



## MODELLING OF ASYMETRIC MODES OF THREE-PHASE THREE LEGS PHASE SHIFTING TRANSFORMERS

Valeriu BOSNEAGA, Victor SUSLOV

Power Engineering Institute of Moldova Academy of Sciences

**Abstract** – The model for three-phase three legs phase-shifting transformers is realized, calculations and research of steady state asymmetric modes particularities were fulfilled, taking into account the electromagnetic coupling of the windings, located on different legs. Calculations and analysis include the most characteristics steady state asymmetric modes that occur during different short circuits and other asymmetric modes, including ones, associated with the occurrence of zero sequence magnetic flux. For the considered modes vector diagrams for currents and voltages were constructed, as well as for the relative values of magnetic fluxes in legs, which in ensemble give a clear idea about their particularities. Obtained results could be used for the design of phase shifting transformers for estimation of winding insulation requirements, electromagnetic forces at short circuits, etc.

**Keywords** – three-phase three legs phase-shifting transformer, asymmetric modes, zero-sequence magnetic flux.

## MODELAREA REGIMURILOR ASIMETRICE A TRANSFORMATOARELOR DE REGLARE A FAZEI CU TREI COLOANE

Valeriu BOSNEAGA, Victor SUSLOV

Institutul de Energetica al Academiei de Științe a Moldovei

**Rezumat** – Este realizat modelul transformatorului trifazat pentru reglarea fazei cu miez din trei coloane, au fost calculate și studiate caracteristicile specifice a modurilor asimetrice ale transformatorului pentru două scheme de conexiune, ținând cont de existența cuplării electromagnetice între bobine, situate pe diferite coloane. Calculele și analize includ diferite scurt-circuite, inclusiv și cu prezența fluxului magnetic de secvență homopolară. Au fost elaborate diagramele vectoriale ale curenților și tensiunilor a bobinelor, precum și a valorilor relative ale fluxului magnetic, care oferă împreună o reprezentare vizuală a particularităților lor. Rezultatele obținute pot fi folosite la elaborarea și proiectarea instalațiilor menționate pentru determinarea cerințelor către izolația bobinelor, estimarea forțelor electromecanice la scurtcircuite, etc.

**Cuvinte cheie** – transformatorului trifazat cu miez din trei coloane, modurile asimetrice, fluxul magnetic de secvență homopolară.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ФАЗОПОВОРОТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ТРЕХСТЕРЖНЕВЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ

В.А. Бошняга, В.М. Суслов .

Институт энергетики Академии наук Молдовы

**Реферат** – Реализована модель трехфазного фазоповоротного трансформатора для схем соединения обмоток с трехстержневой конструкцией магнитопровода, проведены расчеты и изучены особенности установившихся несимметричных режимов работы фазоповоротных трансформаторов с двумя схемами соединения обмоток с учетом электромагнитной связи обмоток, расположенных на различных стержнях. Расчеты и анализ включают 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 обмоток, а также относительных значений магнитного потока в стержнях, которые в совокупности дают наглядное представление об их особенностях. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании фазоповоротных трансформаторов для определения требований к изоляции обмоток, для оценки усилий при коротких замыканиях и др.

**Ключевые слова** – трехфазный фазоповоротный трансформатор с трехстержневым магнитопроводом, несимметричные режимы, магнитный поток нулевой последовательности.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследованию и расчету несимметричных режимов работы силовых фазоворотных трансформаторов (ФПТ), построенных на основе трехфазной группы, состоящей из однофазных единиц, посвящены работы [1-6] и др. В работах [3-6] для расчетов была разработана матрица узловых проводимостей рассмотренных устройств, построенная на основе парных сопротивлений короткого замыкания обмоток. В [7] описана разработанная на основе данного подхода программа для расчета несимметричных режимов участка электрической сети, содержащей (помимо обычных автотрансформаторов с вольтдобавками для продольного и поперечного регулирования напряжения) в том числе и фазоворотные трансформаторы. Однако, перечисленные работы основаны на модели трансформатора, состоящей из группы 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 здесь 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.

## 2. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ

Рассмотрим на основе упомянутой модели [8] особенности характерных установившихся несимметричных режимов трехстержневого силового фазоворотного трансформатора со схемой соединения обмоток в «зигзаг треугольника» [6] В данной схеме (см. рис.1) переключение регулировочных отводов обмоток осуществляется под фазным потенциалом, а в устройстве отсутствует заземленная нейтраль. Все обмотки, относящиеся к одной фазе (так удобно изображать схемы ФПТ) на рисунке 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), 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

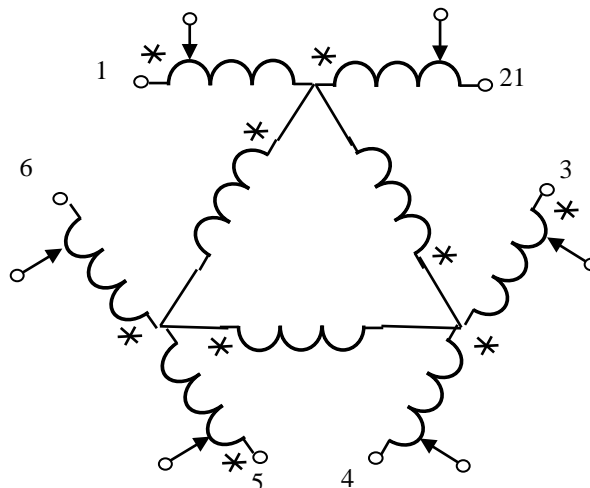


Рис. 1. Схема соединения обмоток рассматриваемого трехстержневого трансформатора

симметричного режима номинальной нагрузки. Буквами А,В,С обозначены вектора напряжений обмоток фаз, расположенных на трех различных

