Ковалев Лев Кузьмич окончил факультет «Энергомашиностроение» МВТУ им. Баумана в 1964 г. и механико-математический факультет МГУ в 1968 г. В 1996 г. защитил докторскую диссертацию по авиационно-космической электроэнергетике в МАИ. Профессор, заведующий кафедрой «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Ковалев Константин Львович окончил в 1993 г. факультет «Экспериментальная и теоретическая физика» Московского инженерно-физического института. В 2005 г. защитил докторскую диссертацию по сверхпроводниковым электрическим машинам. Профессор, ведущий научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Тулинова Екатерина Евгеньевна окончила факультет «Системы управления, информатика и электроэнергетика» МАИ в 2011 г. Инженер кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

* * *

Разработка численно-аналитических моделей управляемых шунтирующих реакторов с подмагничиванием

КАРПОВ В.Н., КИСЕЛЕВ А.Н.

Представлены численно-аналитические модели управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов (УШРП) двух конструкций. Разработана численно-аналитическая модель УШРП с учётом бронестержневого магнитопровода. Проанализировано влияние боковых ярм магнитопровода на параметры расчёта. Разработана аналитическая модель для расчёта установившегося режима работы УШРП. Выполнено сопоставление расчётных зависимостей с результатами системных испытаний.

К л ю ч е в ы е с л о в а: *энергосистема, управляемый реактор, модели, расчёт установившегося режима*

Numerical-analytic models of two designs of bias-controlled shunt reactors (BCSRs) are presented. A numeric-analytic model of a BCSR with a five-legged magnetic core is developed. The influence of the magnetic core lateral yokes on the calculation parameters is analyzed. An analytical model for calculating steady-state operating conditions of a BCSR is developed. The calculation dependences are compared with the results of system tests.

K e y w o r d s: *power system, controlled reactor, models, calculation of steady-state operating conditions*

Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы (УШРП) являются устройствами компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения, включаемыми непосредственно в сеть высокого напряжения. Управление реактивной мощностью, потребляемой УШРП, осуществляется путём изменения степени подмагничивания магнитопровода постоянным магнитным потоком, создаваемым током вентильного преобразователя, работающего на стороне низшего напряжения (НН) УШРП.

К настоящему времени в энергосистемах России и ближнего зарубежья эксплуатируются реакторы с подмагничиванием двух конструкций: УШРП с отдельной обмоткой подмагничивания [1] и УШРП без отдельной обмотки подмагничивания [2]. В литературе встречаются описания математических моделей УШРП с отдельной обмоткой подмагничивания, основанных на разных способах представления цифровых моделей реактора [3, 4]. Авторами статьи разработаны численно-аналитические модели УШРП, базирующиеся на общем принципе моделирования и подходящие для цифрового представления реакторов обеих конструкций различной степени детализации [5, 6]. Для верификации разработанных моделей использовались результаты системных испытаний УШРП 500 кВ с отдельной обмоткой подмагничивания [7].

Принципиальная электрическая схема УШРП 500 кВ с отдельной расщеплённой обмоткой подмагничивания показана на рис. 1. В отличие от схем реакторов низших классов напряжения, имеющих отдельную компенсационную обмотку (КО) и трёхфазный полупроводниковый преобразователь (ПП), в данной схеме используются комбинированная обмотка управления (ОУ), совмещающая в себе функции КО, и три однофазных ПП. В этом случае преобразователи подключаются через однофазные промежуточные трансформаторы (ОМП) между средними эквипотенциальными точками секций ОУ каждого из двух стержней магнитопроводов фаз реактора, а фазы ОУ соединяются в треугольник. Сетевая обмотка (СО) фазы данного УШРП охватывает оба стержня с потенциальным вводом в середине обмотки. На схеме 3хРОДУ-60000/500 кВ – электромагнитная часть реактора типа РТУ-180000/500 пофазного исполнения; ТА1—ТА8 встроенные трансформаторы тока; ЗТМ – заземляющий трехфазный трансформатор с токоограничивающим реактором (ТОР) в каждой фазе и встроенными трансформаторами тока ТА9—ТА11; САУ – система автоматического управления; ШС – шкаф вторичных соединений показан условно, для пофазного РТУ шкафы управления (вторичных соединений) расположены на баке каждой фазы РОДУ.

Дополнительно устанавливаемое оборудование, не входящее в комплект поставки: выключатели $B_{\text{со}}$ — сетевой; $B_{\text{оу}}$ — обмотки управления (пофазноуправляемый, нормально отключен, применяется в специально оговоренных случаях: гашение тока дуги в паузе ОАПВ или при кратковременной двукратной перегрузке реактора по мощности); $B_{\text{тм3}}$ — трехполюсный выключатель (нормально отключен); трансформаторы напряжения: TV1 – шин 500 кВ; TV2 35 кВ – обмотки управления. (На схеме не указаны ограничители перенапряжений (ОПН) на стороне 500 и 35 кВ.)

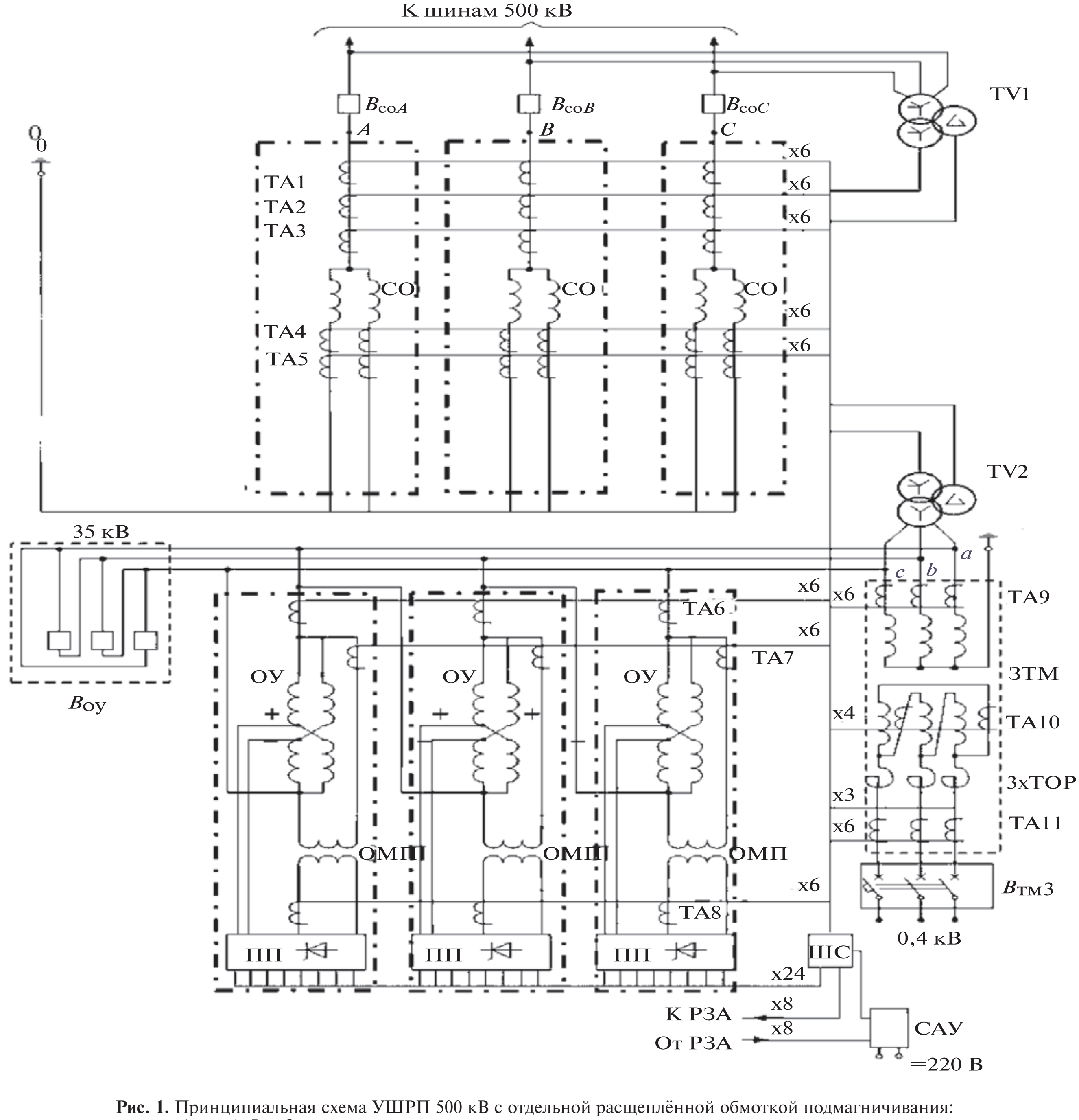

Рис. 1. Принципиальная схема УШРП 500 кВ с отдельной расщеплённой обмоткой подмагничивания: - × — фазы *A, B* и *C* электромагнитной части реактора; ---- — отдельно стоящее силовое оборудование (ТМЗ и ТОР в одном баке, шунтирующий выключатель 35 кВ)

В соответствии с общепринятым представлением магнитного потока обмоток на ферромагнитном сердечнике в виде потока рассеяния и потока в сердечнике [8] индуктивности обмоток УШРП представляются в виде суммы двух составляющих: $L = L_s + L_{ст}$, обусловленных магнитным потоком рассеяния L_s и магнитным потоком в стержне магнитопровода $L_{ст}$. При работе УШРП в отличие от неуправляемых реакторов или силовых трансформаторов используется область насыщения кривой намагничивания стали, что приводит к нелинейной зависимости значений $L_{ст}$ от тока.

