

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ ТРЕХСТЕРЖНЕВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК „В ЗИГЗАГ”

Бошняга В.А., Суслов В.М.  
Институт энергетики Академии наук Молдовы

**Аннотация.** На основе предложенной ранее модели проведены расчеты и изучены особенности установившихся несимметричных режимов работы трехфазного трансформатора с трехстержневой конструкцией магнитопровода и схемой соединения обмоток в зигзаг с учетом электромагнитной связи обмоток, расположенных на различных стержнях. Расчеты и анализ проведены на примере распределительного трансформатора 10/0,4 кВ и включают наиболее характерные установившиеся несимметричные режимы, возникающие при различных коротких замыканиях, в том числе, при наличии магнитного потока нулевой последовательности. Для рассмотренных режимов построены векторные диаграммы токов и напряжений, а также относительных значений потока, которые дают наглядное представление об их особенностях.

**Ключевые слова:** Исследование на модели, несимметричные режимы, трехстержневой магнитопровод, схема соединения обмоток в зигзаг, магнитный поток нулевой последовательности.

### INVESTIGAREA MODURILOR ASIMETRICE A TRANSFORMATOARELOR TRIFAZAȚI CU MIEZ DIN TREI TIJE CU SCHEMA CONECTĂRII BOBINELOR ÎN ZIGZAG Boșneaga V.A., Suslov V.M.

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei

**Rezumat.** În baza modelului propus anterior au fost efectuate calculele și au fost investigate particularitățile modurilor permanente asimetrice a transformatorului trifazat cu miez din trei tije și cu schema de conexiune a bobinelor în zigzag, ținând cont de cuplarea electromagnetică dintre înfășurările situate pe diferite tije. Calculele și analiza respectivă a fost efectuată în transformatorul de distribuție 10/0,4 kV și conține cele mai caracteristici moduri permanente asimetrice, care apar la scurt-circuite, inclusiv, asociate cu apariția fluxului magnetic de secvență homopolară. Pentru regimurile luate în considerație sunt construite diagrame vectoriale pentru curenți și tensiuni, precum și pentru valorile relative ale fluxului magnetic, care oferă o imagine clară despre caracteristicile acestor regime.

**Cuvinte-cheie:** Investigațiile în baza modelului, moduri asimetrice, miez din trei tije, schema de conexiune a bobinelor în zigzag, fluxul magnetic de secvență homopolară.

### INVESTIGATION OF ASYMMETRICAL MODES OF THREE-PHASE THREE-LEG TRANSFORMER WITH WINDINGS CONNECTION IN ZIGZAG

V.A. Bosneaga, V.M. Suslov

Power Engineering Institute of Academy of Sciences of Moldova

**Abstract.** Calculations and analysis were performed and specific characteristics of steady state asymmetric modes were investigated in three-phase three-leg transformer with zigzag diagram of windings connection, taking into account the electromagnetic coupling of the windings, located on different legs. Calculations and analysis were performed for the distribution transformer of 10/0.4 kV. The most characteristic steady state asymmetrical modes, which occur during different short circuits, were investigated, including those, associated with the occurrence of zero sequence magnetic flow. For the considered regimes vector diagrams were constructed for currents and voltages, as well as for the relative values of magnetic flow, which give a clear idea about their particular features.

**Keywords:** Simulation, asymmetric modes, three legs magnetic circuit, zigzag windings connections, zero-sequence magnetic flow.

