

УДК 621.3

А.А. Кралин<sup>1</sup>, Б.Ю. Алтунин<sup>1</sup>, И.А. Карнавский<sup>2</sup>, В.В. Гуляев<sup>3</sup>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В ПАКЕТЕ SIMULINK

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
 ООО «ЛОТЕС ТМ», Н. Новгород<sup>2</sup>,  
 Волжская государственная академия водного транспорта<sup>3</sup>

Рассмотрены вопросы моделирования и исследования нелинейных трехфазных трансформаторов с расщепленной первичной обмоткой, в том числе трансформаторов с тиристорными переключающими устройствами (ТПУ). Модели трансформаторов выполнены в пакете Simulink и состоят из схем замещения магнитной и электрической цепей. Модели позволяют исследовать важнейшие энергетические показатели трансформаторов с ТПУ с различными группами соединения обмоток в динамических и статических режимах работы при симметричной и несимметричной нагрузках.

*Ключевые слова:* трехфазный трансформатор, тиристорное переключающее устройство, моделирование, несимметричные режимы.

Исследование несимметричных режимов работы трехфазных трансформаторов с расщепленными первичными обмотками целесообразно осуществлять с помощью компьютерного моделирования с использованием мощных современных программных средств, таких как Matlab со встроенным пакетом визуального моделирования Simulink [1, 2, 3].

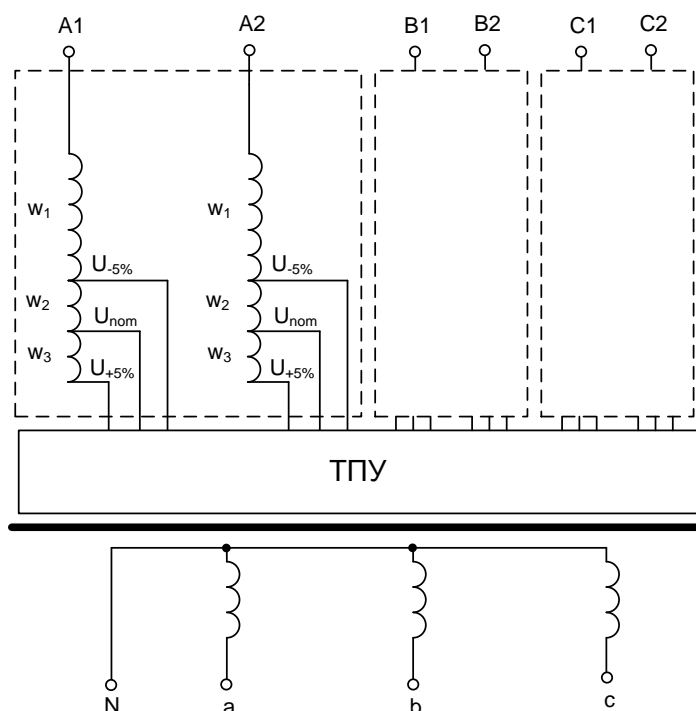


Рис. 1. Электрическая схема трансформатора ТСЗН-400/10

В исследуемых устройствах процессы регулирования напряжения осуществляются с помощью тиристорного переключающего устройства. Данные процессы сопровождаются изменением структуры многообмоточных трехфазных трансформаторов на первичной стороне. При этом возникают режимы работы, сопровождающиеся изменением насыщения магнитопровода трансформатора, которые требуют адекватного математического представле-

ния. В нестационарных режимах, связанных с нарушением нормального функционирования, возможны глубокие насыщения магнитопровода и значительные изменения электромагнитных связей между обмотками трансформатора.

Электрическая схема трехфазного трансформатора ТСЗН-400/10 со схемой Y/Y-0 представлена на рис. 1. Тиристорное переключающее устройство (ТПУ) обеспечивает автоматическое или ручное переключение ответвлений независимо каждой фазы в пределах  $\pm 5\%$  номинального напряжения и протекания каждой полуволны тока через свою часть обмотки.

Многообмоточный трансформатор ТСЗН-400/10 имеет трехстержневой магнитопровод. Каждая фаза разделена на две полуобмотки с регулировочными отводами  $\pm 5\%$  от номинального значения.

Модель трехфазного трансформатора состоит из двух частей - модели электрической системы и модели магнитной системы [1, 2].