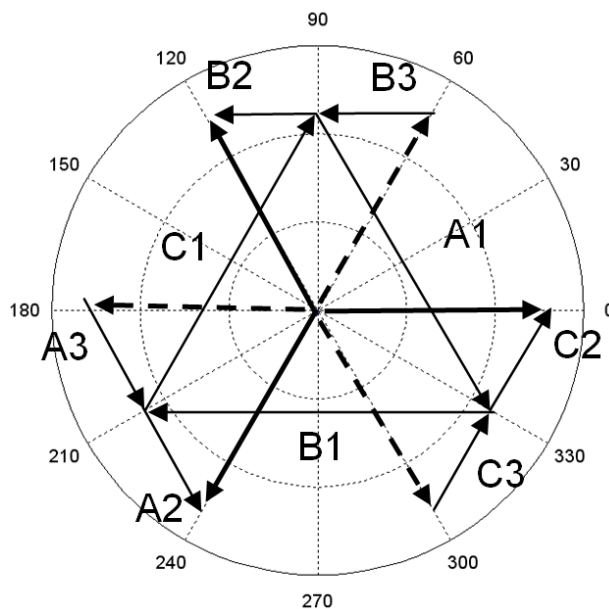


Рис.2. Векторная диаграмма напряжений обмоток для исходного симметричного режима

стержнях магнитопровода. В дальнейшем, при построении ВД напряжений, токов обмоток, магнитных потоков будем придерживаться обозначений рис.2. 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. В дальнейшем она может быть уточнена применительно к конкретному устройству с заданными параметрами. Следует также отметить, что как показали проведенные расчеты, качественные закономерности, присущие различным несимметричным режимам в основном определяются соотношениями параметров трансформатора прямой и нулевой последовательностей и схемой соединения обмоток. Поэтому они могут быть качественно исследованы с помощью выбранного конкретного трансформатора класса напряжения 10 кВ. При необходимости аналогичные расчеты могут быть проведены и для реальных устройств более высоких классов напряжения при заданных значениях параметров.

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. На рис.3 представлены результаты расчета данного режима. Из рис. 3 видно,

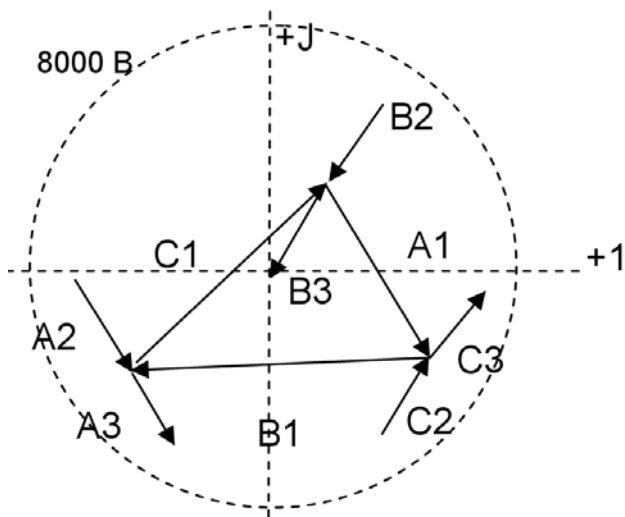


Рис. 3. ВД напряжений обмоток при ОКЗ зажима В3 на землю

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 фазах вектора остаются почти параллельными (величина напряжений соответствует масштабу в 8000 вольт 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

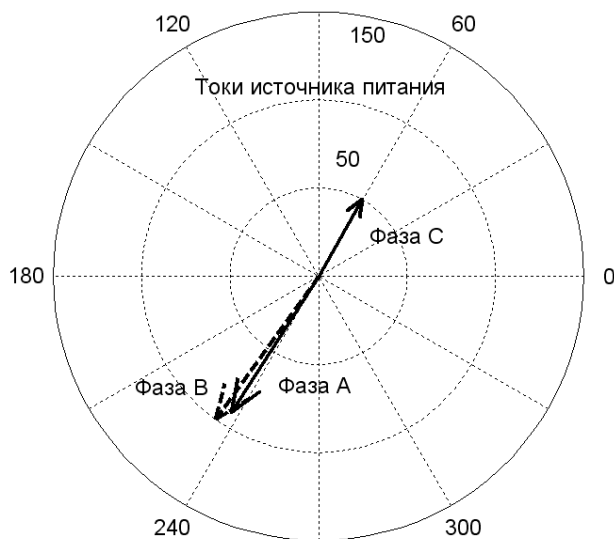


Рис.4. Векторная диаграмма токов источника питания при ОКЗ на стороне нагрузки

показывают фазовые углы в градусах, цифры внутри – величину тока в амперах, 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.

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. 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 напряжения соответствующих обмоток) стянуты в одну точку, потенциал которой не равен нулю, так как имеет место замыкание без земли.

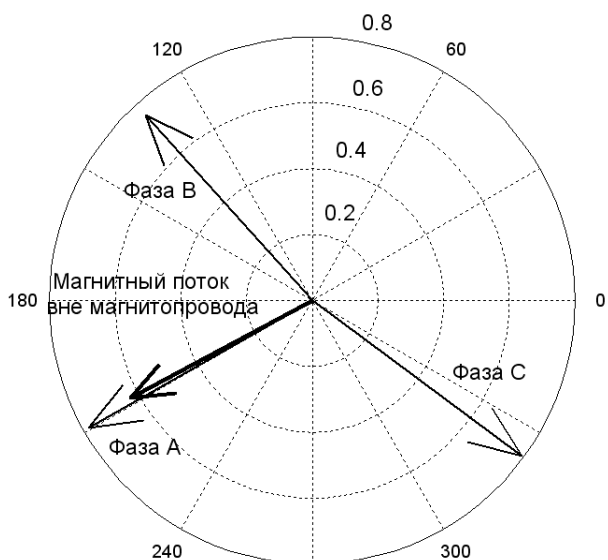


Рис. 5. Относительные значения магнитных потоков в стержнях при ОКЗ на стороне нагрузки

Потенциал этой точки относительно земли отображен утолщенным вектором. Вектора выходных напряжений на замкнутых между собой фазах претерпевают значительные изменения как по величине, так и по фазе, а напряжения обмоток

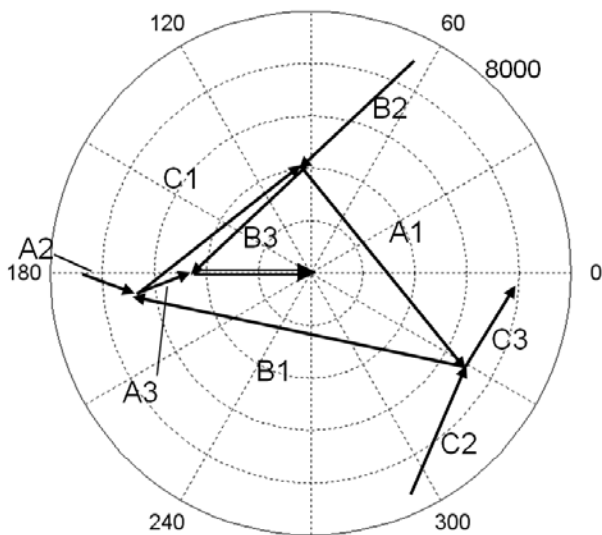


Рис.6. Напряжения обмоток при ДКЗ без земли на стороне нагрузки

«здоровой» фазы изменены значительно меньше. На рис.7 показаны токи источника питания при ДКЗ без земли, ток неповрежденной фазы почти не виден на ВД (отображен отрезком более толстой линии) 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.