## Введение.

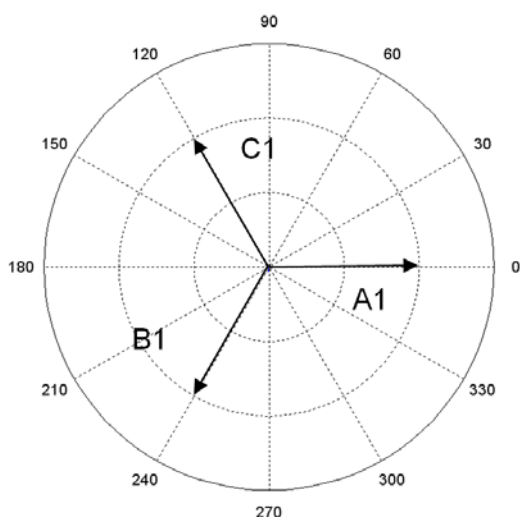
Исследованию и расчету несимметричных режимов работы силовых трансформаторов посвящено достаточно большое количество работ, основы были заложены в классических книгах Петрова Г.Н., Вольдека А.И., Васютинского С.Б.[1-4] и др., затем исследования продолжены в [5-10] и др. (перечень не является исчерпывающим). Тем не менее, публикации, развивающие различные аспекты этой проблемы, в том числе с использованием вновь создаваемых математических моделей трехфазных трансформаторов, продолжают появляться, в том числе и в последние годы [13-20]. Однако нет какой-либо публикации, где были бы подробно рассмотрены несимметричные режимы для схемы с соединением обмоток в зигзаг. Для выполнения данной работы использована предложенная авторами модель трехфазного трехстержневого трансформатора, описанная в [21].

Рассмотрим с помощью упомянутой модели особенности характерных установившихся несимметричных режимов трехстержневого силового распределительного трансформатора со схемой  $Y/z_0$  при изолированной нейтрали на стороне среднего напряжения и заземленной нейтрали на стороне низкого напряжения. При расчетах используем каталожные исходные данные Минского трансформаторного завода (<http://metz.by/>) для распределительных трансформаторов для прямой последовательности (применительно к трансформатору типа ТМГ мощностью 100 кВА, напряжением 10/0,4 кВ имеем:  $I_0=2,6\%$ ,  $U_{кз}=4,7\%$ ,  $P_{хх}=270$  Вт,  $P_{кз}=2270$  Вт).

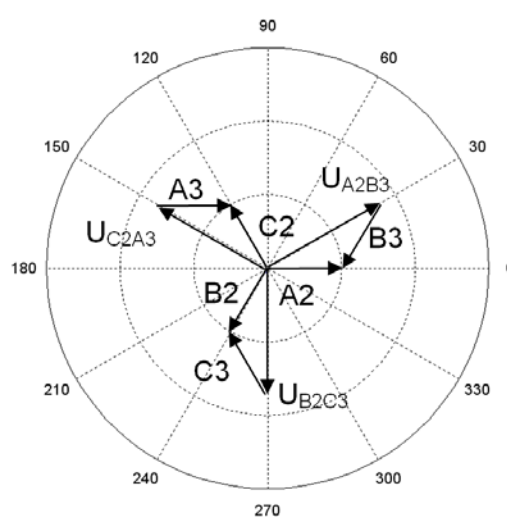
Кроме того, для данного трансформатора изготовителем предоставлено измеренное сопротивление нулевой последовательности со стороны обмотки ВН (для схемы  $Y/y_0$ ):  $Z_0=1,3$  Ом, величина потерь в режиме холостого хода для нулевой последовательности принята равной  $P_{0xx} = 2000$  Вт. На основании этих данных по общеизвестным формулам (например [22, стр. 185-190] ) можно рассчитать действующие значения номинальных токов обмоток ВН ( $I_{вн}=5,8$  А) и НН ( $I_{нн}=152$  А), тока холостого хода на стороне ВН  $I_0=0,15$  А, номинальных напряжений обмоток ВН (5,77 кВ) и НН (127 В), активных сопротивлений и сопротивлений короткого замыкания пар обмоток, а также всех других величин, которые необходимы для построения данной модели.

