

увеличивается, рис. 2,з). В течение данного интервала происходит намагничивание сердечника СИТ  $T_1$ , рабочая точка, характеризующая магнитное состояние, поднимается вверх по восходящей ветви цикла намагничивания и к моменту  $t_2$  достигает точки с координатами  $B = B_{\text{макс}}$ ;  $H = H_{\text{макс}}$ .

Следует сделать замечание о влиянии дополнительной обмотки  $w_3$  СИТ  $T_2$ . В рассмотренном интервале транзисторы  $VT_3$ ,  $VT_4$  второго ОИПН заперты. Полагаем, что к моменту  $t_1$  завершено размагничивание сердечника СИТ  $T_2$ . Поэтому ток, протекающий в интервале  $(t_1; t_2)$  по обмотке  $w_3$  СИТ  $T_2$  от конца к началу, будет осуществлять намагничивание сердечника в сторону отрицательных значений индукции, то есть двустороннее перемагничивание. Поскольку ток  $i_{\text{др}}$  значительно превышает намагничивающий ток при одновременной работе первичной и вторичной обмоток, перемагничивание в отрицательную область будет большим и для этого достаточно одного-двух витков в обмотке  $w_3$ .

В интервале времени  $(t_2; t_3)$  все транзисторы заперты (см. рис. 2,а и б). В первичной цепи первого ОИПН ток протекает за счет энергии, оставшейся в сердечнике СИТ  $T_1$  в момент  $t_2$  запираания транзисторов. Поэтому в момент  $t_2$  на первичной обмотке  $w_1$  СИТ  $T_1$  возникает ЭДС индукции отрицательной полярности («плюс» на конце обмотки  $w_1$ ), превышающая напряжение источника (напряжение на конденсаторе  $C_1$ ). Ток протекает по пути: конец обмотки  $w_1$ , диод  $VD_1$ , положительный вывод конденсатора  $C_1$ , конденсатор  $C_1$ , отрицательный вывод конденсатора  $C_1$ , диод  $VD_2$ , начало обмотки  $w_1$ . За счет протекания этого тока энергия из сердечника СИТ  $T_1$  перекачивается в конденсатор  $C_1$ . Рабочая точка на характеристиках намагничивания перемещается по нисходящей части траектории к точке, соответствующей остаточной индукции частного цикла перемагничивания.

Проектирование источников питания на ЭВМ обычно начинают с силовой части – импульсного преобразователя напряжения. Для того, чтобы приступить к проектированию достаточно знать требования технического задания и выбрать тип ИПН. Далее с помощью программы OPTN определяются параметры элементов выходного фильтра ИПН по критерию минимальных габаритов и массы при моделировании динамических процессов и одновременном анализе качества этих процессов. Контролируется обеспечение допустимых величин выбросов выходного напряжения и тока через ключевые элементы. Исследуется целесообразность использования в ИПН «мягкого пуска», определяются временные характеристики системы. На втором этапе с помощью комплекта программ TRANDR осуществляется конструктивный расчет тороидальных импульсных трансформаторов и дросселей.

**Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин, В.В. Гуляев**  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева  
ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ТРЕХФАЗНОГО ТРЕХСТЕРЖНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В ПАКЕТЕ SIMULINK

Исследование несимметричных режимов работы трансформаторов с РПН целесообразно осуществлять с помощью компьютерного моделирования с использованием мощных современных программных средств, таких как Matlab со встроенным пакетом визуального моделирования Simulink.

В ходе выполнения научной работы была создана нелинейная модель трехфазного

трехстержневого многообмоточного трансформатора с плоской магнитной системой в программе Matlab Simulink.

Схема замещения (рис. 1) состоит из следующих элементов  $(w_1i_1-w_xi_x)$ ,  $(w_2i_2-w_yi_y)$ ,  $(w_3i_3-w_zi_z)$  – намагничивающие силы обмоток на стержнях магнитопровода;  $(\Phi_A-\Phi_C)$  соответственно магнитные потоки фаз;  $H_A l_A \div H_C l_C$ ;  $H_{ЯА} l_{Я} \div H_{ЯС} l_{Я}$  – падения магнитных напряжений на ферромагнитных участках (стержень, ярмо) от потока этих участков,  $H_0 l_0$  – падение магнитного напряжения от потока нулевой последовательности.

