

Investigation of Asymmetrical Modes of Three-Phase Three Leg Combined Transformer-Phase-Shifter

BOSNEAGA V.A., SUSLOV V.M.

Power Engineering Institute of Moldova Academy of Sciences
Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. On the base of previously proposed model of three-phase three leg transformer windings connection scheme for combined transformer-phase shifter was made, for which calculations and analysis of specific characteristics of different steady state asymmetric modes were performed. At this the electromagnetic coupling of the windings, located on different legs of transformer core was taken into account. As the base 10 kV transformer was used, and different short circuits, combined with phase failures at feeding source were investigated. For the considered regimes vectorial diagrams for windings currents, voltages and relative values of magnetic fluxes in the legs and zero sequence magnetic flux, flows out of magnetic circuit, were constructed, giving clear idea about their particular features.

Keywords: asymmetric modes, three legs magnetic circuit, short-circuits and phase failures, combined transformer-phase-shifter, zero sequence magnetic flux.

Ceretarea regimurilor nesimetrice a transformatorului-regulator de fază combinat cu trei faze și miez din trei coloane

Boșneaga V.A., Suslov V.M.

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei
Chișinău, Republica Moldova

Rezumat. În baza modelului transformatorului trifazat cu trei coloane, propus anterior, a fost realizată schema transformatorului-regulatorului de fază combinat, efectuate calculele și cercetările a regimurilor staționare nesimetrice a dispozitivului dat, ținând cont de legătura mutuală electromagnetică dintre înfășurările amplasate pe diferite coloane. Folosind ca exemplu transformatorul de distribuție 10 kV s-au efectuat calcule și analiză celor mai caracteristice regimuri permanente nesimetrice, care apar la scurt-circuit, combinate cu rupturi de fază a sursei de alimentare. Pentru regimurile examinate sunt construite diagrame vectoriale pentru curenți și tensiuni, precum și privind valorile relative ale fluxurilor magnetice în coloane și de secvență homopolară, care oferă o imagine clară privind caracteristicile specifice ale acestor regimuri.

Cuvinte-cheie: regimuri nesimetrice, miez din trei coloane, scurt-circuit și rupturi de fază, transformator-regulator de fază combinat, flux magnetic de secvență homopolara.

Исследование несимметричных режимов трехфазного трехстержневого трансформатора- фазорегулятора

Бошняга В.А., Суслов В.М.

Институт энергетики Академии наук Молдовы
Кишинэу, Республика Молдова

Аннотация. На основе предложенной ранее модели трехфазного трансформатора с трехстержневой конструкцией магнитопровода собрана схема совмещенного трансформатора-фазорегулятора, проведены расчеты и изучены особенности различных установившихся несимметричных режимов работы данной схемы с учетом электромагнитной связи обмоток, расположенных на различных стержнях. Расчеты и анализ проведены на примере трансформатора 10 кВ и включают рассмотрение несимметричных режимов, возникающих при различных коротких замыканиях, сочетающихся с обрывом фаз на стороне источника питания. Для рассмотренных режимов построены векторные диаграммы токов и напряжений, а также относительных значений магнитных потоков в стержнях и потока нулевой последовательности, которые дают наглядное представление об их особенностях.

Ключевые слова: установившиеся несимметричные режимы коротких замыканий и обрывов фаз, трехстержневой магнитопровод, совмещенный трансформатор-фазорегулятор, магнитный поток нулевой последовательности.

