

## INVESTIGATION OF ASYMETRIC MODES OF THREE-PHASE THREE LEGS PHASE SHIFTING TRANSFORMER WITH CONNECTION IN DELTA AND TWO ADDITIONAL WINDINGS

V.A.Bosneaga, V.M. Suslov

*Power Engineering Institute of the Academy of Sciences of Moldova*

**Abstract.** The model of power three-phase three legs phase-shifting transformer with connection in delta and two additional windings is realized. Calculations and research of steady state asymmetric modes particularities of given transformer with such windings connection were fulfilled, taking into account the electromagnetic coupling of the windings, located on different legs. Calculations and analysis were made using as an example the distribution transformer with 10 kV high voltages, including the most characteristic steady state asymmetric modes that occur during different short circuits and asymmetric no load modes, associated with the occurrence of zero sequence magnetic flux. For the considered modes vector diagrams for currents and voltages, as well as for the relative values of magnetic fluxes in legs were constructed, which in ensemble give clear idea about their particularities.

**Keywords:** Power three-phase three legs phase-shifting transformer model, asymmetric modes, three legs magnetic circuit, connection in delta with two additional windings, zero-sequence magnetic flux.

### INVESTIGAREA MODURILOR ASIMETRICE A TRANSFORMATORULUI DE REGLARE A FAZEI CU TREI TIJE CU SCHEMA DE CONEXIUNE ÎN TREUNGHII CU DOUĂ ÎNFĂȘURĂRI ADIȚIONALE

Boșneaga V.A., Suslov V.M.

*Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei*

**Rezumat.** S-a realizat modelul transformatorului de putere trifazat pentru reglarea decalajului de fază. Miezul de fier al transformatorului are trei colone. Înfășurările transformatorului au conexiunea în triunghi și sunt dotate cu două înfășurări suplimentare destinate pentru a regla valoarea unghiului decalajului de fază. Cu utilizarea modelului elaborat s-au studiat prin simulări particularitățile regimurilor nesimetrice staționare a acestei construcții a transformatorului, luând în considerare legăturile electromagnetice ale înfășurărilor amplasate pe diferite coloane le miezului de fier. Calculele s-au executat pentru varianta transformatorului de distribuție cu tensiunea nominală 10 kV pentru regimurile nesimetrice staționare care apar ca urmare a scurtcircuitelor, regimurilor nesimetrice de mers în gol, inclusiv condiționate și de secvențele homopolare a fluxului magnetic fundamental din transformator. Pentru regimurile studiate au fost construite diagramele curenților și tensiunilor înfășurărilor, precum și a valorilor fluxului magnetic în unități relative, care și elucidează particularitățile regimurilor de funcționare a transformatorului în aceste situații.

**Cuvinte-cheie:** Transformator trifazat, reglarea decalajului de fază, regim nesimetric staționar.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ФАЗОПОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПО СХЕМЕ «ТРЕУГОЛЬНИК С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ОБМОТКАМИ»

Бошняга В.А., Суслов В.М.

*Институт энергетики Академии наук Молдовы*

**Аннотация.** Реализована модель силового трехфазного фазоповоротного трансформатора со схемой соединения в треугольник с двумя дополнительными фазосдвигающими обмотками с трехстержневой конструкцией магнитопровода, проведены расчеты и изучены особенности установившихся несимметричных режимов работы фазоповоротного трансформатора с данной схемой соединения обмоток с учетом электромагнитной связи обмоток, расположенных на различных стержнях. Расчеты и анализ проведены на примере распределительного трансформатора с высшим напряжением 10 кВ и включают наиболее характерные установившиеся несимметричные режимы, возникающие при различных коротких замыканиях и несимметричных режимах XX, в том числе, при наличии магнитного потока нулевой последовательности. Для рассмотренных режимов построены векторные диаграммы токов и напряжений обмоток, а также относительных значений магнитного потока в стержнях, которые в совокупности дают наглядное представление об их особенностях.