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

$$\begin{aligned} w_1 i_1 + w_4 i_4 + \dots + w_x i_x - H_A l_A - H_{ЯА} l_{Я} - H_0 l_0 &= 0; \\ w_2 i_2 + w_5 i_5 + \dots + w_y i_y - H_B l_B - H_0 l_0 &= 0; \\ w_3 i_3 + w_6 i_6 + \dots + w_z i_z - H_C l_C - H_{ЯС} l_{Я} - H_0 l_0 &= 0; \end{aligned}$$

Величина потока нулевой последовательности:

$$\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = \Phi_0.$$

Магнитные потери учитываются с помощью активных сопротивлений включенных параллельно соответствующим обмоткам.

Нелинейные свойства материала магнитопровода учитываются с помощью кусочно-линейной интерполяции заданной табличной функции основной кривой намагничивания высоколегированной холоднокатаной анизотропной стали 3413.

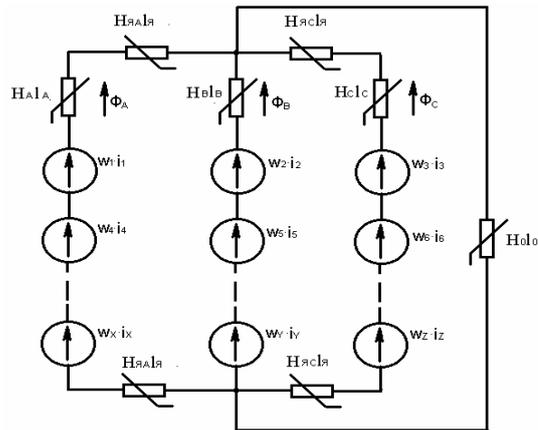


Рис. 1. Схема замещения магнитной цепи трехстержневого многообмоточного трансформатора с контуром замыкания потоков нулевой последовательности

В дополнение к системе нелинейных алгебраических уравнений составлена модель электрической системы (обмоток) трансформатора по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} U_1 &= L_{S1.1} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_A}{dt} + R_1 i_1; \\ U_2 &= L_{S2.2} \frac{di_2}{dt} + w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} + R_2 i_2; \\ U_Y &= L_{SY.Y} \frac{di_Y}{dt} + w_Y \frac{d\Phi_Y}{dt} + R_Y i_Y; \end{aligned}$$

где  $U_n$  – напряжение соответствующей обмотки;

$L_{Sm.m}$  – собственные индуктивности рассеяния обмоток;  
 $R_n$  – активные сопротивления обмоток;  
 $w_n$  – число витков обмоток.

В качестве параметров модели трансформатора используются данные трансформатора ТМ 400 -10/0,4 Y/Y-0:

- потери холостого хода  $P_0=950$  Вт,
- потери короткого замыкания  $P_k=5500$  Вт,
- ток холостого хода  $I_0=2,1\%$ ,
- напряжение короткого замыкания  $U_k=4,5\%$ .

Адекватность модели проверялась по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. В процессе моделирования установлено, что при завершении переходного процесса включения ненагруженного трансформатора мощность потерь холостого хода составляет 860 Вт (рис. 2), что меньше заявленных каталожных потерь на 4,5%. Мощность потерь короткого замыкания составляет 5500 Вт. Отличие от каталожных данных составляет 0,9%.

Разработанная модель трансформатора может быть использована для исследования устройств, содержащих в своем составе трехфазные многообмоточные трансформаторы со стержневой конструкцией магнитопровода, в том числе трансформаторов с РПН, предназначенных для регулирования параметров электроэнергии. Модель позволяет исследовать важнейшие энергетические показатели трансформаторов с РПН с различными группами соединения обмоток в динамических и статических режимах работы при симметричной и несимметричной нагрузках. Модель реализует следующие функции: отображение переходных электромагнитных величин, таких как ток, напряжение, магнитная индукции, магнитный поток трансформатора, что позволяет измерять основные характеристики трехфазных трансформаторов в режимах холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой. В динамических режимах модель позволяет исследовать режимы внезапного короткого замыкания (рис. 3) и подключения трансформатора к трехфазной сети.