Дифференциальное уравнение, описывающее электромагнитные процессы в обмотке реактора:

$$L\,di/dt + Ri = u, \tag{1}$$

где L, R, i и u — индуктивность, активное сопротивление, ток и напряжение обмотки соответственно.

В схеме замещения УШРП его обмотки можно представить в виде управляемых источников тока (рис. 2,*а*). Математическую модель УШРП можно создать, представив каждую из секций обмоток реактора управляемым источником тока. Однако подобный подход приводит к возникновению особых разрезов (разрезов, все ветви которых представляют собой источники тока). К тому же, при общепринятом допущении о параллельности силовых линий магнитного поля стержню в пределах окна магнитопровода [8] и расположении одинаковых секций обмотки (с собственными индуктивностями $L_1 = L_2 = L$) на стержне одна под другой, в любой момент времени с каждой из них сцепляется один и тот же магнитный поток и коэффициент их магнитной связи K равен единице. Тогда значение взаимной индуктивности таких секций обмотки будет равно их собственным индуктивностям

$$|M_{12}| = K\sqrt{L_1 L_2} = L \tag{2}$$

и дифференциальные уравнения таких секций будут линейно зависимыми.

Наличие особых разрезов в схеме замещения электрической цепи и алгебраические связи между отдельными уравнениями, обусловленные (2), приводят к тому, что система дифференциальных уравнений, описывающая электромагнитные процессы в УШРП, является вырожденной, что, в свою очередь, ведёт к невозможности или высокой сложности получения численного решения подобной системы непосредственно.

В результате для применения стандартных пакетов прикладных программ моделирования электрических цепей требуется выполнение предварительных аналитических преобразований системы дифференциальных уравнений реактора, т.е. разработка численно-аналитических моделей УШРП.

Математические модели УШРП. Электрическая схема замещения фазы УШРП 500 кВ с отдельной расщеплённой обмоткой подмагничивания показана на рис. 3. Одноимённые зажимы обозначены звёздочками и применена следующая система индексов: первый индекс соответствует типу обмотки (сетевая — «с», управления — «у», компенсационная — «к»); второй — стержню магнитопровода (первый — «I», второй — «II»); третий — секции обмотки данного стержня (первая — «1», вторая — «2»).

Система дифференциальных уравнений, описывающая электромагнитные процессы в фазе УШРП, записанная в матричной форме, согласно принятым условно-положительным направлениям токов будет иметь вид, аналогичный (1):

$$\mathbf{L}'\,d\mathbf{i}/dt + \mathbf{R}'\,\mathbf{i} = \mathbf{u}, \tag{3}$$

где $\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_с & M_I & M_I & -M_{II} & -M_{II} \\ M_I & L_{уI} & M_{I12} & 0 & 0 \\ M_I & M_{I12} & L_{уI} & 0 & 0 \\ -M_{II} & 0 & 0 & L_{уII} & M_{II12} \\ -M_{II} & 0 & 0 & M_{II12} & L_{уII} \end{bmatrix}$

$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_с \\ i_{уI1} \\ i_{уI2} \\ i_{уII1} \\ i_{уII2} \end{bmatrix}$ $R = \begin{bmatrix} R_с/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_у & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_у & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_у & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_у \end{bmatrix}$ $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_с \\ u_{уI1} \\ u_{уI2} \\ u_{уII1} \\ u_{уII2} \end{bmatrix}$

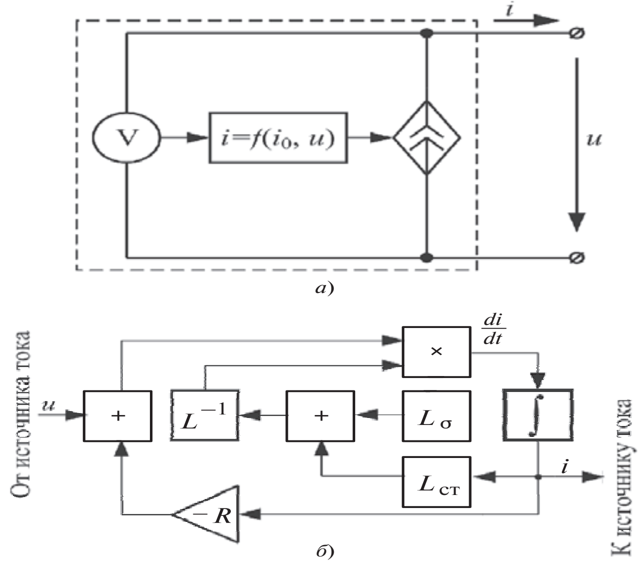

Рис. 2. Расчётная схема замещения (*а*) и структурная схема представления дифференциального уравнения обмотки УШРП в операторной форме (*б*)

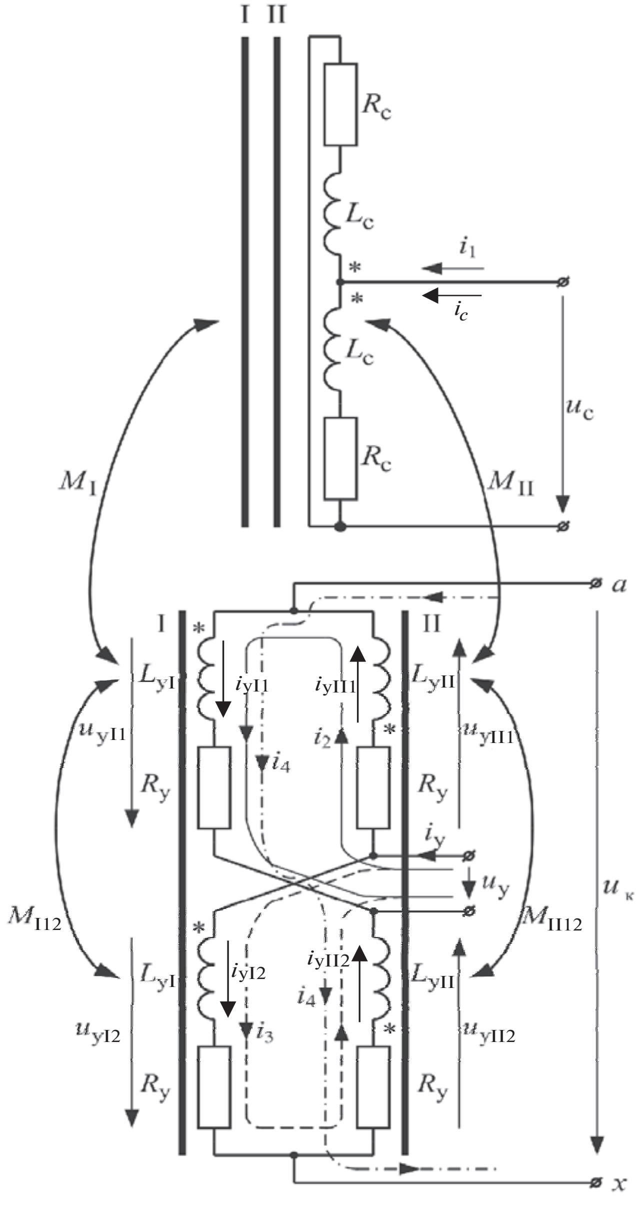

Рис. 3. Электрическая схема замещения фазы УШРП с отдельной расщеплённой обмоткой подмагничивания: ----, - × — контурные токи

С учётом (2) $\left|M_{I12}\right| = L_{yI}$, $\left|M_{II12}\right| = L_{yII}$, и система становится вырожденной с рангом 3. Использование системы контурных токов (см. рис. 3) для данной системы даёт возможность перейти от пяти переменных к четырём. Исключить ещё одну линейно зависимую переменную позволяет преобразование уравнений с учётом соотношений между напряжениями секций обмоток реактора:

$$\begin{aligned} &u_{yI1} + u_{yII1} = u_y; \\ &u_{yI2} + u_{yII2} = u_y; \\ &u_{yI1} - u_{yII2} = u_к. \end{aligned} \tag{4}$$

В результате система дифференциальных уравнений с пятью переменными $(i_c, i_{yI1}, i_{yI2}, i_{yII1}, i_{yII2})$ преобразуется к системе дифференциальных уравнений с тремя независимыми переменными (i_1, i_2, i_4) и алгебраическому уравнению связи $i_3 = i_2 + i_4$ (составляющие преобразованной системы уравнений приведены в приложении — (П-1)).

В большинстве методов численного интегрирования дифференциальных уравнений, а также в современных средствах цифрового моделирования процессов в электрических цепях используется запись уравнений (систем уравнений) в стандартной форме Коши:

$$d\mathbf{i}/dt = \mathbf{L}^{-1} \times (\mathbf{u} - \mathbf{R} \times \mathbf{i}).$$

Для перехода к данной форме записи требуется обращение матрицы индуктивностей **L**. Однако преобразованная система дифференциальных уравнений УШРП является плохо обусловленной (число обусловленности по спектральной норме может достигать 10^5). Численное обращение подобных матриц приводит к необходимости многократного увеличения точности расчёта на каждом шаге и резкому росту погрешности и времени расчёта. Аналитические методы обращения не применимы для плохо обусловленных систем.