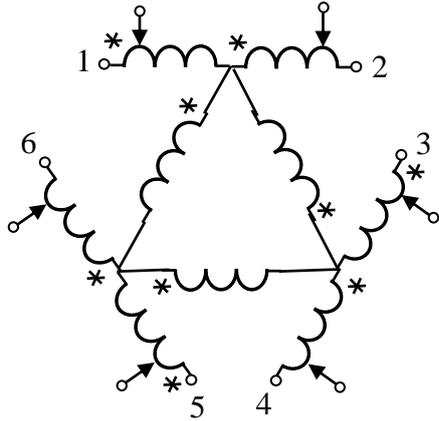
**Ключевые слова:** Модель силового трехфазного фазоповоротного трансформатора, несимметричные режимы, трехстержневой магнитопровод, схема соединения обмоток в треугольник с двумя дополнительными фазосдвигающими обмотками, магнитный поток нулевой последовательности.

## **Введение.**

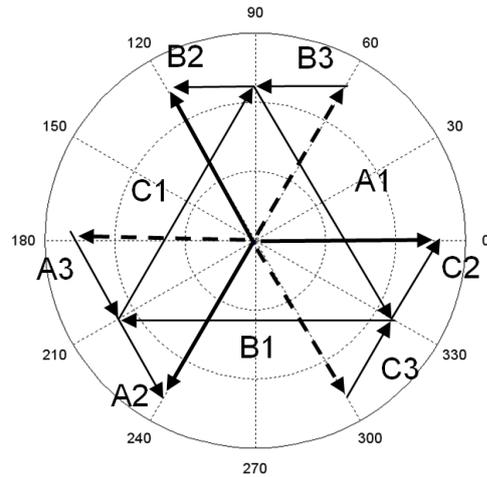
Исследованию и расчету несимметричных режимов работы силовых фазоповоротных трансформаторов (ФПТ), построенных на основе трехфазной группы, состоящей из однофазных единиц, посвящены работы [1-6] и др., в [3-6], например, для расчетов была использована матрица узловых проводимостей рассмотренных устройств, построенная на основе парных сопротивлений короткого замыкания обмоток (к.з.). В [7] описана разработанная на основе данного подхода программа для расчета несимметричных режимов участка электрической сети, содержащей (помимо обычных автотрансформаторов с вольтодобавками для продольного и поперечного регулирования напряжения) в том числе и фазоповоротные трансформаторы, состоящие из трех однофазных трансформаторов. В данной работе, являющейся, по существу, продолжением упомянутых работ, предпринята попытка расширить возможности исследования несимметричных режимов такого рода устройств и распространить их на схемы, содержащие также трехстержневые трансформаторы, в которых имеется существенная электромагнитная связь между обмотками, расположенными на различных стержнях. Предлагаемый подход основан на предложенной авторами модели трехфазного трехстержневого трансформатора, описанной в [8]. В отличие от [9], [10] применяемая здесь модель позволяет рассчитать и проанализировать несимметричные режимы устройства с практически любой схемой соединения обмоток. Известные модели фазоповоротных трансформаторов [11], [12] не позволяют смоделировать рассматриваемую здесь схему.