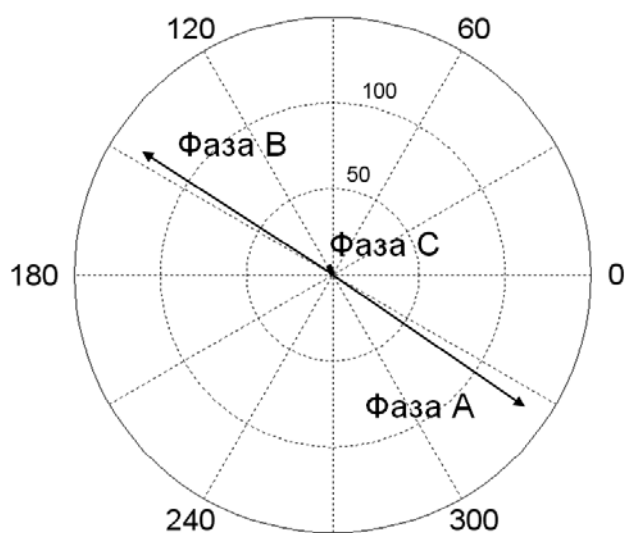


Рис. 7. Токи источника питания при ДКЗ фаз А, В без земли на стороне нагрузки

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

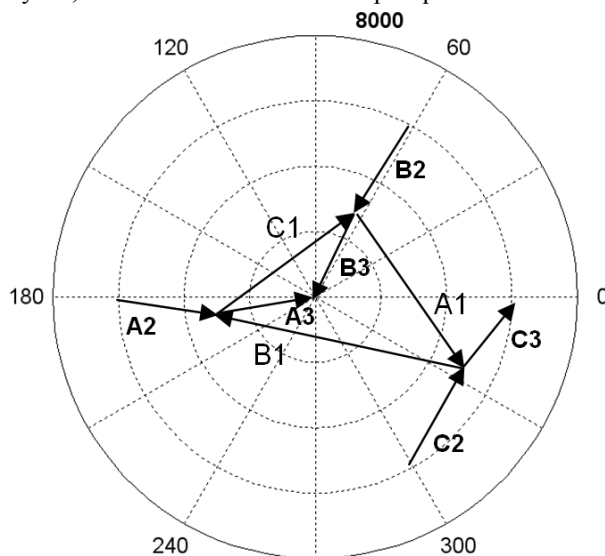


Рис.8. Напряжения обмоток при ДКЗ фаз А, В с землей на стороне нагрузки

напряжения «здоровой» фазы. 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

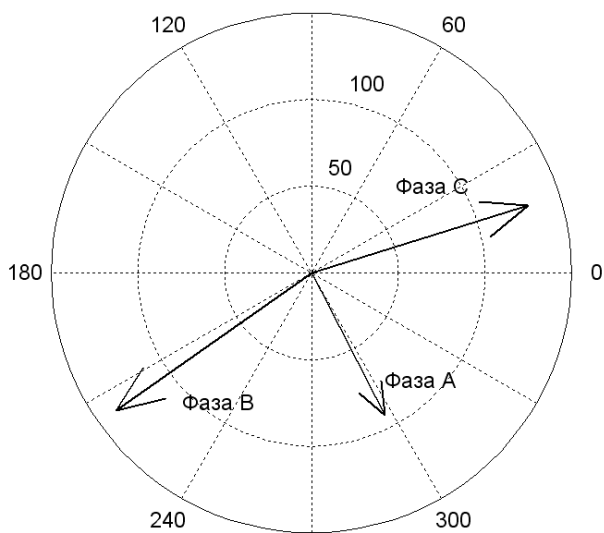


Рис. 9. Токи источника при ДКЗ с землей на стороне нагрузки

рис. 10. Таким образом, при повреждениях с наличием земли в устройстве появляется существенный магнитный поток нулевой последовательности, замыкающийся вне магнитопровода. Рассмотрим далее особенности установившихся несимметричных

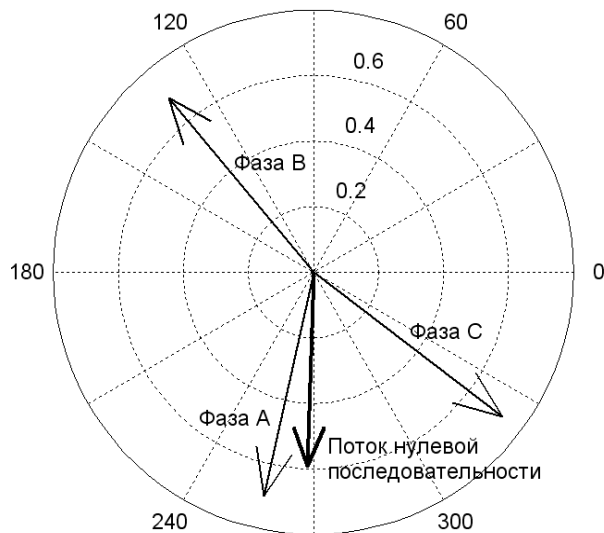


Рис.10. Относительные значения потоков в стержнях при ДКЗ с землей

режимов трехстержневого силового фазоворотного трансформатора со схемой соединения обмоток в «двойной зигзаг», имеющей заземленную нейтраль, где и осуществляется переключение отводов регулировочных обмоток (см. рис.11). Обмотки фаз, расположенные на каждом из трех стержней, обозначены буквами А, В, С с номерами 1, 2, 3, в соответствии с рис.11. Система питающего трехфазного напряжения приложена к началам обмоток А1, В1, С1, а нагрузка подключена к зажимам А3, В3, С3. Причем соотношение чисел