Похожий вариант трансформатора рассматривается, например, в работах [11,12]. Во второй работе приведены более подробные данные о величинах токов короткого замыкания для различных схем трансформаторов с высшим напряжением 6 кВ, в том числе и для схемы зигзага, однако для корректного сравнения результатов необходимо располагать полными исходными данными по параметрам трансформаторов, заложенными в [12]. Для большей наглядности результаты расчетов будем приводить не в виде таблиц с числами, а в виде векторных диаграмм (ВД), а численные значения - приводить по мере необходимости. На ВД рис. 1, 2 приведены в качестве характеристики исходного режима вектора напряжений первичных и вторичных обмоток трансформатора по схеме равноплечего зигзага (при этом количества витков и величины напряжений вторичных полуобмоток, образующих зигзаг, одинаковы). Обмотки, расположенные на одном стержне и относящиеся к одной из фаз, обозначены буквами А, В, С, цифры 1,2,3 относятся к первичной и вторичным обмоткам. Соответственно, напряжения фаз нагрузки содержат в индексе обозначения обмоток, напряжения которых суммируются для получения соответствующего плеча нагрузки (причем первой записана обмотка, соединенная с нейтральной точкой – т.е., например, имеется фаза нагрузки  $U_{A2B3}$ ).

На последующих рисунках приведены в виде векторных диаграмм токов результаты расчетов различных несимметричных режимов. На рис. 3 построены ВД напряжений на обмотках НН и на нагрузке при однофазном коротком замыкании (ОКЗ, закорочена нагрузка A2B3), в качестве исходного принят симметричный режим нагрузки по рис. 1,2. Как видно из ВД рис. 3, напряжения в «здоровых» фазах нагрузки  $U_{B2C3}$  и  $U_{C2B3}$  (показаны пунктиром) несколько меньше номинального, а фазовый угол больше обычных  $120^\circ$  градусов. Система напряжений вторичных обмоток, составляющих зигзаг (напряжения первичных обмоток A1, B1, C1 выглядят аналогично, поэтому не показаны) искажена, при этом напряжения на закороченных полуобмотках A2B3 (как и следовало ожидать) одинаковы, на оставшихся полуобмотках A3, B2, составляющих здоровые фазы нагрузки, напряжения значительно ниже номинального значения в 127 В и имеют фазовый сдвиг менее нормального, а напряжения полуобмоток фазы C2,C3 также одинаковы, а их величина близка к номинальной. Ток ОКЗ, полученный в результате расчета, равен 113 А, что приблизительно согласуется с результатом, приведенным в [12] для напряжения 6 кВ. Картина магнитных потоков в стержнях в этом режиме приведена на рис. 4., из которого видно, что сумма потоков в стержнях приблизительно равна нулю, и следовательно, поток нулевой последовательности при данных условиях отсутствует, что, как известно, является существенным преимуществом схемы зигзага.