## **Создание модели, расчет и анализ несимметричных режимов.**

Рассмотрим с помощью упомянутой модели особенности характерных установившихся несимметричных режимов трехстержневого силового фазоповоротного трансформатора со схемой соединения обмоток в треугольник с двумя дополнительными фазосдвигающими обмотками [6]. В данной схеме (рис.1) переключение регулировочных отводов обмоток осуществляется под фазным потенциалом, а в устройстве отсутствует заземленная нейтраль. Все обмотки, относящиеся к одной фазе (как обычно изображают схемы ФПТ) параллельны, начала обмоток обозначены звездочками, входная трехфазная система напряжений прикладывается к точкам 1,3,5, а выходная – снимается с зажимов 2,4,6. Величина фазового сдвига при этом зависит от числа включенных витков регулировочных обмоток, снабженных ответвлениями, а диапазон регулирования угла фазового угла - от соотношения полных чисел витков регулировочной и основной обмотки. В данной работе рассматривается диапазон угла  $60^\circ$  (достигаемый в режиме холостого хода), как наиболее распространенный, при этом числа витков основной обмотки и регулировочных обмоток относятся как 3:1:1. На рис.2 представлена векторная диаграмма (ВД) напряжений обмоток для исходного симметричного режима номинальной нагрузки. Буквами А, В, С обозначены вектора напряжений обмоток фаз, расположенных на трех различных стержнях магнитопровода. В дальнейшем, при построении ВД напряжений, токов обмоток, магнитных потоков будем придерживаться обозначений рис.2.



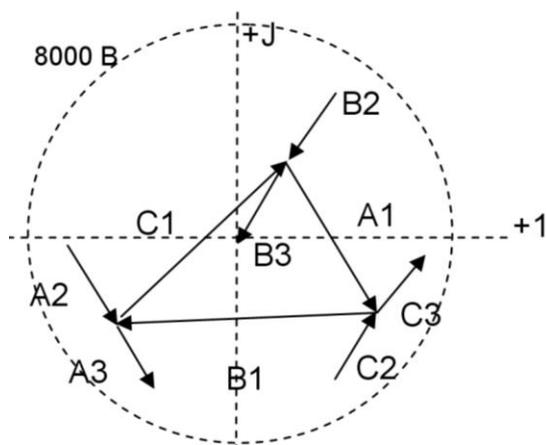
**Рис. 1.** Схема соединения обмоток рассматриваемого трехстержневого трансформатора



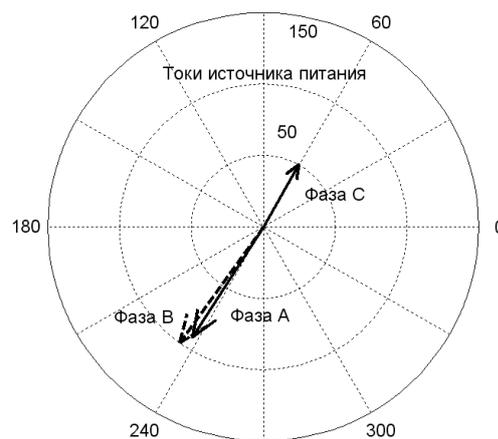
**Рис. 2.** Векторная диаграмма напряжений обмоток для исходного симметричного режима

Рассмотрение проведем на базе распределительного трансформатора класса напряжения 10 кВ, мощностью 100 кВА, причем, ввиду отсутствия данных для трансформатора с рассматриваемым соотношением чисел витков, за основу возьмем трансформатор Y/d с номинальным напряжением первичной обмотки 10 кВ и параметрами холостого хода и короткого замыкания, соответствующими трехфазному распределительному трансформатору такой же мощности Минского трансформаторного завода (<http://metz.by/>) для прямой и нулевой последовательностей. Указанное допущение, позволяет получить качественную картину распределения токов и напряжений в обмотках, а также потоков по стержням в несимметричных режимах, которая в дальнейшем может быть уточнена применительно к конкретному устройству с заданными параметрами.

Рассмотрим сначала наиболее распространенное повреждение – однофазное короткое замыкание (ОКЗ) на землю одного из выходных зажимов устройства. В качестве исходного был принят режим симметричной номинальной нагрузки.