Составим математическое описание электромагнитной системы трансформатора. Для схемы замещения (рис. 2) запишем уравнения по первому закону Кирхгофа, а также по второму закону Кирхгофа для контуров I, II и III:

$$\Phi_a + \Phi_b + \Phi_c = \Phi_0; \tag{1}$$

$$Fa - Fb = Ha \cdot (l_{leg} + 2l_{yoke}) - Hb \cdot l_{leg}; \tag{2}$$

$$Fb - Fc = Hb \cdot l_{leg} - Hc \cdot (l_{leg} + 2l_{yoke}); \tag{3}$$

$$Fb = Hb \cdot l_{leg} + R_0 \cdot \Phi_0; \tag{4}$$

$$Fa = (w_{a11}i_{a11} + w_{a12}i_{a12} + w_{a13}i_{a13}) + (w_{a21}i_{a21} + w_{a22}i_{a22} + w_{a23}i_{a23}) + w_{a14}i_{a14}; \tag{5}$$

$$Fb = (w_{b11}i_{b11} + w_{b12}i_{b12} + w_{b13}i_{b13}) + (w_{b21}i_{b21} + w_{b22}i_{b22} + w_{b23}i_{b23}) + w_{b14}i_{b14}; \tag{6}$$

$$Fc = (w_{c11}i_{c11} + w_{c12}i_{c12} + w_{c13}i_{c13}) + (w_{c21}i_{c21} + w_{c22}i_{c22} + w_{c23}i_{c23}) + w_{c14}i_{c14}. \tag{7}$$

Сформируем канал вычисления  $\Phi_b$  по уравнению (1):

$$\Phi_b = \Phi_0 - \Phi_a - \Phi_c; \tag{8}$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} = S \cdot \begin{bmatrix} Ba \\ Bb \\ Bc \end{bmatrix}; \tag{9}$$

где  $S$  – площадь сечения магнитопровода;

$$Bb = \Phi_b / S. \tag{10}$$

По уравнениям (2) и (3) сформируем канал вычисления  $Ha \cdot lc$  и  $Hc \cdot lc$ :

$$Ha \cdot (l_{leg} + 2l_{yoke}) = Fa - Fb + Hb \cdot l_{leg}; \tag{11}$$

$$Hc \cdot (l_{leg} + 2l_{yoke}) = Fc - Fb + Hb \cdot l_{leg}. \tag{12}$$

Соотношение между магнитной индукцией  $B$  и напряженностью магнитного поля  $H$  в сердечнике – функция  $B = f(H)$ , составляемая по таблице или графику намагничивания:

$$Ba = f(Ha);$$

$$Bc = f(Hc).$$

Получили:

$$\begin{cases} Ha = (Fa - Fb + Hb \cdot l_{leg}) / (l_{leg} + 2l_{yoke}) \\ Hc = (Fc - Fb + Hb \cdot l_{leg}) / (l_{leg} + 2l_{yoke}) \\ Ba = f(Ha); \quad Bc = f(Hc) \\ \Phi_a = Ba \cdot S; \quad \Phi_c = Bc \cdot S \\ \Phi_0 = (Fb - Hb \cdot l_{leg}) / R_0 \\ \Phi_b = \Phi_0 - \Phi_a - \Phi_c \\ Bb = \Phi_b / S \\ Hb = f^{-1}(Bb) \end{cases}$$