Использование системы контурных токов (см. рис. 3) с учётом соединения фаз ОУ в треугольник (рис. 1) позволяет представить составляющие совместной системы уравнений трёх фаз УШРП в виде блочных матриц с окаймлением [9] (составляющие системы уравнений приведены в приложении (П-2)). В этом случае задача определения обратной матрицы индуктивностей совместной системы **L** (размерностью 7×7) с помощью формулы Фробениуса сводится к задаче определения обратной блочно-диагональной матрицы **A**, состоящей из трёх матриц (размерностью 2×2 с числом обусловленности по спектральной норме около 10^3), и к алгебраическим операциям с матрицами:

$$\mathbf{L}^{-1} = \frac{1}{4\tilde{\mathbf{H}}} \begin{bmatrix} 4\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{A}}^{-1} + 2\tilde{\mathbf{B}}' \tilde{\mathbf{C}} \times \tilde{\mathbf{A}}^{-1} & -2\tilde{\mathbf{B}}' \\ -2\tilde{\mathbf{C}}' & 1 \end{bmatrix}$$

Помимо возможности использования аналитических методов обращения уменьшение числа обусловленности способствует увеличению устойчивости и точности численного решения системы дифференциальных уравнений, а также уменьшению времени расчёта.

Математическая модель УШРП с учётом бронестержневого магнитопровода. Для определения влияния на электромагнитные процессы в УШРП боковых ярм магнитопровода и распределения по нему составляющих магнитного потока была разра-

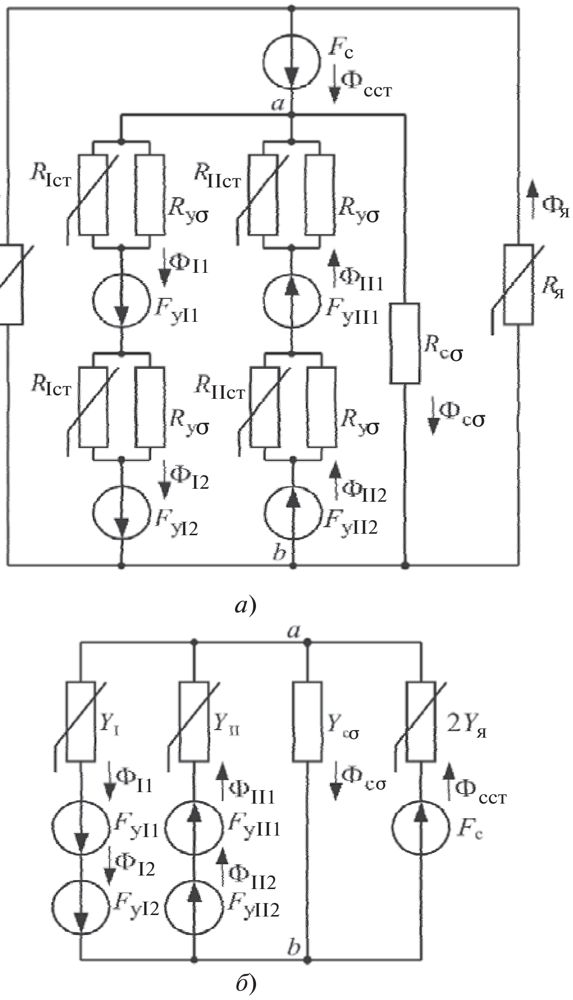

Рис. 4. Электрическая схема замещения магнитной системы фазы УШРП с отдельной расщеплённой обмоткой подмагничивания: *а* – исходная; *б* – преобразованная

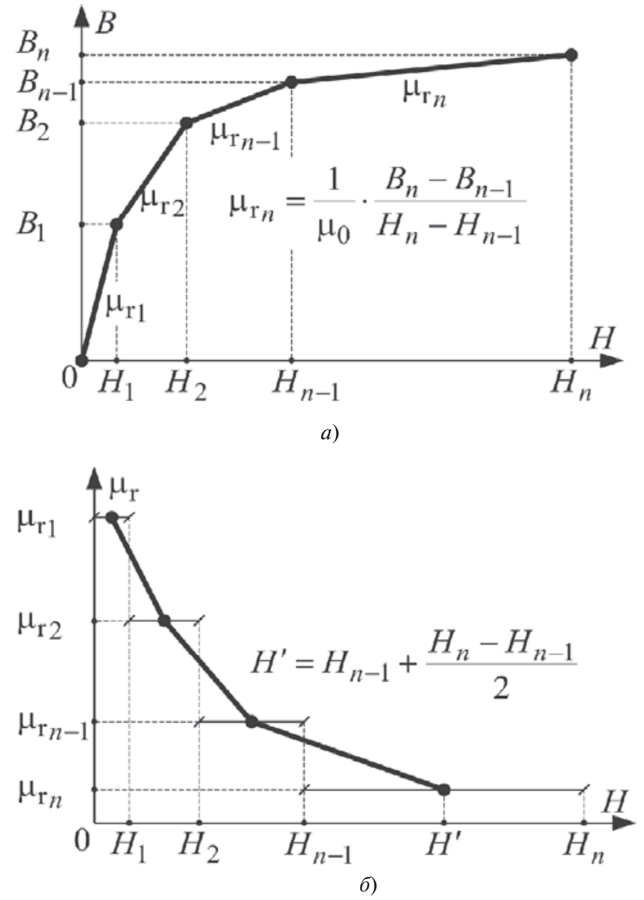

Рис. 5. К получению кусочно-линейной зависимости $\mu_r = f(H)$ стали магнитопровода

ботана математическая модель фазы УШРП 500 кВ с отдельной расщеплённой ОУ с подробным представлением магнитной системы (рис. 4,*а*).

Одной из основных характеристик магнитопроводов является кривая намагничивания стали. Кусочно-линейная аппроксимация этой кривой позволяет определить дискретные значения относительной магнитной проницаемости на каждом линейном интервале (рис. 5,*а*) и получить кусочно-линейную зависимость $\mu_r = f(H)$ (рис. 5,*б*).

При подобном подходе точность аппроксимации напрямую определяется шагом дискретизации, т.е. числом используемых опорных точек, и появляется возможность применения методов анализа линейных цепей применительно к каждому из линейных участков.

Свернув схему на рис. 4,*а* к виду по рис. 4,*б* для каждого линейного участка аппроксимации кривой намагничивания с помощью метода наложения и эквивалентного генератора, можно записать систему уравнений по второму закону Кирхгофа для магнитной цепи:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{с.ст} \\ \Phi_{I1} \\ \Phi_{I2} \\ \Phi_{II1} \\ \Phi_{II2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_с & Y_{с\text{-}уI} & Y_{с\text{-}уI} & -Y_{с\text{-}уII} & -Y_{с\text{-}уII} \\ Y_{с\text{-}уI} & Y_{уI} & Y_{1\text{-}2I} & Y_{I\text{-}II} & Y_{I\text{-}II} \\ Y_{с\text{-}уI} & Y_{1\text{-}2I} & Y_{уI} & Y_{I\text{-}II} & Y_{I\text{-}II} \\ -Y_{с\text{-}уII} & Y_{I\text{-}II} & Y_{I\text{-}II} & Y_{уII} & Y_{1\text{-}2II} \\ -Y_{с\text{-}уII} & Y_{I\text{-}II} & Y_{I\text{-}II} & Y_{1\text{-}2II} & Y_{уII} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_с \\ F_{уI1} \\ F_{уI2} \\ F_{уII1} \\ F_{уII2} \end{bmatrix} \qquad (6)$$

где $Y_с = 2Y_я(Y_I + Y_{II} + Y_{c\sigma})/Y_\Sigma$;

$Y_{уI} = Y_I(Y_{II} + Y_{c\sigma} + 2Y_я)/Y_\Sigma$;

$Y_{уII} = Y_{II}(Y_I + Y_{c\sigma} + 2Y_я)/Y_\Sigma$;

$Y_{I\text{-}II} = Y_I Y_{II}/Y_\Sigma$; $Y_{с\text{-}уI} = 2Y_я Y_I/Y_\Sigma$;

$Y_{с\text{-}уII} = 2Y_я Y_{II}/Y_\Sigma$; $Y_\Sigma = Y_I + Y_{II} + Y_{c\sigma} + 2Y_я$;

$Y_{1-2I} = Y_{уI}$; $Y_{1-2II} = Y_{уII}$; $Y_{c\sigma} = \mu_0 S_р/l$;

$Y_я = \mu_0 \mu_{rяk} S_я/l$; $Y_I = \mu_0(\mu_{rIk} S_{ст} + S_{у\sigma})/l$;

$Y_{II}=\mu_0(\mu_{rIIk}S_{ст}+S_{y\sigma})/l$ — собственные и взаимные магнитные проводимости ветвей; $S_р=S_{c\sigma}-S_{y\sigma}$ — площадь межобмоточного канала рассеяния; $S_{c\sigma}$ и $S_{y\sigma}$ — площади рассеяния СО и ОУ соответственно; $S_я$ — площадь поперечного сечения бокового ярма; $\mu_{rяk}$, μ_{rIk}, μ_{rIIk} — относительные магнитные проницаемости бокового ярма и стержней в k-й точке кривой намагничивания соответственно; l — высота стержня (бокового ярма) магнитопровода; μ_0 — магнитная постоянная.

Подстановка (6) в закон электромагнитной индукции с учётом падений напряжения на активных сопротивлениях обмоток позволяет получить систему уравнений, аналогичную (3) как по виду, так и по числу переменных (составляющие данной системы уравнений приведены в приложении (П-4)). Используя систему контурных токов с учётом (4), данную систему легко преобразовать в систему дифференциальных уравнений с тремя независимыми переменными и алгебраическое уравнение связи, аналогичные по виду таковым для случая математической модели без учёта бронестержневого магнитопровода (составляющие преобразованной системы приведены в приложении (П-5)). Тогда для обоих этих случаев можно использовать одну и ту же математическую модель с введением в неё дополнительных составляющих собственных индуктивностей секций ОУ (M_{I-II}), обусловленных взаимоиндуктивной связью при учёте боковых ярм магнитопровода УШРП.