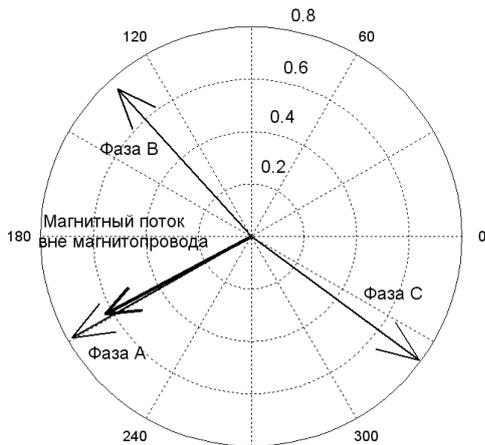
**Рис. 3.** ВД напряжений обмоток при ОКЗ зажима В3 на землю



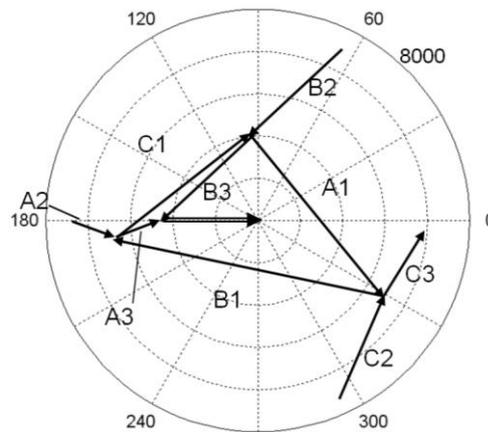
**Рис. 4.** Векторная диаграмма токов источника питания при ОКЗ на стороне нагрузки

Из рис. 3 видно, как изменились фазы и модули напряжений обмоток в результате ОКЗ, конец вектора В3 «притянут» к земле, параллельность векторов напряжений на обмотках фазы В существенно нарушена, в то же время на

неповрежденных фаз вектора остаются почти параллельными (величина напряжений соответствует масштабу в 8000 В для радиуса окружности, показанной пунктиром, такой же масштаб выбран и для остальных ВД напряжений). Система токов на стороне источника питания становится резко несимметричной, ток к.з. протекает через нейтрали источника питания и нагрузки (см. рис.4, цифры снаружи внешней окружности у радиальных лучей показывают фазовые углы в градусах, цифры внутри – величину тока в А, аналогично и на остальных ВД токов). Похожий вид имеет ВД токов в обмотках устройства, токи всех обмоток делятся на две группы, которые находятся приблизительно в противофазе друг по отношению к другу, поэтому здесь не приводятся. Наибольший ток при таком к.з. возникает в закороченной обмотке В3.



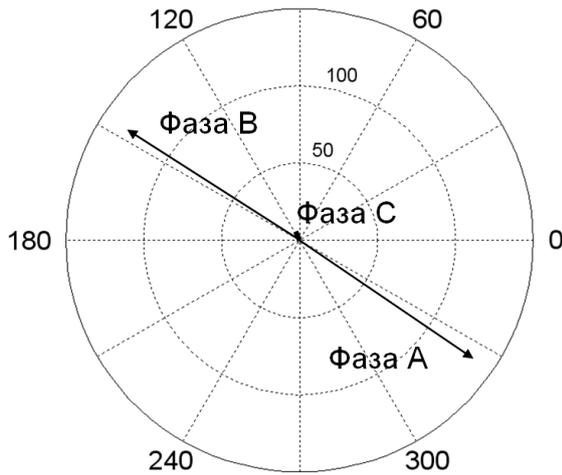
**Рис. 5.** Относительные значения магнитных потоков в стержнях при ОКЗ на стороне нагрузки



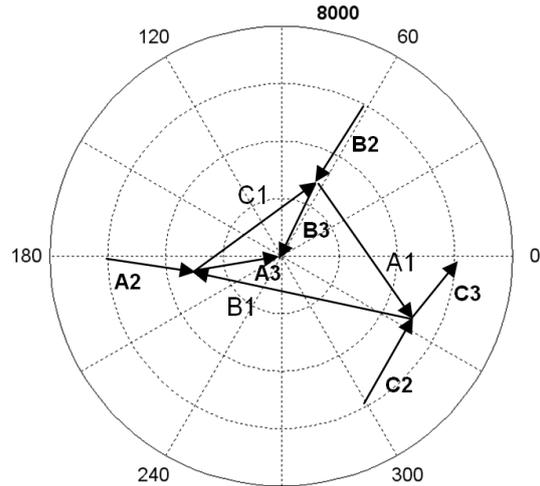
**Рис. 6.** Напряжения обмоток при ДКЗ без земли на стороне нагрузки