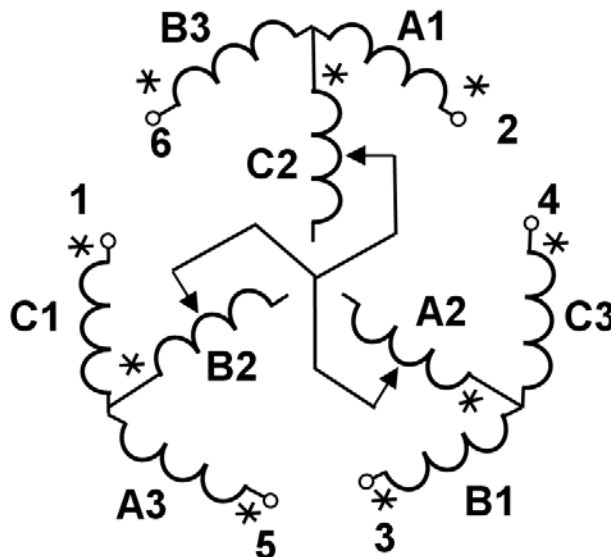


Рис. 11. Схема соединения обмоток рассматриваемого трехстержневого трансформатора

витков рабочих обмоток (вектора А1,В1,С1 и А3,В3,С3) и регулировочных обмоток (вектора А2,В2,С2), соединенных в звезду с заземленной нейтралью (обеспечивающих регулируемый фазовый сдвиг между точками приложения трехфазной питающей системы напряжений 1, 2, 3 и точками подключения нагрузки 4,5,6) выберем равным соответственно 2:1:2. При полностью включенной регулировочной обмотке (имеются вектора напряжений А2,В2,С2 в соответствии с указанным соотношением, см.рис.12), угол фазового сдвига между напряжениями обмоток А1 и А3 по схеме рис.11 составит (в соответствии с векторной диаграммой рис.12) 60°, а номинальные напряжения рабочих и регулировочной обмоток соответственно будут равны 6700 В и 3350 В. При полностью выведенной из работы регулировочной обмотке А2, В2, С2, как легко видеть из ВД рис.12, угол между теми же системами напряжений будет равен 0°. Этот

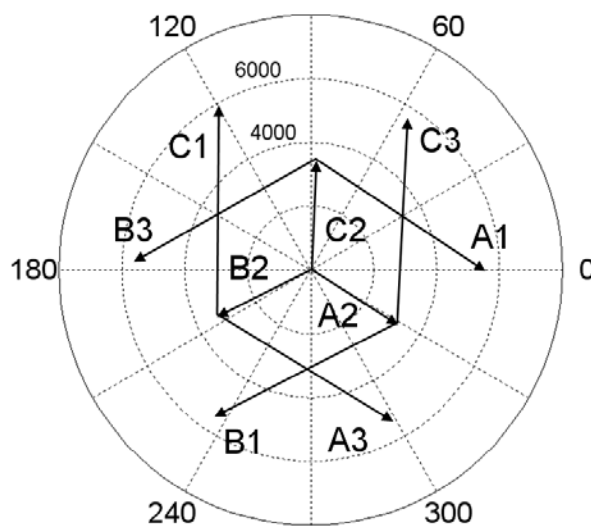


Рис.12. Векторная диаграмма напряжений обмоток для исходного симметричного режима режим практически совпадает с режимом работы

трансформатора со схемой соединения обмоток У/у, рассмотренным, например, в [8]. Поэтому рассмотрим более подробно другой упомянутый крайний режим, обеспечивающий фазовый сдвиг в  $60^\circ$  при полностью включенной регулировочной обмотке. Для сравнения и контроля величин токов и напряжений в несимметричных режимах в качестве ориентира целесообразно использовать результаты расчета токов и напряжений обмоток исходного симметричного режима номинальной нагрузки, приведенные на рис.12. Модули и фазы напряжений соответствуют выбранным номинальным данным с учетом влияния нагрузки. Как видно также из рис.12, системы трехфазных напряжений и токов в данном режиме практически симметричны.

Рассмотрим далее режим однофазного короткого замыкания (ОКЗ) одной из фаз нагрузки на землю при изолированной нейтрали для схемы рис.11. Для получения наглядной картины искажения системы напряжений на рис. 13 построена ВД напряжений обмоток при однофазном к.з. фазы нагрузки. Видно,

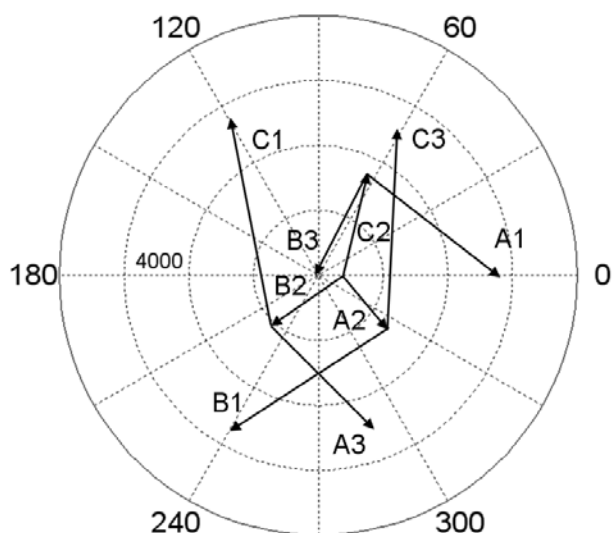


Рис. 13. ВД напряжений обмоток при однофазном к.з. фазы нагрузки и изолированной нейтрали

что токи практически во всех обмотках увеличились при ОКЗ в несколько раз, и система токов стала существенно несимметричной. Кроме того, как показали результаты расчетов, появилось заметное (696 В) смещение нейтрали, сопровождающееся током в ней, равным 69 А. На рис.13 видно смещение нейтральной точки соединения регулировочных обмоток по отношению к началу координат и величина потенциала конца вектора В3 (ввиду того, что начало соответствующей обмотки замкнуто на землю), который близок к нулю. Вектора напряжений обмоток фаз В и С, непосредственно участвующих в данном повреждении, претерпевают наибольшие изменения модулей и фазовых углов. На рис.14 приведена ВД токов источника питания, система токов существенно искажена и неуравновешенна. В случае изолированной от земли нейтрали.