Введение

Исследованию и расчету различных несимметричных режимов работы силовых

трансформаторов посвящено достаточно большое количество работ, многие из

которых стали уже классическими ([1-4] и др.), затем исследования были продолжены в

Для выполнения данной работы использована предложенная авторами модель трехфазного трехстержневого трансформатора, описанная в [19], позволяющая построить векторные диаграммы токов и напряжений обмоток практически в любых несимметричных режимах, включающих короткие замыкания, обрывы фаз, несимметричную загрузку и любые их комбинации. С ее помощью ранее были уже рассмотрены особенности несимметричных режимов работы ряда традиционных схем силовых трансформаторов (например, с соединением обмоток в зигзаг [20], автотрансформаторной схемы [21]), а также некоторых схем фазопоротных трансформаторов [22-23]. Данная работа является продолжением ранее выполненных в [5-10]. Тем не менее, публикации, развивающие различные аспекты этой проблемы, в том числе с использованием вновь создаваемых математических моделей трехфазных, трехстержневых трансформаторов, продолжают появляться, в том числе и в последние годы [11-18], что свидетельствует об актуальности этой тематики. Работа посвящена: исследованию несимметричных режимов трехфазных трехстержневых трансформаторов, изучению особенностей таких режимов для схемы совмещенного трансформатора-фазорегулятора [24], выполняющего функции трансформации напряжения по величине и регулирования сдвига фаз выходной системы напряжений относительно входной.

I. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ КРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Рассмотрим с помощью упомянутой модели [19] особенности характерных установившихся несимметричных режимов трехстержневого силового трансформатора со схемой Y/D, однако имеющего две вторичные регулировочные обмотки, соединенные последовательно и в треугольник по схеме рис.1

Описание основных характеристик симметричного установившегося режима работы данной схемы приведено в [24]). Буквами А,В,С с соответствующими цифрами обозначены обмотки различных фаз трансформатора, цифрами 1,2,3 – входные, а цифрами 4,5,6 – выходные зажимы, к

которым подключена соединенная в звезду с заземленной нейтралью нагрузка. Как показано в [24], при изменении по определенному закону чисел включенных витков (обозначим суммарное число витков регулировочной обмотки через w) регулировочных обмоток С2 и С3, вектор выходного напряжения каждой из фаз может описывать окружность, при этом фазовый сдвиг относительно приложенного напряжения изменяется от 0 до 120°. Например, при изменении чисел витков обмоток от значений 0 для С2 и w для С3 до значений w для С2 и 0 - для С3, вектор выходного напряжения зажима 4 поворачивается на 120°. Применение разных законов регулирования чисел включенных витков регулировочных обмоток, составляющих стороны треугольника, позволяет регулировать не только фазовый сдвиг, но и изменять в определенном диапазоне модуль выходного напряжения (см. [24])

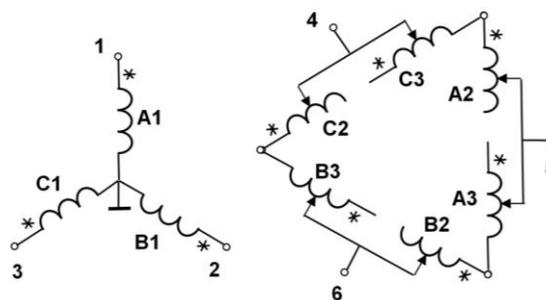


Рис. 1. Схема соединения обмоток рассматриваемого трехстержневого трансформатора

В качестве основы для построения предлагаемой модели используем распределительный трансформатор 10 кВ. При необходимости все полученные результаты легко пересчитать для любых других параметров конкретного трансформатора.

При расчетах используем каталожные исходные данные Минского трансформаторного завода для распределительных трансформаторов для прямой последовательности (см. [25]).

Применительно к трансформатору типа ТМГ мощностью 100 кВА, напряжением 10/0,4 кВ в общепринятых обозначениях имеем: $I_0 = 2,6\%$, $U_{кз} = 4,7\%$, $P_{хх} = 270$ Вт, $P_{кз} = 2270$ Вт.

Кроме того, для данного трансформатора изготовителем по запросу 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.

Номинальное напряжение всех обмоток примем для простоты одинаковым, равным $10/\sqrt{3}$ кВ. Эти данные являлись входными для построения данной модели.

