

УДК 621.3

Е.Н. Соснина, А.А. Кралин, А.А. Асабин

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ФАЗОПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы моделирования трехфазного многообмоточного трансформатора, входящего в состав фазоповоротного устройства. Модель трансформатора выполнена в пакете Simulink и состоит из схемы замещения магнитной и электрической цепей. Модель позволяет исследовать важнейшие энергетические показатели трансформатора в динамических и статических режимах работы. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0098 о предоставлении субсидии от 26.08.2014, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0098).

Ключевые слова: трехфазный многообмоточный трансформатор, моделирование, схемы замещения, Simulink.

Автоматизированный узел регулирования потоков мощности в распределительной электрической сети среднего напряжения (6-10-20 кВ) может быть выполнен на основе транзисторных или тиристорных фазоповоротных устройств (ФПУ). В состав тиристорного ФПУ, как правило, входят два трансформатора: шунтовой (параллельный) и серийный (последовательный).

В исследуемых устройствах процессы регулирования напряжения сопровождаются изменением структуры многообмоточных трехфазных трансформаторов на вторичной стороне с помощью тиристорных ключей. При этом возникают режимы работы, сопровождающиеся изменением насыщения магнитопровода трансформаторов, которые требуют адекватного математического представления. В нестационарных режимах, связанных с нарушением нормального функционирования, возможны глубокие насыщение магнитопроводов и значительные изменения электромагнитных связей между обмотками трансформатора.

В ходе выполнения прикладных научных исследований была разработана нелинейная модель трехфазного трехстержневого многообмоточного трансформатора (параллельный трансформатор) с плоской магнитной системой в программе Matlab Simulink.

Основные допущения при разработке нелинейной математической модели трансформатора общеприняты [1]:

- магнитная система трансформатора представлена схемой замещения с нелинейными сосредоточенными магнитными сопротивлениями, определяемыми аппроксимацией основной кривой намагничивания;
- полные потокосцепления фаз представлены как суммы потокосцеплений от основного магнитного потока и потокосцеплений рассеяния обмоток фазы;
- потокосцепления рассеяния обмоток трансформатора, являются линейными функциями от токов;
- не учитываются емкостные связи между элементами обмоток, между обмотками и заземленными частями магнитопровода, а также токи утечки изоляции.

Схема замещения магнитной цепи (рис. 1) состоит из следующих элементов:

- $(w_A i_A - w_x i_x)$, $(w_B i_B - w_y i_y)$, $(w_C i_C - w_z i_z)$ - намагничивающие силы обмоток на стержнях магнитопровода;
- $(\Phi_A - \Phi_C)$ соответственно магнитные потоки фаз;
- $H_{AC} \div H_{CC}$; $H_{AA} \div H_{AA}$ - падения магнитных напряжений на ферромагнитных участках (стержень, ярмо) от потока этих участков;

- H_0l_0 - падение магнитного напряжения от потока нулевой последовательности.

В соответствии с приведенной схемой замещения уравнения магнитного состояния трехфазного многообмоточного трансформатора будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} w_A i_A + w_{a1} i_{a1} + w_{a2} i_{a2} + w_{a3} i_{a3} + w_{a4} i_{a4} + w_{a5} i_{a5} - H_A l_C - 2H_{ЯА} l_{Я} - H_0 l_0 &= 0; \\ w_B i_B + w_{b1} i_{b1} + w_{b2} i_{b2} + w_{b3} i_{b3} + w_{b4} i_{b4} + w_{b5} i_{b5} - H_B l_C - H_0 l_0 &= 0; \\ w_C i_C + w_{c1} i_{c1} + w_{c2} i_{c2} + w_{c3} i_{c3} + w_{c4} i_{c4} + w_{c5} i_{c5} - H_C l_C - 2H_{ЯС} l_{Я} - H_0 l_0 &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Величина потока нулевой последовательности