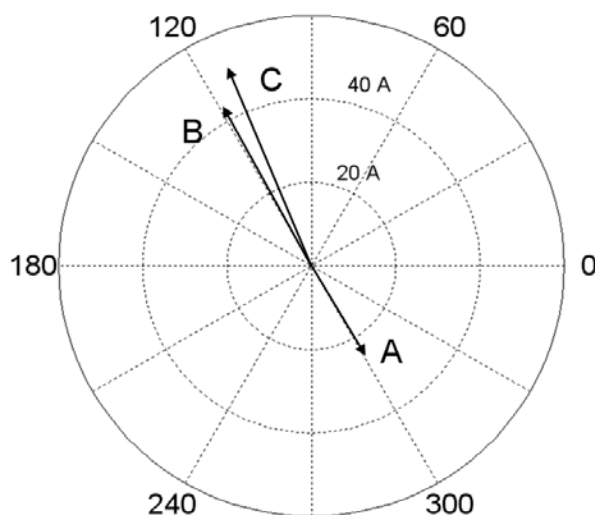
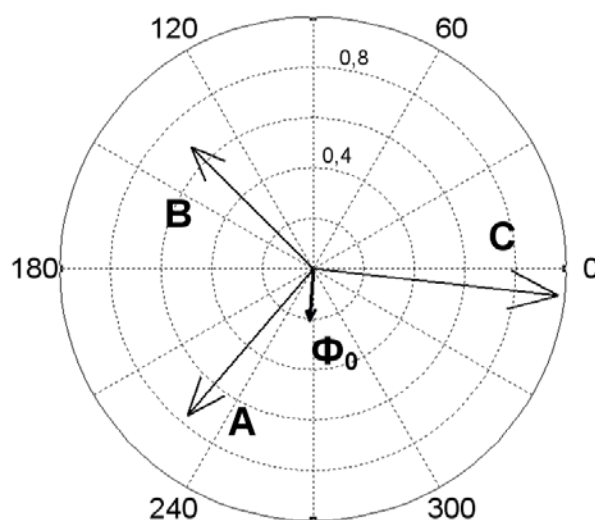


Рис.14. ВД токов от источника питания для режима ОКЗ при изолированной нейтрали трансформатора

трансформатора тока в ней, очевидно, нет. При этом, как показали проведенные расчеты, магнитные потоки стержней образуют несимметричную, но уравновешенную трехфазную систему без потока нулевой последовательности.

Далее рассмотрим режим ОКЗ при заземленной нейтрали трансформатора. Проведенные расчеты показали, что токи и напряжения обмоток при заземлении нейтральной точки обмоток изменяются незначительно по сравнению с предыдущим режимом. Однако есть и существенное различие, заключающееся в появлении в этом режиме небольшого (менее 1 А) тока нулевой последовательности в нейтрали трансформатора, которому сопутствует соответствующий магнитный поток, замыкающийся вне магнитопровода (см. рис 15). Векторная диаграмма напряжений обмоток



15. ВД относительных магнитных потоков при однофазном к.з. фазы нагрузки и заземленной нейтрали трансформатора аналогична представленной ранее на рис. 13, однако смещения нейтрали в этом режиме, естественно, нет,

поскольку она заземлена. Как видно из рис. 15, при однофазном к.з. фазы нагрузки и заземленной нейтрали трансформатора трехфазная система магнитных потоков становится неуравновешенной, появляется заметный поток нулевой последовательности  $\Phi_0$ , аналогично тому, как это происходит в обычном силовом трансформаторе. Рассмотрим далее следующий вид повреждений – двухфазное к.з. на стороне нагрузки на землю (ДКЗ с землей), при этом нагрузка остается подключенной, и ее нейтраль, как и в предыдущих случаях, заземлена. Построенная по этим данным ВД напряжений обмоток приведена на рис. 16. Как видно из данной

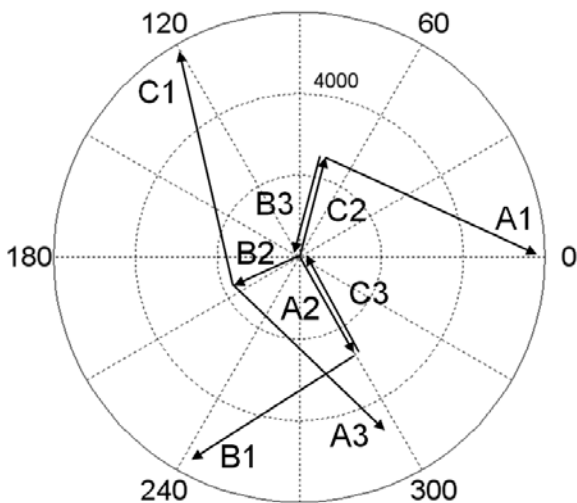


Рис. 16. ВД напряжений обмоток при двухфазном к.з. на землю нагрузки (нейтраль трансформатора заземлена)

диаграммы, концы векторов напряжений замкнутых между собой и на землю обмоток В3 и С3 оказываются практически в начале координат. Для наглядности эти вектора напряжений смещены, чтобы не сливаться на рисунке с векторами А2, С2. Значения токов в обмотках в этом режиме, как правило, больше, чем в случае ОКЗ.

На рис.17 приведена ВД токов источника питания. На нем видно, что система питающих токов резко несимметрична, сопровождается значительным током в нейтрали источника. Таким образом, по обмоткам А1, В1, С1 протекает ток нулевой последовательности.

На рис.18 показана ВД относительных магнитных потоков в данном режиме. На нем видно, что также как и в случае ОКЗ, имеется поток нулевой последовательности, вызванный неуравновешенными токами обмоток.