Отметим, что при равенстве нулю чисел витков соответствующей регулировочной обмотки в каждой из фаз треугольника нагрузка фактически подключается к вершинам треугольника, при этом схема вырождается в традиционную, вида Y/D , которая была уже рассмотрена в [19].

В связи с изложенным, рассмотрим два базовых варианта данной схемы, один с одинаковым числом включенных витков обеих регулировочных обмоток, при этом нагрузка подключена к середине стороны треугольника вторичных обмоток, а второй - с подключением нагрузки на расстоянии от вершины в $1/3$ от полного числа витков $2w$ обмотки треугольника.

Для большей наглядности результаты расчетов будем приводить не в виде таблиц с числами, а в виде векторных диаграмм (ВД), а полученные численные значения - приводить по мере необходимости. В качестве базы для сравнения напряжений и токов обмоток сначала был рассчитан симметричный режим номинальной нагрузки.

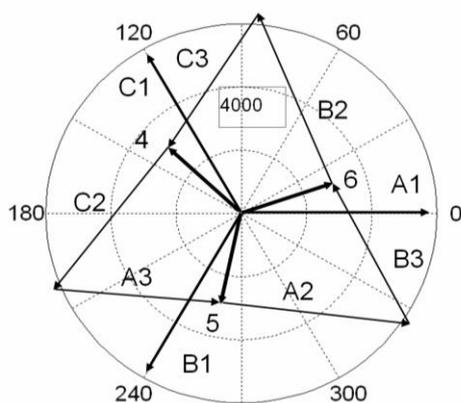


Рис. 2. ВД напряжений нагрузки, первичных и вторичных обмоток в симметричном режиме нагрузки

На векторной диаграмме (далее ВД) рис. 2 приведены вектора первичных и вторичных напряжений обмоток трансформатора, а

также напряжения фаз нагрузки (показаны утолщенными линиями). Причем в данном случае числа витков первичных и вторичных регулировочных полуобмоток, образующих треугольник, одинаковы.

Как уже было сказано, обмотки, расположенные на одном стержне и относящиеся к одной из фаз, обозначены буквами А, В, С, цифры 1,2,3 обозначают номер обмотки. Масштаб напряжения на данном рисунке и на последующих ВД напряжений указан в вольтах в рамке около соответствующей пунктирной окружности. Как видно из ВД рис.2, подключение симметричной нагрузки приводит к некоторому фазовому смещению соответствующих векторов вторичных обмоток по отношению к первичным $A1, B1, C1$, а также изменяет их модули (например, модуль напряжения обмотки $C3$ меньше, чем для $C2$). Условное обозначение для данного режима приведено в приложении, содержащем перечень рассмотренных в данной работе режимов (см. табл., пункт 1).

Рассмотрим далее режим однофазного короткого замыкания фазы нагрузки, подключенной к выходному зажиму 4.

Условное обозначение для данного режима приведено в приложении (см. таблицу, пункт 2).

На рис. 3 построены ВД напряжений на вторичных обмотках и на нагрузке при данном однофазном коротком замыкании (ОКЗ). (Закорочена фаза нагрузки, подключенная к зажиму 4).

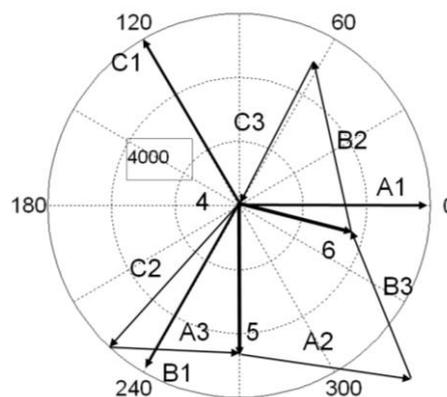


Рис. 3. ВД напряжений нагрузки, первичных и вторичных обмоток при ОКЗ нагрузки

Масштаб напряжения в 4000 вольт показан в прямоугольнике возле пунктирной

окружности. Как видно из ВД рис.3, точка 4 подключения закороченной фазы нагрузки переместилась практически в начало координат, напряжения в «здоровых» фазах нагрузки, подключенных к зажимам 5, 6 (показаны утолщенной линией) выросли по модулю и несколько больше номинального, а фазовый угол между ними значительно меньше обычных 120° . Система напряжений вторичных обмоток, составляющих треугольник, значительно искажена.