$$\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = \Phi_0. \quad (2)$$

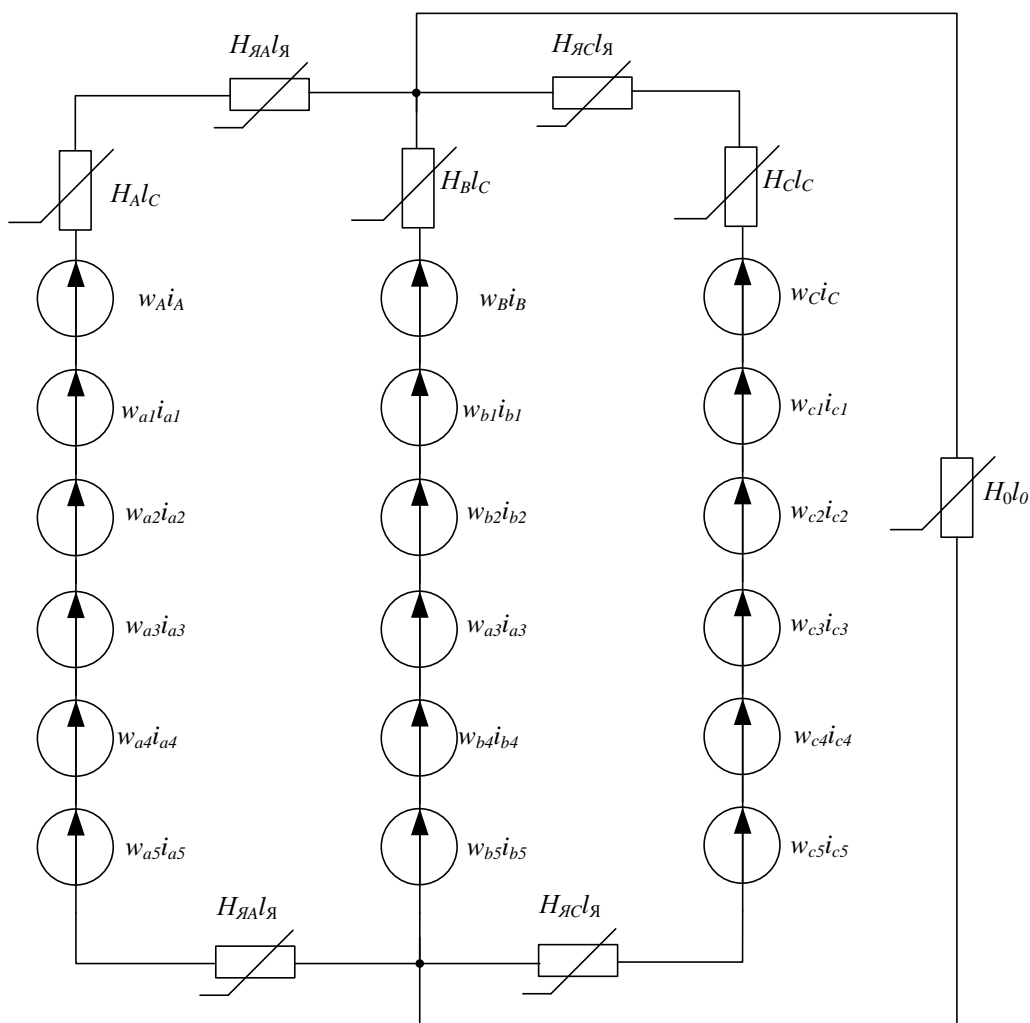


Рис. 1. Схема замещения магнитной цепи параллельного трансформатора с контуром замыкания потоков нулевой последовательности

В дополнение к системе нелинейных алгебраических уравнений магнитной системы, запишем уравнения электрической системы (обмоток) трансформатора по следующим выражениям:

фаза A:

$$\begin{aligned} u_A &= L_{SA} \frac{di_A}{dt} + w_A \frac{d\Phi_A}{dt} + i_A R_A; \\ u_{a1} &= L_{Sa1} \frac{di_{a1}}{dt} + w_{a1} \frac{d\Phi_A}{dt} + i_{a1} R_{a1}; \\ u_{a2} &= L_{Sa2} \frac{di_{a2}}{dt} + w_{a2} \frac{d\Phi_A}{dt} + i_{a2} R_{a2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_{a3} &= L_{Sa3} \frac{di_{a3}}{dt} + w_{a3} \frac{d\Phi_A}{dt} + i_{a3} R_{a3}; \\
 u_{a4} &= L_{Sa4} \frac{di_{a4}}{dt} + w_{a4} \frac{d\Phi_A}{dt} + i_{a4} R_{a4}; \\
 u_{a5} &= L_{Sa5} \frac{di_{a5}}{dt} + w_{a5} \frac{d\Phi_A}{dt} + i_{a5} R_{a5};
 \end{aligned} \tag{3}$$

фаза B:

$$\begin{aligned}
 u_B &= L_{SB} \frac{di_B}{dt} + w_B \frac{d\Phi_B}{dt} + i_B R_B; \\
 u_{b1} &= L_{Sb1} \frac{di_{b1}}{dt} + w_{b1} \frac{d\Phi_B}{dt} + i_{b1} R_{b1}; \\
 u_{b2} &= L_{Sb2} \frac{di_{b2}}{dt} + w_{b2} \frac{d\Phi_B}{dt} + i_{b2} R_{b2}; \\
 u_{b3} &= L_{Sb3} \frac{di_{b3}}{dt} + w_{b3} \frac{d\Phi_B}{dt} + i_{b3} R_{b3}; \\
 u_{b4} &= L_{Sb4} \frac{di_{b4}}{dt} + w_{b4} \frac{d\Phi_B}{dt} + i_{b4} R_{b4}; \\
 u_{b5} &= L_{Sb5} \frac{di_{b5}}{dt} + w_{b5} \frac{d\Phi_B}{dt} + i_{b5} R_{b5};
 \end{aligned} \tag{4}$$

фаза C:

$$\begin{aligned}
 u_C &= L_{SC} \frac{di_C}{dt} + w_C \frac{d\Phi_C}{dt} + i_C R_C; \\
 u_{c1} &= L_{Sc1} \frac{di_{c1}}{dt} + w_{c1} \frac{d\Phi_C}{dt} + i_{c1} R_{c1}; \\
 u_{c2} &= L_{Sc2} \frac{di_{c2}}{dt} + w_{c2} \frac{d\Phi_C}{dt} + i_{c2} R_{c2}; \\
 u_{c3} &= L_{Sc3} \frac{di_{c3}}{dt} + w_{c3} \frac{d\Phi_C}{dt} + i_{c3} R_{c3}; \\
 u_{c4} &= L_{Sc4} \frac{di_{c4}}{dt} + w_{c4} \frac{d\Phi_C}{dt} + i_{c4} R_{c4}; \\
 u_{c5} &= L_{Sc5} \frac{di_{c5}}{dt} + w_{c5} \frac{d\Phi_C}{dt} + i_{c5} R_{c5};
 \end{aligned} \tag{5}$$

где u_n - напряжение соответствующей обмотки; L_{Smm} - собственные индуктивности рассеяния обмоток; R_{mn} - активные сопротивления обмоток; w_{mn} - число витков обмоток.

Представленные уравнения являются нелинейными дифференциальными уравнениями электромагнитных связей трехфазного многообмоточного трансформатора.

Полная модель многообмоточного трансформатора состоит из двух моделей, отвечающих за магнитную и электрическую схемы замещения трансформатора [2].

Рассмотрим алгоритм работы модели. Напряжение, измеренное в блоке *Winding* (рис. 2.) в подсистеме электрических связей трансформатора (рис. 3) с помощью блоков *Goto* и *From*, поступает на блок *integrator*, который совместно с блоком *Gain* в соответствии с представленным ниже уравнением вычисляет поток отдельных обмоток:

$$\Phi = \int \frac{u_n}{w_n} = -\Phi_m \cos \omega t + C, \tag{6}$$

где u_n - напряжение соответствующей обмотки, w_n - число витков соответствующей обмотки, Φ_m - амплитуда магнитного потока, C - постоянная интегрирования.