На рис.19 приведена ВД токов в обмотках устройства в данном режиме. Ввиду того, что ток обмотки А3 значительно меньше остальных токов, он на диаграмме не показан. Можно заметить, что с достаточной точностью соблюдается первый закон Кирхгофа для токов в узлах, где соединяются все

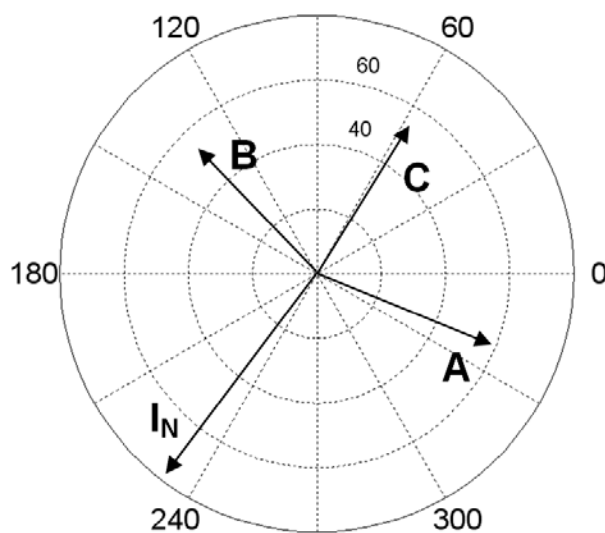


Рис. 17. ВД токов фаз и нейтрали источника питания при двухфазном к.з. с землей на стороне нагрузки

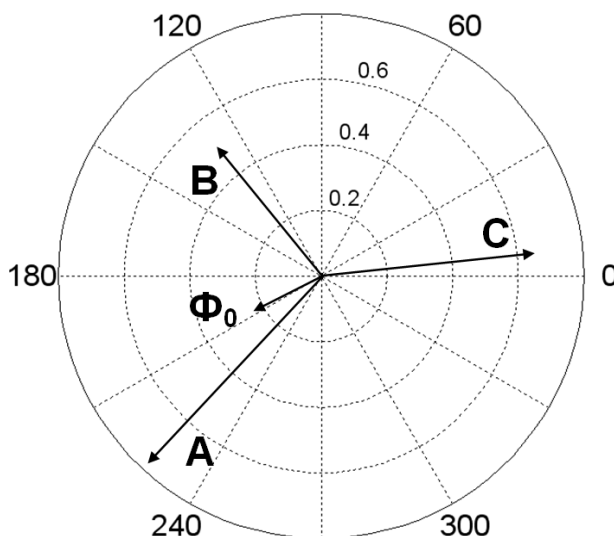


Рис. 18. ВД относительных магнитных потоков при ДКЗ фаз нагрузки с землей и заземленной нейтрали трансформатора

обмотки. Например: для нейтральной точки обмоток А2, В2, С2 сумма соответствующих токов, как видно из рис.19, равна нулю. То же соотношение, с учетом направлений токов относительно начал обмоток, имеет место для токов обмоток А1, В3, С2 и А2, В1, С3 и т.д.

Далее рассмотрим аналогичное предыдущему повреждение - ДКЗ на стороне нагрузки, но без соединения с землей. По полученным данным также построена ВД напряжений обмоток, приведенная на рис. 20. Потенциал в точке соединения обмоток С3-В3 (вектор показан пунктиром), как следует из ВД, не равен нулю, что и следовало ожидать. Вектора напряжений всех обмоток, как и в предыдущих случаях, приблизительно параллельны. Отклонение от параллельного положения связано с наличием токов в обмотках.

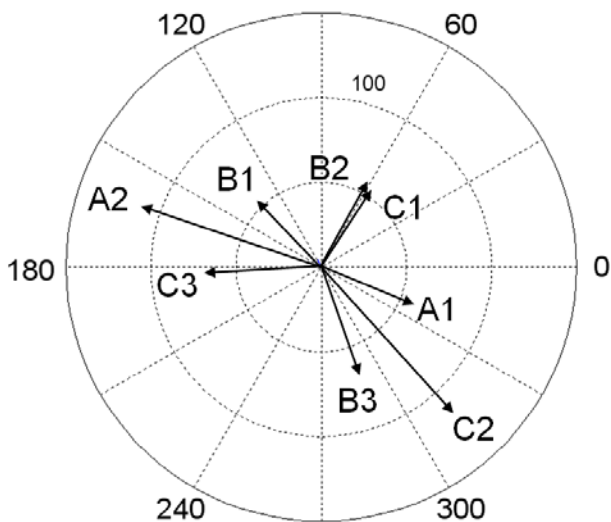


Рис. 19. ВД токов обмоток при двухфазном к.з. на землю со стороны нагрузки (нейтраль трансформатора заземлена)

В данном режиме, как показали проведенные расчеты, отсутствует ток нулевой последовательности в обмотках трансформатора, и соответственно, поток нулевой последовательности.

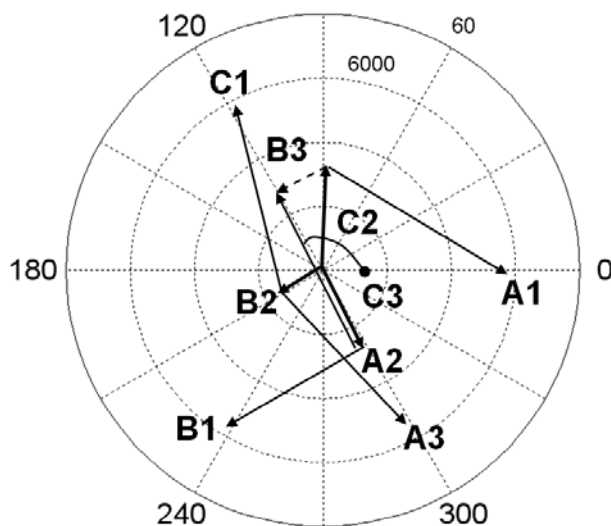


Рис. 20. ВД напряжений обмоток при двухфазном к.з. без земли со стороны нагрузки (нейтраль трансформатора)

Это следует также из ВД на рис. 21, где показаны относительные значения магнитных потоков фаз, геометрическая сумма векторов которых равна нулю. Кроме того, ввиду отсутствия тока в нейтрали источника питания, сумма векторов токов от источника питания (см. ВД рис. 22) также равна нулю. Таким образом, в режимах несимметричных повреждений с землей (ОКЗ, ДКЗ с землей), как и в обычных трансформаторах, имеются токи и магнитные потоки нулевой последовательности. При повреждениях без земли упомянутые токи и потоки

отсутствуют.

