

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ УСТРОЙСТВ С ТРЕХСТЕРЖНЕВЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК

Бошняга В.А., Суслов В.М.

Институт энергетики Академии наук Молдовы

**Аннотация.** Предложена модель для расчета и исследования установившихся несимметричных режимов работы и переходных процессов трехфазного трансформаторного устройства с трехстержневой конструкцией магнитопровода и произвольной схемой соединения обмоток, учитывающая электромагнитную связь обмоток, расположенных на различных стержнях. На примере распределительного трансформатора 10/0,4 кВ проведены расчеты и анализ наиболее характерных установившихся несимметричных режимов, возникающих при коротких замыканиях, обрывах фаз, несимметриях нагрузки для наиболее распространенных схем соединения обмоток и, в том числе, при наличии магнитного потока нулевой последовательности. Для рассмотренных режимов и схем построены векторные диаграммы для токов и напряжений, а также относительных значений потока, которые дают наглядное представление об их особенностях.

**Ключевые слова:** Модель, несимметричные режимы, трехстержневой магнитопровод, произвольные схемы соединения обмоток, магнитный поток нулевой последовательности.

### MODELAREA DISPOZITIVELOR DE TIP TRANSFORMATOR TRIFAZAT CU MIEZ DIN TREI TIJE PENTRU CALCULILE INGINEREȘTI A MODURILOR ASIMETRICE PENTRU DIFERITE SCHEME DE CONEXIUNE A BOBINELOR

Boșneaga V.A., Suslov V.M.

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei

**Rezumat.** Este propus modelul pentru efectuarea calculului și cercetărilor a modurilor permanente asimetrice și proceselor tranzitorie a dispozitivului tip transformator trifazat cu miez din trei tije și schema arbitrară de conexiune a bobinelor, ținând cont de cuplarea electromagnetică dintre înfășurările situate pe diferite tije. Folosind ca exemplu transformatorul de distribuție 10/0,4 kV s-au efectuat calcule și analize a celor mai caracteristice moduri permanente asimetrice, care apar la scurtcircuite, rupturi de faze, sarcina dezechilibrată în diferite scheme de conectare a bobinelor și, în special, asociate cu apariția fluxului magnetic de secvență homopolară. Pentru regimurile și schemele luate în considerație sunt construite diagrame vectoriale pentru curenți și tensiuni, precum și pentru valorile relative ale fluxului magnetic în tije, care oferă o imagine grăitoare despre caracteristicile acestor regime.

**Cuvinte-cheie:** Model, moduri asimetrice, miez din trei tije, scheme arbitrare de conexiune a bobinelor, fluxul magnetic de secvență homopolară.

### MODELING OF THREE-PHASE THREE LEG TRANSFORMER DEVICES FOR ENGINEERING CALCULATIONS OF ASYMMETRICAL MODES FOR DIFFERENT SCHEMES OF WINDING CONNECTIONS

Bosneaga V.A., Suslov V.M.

Power Engineering Institute of Moldova Academy of Sciences

**Abstract.** The model is proposed for the calculation and research of steady state asymmetric modes and transients in three-phase three legs transformer devices with arbitrary diagram of windings connection, taking into account the electromagnetic coupling of the windings, located on different legs. Using as an example distribution transformer of 10/0.4 kV calculations and analysis were performed of the most characteristic steady asymmetrical modes, that occur during short circuit, phase failure, unbalanced load for the most common windings connections and, in particular, associated with the occurrence of zero sequence magnetic flow. For the considered regimes and schemes 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:** Model, asymmetric modes, three legs magnetic circuit, arbitrary windings connections, zero-sequence magnetic flux.

## **Введение.**

Исследованию и расчету несимметричных режимов работы силовых трансформаторов посвящено достаточно большое количество работ, начало было положено в классических книгах Петрова Г.Н., Вольдека А.И., Васютинского С.Б. [1-4], затем продолжено в [5,6] и др. Позднее вопросам моделирования трансформаторов для расчета несимметричных режимов электрической сети уделили внимание также Лосев С.Б., Берман А.П., Карасев Д.Д., Гусейнов А.М. и другие [7-10] (перечень не является исчерпывающим). Тем не менее, публикации на эту тему, развивающие различные аспекты этой проблемы (исследование переходных процессов, учет различных факторов, которые было затруднительно рассмотреть ранее, таких, как нелинейность кривой намагничивания, гистерезис и др.) продолжают появляться, в том числе и в последние годы [11-20].

Для конструктивного исполнения трансформаторов в виде трех однофазных групп была разработана методика и программа расчета установившихся несимметричных режимов участка электрической сети с такими устройствами при произвольной схеме соединения обмоток [21]. Упомянутая методика и программа апробирована и используется в одной из энергосистем Украины для расчетов с учетом пофазного регулирования под нагрузкой (РПН) или при разных параметрах трансформаторов резервных фаз. Однако, в упомянутой программе отсутствует модель трехстержневого трансформатора, попытка реализации которой была предпринята позднее, например, в [22].