**Рис. 1.** ВД напряжений первичных обмоток, соединенных в звезду в симметричном режиме нагрузки

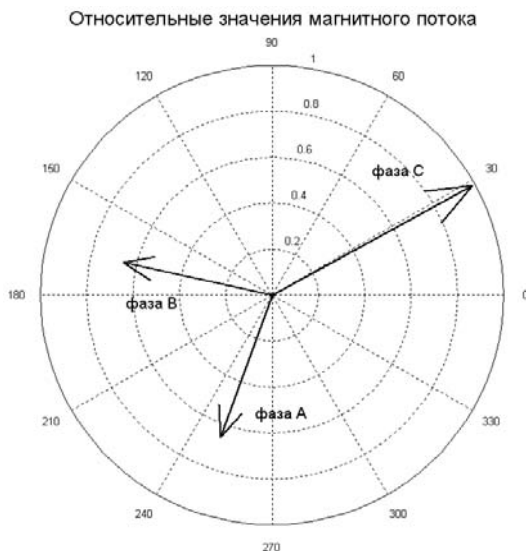


**Рис.2.** ВД напряжений нагрузки и вторичных обмоток, соединенных в зигзаг в симметричном режиме нагрузки

Кроме того, расчеты подтверждают, что звезда напряжений обмоток ВН остается симметричной и отсутствует смещение нейтрали. Следует отметить, что упомянутые положительные свойства схемы соединения в зигзаг имеют место только в случае одинакового числа полуобмоток, составляющих плечи зигзага. На рис. 5, 6 показаны ВД для рассмотренного режима ОКЗ нагрузки, соответствующие соотношению чисел витков полуобмоток 2:1. Из рис. 5, где приведены относительные значения потоков в стержнях, следует появление в этом случае значительного потока нулевой последовательности, кроме того, появляется смещение нейтрали на стороне ВН. Кардинально изменяется также не только картина магнитных потоков в стержнях, но и ВД напряжений на нагрузке и обмотках (рис. 6).



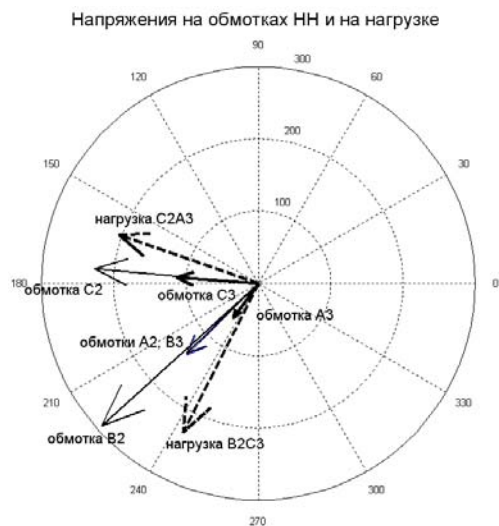
**Рис. 3.** Напряжения на обмотках НН и на нагрузке при замыкании одной из фаз нагрузки



**Рис.4.** Относительные значения магнитных потоков в стержнях при ОКЗ нагрузки



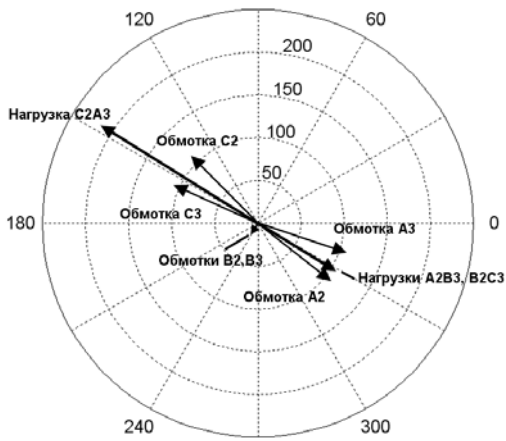
**Рис. 5.** Относительные значения магнитных потоков при ОКЗ нагрузки и неравноплечих обмотках, составляющих зигзаг



**Рис.6.** Напряжения на обмотках НН и на нагрузке при соотношении плеч зигзага 2:1 при однофазном к.з. нагрузки ( $U_{A2B3}=0$ )

Таким образом, при отличающихся числах витков полуобмоток, составляющих «плечи» зигзага, положительные свойства, свойственные данной схеме в несимметричных режимах работы, практически утрачиваются.

Рассмотрим далее менее вероятный, но также возможный режим замыкания двух плеч нагрузки между собой без земли (ДКЗ без земли) на стороне НН, при этом на них, естественно, будут одинаковые напряжения ( $U_{A2B3}=U_{B2C3}$ ). На рис. 7 показана ВД напряжений обмоток НН и нагрузок при ДКЗ без земли. Напряжение на замкнутых нагрузках резко падает и трехфазная система напряжений на нагрузке сильно искажается.