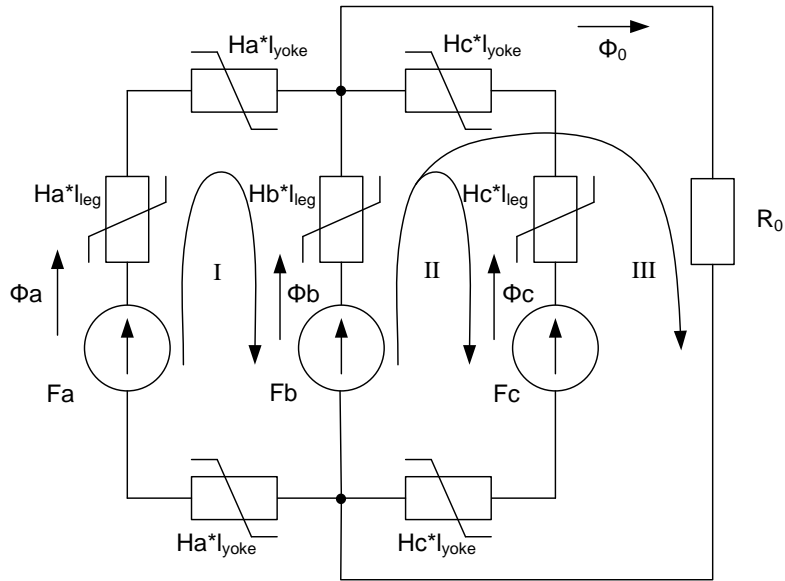


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи

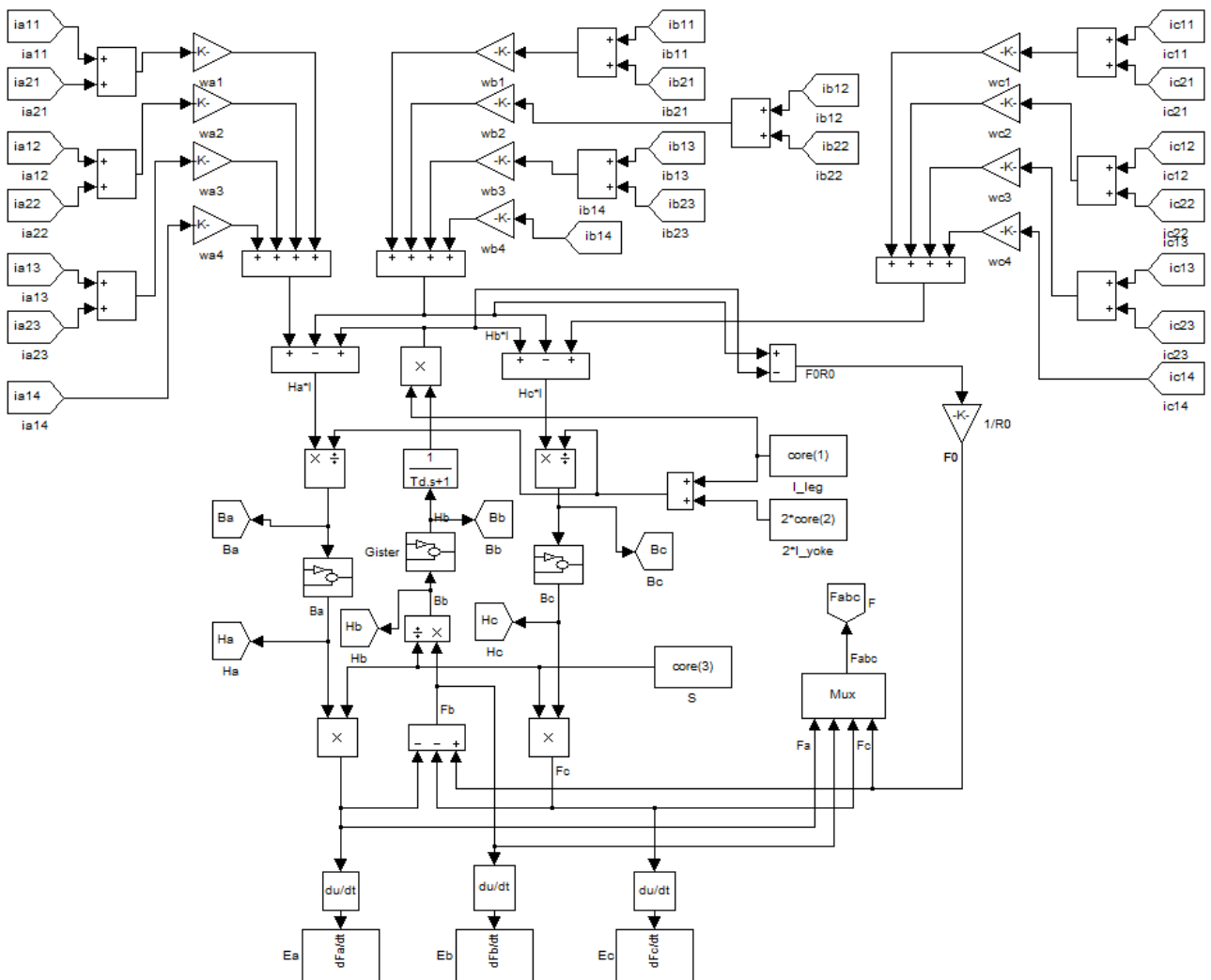


Рис. 3. Модель магнитной системы трехфазного трансформатора в Simulink

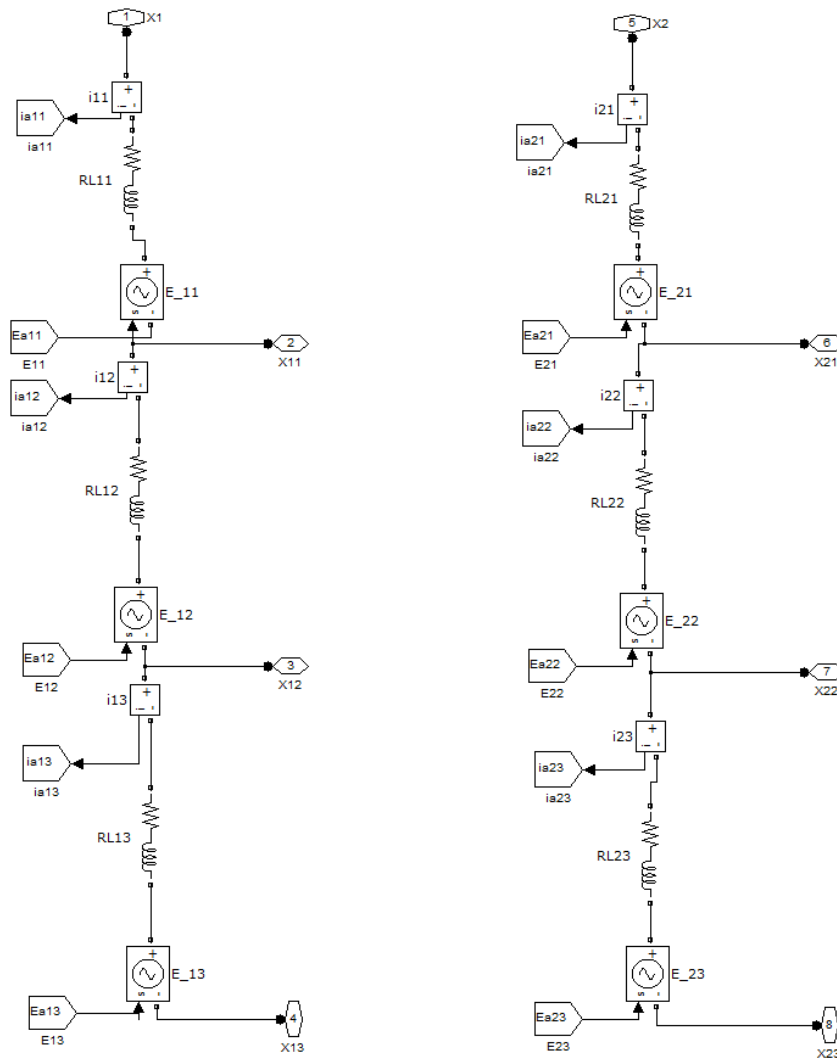


Рис. 4. Первичная обмотка фазы А трехфазного трансформатора в Simulink

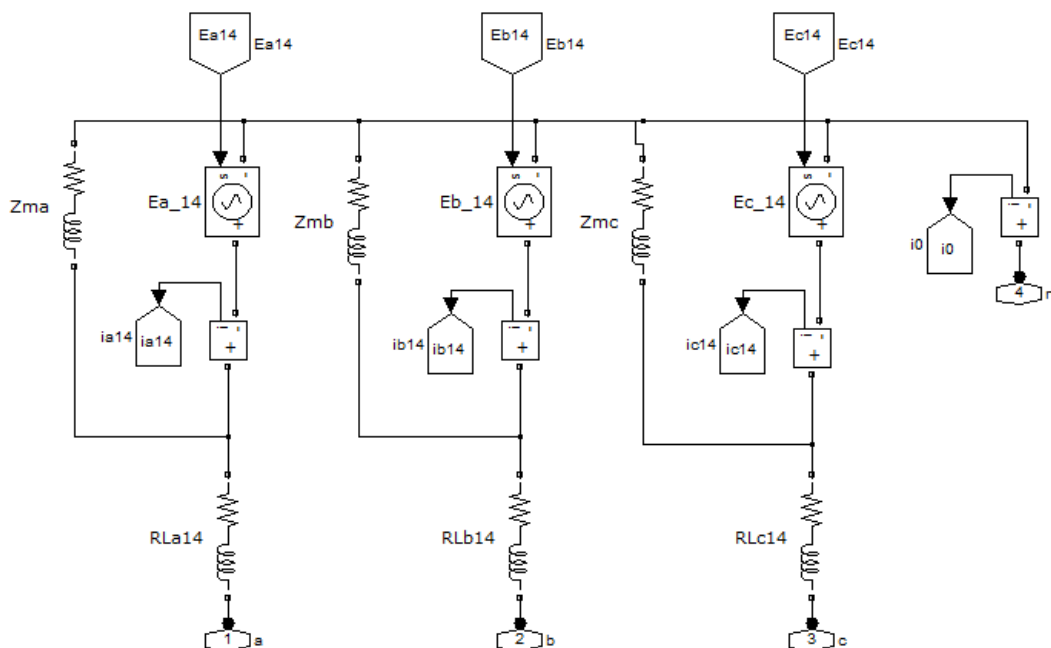
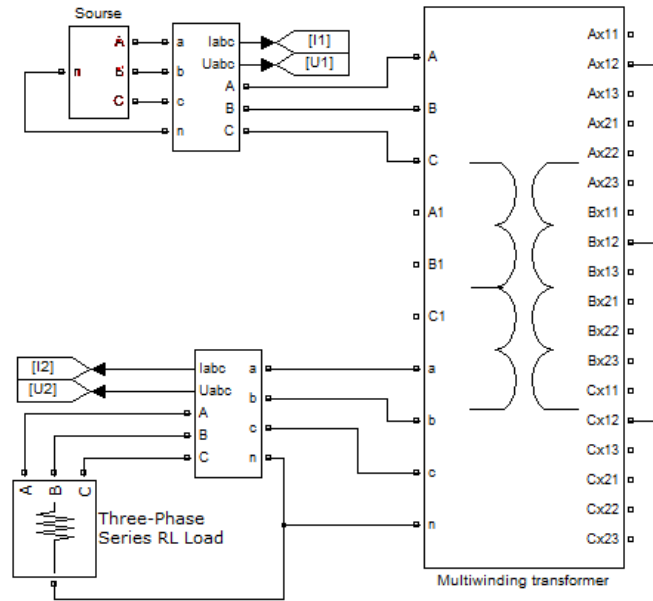


Рис. 5. Вторичные обмотки трехфазного трансформатора в Simulink



**Рис. 6. Имитационная модель исследуемого трехфазного трансформатора**

По структурной схеме магнитной цепи, схемам замещения электрических цепей трансформатора разработана имитационная модель трехфазного трансформатора в Simulink.