В цепи рис. 4,*б* всего два узла, и систему нелинейных уравнений легко можно свести к одному уравнению с помощью следующих выражений:

$$\begin{cases}\Phi_{с.ст}=H2B[(F_с-U_{мab})/l]\cdot S_я;\\ \Phi_{Iст}=H2B[(F_{I_1}+F_{I_2}+U_{мab})/l]\cdot S_{ст};\\ \Phi_{IIст}=H2B[(F_{II_1}+F_{II_2}+U_{мab})/l]\cdot S_{ст};\end{cases} \qquad (7)$$

$$\begin{cases}\Phi_{c\sigma}=\mu_0 S_{c\sigma}U_{мab})/l;\\ \Phi_{I\sigma}=\mu_0 S_{y\sigma}(F_{I_1}+F_{I_2}+U_{мab})/l;\\ \Phi_{II\sigma}=\mu_0 S_{y\sigma}(F_{II_1}+F_{II_2}+U_{мab})/l,\end{cases}$$

где $H2B$ — функция, определяющая по заданной кривой намагничивания индукцию в стали магнитопровода в зависимости от напряжённости магнитного поля; $U_{мab}$ — магнитное напряжение между точками a и b магнитопровода.

Подставив (7) в первый закон Кирхгофа для магнитной цепи, записанный относительно узла a, получим нелинейное уравнение с одной переменной $U_{мab}$:

$$H2B[(F_с-U_{мab})/l]\cdot S_я-(H2B[(F_{I1}+F_{I2}+U_{мab})/l]-$$

$$-H2B[(F_{II1}+F_{II2}+U_{мab})/l]\cdot S_{ст}-\frac{\mu_0}{l}\times$$

$$\times[(F_{I1}+F_{I2}-F_{II1}-F_{II2})S_{y\sigma}+(S_{c\sigma}+2S_{y\sigma})U_{мab}]=0.$$

Решение этого уравнения на каждом шаге интегрирования позволяет находить мгновенные значения относительной магнитной проницаемости стержней и ярм магнитопровода, необходимые для расчёта индуктивностей обмоток, а также распределение магнитных потоков.

Анализ влияния учёта боковых ярм магнитопровода на точность расчёта переходных процессов в УШРП был выполнен сопоставлением ряда расчётов на цифровых моделях различной детализации. Относительная разница между амплитудными и действующими значениями токов и напряжений, рассчитанными на моделях с учётом и без учёта боковых ярм магнитопровода не превысила 1%. В качестве примера приведём результаты расчёта переходного процесса сброса реактивной мощности с номинального значения до значения, соответствующего холостому ходу (х.х.) длительностью 1 с. В этом случае амплитудные значения сетевого тока фазы *А* в первом и последнем колебаниях без учёта в модели боковых ярм магнитопровода составляют приблизительно 295,1 и 234,9 А, а с их учётом — 295,4 и 233,6 А соответственно. При этом расчёт во втором случае занимает примерно в 43 раза большее время, чем в первом. Из этого следует, что целесообразно не учитывать в математических моделях УШРП боковые ярма магнитопровода и допустимо представлять отдельные его стержни магнитно-независимыми.

Аналитическая модель для установившихся режимов работы УШРП. Под аналитической моделью установившегося режима УШРП понимаются аналитические выражения временн*ы*х зависимостей токов и напряжений обмоток реактора, записанные в параметрической форме относительно состояния насыщения стержней магнитопровода, позволяющие получать кривые токов и напряжений любого установившегося режима УШРП.

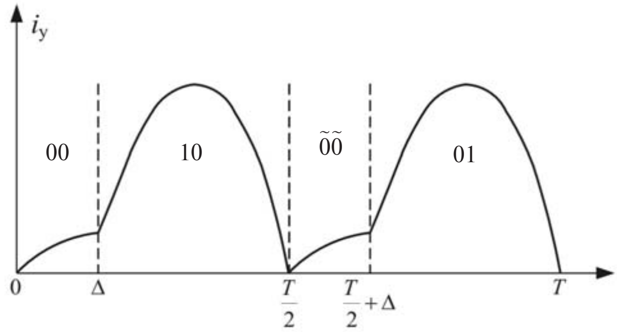

Рис. 6. Разбивка периода напряжения сети на характерные временн*ы*е интервалы

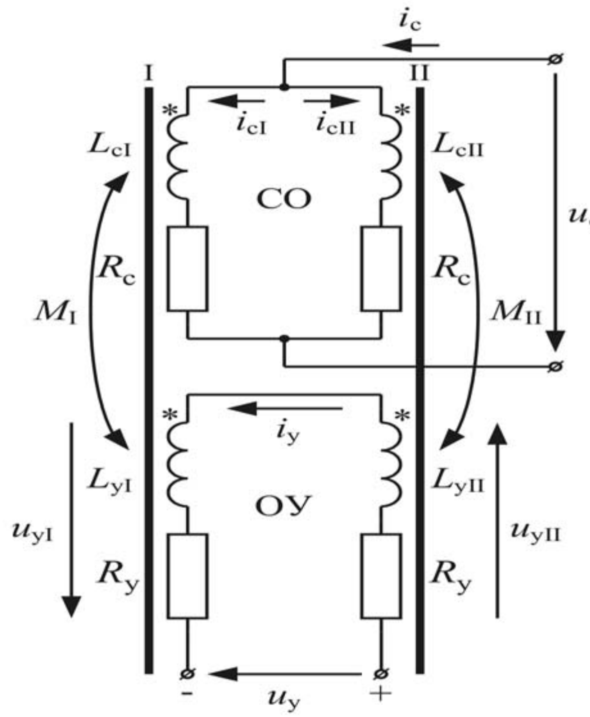

Рис. 7. Принципиальная схема УШРП с отдельной нерасщеплённой ОУ (КО не показана)

Для разработки аналитической модели примем, что кривая намагничивания стали состоит из двух линейных участков. Тогда при работе фазы УШРП стержни её магнитопровода могут пребывать в насыщенном или ненасыщенном состояниях в зависимости от значений переменного и постоянного магнитных потоков. По результатам анализа работы УШРП 500 кВ в различных режимах с помощью расчётных цифровых моделей и данных системных испытаний было установлено, что каждая смена магнитных состояний стержней происходит через интервал времени, в течение которого обе секции находятся в ненасыщенном состоянии. Размер этого интервала времени уменьшается от $T/2$ до близкого к нулю значения по мере изменения режима работы УШРП от х.х. до номинального. Введём параметр Δ, равный интервалу пребывания обеих секций расщеплённого стержня УШРП в ненасыщенном состоянии. Тогда период напряжения сети можно разбить на четыре участка в соответствии с характерными магнитными состояниями стержней (рис. 6) и ввести следующую систему индексов:

не насыщены оба стержня — 00, $t \in (0;\Delta)$;

насыщен первый стержень и ненасыщен второй — 10, $t \in (\Delta; T/2)$;

не насыщены оба стержня — $\tilde{0}\tilde{0}$, $t \in (T/2; T/2+\Delta)$;

не насыщен первый и насыщен второй стержень — 01 $t \in (T/2+\Delta; T)$.

Аналитическая модель установившегося режима УШРП была разработана для реактора 500 кВ с отдельной нерасщеплённой ОУ и расщеплённой СО (схема применяется в наиболее современных конструкциях УШРП 220 кВ и выше) без учёта КО (рис. 7). В случае иной схемной реализации УШРП изменится лишь вид аналитических функций при неизменности используемого подхода.

Напряжение сети представим в виде $u_c(t) = U_{cm}\sin(\omega t + \psi)$, где $\omega = 2\pi/T$ — круговая частота; ψ — фазовый сдвиг относительно сетевого тока. Напряжение $u_y(t)$, прикладываемое к ОУ, примем постоянным. Высокая добротность УШРП позволяет пренебречь активными сопротивлениями секций СО.

Система дифференциальных уравнений, описывающая электромагнитные процессы в схеме рис. 7, без учёта R_c:

$$\begin{cases} \dfrac{di_{cI}}{dt} = \dfrac{u_c}{L_{cI}} - \dfrac{M_I}{L_{cI}}\dfrac{di_y}{dt}; \\ \dfrac{di_{cII}}{dt} = \dfrac{u_c}{L_{cII}} - \dfrac{M_{II}}{L_{cII}}\dfrac{di_y}{dt}; \\ (L_{yI} + L_{yII})\dfrac{di_y}{dt} + M_I\dfrac{di_{cI}}{dt} - M_{II}\dfrac{di_{cII}}{dt} + 2R_y i_y = u_c, \end{cases} \tag{8}$$

откуда легко получить уравнение относительно тока ОУ:

$$\begin{aligned} &\left(L_{yI} + L_{yII} - \frac{M_I^2}{L_{cI}} - \frac{M_{II}^2}{L_{cII}}\right)\frac{di_y}{dt} + 2R_y i_y = \\ &= u_y + \left(\frac{M_{II}}{L_{cII}} - \frac{M_I}{L_{cI}}\right)u_c. \end{aligned} \tag{9}$$

При ненасыщенном состоянии обоих стержней собственные и взаимные индуктивности секций обмоток будут одинаковыми и выражение (9) примет вид

$$L_{экв0}di_{y0}/dt + R_{экв}i_{y0} = E_{экв0}, \tag{10}$$

где $L_{экв0} = 2(L_{y0} - M_0^2/L_{c0})$; $R_{экв0} = 2R_y$; $E_{экв0} = u_y$; L_{c0}, L_{y0} и M_0 — собственные и взаимные индуктивности секций обмоток УШРП при ненасыщенном состоянии стрежней.