**Рис.7.** Напряжения нагрузок и обмоток НН при двухфазном к.з. (исходный режим-симметричная нагрузка)



**Рис. 8.** ВД токов источника при двухфазном кз без земли и при симметричной нагрузке

Видно также, что напряжения на обмотках В2 и В3 совпадают и почти не видны на ВД ввиду относительно небольшой величины. Кроме того, на всех обмотках стороны НН напряжение значительно ниже номинального. Как видно из рис. 8, сумма токов источника питания нулевая, что понятно, так как на стороне ВН нет пути для протекания токов нулевой последовательности, из расчета следует, что тока в нейтрали на стороне НН также нет, соответственно, нет и тока нулевой последовательности и потока нулевой последовательности. Величина наибольшего тока к.з. в этом режиме достигается в фазе В источника питания и равна 150 А.

Далее рассмотрим двухфазного короткого замыкания (ДКЗ) с землей. При этом напряжения двух плечей нагрузки  $U_{A2B3}=U_{B2C3}=0$ . На рис. 9, 10 представлены ВД, построенные для данного случая. На рис. 9 представлены напряжения обмоток на стороне НН, видно, что при таком повреждении напряжения обмоток еще больше уменьшаются, однако система токов от источника питания остается уравновешенной и становится даже более симметричной, хотя наибольшее значение тока замыкания (рис.10) остается практически таким же.



**Рис.9.** Напряжения обмоток на стороне НН при двухфазном к.з. с землей



**Рис. 10.** Токи источника при двухфазном к.з. с землей

Токи от источника питания (рис.10) в этом режиме более симметричны, чем при ДКЗ без земли и также уравновешены.

Рассмотрим далее для полноты особый несимметричный режим, связанный с возможным внутренним повреждением трансформатора, а именно - однофазное замыкание одной из полуобмоток на стороне НН, примыкающей к нейтрали (в данном случае, фазы А). На рис. 11-14 приведены соответствующие ВД, построенные по результатам расчета. Как следует из рис. 11, где показаны токи замыкания от источника, они относительно невелики, значительно меньше тока ОКЗ, вследствие чего при таком повреждении релейная защита не сработает, однако трансформатор будет перегружаться повышенным током, поэтому желательно предусмотреть защиту от этого режима. Токи и напряжения нагрузки в этом режиме (см. рис.12) близки к симметричным, однако напряжения «здоровых» обмоток В2, В3 и С2, С3 сильно смещены по фазе относительно нормального положения. Из рис.13, где представлены напряжения первичных обмоток, соединенных в звезду с изолированной нейтралью, видно, что система напряжений первичных обмоток существенно несимметрична и имеет место значительное смещение нейтрали. Кроме того, в этом режиме (рис.14) имеется значительный поток нулевой последовательности.