Следует отметить, что предложенная модель позволяет также выявить различное поведение фазоворотного устройства на основе трехфазной

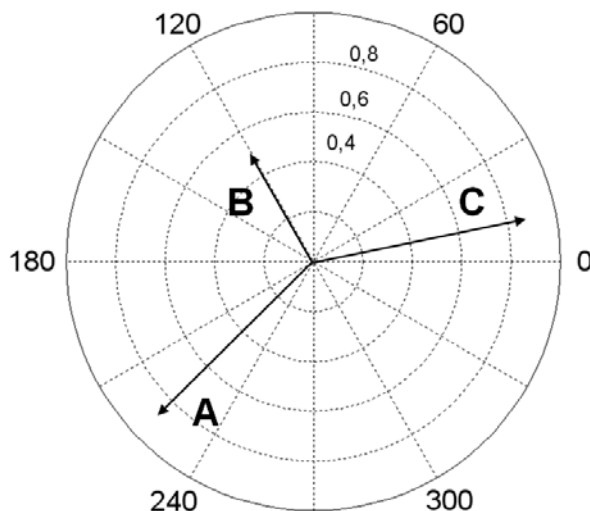


Рис. 21. ВД относительных магнитных потоков при ДКЗ фаз нагрузки без земли (нейтраль трансформатора заземлена)

группы и трехстержневого трансформатора в специфических режимах, в которых сказывается наличие электромагнитной связи обмоток, расположенных на разных стержнях. Для иллюстрации этого рассмотрим, например, однофазный режим холостого хода. При этом питание фазоворотного трансформатора производится от одной фазы А, при холостом ходе на стороне нагрузки. Напряжение одной из фаз источника питания оказывается приложенным к последовательно соединенным обмоткам фаз А1 и С2,

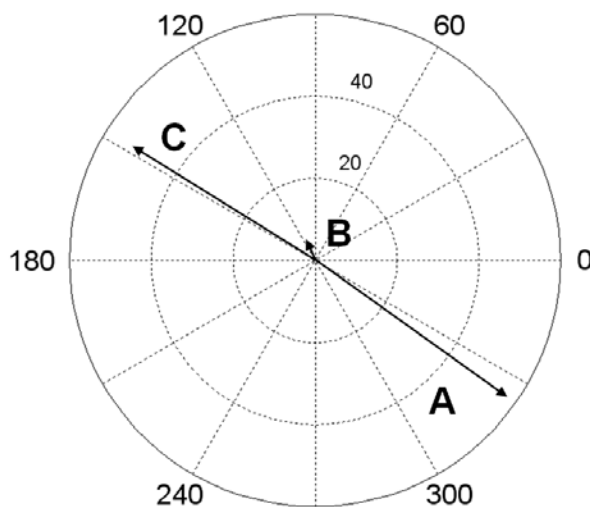


Рис. 22. ВД токов от источника питания для режима ДКЗ без земли (нейтраль трансформатора заземлена)

имеющим разное число витков. На рис. 23, 24 приведены результаты, полученные для этого режима



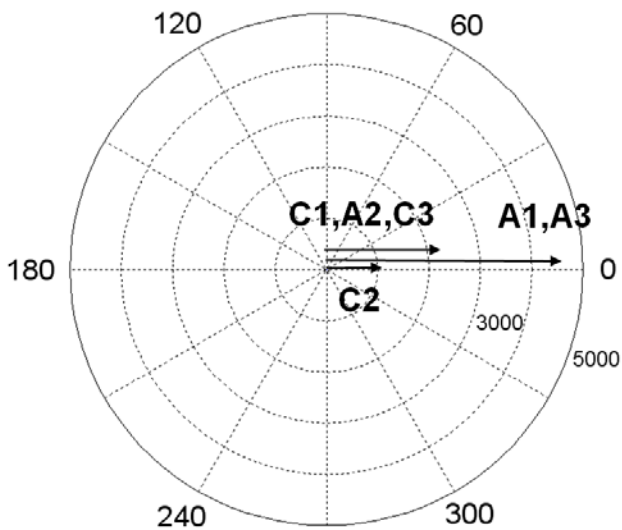


Рис. 23. ВД напряжений обмоток рассматриваемого фазоповоротного трансформатора, построенного на основе трехфазной группы

соответственно для трехфазной группы и трехстержневого трансформатора. Из ВД напряжений обмоток рис. 23 следует, что при отдельных магнитопроводах для каждой из фаз, имеются напряжения только на обмотках фаз А и С, к которым приложено питающее напряжение, причем их величины соответствуют числам витков обмоток. Напряжения А1, А3 – одинаковы, напряжение на обмотке А2 вдвое меньше. Такое же соотношение выполняется для напряжений обмотки фазы С, а на обмотке фазы В вообще нет заметного напряжения.

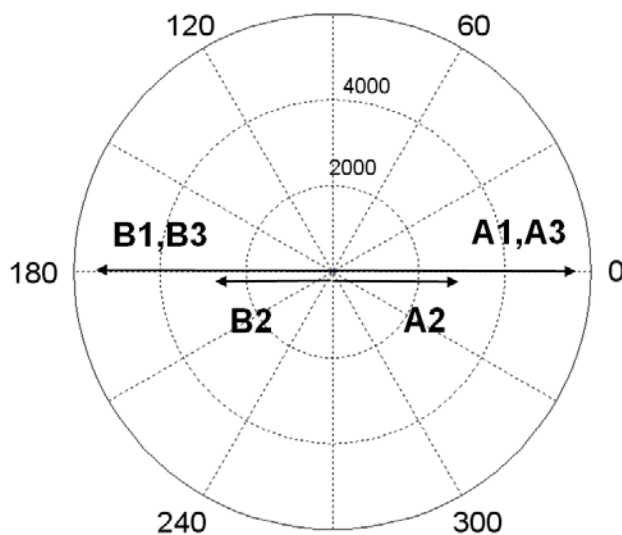


Рис. 24. ВД напряжений обмоток рассматриваемого фазоповоротного трансформатора, построенного на основе трехстержневого магнитопровода с электромагнитной связью обмоток разных фаз

Кардинально другой результат получается в случае трехстержневого магнитопровода, где между обмотками разных фаз имеется электромагнитная связь (см. ВД рис.24). В этом случае напряжения на

обмотках фазы С практически отсутствуют (и соответственно отсутствует магнитный поток в стержне фазы С). Получается эффект, эквивалентный как бы частичному закорачиванию обмотки фазы С. На обмотках фаз А и В имеются напряжения в противофазе (ввиду замыкания магнитного потока по стержням фаз А и В), также соответствующие их числам витков. Из приведенного примера следует, что в некоторых режимах поведение фазоповоротного трансформатора, построенного на основе трехфазной группы однофазных трансформаторов, может заметно отличаться от поведения трансформатора, выполненного на трехстержневом сердечнике.