Аналогичным образом выражение (9) записывается для случая одного насыщенного и одного ненасыщенного стержней УШРП:

$$L_{экв1}di_{y1}/dt + R_{экв}i_{y1} = E_{экв1}, \tag{11}$$

где $L_{экв1} = L_{y1} + L_{y0} - M_1^2/L_{c1} - M_0^2/L_{c0}$;

$E_{экв1}=u_у\pm(M_0/L_{c0}-M_1/L_{c1})u_c$; L_{c1}, $L_{у1}$ и M_1 – собственные и взаимные индуктивности секций обмоток УШРП, соответствующие насыщенному состоянию одного из стрежней.

В выражении для $E_{экв1}$ «минусу» соответствует второй полупериод напряжения сети u_c (противоположной полярности), поэтому выражение для $E_{экв1}$ не зависит от того, какой из стержней находится в насыщенном состоянии, а период пульсаций тока ОУ составляет половину периода напряжения сети. Поэтому на периоде тока ОУ можно выделить всего два характерных интервала, отвечающих ненасыщенному состоянию обоих стержней (индекс 0) и переходу одного из стержней в насыщенное состояние (индекс 1) соответственно.

Уравнения (10) и (11) для каждого из линейных участков кусочно-линейной кривой намагничивания стали являются линейными неоднородными первого порядка. Общее решение этого типа уравнений записывается в виде

$$i_{уk}(t)=i_{уk}(t_0)e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв k}}(t-t_0)}+\frac{1}{L_{экв k}}\int_{t_0}^{t}E_{экв k}(\tau)e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв k}}(t-t_0-\tau)}d\tau, \qquad (12)$$

где индекс k соответствует одному из характерных состояний магнитной системы (0 или 1); t_0 – начальная точка области определения соответствующей функции.

В случае ненасыщенного состояния стержней (12) принимает вид

$$i_{у0}(t)=i_у(0)e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв0}}t}+\frac{u_у}{R_{экв}}\left(1-e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв0}}t}\right), \qquad (13)$$

где за начало отсчёта $i_у(t)$ был принят нулевой момент времени ($t_0=0$).

Аналогичным образом выражение для тока управления при одном насыщенном и одном ненасыщенном стержнях записывается как

$$i_{у1}(t)=i_{у0}(\Delta)e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}(t-\Delta)}+\frac{u_у}{R_{экв}}\left(1-e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}(t-\Delta)}\right)\times$$

$$\times e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}\Delta}-Km_1U_{cm}e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}\Delta}\{\cos(\omega t+\psi)-m_0\sin(\omega t+\psi)-$$

$$-[\alpha_1(\Delta)\cos(\psi)-\alpha_2(\Delta)\sin(\psi)]e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}(t-\Delta)}\}, \qquad (14)$$

а среднее за период значение тока ОУ можно определить интегрированием (13) и (14) в пределах $(0,\Delta)$ и $(\Delta,T/2)$ соответственно:

$$I_{у.ср}(\Delta)=\frac{2}{T}\left\{\alpha_4(\Delta)i_у(0)+\frac{u_у}{R_{экв}}\times\right.$$

$$\times\left[\Delta+\alpha_3(\Delta)-\alpha_4(\Delta)+\left(\frac{T}{2}-\Delta\right)e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}\Delta}\right]+$$

$$+\frac{Km_1U_{cm}}{\pi}\{[1+\alpha_1(\Delta)-\alpha_2(\Delta)\alpha_5(\Delta)]\sin(\psi)+[m_0+$$

$$\left.+\alpha_2(\Delta)+\alpha_1(\Delta)\alpha_5(\Delta)]\cos(\psi)]\}e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}\Delta}\right\} \qquad (15)$$

(соотношения для определения элементов $\alpha_{1,2,\dots}$, m_0, m_1, K, K_0, K_1 и $i_{у1}(t_0)$ в (14) и (15) приведены в приложении (П-6)).

Интегрирование первых двух уравнений системы в пределах от t_0 до t позволяет получить общее выражение для токов секций СО:

$$i_{cI,II\,j}(t)=i_{cI,II\,j}(t_0)-\frac{U_{cm}}{\omega L_{c_j}}[\cos(\omega t+\psi)-\cos(\omega t_0+\psi)]\pm$$

$$\pm K_j[i_{у\zeta}(t)-i_{у\zeta}(t_0)], \qquad (16)$$

где разность/сумма соответствуют секциям СО первого/второго стержней соответственно; j определяется магнитным состоянием соответствующего стержня (0,1); $\zeta=1$ – при насыщении одного из стержней на данном интервале времени и $\zeta=0$ – в противном случае.

На втором полупериоде напряжения сети для функций тока ОУ в (16) следует использовать временн**о**й сдвиг вправо по оси абсцисс на $T/2$.

На основании (16) нетрудно записать выражения для токов секций СО на всех четырёх интервалах периода сети (см. приложения), а чередование магнитных состояний стержней с периодичностью $T/2$ ($i_{cI}(\Delta)=-i_{cII}(T/2+\Delta)$ или $i_{cI}(T/2)=-i_{cII}(T)$) позволяет определить связь начальных значений токов секций СО:

$$i_{cI}(0)+i_{cII}(0)=-2U_{cm}\cos(\psi)/\omega L_{c0}. \qquad (17)$$

Подстановка (17) в (П-7) для токов секций СО с учётом условия $i_c=i_{cI}+i_{cII}$ приводит к исключению начальных значений токов секций СО и записи функций сетевого тока УШРП для четырёх временн**ы**х интервалов периода напряжения сети в следующем виде:

$$\begin{cases} i_{c00}(t) = -2\dfrac{U_{cm}}{\omega L_{c0}}\cos(\omega t+\psi); \\ i_{c10}(t) = -\dfrac{U_{cm}}{\omega L_{c0}L_{c1}}[(L_{c0}+L_{c1})\cos(\omega t+\psi) - (L_{c0} - \\ \quad - L_{c1})\cos(\omega\Delta+\psi)] + K[i_{y1}(t) - i_{y0}(\Delta)]; \\ \tilde{i}_{c00}(t) = -\dfrac{U_{cm}}{\omega L_{c0}L_{c1}}[2L_{c1}\cos(\omega t+\psi) - (L_{c0} - L_{c1})\times \\ \quad \times\cos(\omega\Delta+\psi) - (L_{c0} - L_{c1})\cos(\psi)] - K[i_{y0}(\Delta) - i_y(0)]; \\ i_{c01}(t) = -\dfrac{U_{cm}}{\omega L_{c0}L_{c1}}[(L_{c0}+L_{c1})\cos(\omega t+\psi) - (L_{c0} - \\ \quad - L_{c1})\cos(\psi)] - K[i_{y1}\left(t - \dfrac{T}{2}\right) - i_y(0)]. \end{cases} \qquad (18)$$

Из условия периодичности функций тока секций СО ($i_{cI}(T) = i_{cI}(0)$ или $i_{cII}(T) = i_{cII}(0)$) можно получить выражение для напряжения на выводах ОУ реактора в зависимости от параметра Δ, представляющее собой сумму двух составляющих: напряжения подмагничивания и пульсаций напряжения, обусловленных трансформаторной связью с СО УШРП:

$$u_y = R_{экв}i_y(0) + R_{экв}m_2U_{cm}[\cos(\omega\Delta+\psi) + \cos(\psi)]/\alpha_6(\Delta), \qquad (19)$$

где $m_2 = (L_{c0} - L_{c1})/\omega L_{c0}L_{c1}$;

$\alpha_6(\Delta) = K[1 - \exp(-R_{экв}\Delta/L_{экв0})]$.

Подстановка (19) в условие периодичности функции тока ОУ ($i_y(T/2) = i_y(0)$) приводит к следующему уравнению:

$$A(\Delta)\sin(\psi) - B(\Delta)\cos(\psi) = C(\Delta)i_y(0) \qquad (20)$$

(выражения для $A(\Delta)$, $B(\Delta)$ и $C(\Delta)$ см. (П-8) приложения).

Значение функции $C(\Delta)$ на всей области определения не превосходит $1{,}8\cdot10^{-14}$ В$^{-1}$. Подобным значением вполне правомерно пренебречь. Тогда фаза ψ будет определяться лишь магнитными состояниями стержней магнитопровода:

$$\psi = \operatorname{arctg}(B(\Delta)/A(\Delta)). \qquad (21)$$

В любом установившемся режиме работы УШРП средневыпрямленное значение тока ОУ (совпадающее со средним за период значением тока ОУ) $I_{y.ср} = f_y(\Delta, i_y(0))$ должно соответствовать приведённому к низшей стороне средневыпрямленному значению тока СО $I_{c.ср} = n_{тр}f_c(\Delta, i_y(0))$. Тогда зависимость тока подмагничивания $i_y(0)$ от Δ можно найти в результате численной минимизации следующей разностной функции:

$\xi(\Delta, i_y(0)) = n_{тр}f_c(\Delta, i_y(0)) - f_y(\Delta, i_y(0))$ или

$$\xi(\Delta, i_y(0)) = n_{тр}\frac{1}{T}\int_0^T |i_c(\tau)|d\tau - I_{y.ср}(\Delta). \qquad (22)$$

Хорошее приближение даёт аппроксимация зависимости $i_y(0)$ от $i_y(0)$ многочленом четвёртой степени со следующими коэффициентами: $a_0 = 869{,}1$; $a_1 = -2{,}104\cdot10^5$; $a_2 = 1{,}142\cdot10^7$; $a_3 = 6{,}593\cdot10^8$; $a_4 = -5{,}436\cdot10^{10}$.