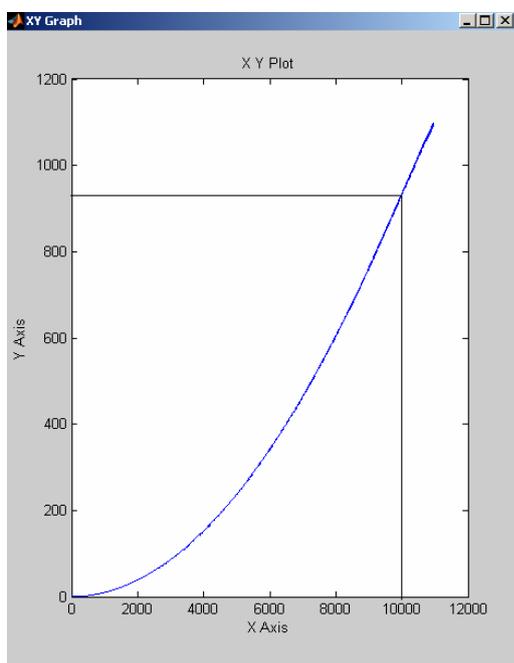


Рис. 2. Зависимость потерь холостого хода от напряжения

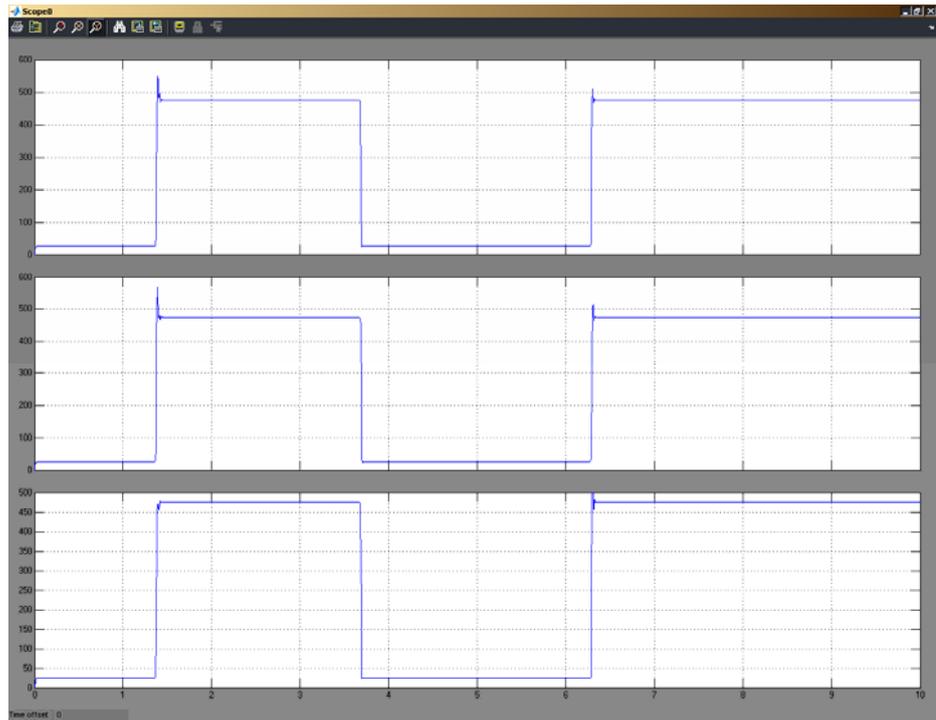


Рис. 3. Действующие значения фазных токов симметричного трехфазного КЗ.

**Е.М. Бурда**  
ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

### ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ГРЕБНОЙ УСТАНОВКИ ПАССАЖИРСКОГО СУДНА «СУРА»

В 2009 г. на Городецком судоремонтном заводе было начато строительство мелкосидящего пассажирского колесного судна ПКС 40 «Сура». Это судно должно было решить ряд задач повышения эффективности речных судов и приспособить их к естественным условиям – уменьшить осадку судов, оптимизировать размеры, повысить маневренные качества, обеспечить возможность работы без причальных сооружений и при этом снизить удельные показатели мощности энергетической установки.

В 2011 г. строительство завершилось, а в 2012 г. судно вышло в первую навигацию, получив класс по Правилам Российского Речного Регистра «Р» с индексом «Э» (экспериментальное).

В процессе строительства судна произошли существенные отклонения ряда параметров судна от проектных и расчетных.

#### Главные размерения и основные характеристики ПКС 40 «Сура»:

	Проект	Факт
Длина габаритная, м	34,0	
Длина по КВЛ, м	24,0	25,0
Ширина габаритная, м	10,8	
Ширина по КВЛ, м	10,3	