В дополнение к системе нелинейных алгебраических уравнений (1)–(12) составлена модель электрической системы первичных (рис. 3) и вторичных (рис. 4) обмоток трансформатора по следующим выражениям:

$$U_1 = L_{S1.1} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_A}{dt} + R_1 i_1; \quad (13)$$

$$U_2 = L_{S2.2} \frac{di_2}{dt} + w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} + R_2 i_2; \quad (14)$$

$$U_Y = L_{SY.Y} \frac{di_Y}{dt} + w_Y \frac{d\Phi_Y}{dt} + R_Y i_Y, \quad (15)$$

где  $U_n$  - напряжение соответствующей обмотки;  $L_{Sm.m}$  - собственные индуктивности рассеяния обмоток;  $R_n$  - активные сопротивления обмоток;  $w_n$  - число витков обмоток.

Приведенные ранее уравнения представляют собой нелинейные дифференциальные уравнения электромагнитных связей трехфазного многообмоточного трансформатора.

Разработанные модели трансформаторов могут быть использованы для исследования устройств, содержащих в своем составе трехфазные многообмоточные трансформаторы с расщепленной первичной обмоткой, в том числе для трансформаторов с тиристорными регуляторами напряжения и мощности (ТТРНМ), предназначенных для регулирования параметров электроэнергии. Модели позволяют исследовать важнейшие энергетические показатели трансформаторов с ТТРНМ с различными группами соединения обмоток в динамических и статических режимах работы при симметричной и несимметричной нагрузках. Модели реализуют следующие функции: отображение переходных электромагнитных величин, таких как ток, напряжение, магнитная индукция, магнитный поток трансформатора, что позволяет измерять основные характеристики трехфазных трансформаторов в режимах холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой.