Поэтому, в данной работе (с учетом опыта, полученного при изучении трансформаторных фазоповоротных устройств ([23-25]) авторы предлагают методику моделирования трехфазного трансформаторного устройства для случая трехстержневой конструкции магнитопровода и произвольной схемы соединения обмоток. Наряду с общераспространенными схемами на основе звезды, треугольника, зигзага, предложенный подход позволяет также моделировать специфические для фазоповоротных трансформаторов схемы, включающие, например, соединение обмоток в многоугольник, зигзаг многоугольника и др. [26-28] (этому направлению использования разработанной модели предполагается посвятить отдельную работу).

Следует отметить, что имеются работы (см. например, [13-17]), в которых описаны математические модели трехстержневых трансформаторов в виде соответствующих систем уравнений, построенных на базе геометрических и/или каталожных данных, однако, к сожалению, лишь в некоторых из них (см., например, [11,14,16]) приведены конкретные примеры выполненных с их применением численных расчетов несимметричных режимов, основываясь на которых, можно было бы оценивать и сравнивать результаты, полученные различными авторами.

Кроме того, в некоторых работах (см., например, [15]) при создании модели принято допущение об отсутствии электромагнитной связи между обмотками разных фаз, что не всегда справедливо для трехстержневого трансформатора. Например, при возбуждении обмотки, расположенной на одном из стержней, в невозбужденных разомкнутых обмотках других стержней [20], будет наводиться существенная эдс (немного меньше половины приложенного напряжения, в соответствии с параметрами трансформатора), что свидетельствует о наличии заметной электромагнитной связи в случае трехстержневого трансформатора. Кстати говоря, такой режим, наряду с аналогичным, но при замкнутых обмотках других стержней (при котором в замкнутых обмотках невозбужденных стержней возникают существенные токи) можно использовать в качестве своеобразного теста для определения работоспособности модели трехстержневого трансформатора.

В работе [17] предложена математическая модель и заявлена возможность расчета несимметричных режимов, которая обеспечивает, по словам автора, в отличие от публикаций [18, 19] возможность моделирования трехстержневых трансформаторов с любыми схемами соединения обмоток. Однако, неясно, какие заложены в модель исходные данные по параметрам трансформатора, которые обеспечивают возможность учета электромагнитной связи обмоток разных стержней, что позволило бы моделировать все возможное разнообразие несимметричных режимов. В работе [20] описано расширение модели [19] на случай трех обмоток в каждой фазе, однако, (также как и в [17]) моделируются только стандартные схемы соединения обмоток, и нет возможности моделирования специальных схем соединения обмоток, применяемых в фазоповоротных трансформаторах.

В данной работе сделана попытка восполнить упомянутые пробелы, рассмотреть и проанализировать особенности некоторых характерных установившихся несимметричных режимов для наиболее распространенных схем соединения обмоток силовых трансформаторов и наглядно представить полученные результаты, с тем, чтобы они могли быть проверены другими численными или экспериментальными методами.

### **Описание модели трехфазного трехстержневого трансформатора и некоторых результатов, полученных с ее помощью.**

Основой для построения модели является классическая трехлучевая схема замещения приведенного трехобмоточного трансформатора, распространенная на случай трехфазного трансформатора и дополненная идеальными трансформаторами для электрической развязки обмоток трансформатора и получения истинных (в отличие от приведенных) значений токов и напряжений, а также вспомогательными элементами, моделирующими процессы в магнитопроводе, в том числе и процессы циркуляции части основного потока по стенкам бака трансформатора через воздух от ярма к ярму.

Основные допущения, принятые в модели.

1. Параметры обмоток приняты равными как для уравновешенного режима, так для режима нулевой последовательности [3, стр. 322]. (Это допущение, кроме заметного упрощения модели, позволило не задавать отдельно для трансформатора труднодоступные параметры короткого замыкания для нулевой последовательности, которыми обычно не располагают производители трансформаторов.)

2. Все параметры модели приняты линейными (то есть, не зависящими от режима).

Модель трансформатора имеет блочную структуру и состоит из 3-х блоков, моделирующих процессы в обмотках, по одному на каждый стержень, а также дополнительного блока, моделирующего процессы в стали всех трех стержней трансформатора, который состоит из 3-х взаимосвязанных катушек индуктивности. Такая структура дополнительного блока позволяет учесть различие параметров ветви намагничивания трансформатора для прямой и нулевой последовательности и обеспечивает возможность реализации произвольной схемы соединений обмоток трансформатора.

Модель предусматривает ввод всех необходимых исходных данных и параметров трансформатора, характеризующих его как в нормальном нагрузочном режиме, так и в режимах холостого хода и короткого замыкания. Данная модель, дополненная отдельными блоками трехфазного источника и нагрузок, позволяет получить осциллограммы переходного процесса и параметры установившегося несимметричного режима, как в комплексном виде, так и в виде векторных диаграмм.