На рис.5 показана ВД относительных значений магнитных потоков в стержнях в данном режиме ОКЗ (относительные величины обозначены цифрами у соответствующих окружностей). Из приведенных результатов следует, что режим ОКЗ сопровождается возникновением значительного потока нулевой последовательности (показан на рис.5 утолщенной линией), который появляется в результате того, что сумма магнитных потоков стержней не равна нулю (система неуравновешенна). Такой поток не может возникать в групповых трансформаторах ввиду того, что потоки разных фаз замыкаются независимо друг от друга в пределах магнитной системы каждой фазы.

Рассмотрим далее режим двухфазного к.з. (ДКЗ) на выходных зажимах А3, В3 устройства. ВД напряжений обмоток в указанном режиме приведены на рис.6 (масштаб напряжений, как и ранее, составляет 8000 В). На рис.6 наглядно представлено искажение системы векторов напряжений обмоток по сравнению с симметричным режимом при данном повреждении. Видно, что концы векторов напряжений А3 и В3 (отображающих соответствующие обмотки) стянуты в одну точку, потенциал которой не равен нулю, так как имеет место замыкание без земли. Потенциал этой точки относительно земли отображен утолщенным вектором. Вектора напряжений замкнутых между собой фаз А и В претерпевают значительные изменения как по величине, так и по фазе, а напряжения обмоток «здоровой» фазы С изменены значительно меньше. На рис.7 показаны токи источника питания при ДКЗ фаз А, В без земли, ток неповрежденной фазы С почти не виден на ВД (отображен более толстой линией)

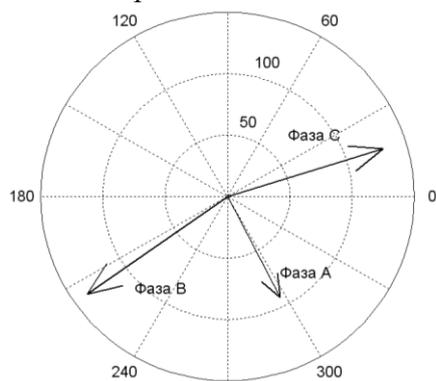


**Рис. 7.** Токи источника питания при ДКЗ фаз А, В без земли на стороне нагрузки



**Рис. 8.** Напряжения обмоток при ДКЗ фаз А, В с землей на стороне нагрузки

ввиду его относительно небольшой величины, а токи поврежденных фаз находятся приблизительно в противофазе. В этом режиме токи обмоток создают уравновешенную (хотя и несимметричную) систему магнитных потоков, и поток нулевой последовательности отсутствует. Рассмотрим далее другое возможное повреждение - двухфазное к.з. с землей. ВД напряжений обмоток для этого случая приведена на рис. 8. Видно, что вектора напряжений закороченных обмоток А3 и В3 стянуты к началу координат, напряжение на концах обмоток, как и должно быть, равно нулю. Как и в предыдущем случае, наименьшее искажение претерпевают напряжения «здоровой» фазы С. На рис.9 показана ВД токов от источника питания, из которой следует, что при данном повреждении токи к.з. есть во всех трех фазах, причем система токов существенно несимметрична. Как следует из проведенных расчетов, в этом режиме (как и в случае ОКЗ) появляется поток нулевой последовательности, соответствующая ВД относительных значений потоков в стержнях магнитопровода приведена на рис. 10. Таким образом, при повреждениях с наличием земли в устройстве появляется существенный магнитный поток нулевой последовательности, замыкающийся вне магнитопровода.