Как видно, кроме блока управляемого источника тока, подсистемы *Winding* содержат в своем составе последовательное сопротивление $R1$, равное активному сопротивлению соответствующей обмотки трансформатора, параллельное сопротивление $Rm1$, учитывающее магнитные потери в сердечнике трансформатора и измеритель напряжения $V1$.

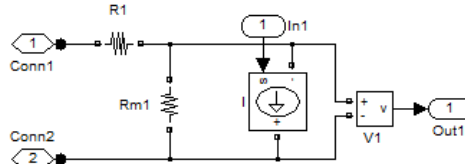


Рис. 2. Состав подсистем Winding

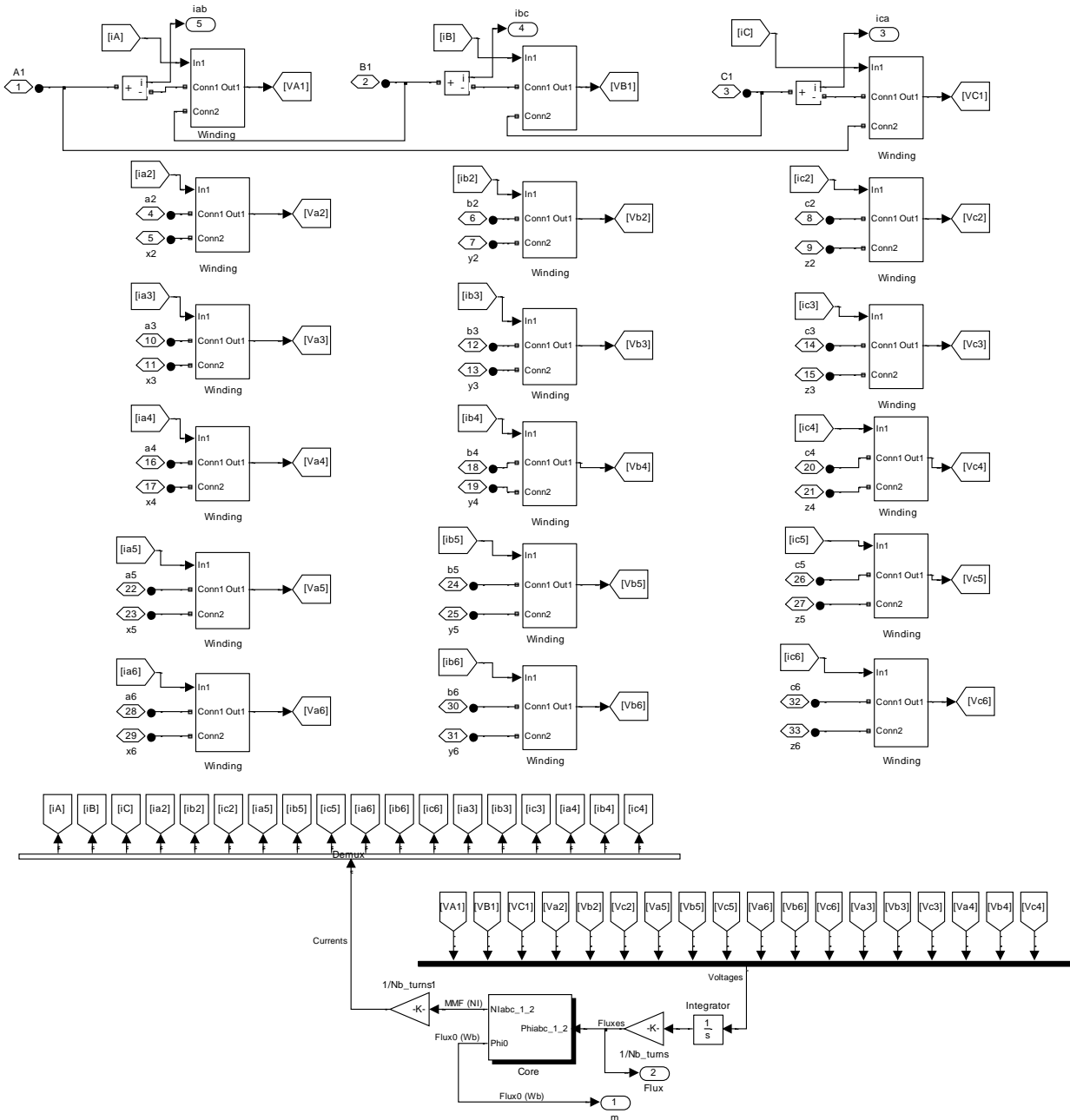


Рис. 3. Модель электрической системы трансформатора

Начальными условиями для блока «integrator» являются значения потока в момент времени $t = 0$ (рис. 3). Задание начальных условий интегрирования позволяет, при необходимости, исключить апериодическую составляющую переходного процесса и сразу перейти к установившемуся режиму работы, что дает значительное сокращение времени моделирования. Блок *Gain* выполняет деление интеграла напряжения на число витков соответствующей обмотки.

Вычисление начального потока выполняется с помощью команд инициализации, написанных на языке Matlab. Данные команды записаны во вкладке *Initialization* маскированной подсистемы модели трансформатора. Размер вектора потоков содержит 18 элементов по количеству обмоток трансформатора.

Значения вычисленных потоков поступают на вход подсистемы, моделирующей магнитную цепь трансформатора. На рис. 4 представлена модель магнитной системы трансформатора, составленная по уравнениям (1)-(2) в соответствии со схемой замещения рис. 1.