Токи в сопротивлениях нагрузок, возникшие в результате наложения режима нагрузки и ОКЗ, приведены на ВД рис. 4.

Масштаб тока здесь и везде далее также указан в прямоугольнике возле соответствующей пунктирной окружности в амперах (здесь – 20 А).

Вследствие активного характера нагрузки, токи от зажимов 5, 6 совпадают по фазе с соответствующими напряжениями на рис. 3. Ток закороченного зажима примерно вдвое превышает токи в «здоровых» фазах. При этом сумма токов нагрузки всех фаз, как и должно быть, равна нулю.

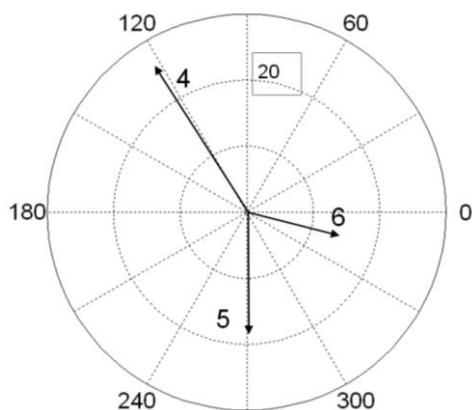


Рис. 4. ВД токов нагрузки при замыкании одной из фаз (ОКЗ)

При этом сумма токов нагрузки всех фаз, как и должно быть, равна нулю.

На рис. 5 приведены вектора фазных токов источника питания. На нем видно, что сумма токов фаз источника питания также равна нулю, токи же двух фаз приблизительно вдвое больше по модулю третьего тока.

Рассмотрим далее режим двухфазного короткого замыкания (ДКЗ) с землей зажимов 4, 6. Условное обозначение для данного режима приведено в приложении (см. таблицу, пункт 3). При этом в качестве

исходного режима до замыкания выбран, как и ранее, режим симметричной нагрузки. На рис. 6,7 показаны ВД токов источника и напряжений обмоток и нагрузок для рассмотренного режима ДКЗ с землей.

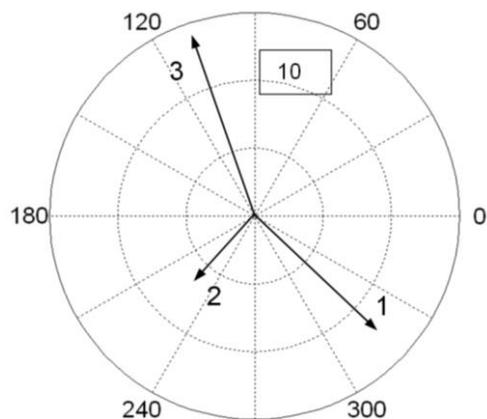


Рис.5. ВД токов источника при ОКЗ

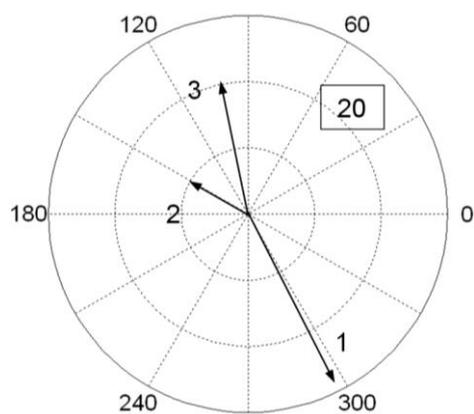


Рис. 6. ВД токов источника при ДКЗ фаз нагрузки и одинаковых полюбомотках, составляющих треугольник

Из рис. 6 следует, что в режиме ДКЗ с землей токи источника заметно больше, чем при ОКЗ и существенно несимметричны. Однако их сумма по-прежнему равна нулю, т.е. ток в нейтрали источника отсутствует.