Зависимость напряжения подмагничивания $u_{пдм} = R_{экв}i_y(0)$ от параметра Δ, построенная с помощью полученных выражений, показана на рис. 8.

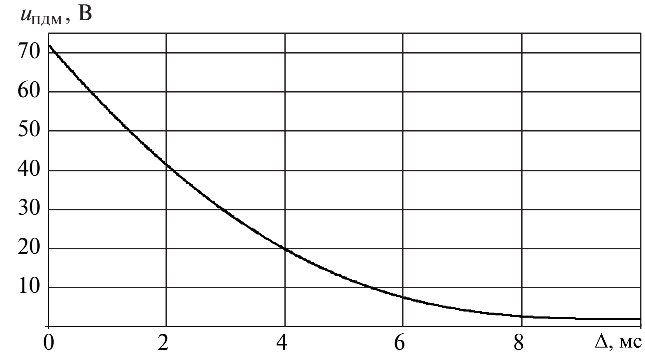

Рис. 8. Зависимость напряжения подмагничивания УШРП от параметра Δ

Нулевому значению Δ соответствует режим работы УШРП, характеризующийся мгновенной сменой магнитных состояний стержней, не реализуемый на практике в реальном устройстве. Для определения значения Δ, соответствующего номинальному режиму работы реактора, была рассчитана зависимость действующего значения основной гармоники тока СО УШРП $I_c(1)$ от напряжения подмагничивания $u_{пдм}$. Амплитуда и фаза $I_c(1)$ были определены численно через коэффициенты разложения $i_c(t)$ в тригонометрический ряд Фурье:

$$A_{1_m} = \sqrt{B_{1m}^2 + C_{1m}^2};\ \varphi_1 = \operatorname{arctg}(C_{1m}^2/B_{1m}^2),$$

где $B_{1m}^2 = \dfrac{2}{T}\displaystyle\int_0^T i_c(\tau)\sin(\omega\tau)d\tau$; $C_{1m}^2 = \dfrac{2}{T}\displaystyle\int_0^T i_c(\tau)\cos(\omega\tau)d\tau$.

При заданных параметрах УШРП номинальному режиму работы реактора соответствует $\Delta_{ном} \approx 550$ мкс. Зависимости $i_y(t)$ и $i_c(t)$ УШРП в этом режиме представлены на рис. 9. Наличие площадок в кривой сетевого тока в окрестностях пересечений ею оси абсцисс объясняется использованием кривой намагничивания с ярко выраженным изломом, что приводит к несколько завышенному содержанию высших гармонических составляющих в сетевом токе реактора. По результатам системных испытаний УШРП 500 кВ с отдельной расщеплённой ОУ подобные площадки в кривой тока СО также присутствуют, но более сглажены.

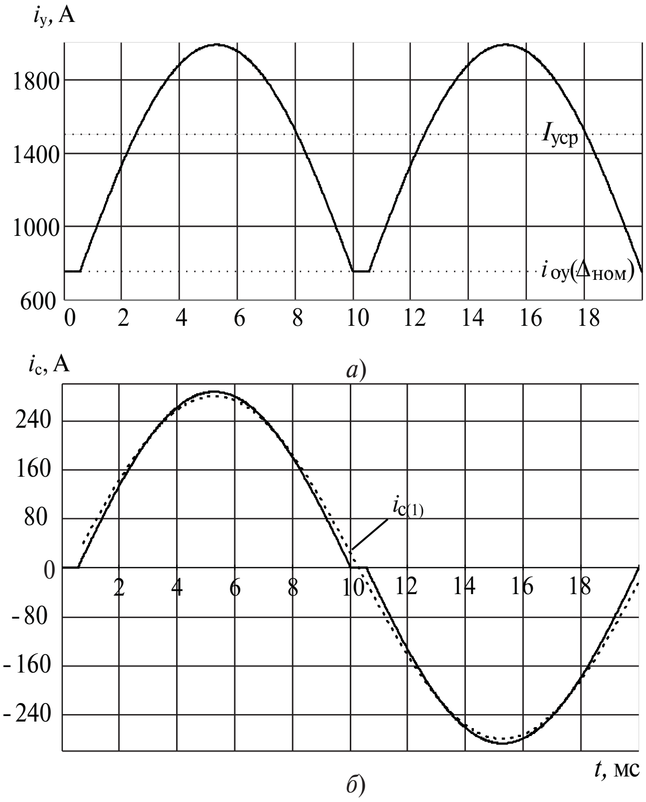

Рис. 9. Ток управления (*а*) и сетевой ток (*б*) УШРП в номинальном режиме работы

Результаты численного моделирования и сопоставление с экспериментальными данными. На основе разработанных моделей УШРП в программном комплексе Matlab\Simulink были реализованы цифровые расчётные модели, с помощью которых осуществлено численное моделирование различных режимов работы УШРП.

Для верификации разработанных моделей УШРП было выполнено сопоставление расчётных зависимостей с результатами системных испытаний реактора аналогичной конструкции [7] в одних и тех же режимах, из которого следует, что во всём диапазоне изменения реактивной мощности реактора наблюдается хорошее соответствие расчётных и экспериментальных зависимостей. Некоторое расхождение кривых отмечается лишь в режимах, близких к х.х., когда в сетевых токах УШРП преобладают высшие гармонические составляющие, точный учёт которых возможен лишь при подробном представлении ПП в модели реактора и точном воспроизведении режима сети.

На основе данных установившихся режимов работы УШРП были рассчитаны экспериментальная и расчётная регулировочные характеристики реактора (зависимости действующих значений сетевого тока УШРП от средневыпрямленных значений тока стороны НН ОМП), представленные на рис. 10. На графике построена также зависимость $I_с(1)$ от напряжения подмагничивания $u_{пдм}$, полученная с помощью аналитической модели установившегося режима работы УШРП. При расчёте относительных значений тока ОМП и напряжения $u_{пдм}$ за базисные значения были приняты ток и напряжение, соответствующие номинальному режиму работы реактора.

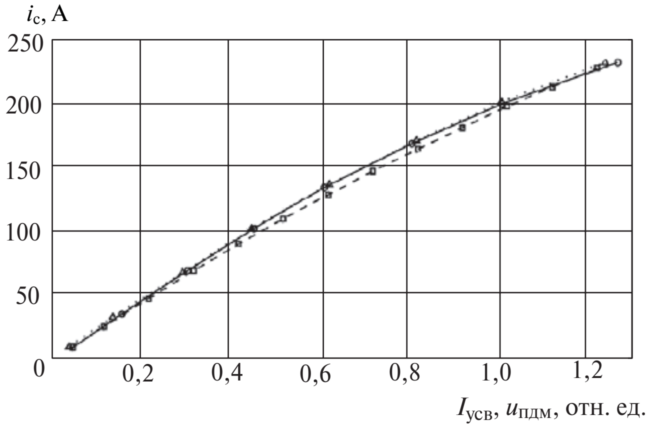

Рис. 10. Зависимость действующего значения сетевого тока УШРП 500 кВ с отдельной расщеплённой ОУ от средневыпрямленного значения тока/напряжения управления: ○ — эксперимент; △ — расчет по цифровой модели; □ — то же по аналитической

С помощью цифровых моделей УШРП 500 кВ с отдельной расщеплённой ОУ были рассчитаны процессы включения реактора на х.х. с предварительным подмагничиванием и без него с непосред-

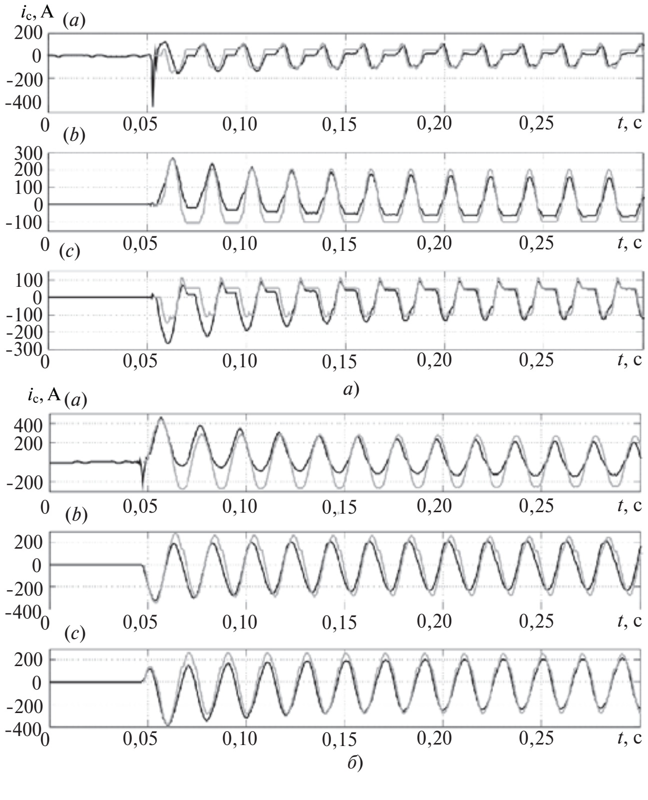

Рис. 11. Мгновенные значения сетевого тока УШРП 500 кВ с отдельной расщеплённой ОУ при его включении на х.х.: *а* — без предварительного подмагничивания; *б* — с предварительным подмагничиванием

ственным заданием уставки (без учёта регулятора САУ). Экспериментальные и расчётные осциллограммы сетевых токов УШРП для данных режимов представлены на рис. 11 (— расчётные кривые).

