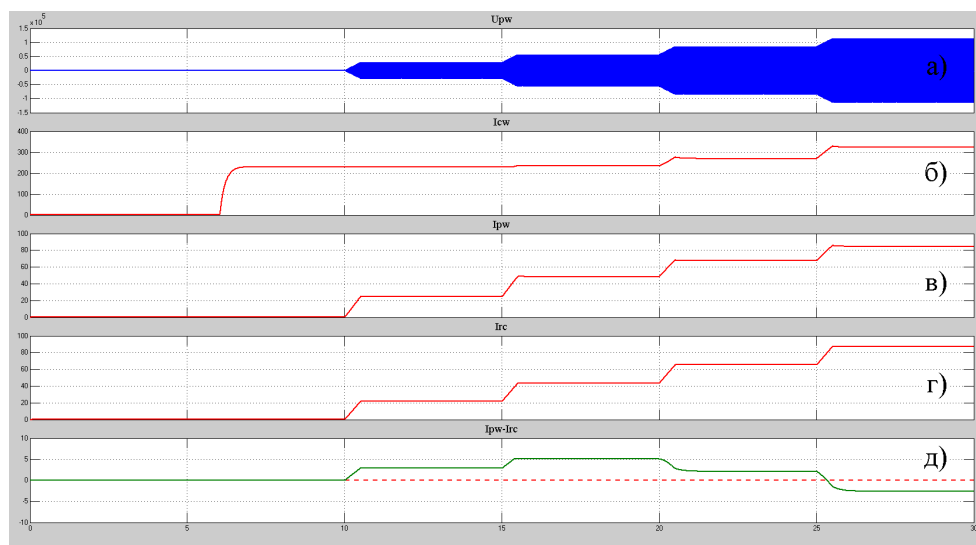


Рис.18. Результаты моделирования вывода реактора в номинальный режим
 а) напряжение на СО; б) ток в ОУ; в) ток в СО; г) ток конденсаторной батареи;
 д) разность токов СО и конденсаторной батареи

Результаты моделирования вывода реактора в номинальный режим, приведенные в качестве примера, позволили выявить неправильный выбор параметров оборудования, используемого при испытании, приводящий к невозможности проведения испытания из-за самовозбуждения генератора (время расчета после 25 сек. на рис.18). Коррекция параметров оборудования для испытаний по результатам моделирования испытаний позволила проводить испытания без аварийных отключений.

Таким образом, результаты расчетов разработанных моделей электромагнитных частей реакторов различного конструктивного исполнения, моделей испытательного оборудования и моделей, имитирующих различные виды заводских испытаний реакторов, хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными в процессе заводских испытаний.

С использованием разработанных моделей оборудования УПШР создана модель для исследования режимов работы УПШР в условиях эксплуатации. Функциональная схема модели приведена на рис.19, пример результатов моделирования – на рис.20.

В состав модели входят:

1. Оборудование УШР – три электромагнитные части трехфазного реактора пофазного исполнения (1, 2 и 3 на рис.19) и два полупроводниковых преобразователя (4 и 5 на рис.19). Модели оборудования УПШР аналогичны моделям, приведенным ранее в настоящей статье.
2. Высоковольтные выключатели (6, 7, 8 и 9 на рис.19), в качестве моделей которых используются SimPowerSystem-блоки Three-Phase Breaker.
3. Линии электропередач (10, 11, и 12 на рис.19), в качестве моделей которых используются SimPowerSystem-блоки Three-Phase PI Section Line.