Из рис. 7 видно, что в данном режиме наблюдается еще более значительное, чем в предыдущем случае, искажение системы напряжений обмоток. Точки 4, 6 стянуты практически к началу координат.

Напряжения на обмотках СЗ и В2, естественно, одинаковы по модулю и противоположны по фазе (налагающиеся друг на друга вектора здесь и далее изображены параллельными для большей наглядности чертежа).

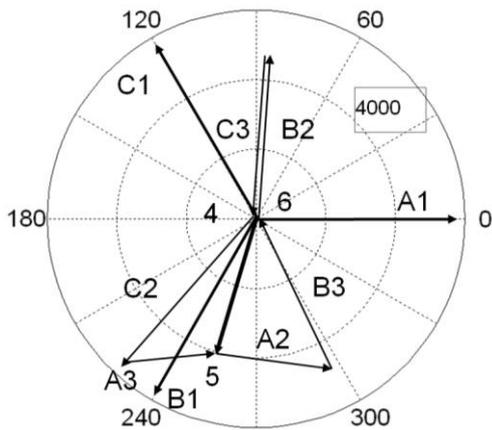


Рис. 7. ВД напряжений нагрузки, первичных и вторичных обмоток при ДКЗ фаз нагрузки с землей

Рассмотрим далее также возможный режим замыкания двух плеч нагрузки между собой без земли (ДКЗ без земли). Условное обозначение для данного режима приведено в приложении (см. таблицу, пункт 4). Рассчитанные величины токов источника показаны на рис. 8. На нем видно, что токи существенно несимметричны. Их сумма, как и ранее, равна нулю.

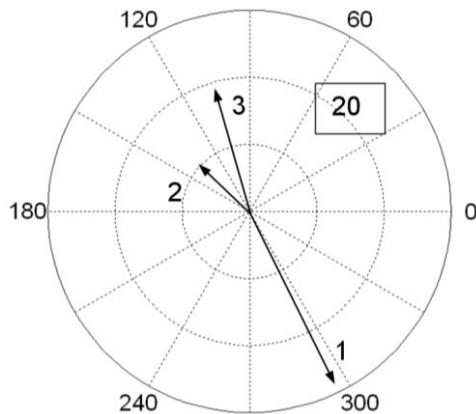


Рис. 8. ВД токов источника при ДКЗ без земли (исходный режим - симметричная нагрузка)

На ВД рис. 9 показаны напряжения обмоток и нагрузок. На нем видно, что точки 4 и 6 совпадают вследствие короткого замыкания. Поэтому напряжения обмоток C3 и B2, как и в предыдущем случае, одинаковы по модулю и находятся в противофазе. Потенциалы точек 4,6 одинаковы и не равны нулю, в отличие от предыдущего случая. Напряжение на замкнутых нагрузках резко падает, и трехфазная система напряжений на

нагрузке сильно искажается. При этом вектора напряжений закороченных фаз приблизительно в два раза меньше по модулю и находятся в противофазе по отношению к «здоровой фазе». Интересно, что напряжения на участвующих в этом повреждении вторичных обмотках практически не изменили своей величины. Зато заметно уменьшились напряжения на «здоровых» обмотках A2 и A3, которые в повреждении не участвуют.