Как видно из рис. 11, отличие экспериментальных зависимостей от расчётных в данном случае наблюдается в основном лишь в значениях апериодической составляющей. Этот факт можно объяснить использованием в измерительной схеме при проведении системных испытаний УШРП электромагнитных трансформаторов тока, искажающих сигналы с апериодической составляющей.

Приложение. Составляющие преобразованной с помощью выражения и ввода системы контурных токов системы дифференциальных уравнений фазы УШРП 500 кВ с отдельной расщеплённой обмоткой подмагничивания:

$$\mathbf{L}=\begin{bmatrix} L_{\text{c}} & 2(M_I-M_{II}) & 2M_I \\ M_I-M_{II} & 2(L_{\text{y}I}+L_{\text{y}II}) & 2L_{\text{y}I} \\ M_I+M_{II} & 2(L_{\text{y}I}-L_{\text{y}II}) & 2L_{\text{y}I} \end{bmatrix};\quad \mathbf{i}=\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}=\begin{bmatrix} R_{\text{c}}/2 & 0 & 0 \\ 0 & 2R_{\text{y}} & R_{\text{y}} \\ 0 & 0 & R_{\text{y}} \end{bmatrix};\quad \mathbf{u}=\begin{bmatrix} u_{\text{c}} \\ u_{\text{y}} \\ u_{\text{к}} \end{bmatrix} \qquad (\text{П-1})$$

Составляющие совместной системы дифференциальных уравнений трёх фаз УШРП 500 кВ с отдельной расщеплённой обмоткой подмагничивания с учётом соединения фаз ОУ в треугольник, представленные в виде блочных матриц с окаймлением:

$$\tilde{\mathbf{L}}=\begin{bmatrix} \mathbf{A}_a & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_a \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_b & \mathbf{0} & \mathbf{B}_b \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_c & \mathbf{B}_c \\ \mathbf{C}_a & \mathbf{C}_b & \mathbf{C}_c & \mathbf{D}_a+\mathbf{D}_b+\mathbf{D}_c \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{R}}=\begin{bmatrix} \mathbf{R}' & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}'' \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}' & \mathbf{0} & \mathbf{R}'' \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}' & \mathbf{R}'' \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 3R_{\text{y}} \end{bmatrix};\quad \tilde{\mathbf{i}}=\begin{bmatrix} \mathbf{i}_a \\ \mathbf{i}_b \\ \mathbf{i}_c \\ i_4 \end{bmatrix};\quad \tilde{\mathbf{u}}=\begin{bmatrix} \mathbf{u}_a \\ \mathbf{u}_b \\ \mathbf{u}_c \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (\text{П-2})$$

$$\mathbf{A}_k=\begin{bmatrix} L_{\text{c}k} & 2(M_{Ik}-M_{IIk}) \\ M_{Ik}-M_{IIk} & 2(L_{\text{y}Ik}+L_{\text{y}IIk}) \end{bmatrix};\quad \mathbf{B}_k=2\begin{bmatrix} M_{Ik} \\ L_{\text{y}Ik} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{i}_k=\begin{bmatrix} i_{1k} \\ i_{2k} \end{bmatrix};\quad \mathbf{R}'=\begin{bmatrix} R_{\text{c}}/2 & 0 \\ 0 & 2R_{\text{y}} \end{bmatrix};\quad \mathbf{R}''=\begin{bmatrix} 0 \\ R_{\text{y}} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{u}_k=\begin{bmatrix} u_{\text{c}k} \\ u_{\text{y}k} \end{bmatrix};\quad \mathbf{C}_k=[M_{Ik}+M_{IIk} \quad 2(L_{\text{y}Ik}-L_{\text{y}IIk})];$$

$\mathbf{D}_k=2L_{\text{y}Ik}$, – фазы УШРП.

Соотношения для определения составляющих выражения для расчёта обратной матрицы системы дифференциальных уравнений трёх фаз УШРП 500 кВ с отдельной расщеплённой обмоткой подмагничивания с учётом соединения фаз ОУ в треугольник:

$$\tilde{\mathbf{A}}^{-1}=\begin{bmatrix} \mathbf{A}_a^{-1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_b^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_c^{-1} \end{bmatrix};\quad \tilde{\mathbf{B}}'=\begin{bmatrix} \mathbf{B}'_a \\ \mathbf{B}'_b \\ \mathbf{B}'_c \end{bmatrix};$$

$$\tilde{\mathbf{C}}'=[\mathbf{C}'_a \quad \mathbf{C}'_b \quad \mathbf{C}'_c];\quad \tilde{\mathbf{H}}=\mathbf{H}_a+\mathbf{H}_b+\mathbf{H}_c; \qquad (\text{П-3})$$

$$\mathbf{A}_k^{-1}=\frac{1}{\alpha_{6k}}\begin{bmatrix} L_{\text{y}Ik}+L_{\text{y}IIk} & M_{IIk}-M_{Ik} \\ \frac{1}{2}(M_{IIk}-M_{Ik}) & \frac{1}{2}L_{\text{c}k} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}'=\frac{1}{\alpha_{6k}}\begin{bmatrix} \alpha_{2k} \\ \frac{\alpha_{4k}}{2} \end{bmatrix};\quad \mathbf{C}'=\frac{1}{\alpha_{6k}}[\alpha_{2k} \quad \frac{\alpha_{5k}}{2}];$$

$\mathbf{H}=\alpha_{0k}/\alpha_{6k}$; $k=a,b,c$ – фазы УШРП;

$$\alpha_0=L_{\text{c}}L_{\text{y}I}L_{\text{y}II}-L_{\text{y}I}M_{II}^2-L_{\text{y}II}M_I^2;$$

$$\alpha_2=L_{\text{y}I}M_{II}+L_{\text{y}II}M_I;$$

$$\alpha_4=L_{\text{c}}L_{\text{y}I}-M_I(M_i-M_{II});$$

$$\alpha_5=L_{\text{c}}(L_{\text{y}I}-L_{\text{y}II})-(M_I^2-M_{II}^2);$$

$$\alpha_6=L_{\text{c}}(L_{\text{y}I}+L_{\text{y}II})-(M_I-M_{II})^2.$$

Составляющие системы дифференциальных уравнений фазы УШРП 500 кВ с отдельной расщеплённой обмоткой подмагничивания с учётом бронестержневого магнитопровода:

$$\mathbf{L}=\begin{bmatrix} L_{\text{c}} & M_I & M_I & -M_{II} & -M_{II} \\ M_I & L_{\text{y}I} & L_{\text{y}I} & M_{I-II} & M_{I-II} \\ M_I & L_{\text{y}I} & L_{\text{y}I} & M_{I-II} & M_{I-II} \\ -M_{II} & M_{I-II} & M_{I-II} & L_{\text{y}II} & L_{\text{y}II} \\ -M_{II} & M_{I-II} & M_{I-II} & L_{\text{y}II} & L_{\text{y}II} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}=\begin{bmatrix} R_{\text{c}}/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{\text{y}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{\text{y}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{\text{y}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{\text{y}} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{i}=\begin{bmatrix} i_{\text{c}} \\ i_{\text{y}I1} \\ i_{\text{y}I2} \\ i_{\text{y}II1} \\ i_{\text{y}II2} \end{bmatrix};\quad \mathbf{u}=\begin{bmatrix} u_{\text{c}} \\ u_{\text{y}I1} \\ u_{\text{y}I2} \\ u_{\text{y}II1} \\ u_{\text{y}II2} \end{bmatrix} \qquad (\text{П-4})$$

где $L_{\text{c}}=w_{\text{c}}^2Y_{\text{c}}$; $L_{\text{y}I}=w_{\text{y}}^2Y_I$; $L_{\text{y}II}=w_{\text{y}}^2Y_{II}$; $M_I=w_{\text{c}}w_{\text{y}}Y_{\text{c-y}I}$; $M_{II}=w_{\text{c}}w_{\text{y}}Y_{\text{c-y}II}$; $M_{I-II}=w_{\text{y}}^2Y_{I-II}$ – собственные и взаимные индуктивности обмоток УШРП.

Составляющие преобразованной с помощью выражения и ввода системы контурных токов системы дифференциальных уравнений УШРП 500 кВ с отдельной расщеплённой обмоткой подмагничивания с учётом бронестержневого магнитопровода:

$$\mathbf{L}=\begin{bmatrix} L_c & 2(M_I-M_{II}) & 2M_I \\ M_I-M_{II} & 2(L'_{yI}+L'_{yII}) & 2L'_{yI} \\ M_I+M_{II} & 2(L''_{yI}-L'_{yII}) & 2L''_{yI} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{i}=\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_4 \end{bmatrix};\quad \mathbf{R}=\begin{bmatrix} R_c/2 & 0 & 0 \\ 0 & 2R_y & R_y \\ 0 & 0 & R_y \end{bmatrix};\quad \mathbf{u}=\begin{bmatrix} u_c \\ u_y \\ u_к \end{bmatrix}, \qquad (П\text{-}5)$$

где $L'_{yI}=L_{yI}+M_{I-II}$; $L'_{yII}=L_{yII}+M_{I-II}$; $L''_{yI}=L_{yI}-M_{I-II}$.