Рассмотрим еще один аналогичный режим холостого хода, более простой для понимания, который отличается от предыдущего тем, что дополнительно закорочена обмотка С2. При этом напряжение источника прикладывается полностью к обмотке А1. На рис. 25, 26 представлены ВД напряжений обмоток в данном режиме для трехфазной группы (рис.25) и трехстержневого трансформатора (рис.26). Как и в предыдущем случае, ВД напряжений обмоток на рис.25, 26 отличаются существенно. В трехстержневом варианте (рис. 26) на обмотках фазы В появляется напряжение такой же величины, как и на фазе А, вызванное замыканием магнитного потока по стержням фаз А и В.

Кроме того, из рис. 23 и 25 видно, что отличие между первым и вторым случаем состоит в том, что на рис.25 полностью исчезло напряжение обмотки фазы С, которая закорочена. Для трехстержневого же варианта магнитопровода ВД на рис. 24 и 26 практически совпадают.

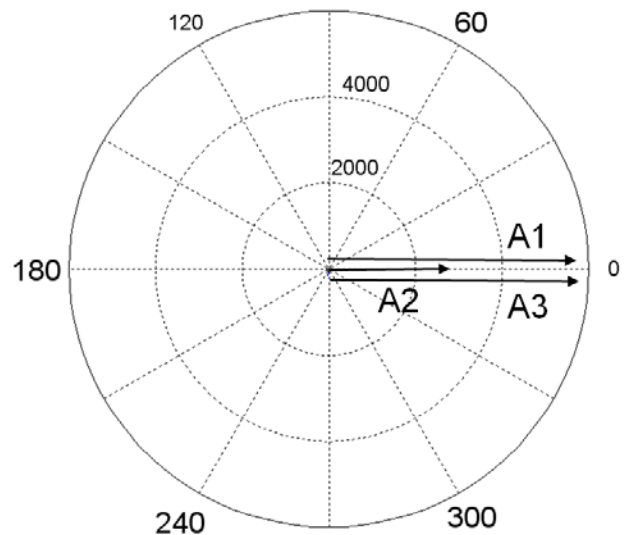


Рис. 25. ВД напряжений обмоток фазоповоротного трансформатора (обмотка С2 закорочена), на основе трехфазной группы однофазных трансформаторов

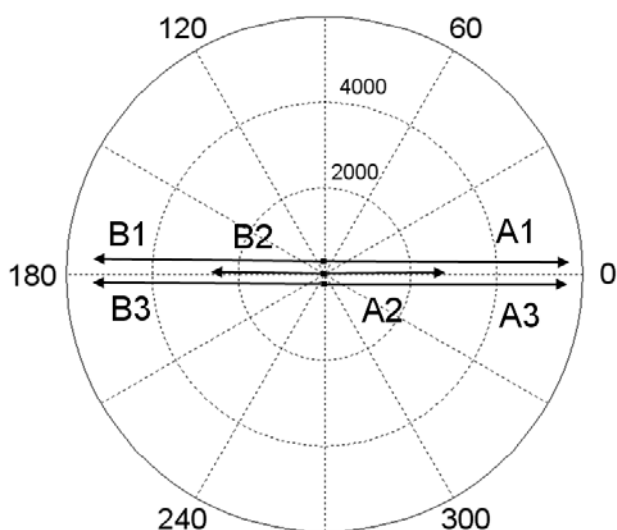


Рис. 26. ВД напряжений обмоток (обмотка С2 закорочена) фазоворотного трансформатора, на основе трехстержневого магнитопровода

### 3. ВЫВОДЫ

1. Реализована модель трехфазного фазоворотного трансформатора на базе трехстержневого магнитопровода для схем соединения обмоток в «зигзаг треугольника» и в «двойной обратный зигзаг», которая позволяет рассчитывать модули и углы векторов токов и напряжений в обмотках трехстержневого ФПТ при любых несимметричных режимах. Предложенная модель является удобным инструментом, позволяющим исследовать все многообразие несимметричных режимов трехстержневого фазоворотного устройства на основе единого подхода.

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

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лосев С.Б., Чернин А.Б. *Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем*. М, Энергоатомиздат, 1983, 527 стр.
- [2]. Карасев Д. Д., Карасев Е.Д. *Расчет режимов электрических сетей по программе «ФАЗАН»*. Под ред. А.И. Артемова. М.: Московский энергетический институт., 1989.
- [3] Бошняга В.А. , Гримальский О.В. *Несимметричные режимы работы фазорегулирующего трансформатора* Известия Академии наук СССР, Энергетика и транспорт, N 2, 1989 г
- [4] Бошняга В.А. *Расчет несимметричных режимов работы фазорегулирующего трансформатора с соединением обмоток в зигзаг*. Электричество, № 11, 1990 г.
- [5] Бошняга В.А. *Расчет и исследование несимметричных режимов работы фазоворотного трансформатора*. Известия вузов, "Энергетика" N 11, 1991 г.
- [6] Бошняга В.А. *Расчет и исследование несимметричных режимов фазоворотного трансформатора по схеме «зигзаг треугольника»*. Сборник статей «Управляемые электропередачи», вып.4., 1991 г. стр.65-74.
- [7] Бошняга В.А. *Расчет и анализ несимметричных режимов участка электрической сети с трансформаторными устройствами*. Электрические станции, 1997, №3, стр. 58-63.
- [8]. Бошняга В.А., Суслов 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 (<http://journal.ie.asm.md/ru/contents/elektronnyj-zhurnal-n-222-2013>)
- [9]<http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypethreewindings.html>. (дата обращения 09.09.2016)
- [10]<http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/zigzagphaseshiftingtransformer.html> (дата обращения 09.09.2016)

### 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, их влиянием на окружающую среду, режимами энергетических систем, переходными электромеханическими

процессами, моделированием в энергетических системах. E-mail: [svictorm46@gmail.com](mailto:svictorm46@gmail.com)