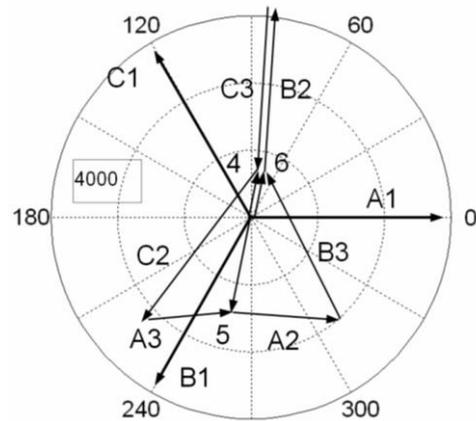


Рис. 9. ВД напряжений нагрузки и обмоток при ДКЗ без земли

Далее рассмотрим аналогичные предыдущим режимы коротких замыканий для варианта схемы, в которой числа включенных витков регулировочных обмоток не одинаковы, а находятся в соотношении 1:2. т.е. нагрузка подключена не в средней части обмотки, составляющей треугольник.

На рис. 10 представлены в качестве базы для сравнения ВД напряжений обмоток и нагрузок для данного случая при симметричной нагрузке. На нем видно, что величины векторов напряжений на регулировочных обмотках (например: вектора B2 и B3) относятся приблизительно как 1:2, в соответствии с принятыми числами их включенных витков. Кроме того, фазовый сдвиг выходных напряжений, с изменением числа включенных витков регулировочных обмоток, заметно изменился (см. рис. 2).

На рис 11 представлены ВД напряжений обмоток и нагрузок на стороне треугольника при ОКЗ фазы нагрузки (схема №2 приложения). На нем видно, что точка 4 при данном повреждении, естественно, сместилась в начало координат. Однако при этом сохраняется приблизительно

соотношение 1:2 между величинами напряжений одноименных регулировочных обмоток всех фаз.

Система напряжений нагрузки сильно искажена, но система токов от источника питания остается уравновешенной и тока в нейтрали источника питания нет.

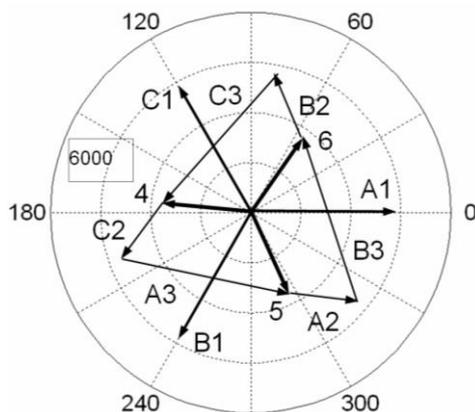


Рис. 10. Напряжения обмоток в исходном симметричном режиме при соотношении чисел витков вторичных обмоток 1:2

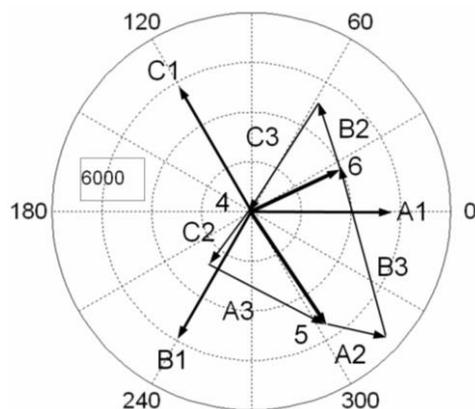


Рис. 11. ВД напряжений обмоток и нагрузок при ОКЗ фазы нагрузки с землей

Рассмотрим далее для данного варианта схемы режим двухфазного короткого замыкания без земли (схема №4 приложения).

На рис. 12 приведена ВД токов источника для данного случая. Как следует из рисунка, система токов далека от симметричной, а величины токов заметно больше, чем при однофазном к.з.

На рис. 13 приведена ВД напряжений обмоток и нагрузок для данного случая ДКЗ без земли. На нем видно, что зажимы 4, 6 (аналогично предыдущему случаю) стянуты в

одну точку, потенциал которой, однако, не равен нулю.