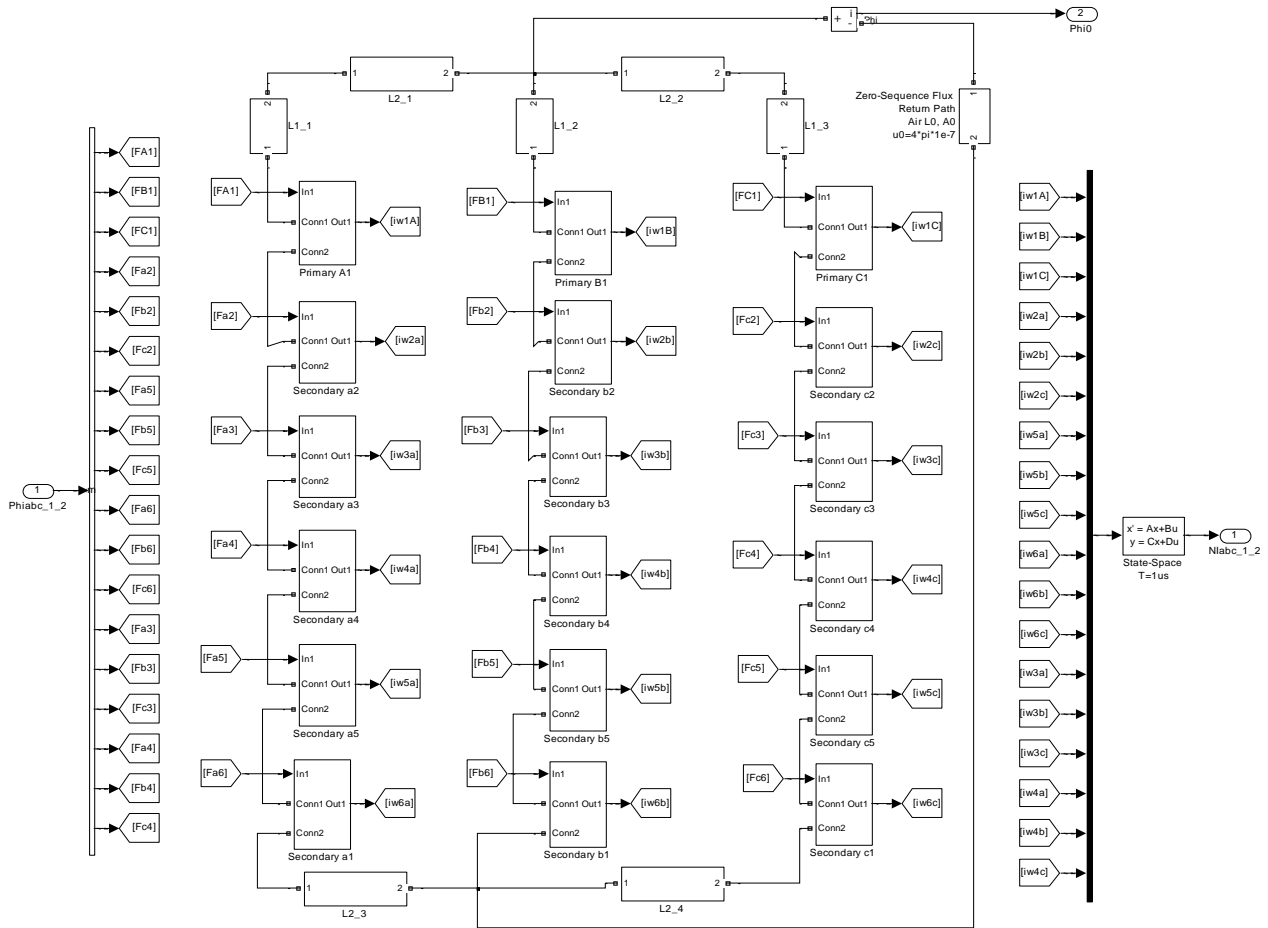


Рис. 4. Модель магнитной системы трансформатора

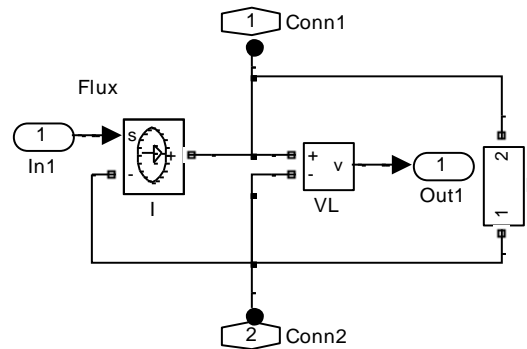


Рис. 5 Состав подсистем *Primary* и *Secondary*

Модель магнитной системы представляет собой эквивалентную электрическую схему замещения магнитной цепи трансформатора. Внешним контуром модели магнитной системы трансформатора является контур замыкания потоков нулевой последовательности.

С помощью блоков *Goto* и *From* значения потоков подаются на входы подсистем *Primary* и *Secondary*, и далее на входы блоков *Controlled Current Source*, превращаясь, таким образом, в электрический сигнал, пропорциональный потоку (рис. 5).

Параллельно источнику тока включено активное сопротивление, величина которого равна соответствующему магнитному сопротивлению, значение которого вычисляется в соответствии с выражением

$$L = \frac{w\Phi}{I} = w^2 \frac{\mu_0 \mu S}{l} = \frac{w^2}{R_M}, \tag{6}$$

и, следовательно,

$$R_M = \frac{w^2}{L}, \tag{7}$$

где R_M – магнитное сопротивление, w – число витков обмотки, L – индуктивность рассеяния обмотки.

Сигнал с измерителя напряжения VL равен величине МДС соответствующей обмотки.

Значения потоков стержней и ярм трансформатора поступают на вход подсистем представляющих нелинейные сопротивления, учитывающие геометрию и магнитные свойства магнитопровода трансформатора (рис. 6). В этих подсистемах определяются магнитные напряжения на ферромагнитных участках (стержень, ярмо) от потока этих участков.