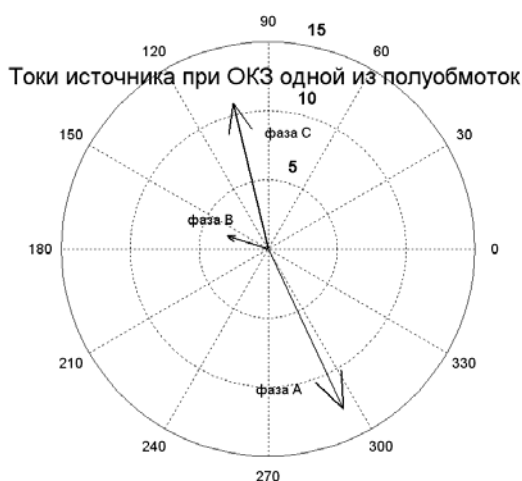


Рис.11. Токи источника при ОКЗ полуобмотки, соединенной с нейтралью

Напряжения обмоток на стороне НН и токи нагрузки при окз одной полуобмотки

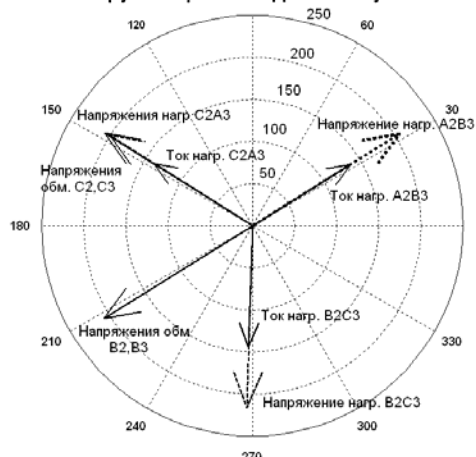
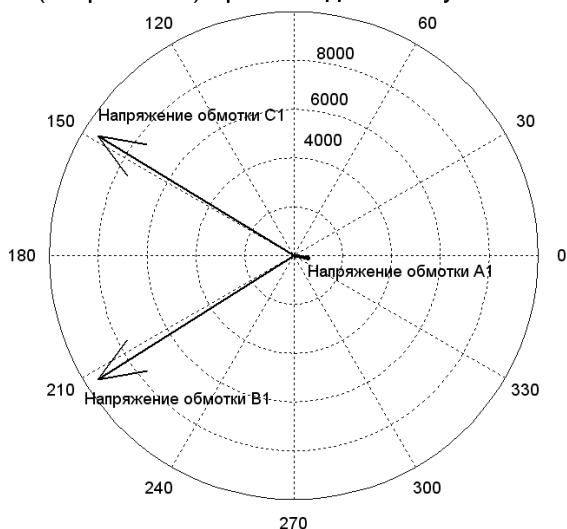
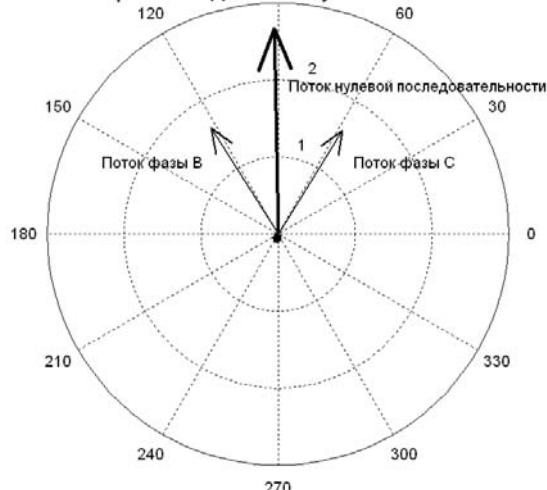


Рис. 12. Напряжения обмоток на стороне НН и токи нагрузки при КЗ полуобмотки, соединенной с нейтралью

Напряжения первичных обмоток (сторона ВН) при окз одной полуобмотки



Относительное значение магнитного потока по стержням при окз одной полуобмотки





**Рис. 13.** Напряжения первичных обмоток при ОКЗ одной полуобмотки на стороне нагрузки

**Рис. 14.** Относительное значение магнитного потока в стержнях и суммарный поток в воздухе при ОКЗ полуобмотки

## ВЫВОДЫ

1. Рассчитаны модули и углы векторов токов и напряжений в обмотках распределительного трехфазного трехстержневого трансформатора с соединением вторичных обмоток в зигзаг при различных режимах короткого замыкания, построены векторные диаграммы, дающие наглядное представление об особенностях таких режимов.

2. В режимах обычных однофазных и двухфазных коротких замыканий схема зигзага обеспечивает отсутствие тока и потока нулевой последовательности и, соответственно, меньшие искажения напряжений и токов в режимах несимметричных к.з. и нагрузки. Однако при неодинаковых числах витков обмоток, составляющих плечи зигзага, отмеченные преимущества этой схемы теряются. Кроме того, они также исчезают при однофазном замыкании одной из полуобмоток, очевидно, что похожий эффект будет происходить также при витковых замыканиях в обмотках.