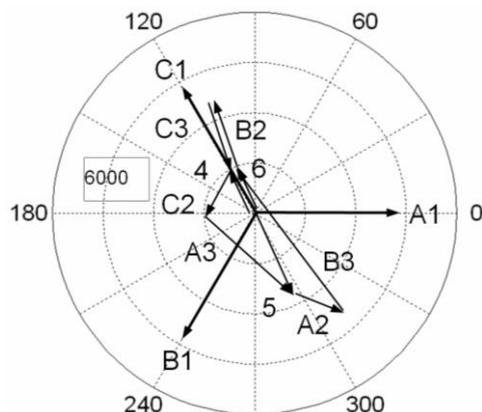


Рис. 13. ВД напряжений обмоток и нагрузок на стороне треугольника при КЗ без земли

Напряжения закороченных обмоток C3 и B2, естественно, одинаковы. А для остальных обмоток выполняется приблизительно соотношение напряжений в соответствии с их числами витков 1:2. Напряжения нагрузок в этом режиме выглядят аналогично тому, как это было и в предыдущем случае при одинаковых числах витков регулировочных обмоток (см. рис. 9). Однако сдвиги напряжений разных фаз, конечно, совсем другие.

Расчеты для режима ДКЗ с землей показали, что токи при этом, естественно, несколько увеличиваются, а векторная диаграмма напряжений обмоток аналогична показанной на рис. 13, отличие состоит в том, что точки 4,6 соединения обмоток «притянуты» к началу координат. Следует отметить, что во всех рассмотренных до сих пор режимах не возникает поток нулевой последовательности, замыкающийся вне магнитопровода.

II. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ КОМБИНИРОВАННЫХ РЕЖИМОВ КРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И ОБРЫВА ПИТАНИЯ

Рассмотрим далее серию неполнофазных режимов, вызванных обрывом одной из фаз питающего напряжения, сочетающихся с различными короткими замыканиями при таком же соотношении чисел витков обмоток, как в последнем варианте.

В качестве первого рассматриваемого режима выберем режим симметричной нагрузки при наличии обрыва в фазе С источника питания (схема аналогичная режиму №5 приложения, отличающаяся отсутствием ТКЗ нагрузки). Очевидно, что при этом ток в первичной обмотке С1 (фазы С) равен нулю.

На рис. 14 приведена ВД токов обмоток в данном режиме. Утолщенными линиями изображены вектора токов в первичных обмотках А1, В1, более тонкими – вектора токов вторичных обмотк. Масштаб тока в амперах приведен в прямоугольнике возле соответствующей пунктирной окружности.

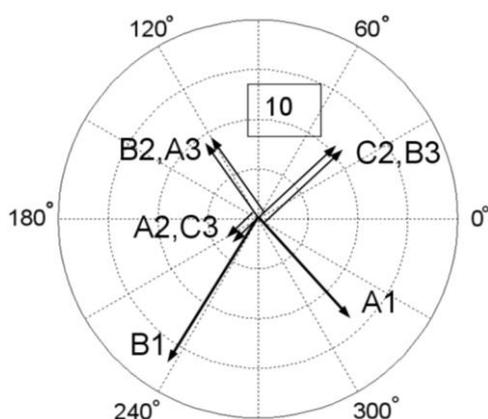


Рис. 14. ВД токов обмоток при обрыве фазы С и симметричной нагрузке

На нем сливающиеся вектора токов условно, для наглядности, изображены двумя параллельными векторами. Токи же в смежных частях вторичных обмоток, соединяющихся в вершинах треугольника, естественно, одинаковы. Токи «здоровых» первичных обмоток А1, В1 образуют резко несимметричную систему, их сумма составляет ток нейтрали первичных обмоток, равный 24,9 А. При этом токи обмоток оборванной фазы С лежат на одной прямой и находятся в противофазе (вектора С2, С3). Токи же в обмотках остальных фаз имеют различный фазовый сдвиг.