Более подробному описанию данной модели планируется посвятить отдельную работу, здесь же будут представлены некоторые результаты, полученные с ее использованием, которые, по мнению авторов, иллюстрируют новые возможности для

анализа разнообразных несимметричных режимов трехстержневых трансформаторов с любыми схемами соединения обмоток на основе единого подхода.

Рассмотрим несколько примеров для описания возможностей и получаемых с помощью упомянутой модели результатов. Для случая, например, распределительного трансформатора со схемой  $Y/y_0$ , типичной является работа с изолированной нейтралью на стороне среднего напряжения и заземленной нейтралью 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:  $I_0=2,6\%$ ,  $U_{кз}=4,5\%$ ,  $P_{хх}=270$  Вт,  $P_{кз}=1970$  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 и величина потерь в режиме холостого хода для нулевой последовательности  $P_{0xx} = 2000$  Вт. На основании этих данных по общеизвестным формулам (см. например [29, 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 (220 В), активных сопротивлений и сопротивлений короткого замыкания пар обмоток, а также всех других величин, которые необходимы для построения данной модели.

Похожий вариант трансформатора рассмотрен, например, в работе [11], причем там приведена величина тока однофазного короткого замыкания (ОКЗ), равная 22 А для трансформатора с высшим напряжением 6 кВ. Для большей наглядности результаты расчета будем приводить не в виде таблиц с числами, а в виде векторных диаграмм, а численные значения – приводить по мере необходимости. По результатам проведенного в данной работе расчета ОКЗ из исходного режима номинальной нагрузки на рис.1,2 построены векторные диаграммы (ВД) токов в первичных и во вторичных обмотках, а на рис. 3 – векторная диаграмма напряжений на обмотках ВН. Ток однофазного к.з. поврежденной фазы А на стороне ВН трансформатора чуть больше 17 А (см. рис.1 ), что вполне согласуется с результатом [11] с учетом того, что в данном случае напряжение стороны ВН равно 10 кВ (вместо 6 кВ). При этом токи в здоровых фазах (сильнее выражено на первичной стороне), как следует из приведенных результатов, неодинаковы по величине, а токи первичных и вторичных обмоток находятся приблизительно в противофазе (см. ВД токов рис. 1,2). Как видно из ВД рис. 3,

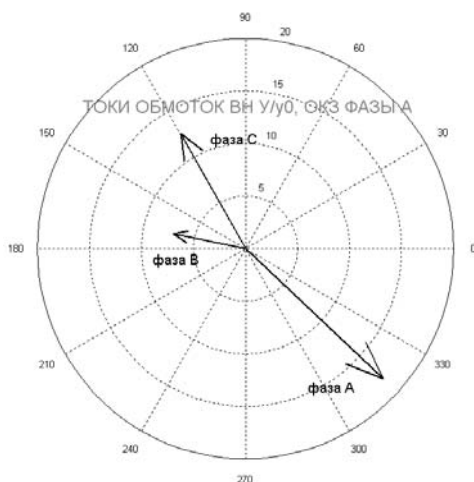


Рис. 1. Токи первичных обмоток при ОКЗ фазы А

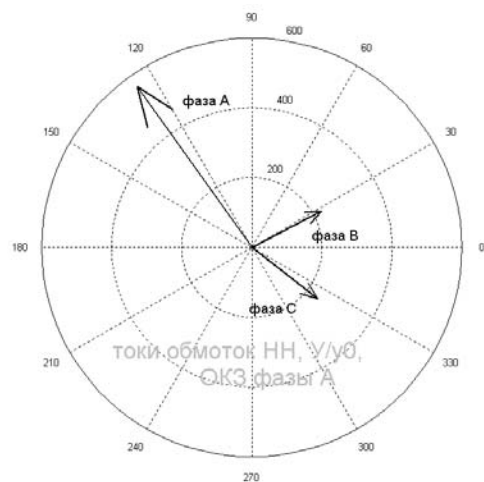


Рис.2. Токи вторичных обмоток при ОКЗ фазы А.