## Литература.

- [1] Петров Г.Н. Трансформаторы, том.1, Основы теории, ГЭИ, 1934, 445 стр.
- [2] Петров Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч.1. Введение. Трансформаторы. М., «Энергия», 1974, 240 с.
- [3] Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978, 832 с.
- [4] Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л., Энергия, 1970, 432 с.
- [5] Сергеенков Б.Н. Электрические машины. Трансформаторы. Под редакцией Копылова И.П., М. Высшая школа, 1989, 352 с.
- [6] Забудский Е.И. Электрические машины. Ч.1. Трансформаторы. М, 2002, 168 с.
- [7] Лосев С.Б., Чернин А.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. М, Энергоатомиздат, 1983, 527 с.
- [8] Берман А.П. Расчет несимметричных режимов электрических систем с использованием фазных координат. Электричество, 1985 г. №12, стр. 6-12.
- [9]. Гусейнов А.М. Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся режимов в сложных системах. Электричество, 1989, № 3.
- [10]. Карасев Д. Д., Карасев Е.Д. Расчет режимов электрических сетей по программе «ФАЗАН». Под ред. А.И. Артемова. М.: Моск. энерг. ин-т., 1989.
- [11] Фишман В., Федоровская А. Силовые трансформаторы 10(6)/0,4 кВ. Области применения разных схем соединения обмоток. Новости Электротехники, №5, 2006 г.
- [12] Фишман В., Федоровская А. Силовые трансформаторы 10(6)/0,4 кВ. Области применения разных схем соединения обмоток. Новости Электротехники, №6 (60) 2009 год.
- [13] Евдокунин Г.А., Дмитриев М.В. Трансформаторы в электрической сети. Моделирование переходных процессов с учетом конфигурации магнитной системы. "Новости электротехники" №5 (53) 2008 год
- [14] В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Издательство Иркутского государственного университета, 2005 г. – 274 с. (с. 45 – модель трансформатора).

- [15] Гусев А.С., Свечкарёв С.В., Плодистый И.Л. Универсальная математическая модель трёхфазных трансформаторов и авто- трансформаторов // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 77–81.
- [16] Мартынов В.А. Несимметричные режимы работы силовых трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y0. «Вестник ИГЭУ» Вып. 2, 2009 г, с. 1-5.
- [17] Пустоветов М.Ю. Математическая модель трехфазного трансформатора, Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 4.
- [18] Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings). 2012. URL:<http://www.mathworks.com/help/toolbox/phsysmod/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypetwowindings.html> (дата обращения: 06.04.2012).
- [19] Three-Phase Transformer 12 Terminals. 2012. URL: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/phsysmod/powersys/ref/threephasetransformer12terminals.html> (дата обращения: 06.04.2012).
- [20] URL:<http://www.mathworks.com/help/phsysmod/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypethreewindings.html> (дата обращения: 20.09.2013).
- [21] Бошняга В.А., Сулов В.М. Моделирование трехфазных трансформаторных устройств с трехстержневым магнитопроводом для инженерных расчетов несимметричных режимов при различных схемах соединения обмоток. Проблемы региональной энергетики, № 2(22), 2013 г.
- [22] Электротехнический справочник: в 3-х томах, Т.2. М, Энергоатомиздат, 1986, 712 стр.

#### Сведения об авторах



**Бошняга В.А.**, окончил Кишиневский политехнический институт в 1971 г. Защитил диссертацию на степень кандидата технических наук в Институте Электродинамики Академии наук Украины в 1988 г. Ведущий научный сотрудник, область научных интересов связана с расчетами режимов электрических систем с использованием разрабатываемых моделей трансформаторных устройств.

E-mail: [valeriu.bosneaga@gmail.com](mailto:valeriu.bosneaga@gmail.com)



**Сулов В.М.**, окончил Кишиневский политехнический институт в 1972 г. Научный сотрудник, область научных интересов связана с электропередачами переменного тока повышенной пропускной способности, их влиянием на окружающую среду, режимами энергетических систем, переходными электромеханическими процессами, моделированием в энергетических системах.