Соотношения для определения составляющих выражений и для расчёта мгновенного и среднего за период значений тока управления при одной насыщенной и одной ненасыщенной секциях расщеплённого стержня магнитопровода УШРТ 500 кВ с отдельной нерасщеплённой обмоткой подмагничивания и расщеплённой СО без учёта КО:

$$\alpha_1(\Delta)=\cos(\omega\Delta)-\mu_0\sin(\omega\Delta);$$

$$\alpha_2(\Delta)=\sin(\omega\Delta)+\mu_0\cos(\omega\Delta);\quad \mu_0=R_{экв}/\omega L_{экв1};$$

$$\mu_1=\omega L_{экв1}/(R^2_{экв}+(\omega L_{экв1})^2);\quad K=K_0-K_1;$$

$K_0=M_0/L_{c0}$; $K1=M_1/L_{c1}$; $t_0=\Delta$; $i_{y1}(\Delta)=i_{y0}(\Delta)$ — из условия непрерывности функции тока управления;

$$\alpha_3(\Delta)=\frac{L_{экв1}}{R_{экв}}\left(1-\left[1+\left(1-e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}\Delta}\right)e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}(T/2)}\right]e^{\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}\Delta}\right);$$

$$\alpha_4(\Delta)=\frac{L_{экв0}}{R_{экв}}-\frac{L_{экв0}-L_{экв1}}{R_{экв}}e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}\Delta}-\frac{L_{экв1}}{R_{экв}}e^{-R_{экв}\left(\frac{\Delta}{L_{экв0}}+\frac{T/2-\Delta}{L_{экв1}}\right)};$$

$$\alpha_5(\Delta)=\frac{1}{m_0}\left(1-e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}(T/2-\Delta)}\right). \qquad (П\text{-}6)$$

Аналитические выражения для токов секций СО УШРТ 500 кВ с отдельной нерасщеплённой обмоткой подмагничивания и расщеплённой СО без учёта КО для четырёх интервалов времени, записанные на основе выражения (16):

$$\begin{cases} i_{cI0}(t)=i_{cI0}(0)-\dfrac{U_{cm}}{\omega L_{c0}}[\cos(\omega t+\psi)-\cos](\psi)- \\ -K_0[i_{y0}(t)-i_{y0}(0)]; \\ i_{cII0}(t)=i_{cII0}(0)-\dfrac{U_{cm}}{\omega L_{c0}}[\cos(\omega t+\psi)-\cos(\psi)]+ \\ +K_0[i_{y0}(t)-i_y(0)]; \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{cI1}(t)=i_{cI}(0)-\dfrac{U_{cm}}{\omega L_{c0}L_{c1}}[L_{c0}\cos(\omega t+\psi)-(L_{c0}-L_{c1})\times \\ \times\cos(\omega\Delta+\psi)-L_{c1}\cos(\psi)]- \\ -[K_1 i_{y1}(t)+Ki_{y0}(\Delta)-K_0 i_y(0)]; \\ i_{cII0}(t)=i_{cII0}(0)-\dfrac{U_{cm}}{\omega L_{c0}}[\cos(\omega t+\psi)-\cos(\psi)]+ \\ +K_0[i_{y1}(t)-i_y(0)]; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \tilde{i}_{cI0}(t)=i_{cI}(0)-\dfrac{U_{cm}}{\omega L_{c0}L_{c1}}[L_{c1}\cos(\omega t+\psi)-(L_{c0}-L_{c1})\times \\ \times\cos(\omega\Delta+\psi)-L_{c0}\cos(\psi)]- \\ -\left[K_0 i_{y0}\left(t-\dfrac{T}{2}\right)+Ki_{y0}(\Delta)+(K_1-2K_0)i_y(0)\right]; \\ \tilde{i}_{cII0}(t)=i_{cII}(0)-\dfrac{U_{cm}}{\omega L_{c0}}[\cos(\omega t+\psi)-\cos(\psi)]+ \\ +K_0\left[i_{y0}\left(t-\dfrac{T}{2}\right)-i_y(0)\right]; \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{cI0}(t)=i_{cI}(0)-\dfrac{U_{cm}}{\omega L_{c0}L_{c1}}[L_{c1}\cos(\omega t+\psi)-(L_{c0}-L_{c1})\times \\ \times\cos(\omega\Delta+\psi)-L_{c0}\cos(\psi)]- \\ -\left[K_0 i_{y1}\left(t-\dfrac{T}{2}\right)+Ki_{y0}(\Delta)+(K_1-2K_0)i_y(0)\right]; \\ i_{cII1}(t)=i_{cII}(0)-\dfrac{U_{cm}}{\omega L_{c0}}[\cos(\omega t+\psi)-\cos(\psi)]+(L_{c0}-L_{c1})\times \\ \times\cos(\omega\Delta+\psi)-L_{c0}\cos(\psi)]+ \\ +\left[K_1 i_{y1}\left(t-\dfrac{T}{2}\right)+Ki_{y0}(\Delta)-K_0 i_y(0)\right], \end{cases}$$

(П-7)

где $i_{y1}(\Delta)=i_{y0}(\Delta)$; $i_{y1}(T/2)=i_y(0)$; $i_{cI1}(\Delta)=i_{cI0}(\Delta)$; $\tilde{i}_{cI0}(T/2)=i_{cI1}(T/2)$; $i_{cII1}(T/2+\Delta)=\tilde{i}_{cII0}(T/2\Delta)$ — из условия непрерывности функций токов.

Выражения для определения составляющих уравнения относительно фазового сдвига сетевых напряжения и тока УШРТ 500 кВ с отдельной нерасщеплённой обмоткой подмагничивания и расщеплённой СО без учёта КО:

$$A(\Delta)=\alpha_7(\Delta)\sin(\omega\Delta)+K\mu_1\alpha_6(\Delta)[\mu_0+\alpha_2(\Delta)\times$$
$$\times\exp(-R_{экв}(T/2-\Delta)L_{экв1})];$$

$$B(\Delta)=\alpha_7(\Delta)[1+\cos(\omega\Delta)]+K\mu_1\alpha_6(\Delta)[1+\alpha_1(\Delta)\times$$
$$\times\exp(-R_{экв}(T/2-\Delta)L_{экв1})];$$

$$C(\Delta)=\frac{\alpha_6(\Delta)}{U_{cm}}\left[1-e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}\Delta}+\left(1-e^{\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}\Delta}\right)e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}(T/2)}\right];$$

$$\alpha_7(\Delta)=m_2\left[1+\left(1-e^{-\frac{R_{экв}}{L_{экв0}}\Delta}-e^{\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}\Delta}\right)e^{\frac{R_{экв}}{L_{экв1}}(T/2)}\right]$$

(П-8)

Выводы. 1. Использование разработанных численно-аналитических моделей УШРП 500 кВ в стандартных пакетах прикладных программ моделирования электрических цепей позволяет повысить устойчивость и точность численного моделирования, а также уменьшить время расчёта.

2. Разработанная аналитическая модель УШРП 500 кВ с отдельной обмоткой подмагничивания без учёта компенсационной обмотки позволяет получать кривые токов и напряжений любого установившегося режима работы реактора.

3. Верификация расчетных моделей УШРП с использованием результатов системных испытаний реактора аналогичной конструкции в статических и динамических режимах работы, полностью охватывающих весь рабочий диапазон УШРП, показала высокую достоверность разработанных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Управляемые** подмагничиванием электрические реакторы (Сб. статей)/Под ред. А.М. Брянцева. – М.: Знак, 2004.

2. **Мастрюков Л.А.** Новая концепция проектирования управляемого шунтирующего реактора с магнитным регулированием мощности для ЛЭП СВН 550, 800, 1100 кВ. — Сб. докладов IX симпозиума «Электротехника 2030. Перспективные технологии электроэнергетики» – М.: Международная ассоциация ТРАВЭК (ВЭИ), 2007, доклад 2.41.

3. **Лучко А.Р., Ебадиан М.** Принципы математического моделирования динамических процессов в управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторах в SimPowerSystems (Matlab). — Электричество, 2008, № 3.

4. **Гусев С.И., Столяров Е.И., Мустафа Г.М. и др.** Модель управляемого подмагничиванием реактора для расчета электромагнитных процессов в линиях электропередачи. – Электричество, 2010, № 6.

5. **Карпов В.Н., Киселёв А.Н.** Разработка модели управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора. – Материалы II Всероссийской конф. по итогам конкурса молодых специалистов инжинирингового профиля в области электроэнергетики (секция II). – Дивноморск, 2007.

6. **Карпов В.Н.** Разработка расчётной модели управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора. — Материалы Шестнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», т. 3. – М., 2010.

7. **Гусев С.И., Карпов В.Н., Киселёв А.Н., Кочкин В.И.** Результаты системных испытаний шинного управляемого шунтирующего реактора 500 кВ на подстанции «Таврическая». — Электрические станции, 2009, № 7.

8. **Лейтес Л.В.** Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981.

9. **Гантмахер Ф.Р.** Теория матриц. – М.: Наука, 1966.

[04.04.12]

Авторы: ***Карпов Виктор Николаевич*** *окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 2007 г. Старший научный сотрудник Центра надёжности и режимов работы электрических сетей ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».*

Киселёв Алексей Николаевич *окончил электротехнический факультет МЭИ в 2003 г. В 2006 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка математических моделей управляющих элементов электрических цепей для решения задач оптимизации». Начальник Центра надёжности и режимов работы электрических сетей ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».*

* * *

Вниманию предприятий, организаций,
НИИ, вузов России
и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира.
Напоминаем наш адрес: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648.
Тел./факс (7-495)362-7485