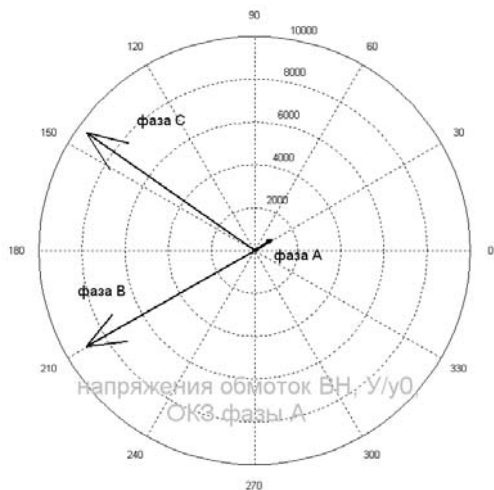


Рис. 3. Напряжения первичных обмоток при ОКЗ фазы А

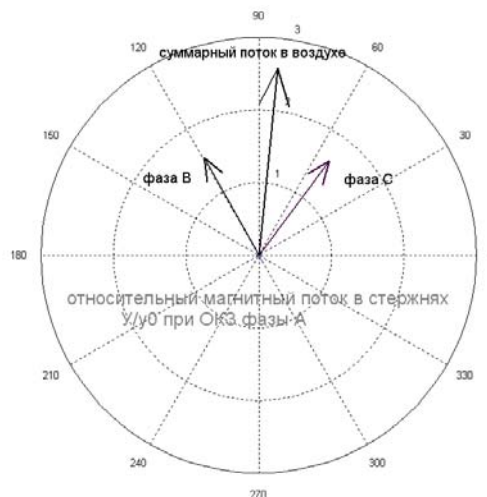


Рис.4. Относительные магнитные потоки в стержнях и в воздухе.

звезда напряжений обмоток ВН (как и следовало ожидать) претерпевает сильное искажение с большим смещением нейтрали, поэтому система напряжений первичных обмоток содержит существенную нулевую составляющую, однако, вследствие изолированной нейтрали, токи нулевой последовательности по первичным обмоткам не протекают, и сумма токов первичных обмоток равна нулю. Напряжение на закороченной обмотке фазы А составляет порядка 670 В, в то время как на здоровых фазах, ввиду сильного смещения нейтрали, оно повышается до 9,3 кВ по сравнению с номинальным значением 5,77 кВ (здесь следует отметить, что это свидетельствует о необходимости учета в таких режимах нелинейности кривой намагничивания, что приведет в действительности к значительно большим токам намагничивания). Зато сумма токов во вторичных обмотках (рис. 2) не равна нулю, и через заземленную нейтраль протекает значительный ток (порядка 423 А), что свидетельствует о наличии несбалансированного тока нулевой последовательности, вызывающего поток нулевой последовательности, замыкающийся вне сердечника, что отмечено также и в [11]. На рис. 4 приведена ВД относительных значений потоков в стержнях, поток в закороченной фазе А практически незаметен на фоне потоков в стержнях фаз В и С, сумма которых образует суммарный поток нулевой последовательности, замыкающийся помимо магнитопровода.

Аналогичный вид имеют ВД (см. рис 5-7) в случае однофазной активной нагрузки фазы А трансформатора (в фазах В и С нагрузки нет), с той лишь разницей, что искажения системы напряжений выражены значительно слабее, чем в случае ОКЗ, а токи близки к номинальным. При этом ток нагруженной фазы лишь немного отстает по фазе от напряжения, что обусловлено активным характером подключенной нагрузки. Смещение нейтрали в этом случае также выражено значительно слабее, а ток нейтрали и, соответственно, поток нулевой последовательности соответственно, меньше (см. рис. 7).



Рис. 5. Токи первичных обмоток при однофазной нагрузке



Рис.6. Напряжения первичных обмоток при при однофазной нагрузке



Рис.7. Относительные магнитные потоки стержней при однофазной нагрузке

Рассмотрим далее результаты, полученные для данного трансформатора при несимметричной нагрузке, аналогичной той, которая приведена в [16, (см. таблицу)], при этом сопротивления нагрузки зададим соответствующие принятым в [16] (относительные значения сопротивлений нагрузок фаз  $Z_a=1$ ,  $Z_b=2$ ,  $Z_c=4$ ). ВД диаграммы полученных напряжений и токов обмоток приведены на рис. 8 - 11.