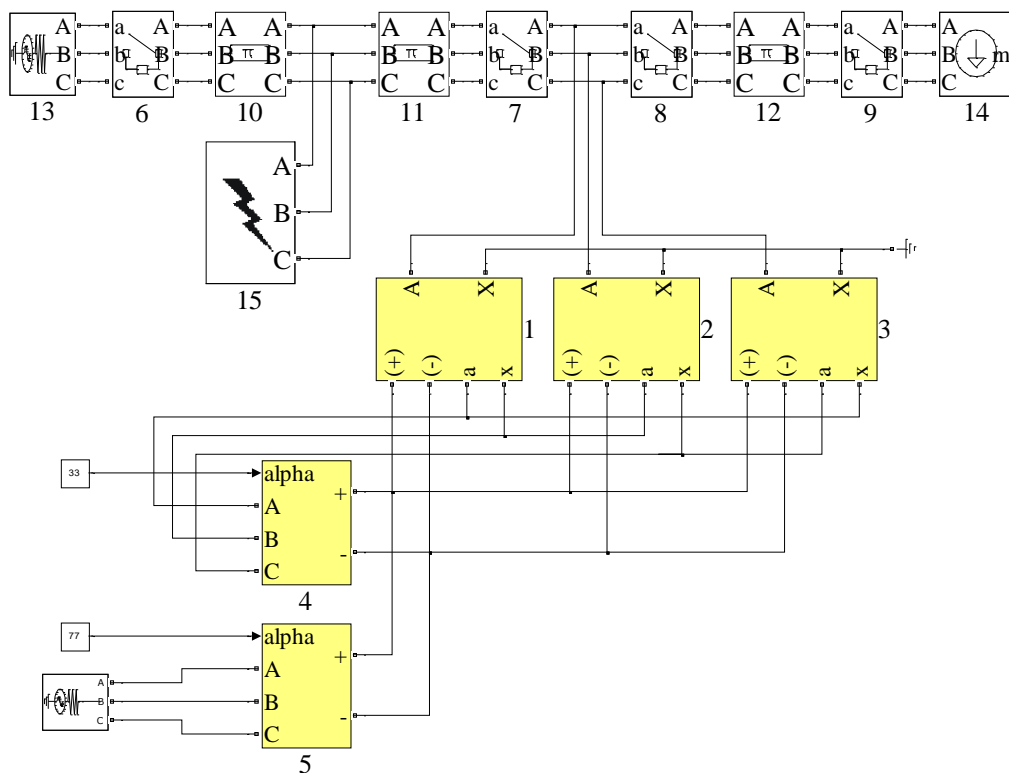


Рис.19. Модель для исследования режимов работы УПШР в эксплуатации.

4. Эквивалентные элементы электроэнергетической системы – источник напряжения (13 на рис.19) и нагрузка (14 на рис.19). В качестве моделей источника и нагрузки используются SimPowerSystem-блоки Three-Phase Source и Three-Phase Dynamic Load соответственно.

5. Элемент, имитирующий аварийные режимы работы линии (15 на рис.19), в качестве модели которого используется SimPowerSystem-блок Three-Phase Fault.

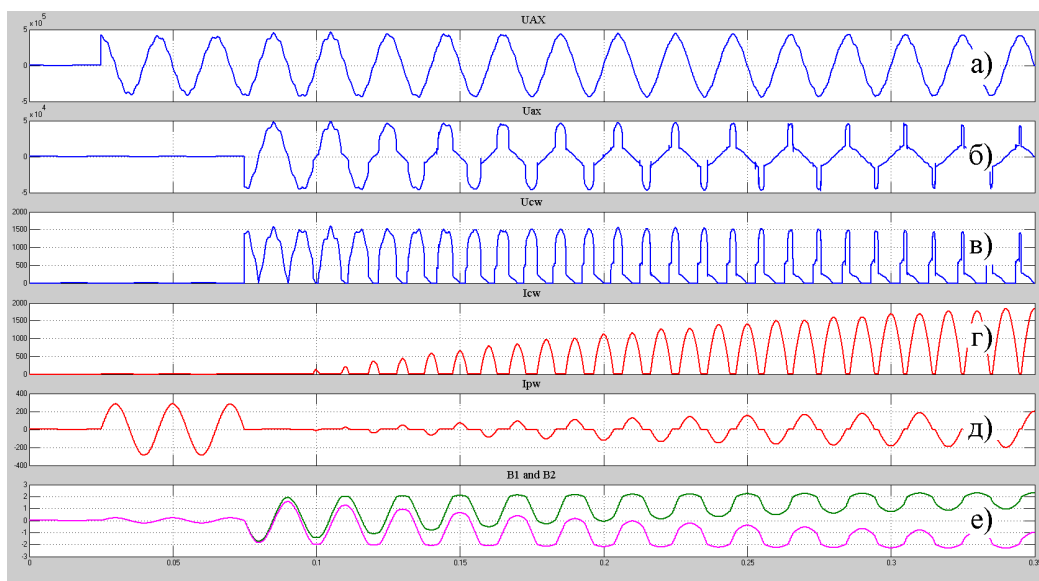


Рис.20. Пример результатов моделирования режимов работы УПШР (фаза А)
а) напряжение на СО; б) напряжение на КО; в) напряжение на ОУ;
г) ток в ОУ; д) ток в СО; е) индукции в полустержнях.

Разработка и расчет подобных моделей для различных режимов работы (регулирования, коммутационных, аварийных) позволит оптимизировать параметры и алгоритмы работы оборудования УШР, что приведет к повышению их надежности при эксплуатации.

Список литературы:

1. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008 – с.288.
2. Simulink. Model-Based and System-Based Design. Using Simulink. The Math Works, Inc. USA, 2002.

© Copyright 2014 ПАО «Запорожтрансформатор». Документ, или его части, не может копироваться, распространяться или использоваться иным образом без предварительного письменного согласия ПАО «Запорожтрансформатор».