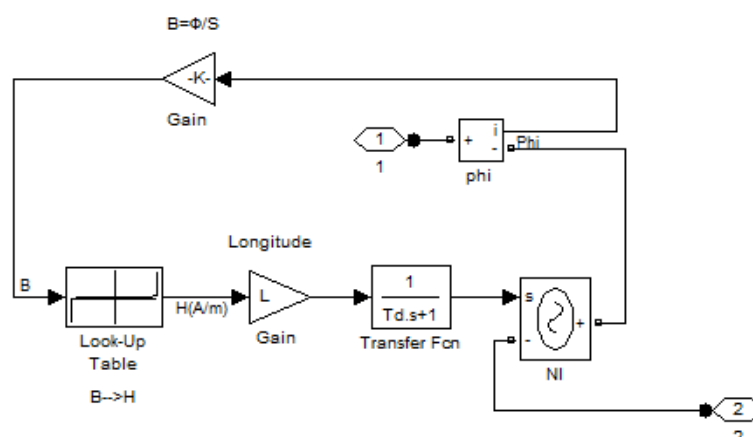


Рис. 6. Состав подсистемы определения магнитного напряжения участков магнитопровода

Алгоритм работы подсистемы (рис. 6) следующий: по величине потока с помощью блока «Gain» рассчитывается индукция на соответствующем участке

$$B = \frac{\Phi}{S}, \tag{8}$$

где S – сечение стержня или ярма. Далее с помощью блока *Look-Up Table* вычисляется напряженность магнитного поля. Данный блок реализует кусочно-линейную интерполяцию заданной табличной функции основной кривой намагничивания стали. Входным сигналом является индукция B , выходным напряженность магнитного поля H . Реализуя произведение напряженности магнитного поля H на соответствующую длину участка магнитопровода l с помощью блока *Gain* определяются падения магнитного напряжения соответствующих участков магнитопровода (стержня или ярма).

Следует отметить, что для улучшения устойчивости вычислений (разрыва алгебраической петли) используется блок *Transfer Fcn* в котором прописана передаточная функция аperiodического звена с малой постоянной времени.

Сигнал равный падению магнитного напряжения участка магнитопровода Hl , является входным для блока *Controlled Current Source*.

Значения МДС обмоток поступают в подсистему верхнего уровня (рис. 3), в которой моделируются электрические связи обмоток.

Значения токов обмоток вычисляются через МДС с помощью блока *Gain* (рис. 3) по выражению:

$$i = \frac{i_w}{w} \quad (9)$$

Вычисленный ток поступает на входы подсистем *Winding* и далее на блок управляемого источника тока (рис. 2). Напряжение, измеренное с помощью *V1*, поступает на блок *integrator* и далее процесс вычисления повторяется.

Разработанная модель шунтового трансформатора ФПУ реализует следующие функции: отображение переходных электромагнитных величин, таких как ток, напряжение, магнитная индукция, магнитный поток трансформатора в режиме холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой. В динамических режимах модель позволяет исследовать режимы короткого замыкания и подключения трансформатора к трехфазной сети.

Библиографический список

1. Алтунин, Б.Ю. Математическое моделирование тиристорных устройств РПН трехфазных трансформаторов / Б.Ю. Алтунин, И.М. Туманов // Электротехника. 1996. №6. С. 22–25.
2. Алтунин, Б.Ю. Исследование режимов работы нелинейного трехфазного трансформатора в пакете Simulink / Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин, В.В. Гуляев // Вестник волжской государственной академии водного транспорта. 2012. № 32. С. 195–198.

Дата поступления
в редакцию 16.04.2015

E.N. Sosnina, A.A. Kralin, A.A. Asabin

DEVELOPMENT OF SIMULATION MODEL OF PHASE SHIFTING PARALLEL TRANSFORMER

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Development of simulation model of phase-shifting multi-winding transformer by means of Simulink.

Design/methodology/approach: Models are made in Simulink by means of structural scheme.

Findings: Model allows us to study electromagnetic processes of phase-shifting transformers in steady-state and transient mode. Models consist of two parts: magnetic and electrical.

Key words: three-phase multi-winding transformer, modeling, equivalent circuits, Simulink.