Рис. 8. Напряжения первичных обмоток при несимметричной нагрузке

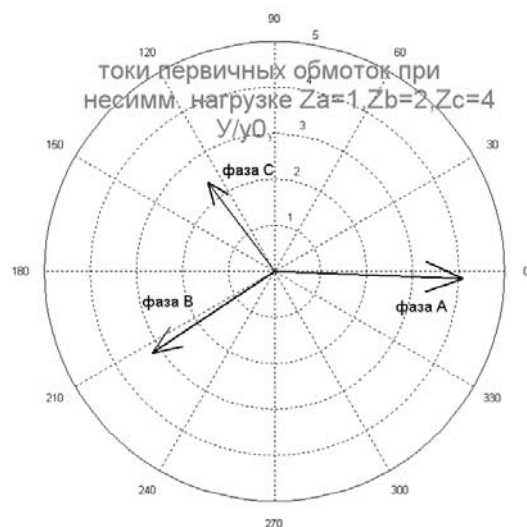


Рис.9. Токи первичных обмоток при несимметричной нагрузке





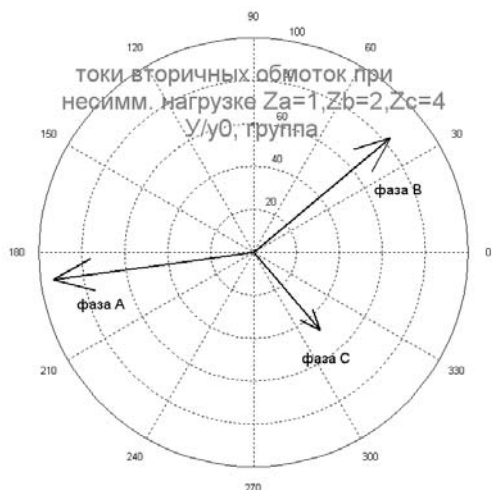
Рис. 10. Токи вторичных обмоток при несимметричной нагрузке



Рис.11. Относительные магнитные потоки при несимметричной нагрузке

Наблюдается искажение звезды напряжений на обмотках ВН (см. рис. 8), несимметрия токов первичных и вторичных обмоток, находящихся в противофазе (рис. 9, 10) и наличие потока нулевой последовательности, вызванного неуравновешенной системой токов в обмотке НН, где протекают токи нулевой последовательности. Качественно полученные результаты аналогичны [16], однако имеются и некоторые расхождения, причину которых еще предстоит выявить. Следует отметить, что по сравнению с [16], полученные с помощью предложенной модели ВД дают информацию не только о модулях, но и о фазах величин, что обеспечивает более наглядное и полное представление об особенностях практически любых несимметричных режимов, включая несимметричную нагрузку по фазам, короткие замыкания, неполнофазные режимы и их различные комбинации.

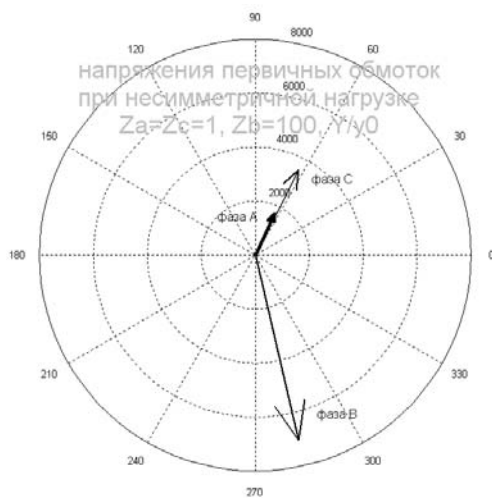
Отметим, что, несмотря на то, что для обычных распределительных трехфазных трансформаторов нет необходимости применять групповой трансформатор, составленный из трех однофазных единиц, сравнение результатов расчетов несимметричных режимов для группового и трехстержневого трансформаторов (приведены также и в [16]) может быть полезно ввиду того, что групповые трансформаторы широко применяются для больших мощностей. Рассчитанные величины вторичных токов для рассматриваемого режима в случае группового трансформатора приведены на ВД рис. 12, которую можно сравнить с рис. 10 для трехстержневого трансформатора. Особых кардинальных отличий в данном режиме в поведении группового и трехстержневого трансформаторов, проявляющихся в ВД, не наблюдается, однако токи в нейтрали на стороне НН, тем не



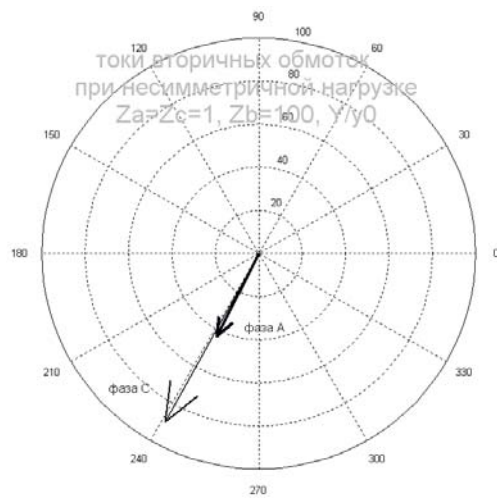
менее, отличаются заметно: в групповом трансформаторе ток составляет порядка 5 А (чуть более 3% номинального тока), в трехстержневом – около 86 А, т.е. более половины номинального тока, что свидетельствует о наличии в случае трехстержневого трансформатора заметного потока нулевой последовательности. Качественно похожий результат получен и в [16]. Аналогичный вид имеют и ВД напряжений обмоток, поэтому здесь не приводятся.

Рис. 12. Токи вторичных обмоток при несимметричной нагрузке для группового трансформатора.