В ходе проведенного моделирования установлено, что негативное влияние на качество напряжения вторичной обмотки оказывает несимметричная нагрузка, причем наибольшая

несимметрия напряжения наблюдается при однофазной нагрузке близкой к номинальной. При этом несимметричные режимы, особенно однофазный нагрузочный режим, характеризуются значительным повышением тока в нулевом проводе. Во избежание значительного неравенства фазных напряжений необходимо ограничивать нагрузку нулевого провода не допуская значений выше 25% номинального тока обмотки. Для снижения несимметрии напряжения и тока в нулевом проводе необходимо либо выравнять нагрузку по фазам, либо ее снизить.

В соответствии с ГОСТ на нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения, несимметрия напряжений характеризуется коэффициентами несимметрии напряжений по обратной  $K2U\%$  и нулевой  $K0U\%$  последовательностям. Нормально допустимые и предельно допустимые значения данных коэффициентов равны 2,0 и 4,0 % соответственно.

Результаты моделирования однофазного КЗ представлены в табл. 1. Результаты несимметричного однофазного нагрузочного режима представлены в табл. 2. Из представленных данных видно, что качество электроэнергии значительно выходит за допустимые значения по нормируемым коэффициентам несимметрии напряжения по нулевой и обратной последовательностям.

Таблица 1

Режим короткого замыкания фазы  $A$ ,  $Pb=Pn$ ,  $Pc=Pn$

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Ток первичной обмотки, А	92,58	36,46	61,33
Ток вторичной обмотки, А	2918	836,6	911,9
Фазные напряжения первичной обмотки, В	1432	8569	9281
Фазные напряжения вторичной обмотке, В	0	331,2	359,4
Ток в нулевом проводе, А / %	2148 / 372,3		
	Прямая последовательность	Обратная последовательность	Нулевая последовательность
Ток первичной обмотки, %	240,3	165,3	0
Ток вторичной обмотки, %	239,8	165,5	124,1
Фазные напряжения первичной обмотки, %	100	0,418	78,36
Фазные напряжения вторичной обмотки, %	91,57	9,515	82,95

Таблица 2

Однофазный нагрузочный режим  $Pa=Pn$ ,  $Pb=0$ ,  $Pc=0$

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
1	2	3	4
Ток первичной обмотки, А	14,24	7,255	6,984
Ток вторичной обмотки, А	530,7	0	0
Фазные напряжения первичной обмотки, В	5306	6905	5291
Фазные напряжения вторичной обмотке, В	209,6	274,1	212,4
Ток в нулевом проводе, А / %	530,7 / 91,97		
	Прямая последовательность	Обратная последовательность	Нулевая последовательность
Ток первичной обмотки, %	31,02	30,57	0
Ток вторичной обмотки, %	30,63	30,63	30,63

Окончание табл. 2

1	2	3	4
Фазные напряжения первичной обмотки, %	100	0,1983	19,5
Фазные напряжения вторичной обмотки, %	100,8	1.812	20.65
Ток первичной обмотки, %	1818	3,202	0
Ток вторичной обмотки, %	1820	3,191	0,03929
Фазные напряжения первичной обмотки, %	100	0.139	0.00107
Фазные напряжения вторичной обмотки, %	-	-	-

### Библиографический список

1. **Алтунин, Б.Ю.** Исследование несимметричных режимов работы трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения и мощности / Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин, И.А. Карнавский // Промышленная энергетика. 2013. №12. С. 13–16.
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.
3. **Лоскутов, А.Б.** Имитационная модель активного фильтра для четырехпроводной сети / А.Б. Лоскутов, Б.Ю. Алтунин, И.А. Карнавский // Промышленная энергетика. 2013. №10. С. 40–44.

Дата поступления  
в редакцию: 29.04.2014

**A.A. Kralin, B.Y. Altunin, I.A. Karnavsky, V.V. Gulyaev**

### ASYMMETRICAL MODE MODELING OF THE THREE-PHASE TRANSFORMER IN SIMULINK

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev,  
Volga state academy of water transport,  
"LOTES TM" ltd, N. Novgorod

Problems of modeling and study of nonlinear three-phase transformer with a split primary winding, including transformers, thyristor switching devices (TSD). Model transformers are made in Simulink package and consist of the equivalent circuits of the magnetic and electric circuits. Models allow us to explore the most important energy performance of transformers with TSD with different groups of winding connections in dynamic and static modes for symmetrical and asymmetrical loads.

*Key words:* three-phase transformer, thyristor switching device modeling, unbalanced modes.