**Рис. 9.** Токи источника при ДКЗ с землей на стороне нагрузки



**Рис. 10.** Относительные значения потоков в стержнях при ДКЗ с землей

## ВЫВОДЫ

1. Реализована модель фазоповоротного трансформатора для схемы соединения обмоток в треугольник с двумя дополнительными фазосдвигающими обмотками, которая позволяет рассчитать модули и углы векторов токов и напряжений в обмотках данного трехстержневого ФПТ при любых несимметричных режимах, включая короткие замыкания, обрывы фаз, несимметричную систему питающих напряжений, несимметричную нагрузку и их комбинации. Она является удобным инструментом, позволяющим исследовать все многообразие несимметричных режимов на основе единого подхода.

2. Модель обеспечивает построение векторных диаграмм токов и напряжений в обмотках, а также относительных магнитных потоков в стержнях данного трансформаторного устройства, что дает наглядное представление об особенностях несимметричных режимов работы рассматриваемой схемы, кроме того, она может быть использована при проектировании и реализации подобных устройств (определение требований к изоляции обмоток, к механической стойкости проводников и др.), а также при разработке релейной защиты.

## Литература.

- [1] Losev S.B., Chernin A.B. Vichislenie electriceskikh velichin v nesimmetrichnyh rejimakh electriceskikh sistem. M, Energoatomizdat, 1983, 527 s. (in Russian)
- [2]. Karasev D. D., Karasev E.D. Raschet rejimov electriceskikh setei po programe «FAZAN». Pod red. A.I. Artiomova. M.: Moskovskii energheticheskii institut. 1989. (in Russian)
- [3] Boshneaga V.A., Grimalskii O.V. Nesimmetrichnye rejimy raboty fazoreguliruiushego transformatora. Izvestia Akademii nauk SSSR, Energhetika I transport, Nr. 2, 1989. (in Russian)
- [4] Boshneaga V.A. Raschet nesimmetrichnyh rejimov raboty fazoreguliruiushego transformatora s soedineniem obmotok v zigzag. Electrichestvo, Nr. 11, 1990. (in Russian)
- [5] Boshneaga V.A. Raschet i issledovanie nesimmetrichnyh rejimov raboty fazopovorotnogo transformatora. Izvestia vuzov, "Energhetika" N 11, 1991. (in Russian)
- [6] Boshneaga V.A. Raschet i issledovanie nesimmetrichnyh rejimov raboty fazopovorotnogo transformatora po sheme «zigzag treugolinika». Sbornik statei «Upravleaemye electroperedachi», vyp.4., 1991, s.65-74. (in Russian)
- [7] Boshneaga V.A. Raschet i analiz nesimmetrichnyh rejimov uchastka electriceskoi seti s transformatornymi ustroystvami. Electricheskie stantsii, 1997, №3, s. 58-63. (in Russian)
- [8]. Boshneaga V.A., Suslov V.M. Modelirovanie trehfaznyh transformatornyh ustroystv s trehsterjnevym magnitoprovodom dlea injenernyh raschetov nesimmetrichnyh rejimov pri razlichnyh shemah soedinenia obmotok. Problemy regionalnoi energhetiki, Nr.2(22), 2013 (<http://journal.ie.asm.md/ru/contents/elektronnyj-zhurnal-n-222-2013>) (in Russian)
- [9] Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings). URL:<http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypetwowindings.html> (accessed: 10.11.2014).
- [10] URL: <http://www.mathworks.com/help/physmod/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypethreewindings.html> (Data: 10.11.2014).
- [11] Three-Phase OLTC Phase Shifting Transformer Delta-Hexagonal (Phasor Type). URL <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephaseoltcphaseshiftingtransformerdeltahexagonalphasortype.html> (accessed :13.10.2014)

[12] Zigzag Phase-Shifting Transformer. 2014, URL <http://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/zigzagphaseshiftingtransformer.html> (accessed: 10.11.2014).

**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 1988г. Ведущий научный сотрудник, область научных интересов связана с расчетами режимов электрических систем с использованием разрабатываемых моделей трансформаторных устройств.  
E-mail:  
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.