Приведем далее результаты расчетов одного неполнофазного режима с обрывом фазы А, рассмотренного также в [16], при относительных сопротивлениях нагрузки  $Z_a=Z_c=1$  и большом сопротивлении нагрузки  $Z_b=100$  в фазе В. На рис. 13 приведены ВД системы напряжений первичных обмоток, которая характеризуется существенной несимметрией и наличием напряжения нулевой последовательности, однако токи нулевой последовательности, как уже было отмечено, в данном режиме по ним не протекают ввиду изолированной нейтрали. Для первичных токов ВД не приведена ввиду ее очевидного характера – ток в отключенной фазе равен нулю, а токи в фазах В и С равны по величине и противоположно направлены. Далее на рис. 14 показана ВД вторичных токов, ток в фазе В с большим сопротивлением на ВД незаметен, токи в фазах А и С с одинаковой нагрузкой отличаются по величине практически в 2 раза, в соответствии с приложенными напряжениями (см. ВД рис.13). Вторичные напряжения выглядят аналогично ВД рис.13.



**Рис. 13.** Напряжения первичных обмоток в неполнофазном режиме при несимметричной нагрузке



**Рис.14.** Токи вторичных обмоток в неполнофазном режиме при несимметричной нагрузке

Качественно величины токов и напряжений совпадают с [16], хотя имеются некоторые количественные отличия. Например, напряжение обмотки фазы В, где практически нет нагрузки ( $Z_b=100$ ), на рис. 13 превышает номинальное (в [16] приведено значение 0,659 о.е.). В этом режиме имеется заметный неуравновешенный ток нулевой последовательности в обмотках НН (ток нейтрали равен 130 А).

Расчеты данного режима для группового трансформатора показали, что для него этот режим является фактически режимом намагничивания, токов нагрузки вообще практически нет, напряжения обмоток фаз А, С близки к нулю, зато на обмотке фазы В, в которую, в отличие от фаз А, С, включено относительно большое сопротивление, напряжение несколько превышает номинальное и равно 7 кВ (в [16] это напряжение равно 0,99 о.е.). Таким образом, в тех случаях, когда возникает заметный магнитный поток нулевой последовательности, поведение трехфазного трансформатора ощутимо отличается от группового.

Рассмотрим далее результаты, полученные с использованием разработанной модели при расчете несимметричных режимов трансформатора со схемой Д/у0 той же мощности 100 кВА, напряжением 10/0,4 кВ. Сохраним для простоты те же параметры трансформатора, изменив в исходных данных для расчета только номинальное значение напряжения и тока в обмотках ВН, соединенных в треугольник, которые в данном случае будут равны соответственно 10 кВ и 3,33 А. На рис. 15, 16 показаны ВД токов источника питания и токов в обмотках ВН, соединенных в треугольник при ОКЗ на стороне НН, в качестве исходного взят режим симметричной номинальной нагрузки. Из ВД рис. 15



видно, что сумма токов источника, как и должно быть, равна нулю, токи к.з. замыкаются через 2 фазы источника, из рис. 16 видно, что токи обмоток неповрежденных фаз близки к номинальным (показаны утолщенными линиями), ток к.з. наблюдается только в обмотке поврежденной фазы, а в треугольнике обмоток ВН циркулирует значительный ток нулевой последовательности, что согласуется с общепринятыми представлениями. Наибольший ток стороны ВН в 76 А при этом повреждении (без учета дополнительного сопротивления дуги) достигается в фазе С источника питания. В работе [16] приведен ток однофазного замыкания с учетом сопротивления дуги, равный 62 А. Таким образом, получаемые с помощью разработанной модели результаты близки к приведенным в [16]. ВД токов в обмотках на стороне НН, соединенных в звезду с заземленной нейтралью, имеют вид, аналогичный рис. 16, но вектора токов направлены встречно, в этих обмотках также протекает ток нулевой последовательности, в результате взаимодействия токов нулевой последовательности сторон ВН и НН возникает результирующий поток нулевой последовательности, замыкающийся вне магнитопровода. На рис. 17 приведена ВД относительных значений магнитного потока фаз, наглядно отражающая полученный результат.



Рис. 15. Токи источника питания при ОКЗ на стороне НН

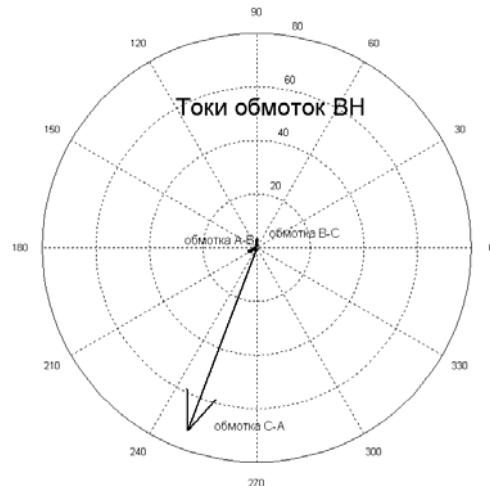


Рис. 16. Токи обмоток ВН при ОКЗ на стороне НН.



Рис.17. Относительные магнитные потоки фаз и суммарный поток нулевой последовательности.

Далее приведем основные результаты выполненных расчетов для режима двухфазного к.з. В качестве исходного принят симметричный режим холостого хода. Полученные данные представлены на ВД рис.18-21. Наибольший ток повреждения имеет место в фазе В источника питания и равен 126 А (см. рис.18). Сравнение с [11], где ток для двухфазного кз составляет 103 А, приводит к такому же выводу, который ранее при однофазном к.з., т.е. качественно величины токов повреждения совпадают, однако для констатации удовлетворительного совпадения результатов необходимо убедиться в использовании одинаковых исходных данных при расчете. Токи в обмотках ВН показаны на рис. 19, ток обмотки СА (равен 3,2 А), выделенный более толстой линией, близок к номинальному току нагрузки, поэтому на диаграмме плохо различим по сравнению с гораздо большими токами повреждения в остальных двух обмотках. На рис. 20 приведены ВД напряжений обмоток НН, видно, что напряжения замкнутых между собой обмоток совпадают ( $U_{ab}=U_{bc}$ ), а напряжение на «здоровой»

обмотке  $U_{ca}$  близко к номинальному. На ВД рис. 21 показаны токи обмоток НН, ток «здоровой» обмотки  $I_{ca}$  близок к номинальному для вторичной обмотки (145 А, выделен более толстой линией) и намного меньше токов повреждения в обмотках АВ и ВС.



Рис. 18. Токи источника питания при двухфазном КЗ на стороне НН.



Рис. 19. Токи обмоток ВН при двухфазном КЗ на стороне НН.

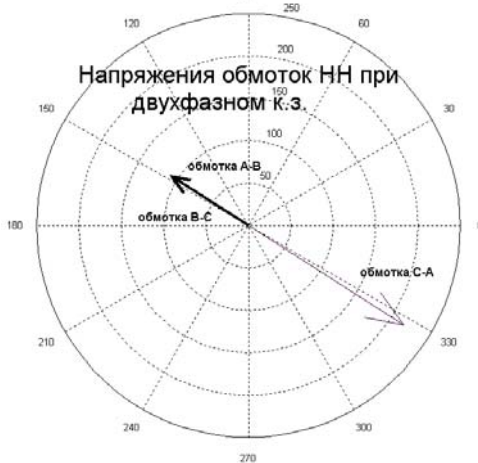


Рис. 20. Напряжения обмоток НН при двухфазном КЗ



Рис.21. Токи обмоток НН при двухфазном КЗ

В этом режиме, как показали проведенные расчеты, поток нулевой последовательности, замыкающийся вне магнитопровода, отсутствует. Это видно из ВД рис. 19, 21, где токи первичных и вторичных обмоток взаимно компенсируются.

Рассмотрим еще один вариант несимметричной работы трехфазного трансформатора  $D/y0$ , связанный с обрывом фазы нагрузки на стороне, соединенной в звезду с заземленной нейтралью, который представляет интерес в связи с тем, что позволяет передавать мощность по двум фазам линии (описан применительно к повышающему трансформатору, например, в [12]). На рис. 22 показана ВД токов источника питания, сумма этих токов при изолированной нейтрали равна нулю (токи нулевой последовательности в ней отсутствуют), видно, что источник питания загружен существенно несимметрично.

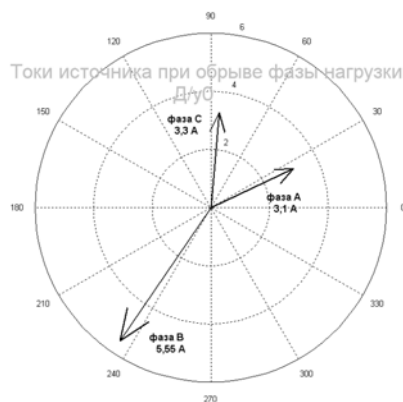


Рис. 22. Токи источника при обрыве фазы нагрузки на стороне

звезды.

В этом режиме системы напряжений обмоток практически симметричны, поэтому не приводятся. На рис. 23 приведена ВД токов в обмотках, соединенных в треугольник, система токов существенно несимметрична и содержит, как известно, составляющие нулевой последовательности. ВД токов в обмотках звезды имеет аналогичный характер (поэтому не приведена), при этом токи соответствующих обмоток уравнивают первичные токи. Соответственно, протекающие по обеим обмоткам токи нулевой последовательности, которые замыкаются в треугольнике и текут через заземленную нейтраль звезды, компенсируют друг друга, поэтому поток нулевой последовательности вне магнитопровода отсутствует, и, соответственно, в этом режиме нет дополнительных потерь от него в баке и деталях магнитопровода.

При рассмотрении величины потерь в обмотках в этом режиме (см. также подход [12]) можно выделить два случая: неизменное **сопротивление** нагрузки (что при обрыве фазы приводит к уменьшению суммарной мощности нагрузки на одну треть) и неизменная **мощность** нагрузки. В первом случае, как следует из результатов расчета, по обмоткам (кроме той, где имеется обрыв) протекают токи, близкие к номинальным, поэтому в этом режиме потери уменьшаются на треть по сравнению с симметричным режимом. Во втором случае, для сохранения той же передаваемой мощности, необходимо увеличить токи в «здоровых» обмотках, и это, естественно, как подтвердили и проведенные расчеты, приводит к повышению суммарных потерь в обмотках приблизительно в 1,5 раза.

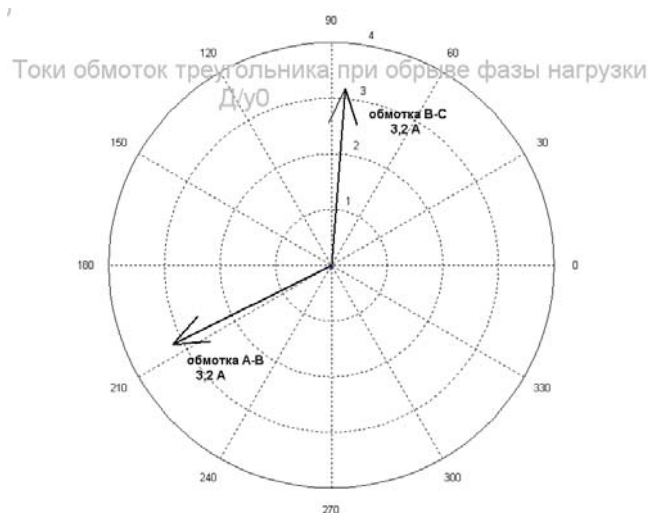


Рис. 23. Токи обмоток соединенных в треугольник при обрыве фазы нагрузки на стороне звезды.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена модель для расчета и исследования установившихся несимметричных режимов работы и переходных процессов трехфазного трансформаторного устройства с трехстержневой конструкцией магнитопровода и произвольной схемой соединения обмоток, учитывающая электромагнитную связь обмоток, расположенных на различных стержнях.
2. Модель позволяет рассчитать модули и углы векторов токов и напряжений в обмотках трехстержневого (а также попутно и группового) трансформатора при любых несимметричных режимах и схемах соединения обмоток и является удобным инструментом, позволяющим исследовать все многообразие несимметричных режимов на основе единого подхода.

## 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 стр.
- [3] Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978, 832 с.
- [4] Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л., Энергия, 1970, 432 стр.
- [5] Сергеенков Б.Н. Электрические машины. Трансформаторы. Под редакцией Копылова И.П., М. Высшая школа, 1989, 352 стр.
- [6] Забудский Е.И. Электрические машины. Ч.1. Трансформаторы. М, 2002, 168 стр.
- [7] Лосев С.Б., Чернин А.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. М, Энергоатомиздат, 1983, 527 стр.
- [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] Александров Г.Н. Режимы работы трансформаторов. Учебное пособие. Санкт-Петербург, 2006, 143 стр.
- [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. (стр. 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, стр. 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/physmod/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypetwowindings.html> (дата обращения: 06.04.2012).
- [19] Three-Phase Transformer 12 Terminals. 2012. URL: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/powersys/ref/threephasetransformer12terminals.html> (дата обращения: 06.04.2012).
- [20] URL: <http://www.mathworks.com/help/physmod/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypethreewindings.html> (дата обращения: 20.09.2013).
- [21] Бошняга В.А. Расчет и анализ несимметричных режимов участка электрической сети с трансформаторными устройствами. Электрические станции, 1997, №3, стр. 58-63.

- [22] Бошняга В.А. Моделирование трехфазных трансформаторов для расчета несимметричных режимов работы электрических сетей. Известия вузов и энергетических объединений СНГ, Энергетика, №1-2, 1997, стр. 14-19.
- [23] Бошняга В.А., Гримальский О.В. Несимметричные режимы работы фазорегулирующего трансформатора Известия Академии наук СССР, Энергетика и транспорт, N 2, 1989 г
- [24] Бошняга В.А. Расчет несимметричных режимов работы фазорегулирующего трансформатора с соединением обмоток в зигзаг. Электричество, N 11, 1990 г.
- [25] Бошняга В.А. Расчет и исследование несимметричных режимов работы фазоповоротного трансформатора Известия вузов, "Энергетика" N 11, 1991 г.
- [26] Evenepoel Walter. Problemes poses par la conception et la realization du decale traversante. Revue Electr. 1967.Vol.5. Nr.5, pp 177-183.
- [27] Mc. Cormick L.S., Hedding R.A. Phase angle regulators optimize transmission line power flow. Westinhouse Engineer. July. 1974, pp 87-91.
- [28] Perco D. Special transformer will control power flow between Ontario-Manitoba. Electrical News and Engineering. July, 1972.
- [29] 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)



**Суслов 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.