На рис. 15 показана ВД напряжений обмоток и нагрузок в этом же режиме. Масштаб напряжений в вольтах указан аналогично предыдущему.

На нем видно, что несмотря на обрыв питания в фазе С (что приводит к существенному искажению треугольника вторичных напряжений), напряжения на фазах нагрузки все-таки сохраняют

определенный уровень симметрии. Это происходит благодаря наличию трехстержневого сердечника, т.е., трансформатор в этом случае как бы сам по себе обладает свойством «симметрирования» напряжений нагрузки.

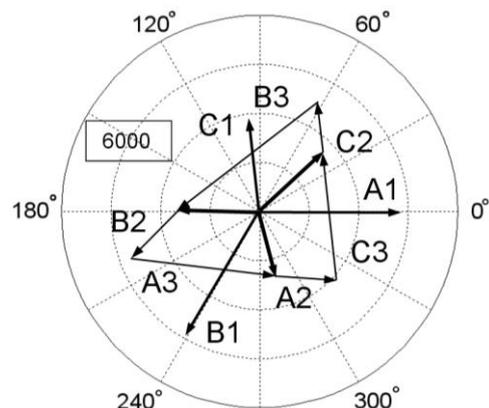


Рис. 15. ВД напряжений обмоток и нагрузок при обрыве фазы С и симметричной нагрузке

Величина же вектора напряжения С1 на первичной обмотке этой фазы, появляющегося за счет протекания по данному стержню магнитного потока, создаваемого в результате совместного действия потоков других стержней, сравнима с другими фазами, и его модуль составляет около 67% от напряжения здоровых фаз, однако фазовый сдвиг отличается от нормального. Напряжения фаз нагрузок (показаны утолщенными линиями) почти симметричны, хотя и имеют разброс модулей в 26%.

Как показали проведенные расчеты, с ростом нагрузки степень несимметрии увеличивается.

На рис. 16 представлена ВД относительных значений магнитных потоков стержней, из которой видно, что в данном режиме магнитные потоки имеются во всех трех стержнях, в том числе, как уже было отмечено, и в стержне С, обмотка которого не запитана от источника питания. В результате того, что их сумма не равна нулю, появляется поток нулевой последовательности Ф0, замыкающийся вне сердечника.

Рассмотрим далее предельный случай увеличения симметричной нагрузки, а именно, трехфазное короткое замыкание (ТКЗ) нагрузки при обрыве фазы С источника питания. Условное обозначение для данного

режима приведено в приложении (см. схему № 5 приложения).

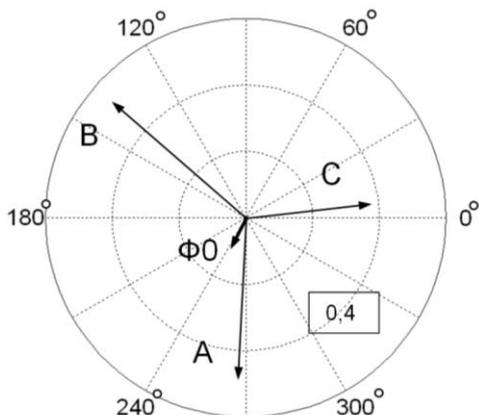


Рис. 16. ВД относительных значений потоков стержней при нагрузке и обрыве фазы С

На рис. 17 представлена ВД токов обмоток для данного режима. Ток в первичной обмотке С1, естественно, отсутствует, а токи в обмотках, примыкающих к каждой из вершин треугольника (А2 и С3, С2 и В3, В2 и А3), естественно, одинаковы и показаны одним вектором. Видно, что вектора токов обмоток оборванной фазы С противоположны по направлению, однако, даже с учетом того, что число витков обмотки С3 вдвое больше числа витков обмотки С2, намагничивающие силы обмоток на данном стержне не уравниваются друг друга.

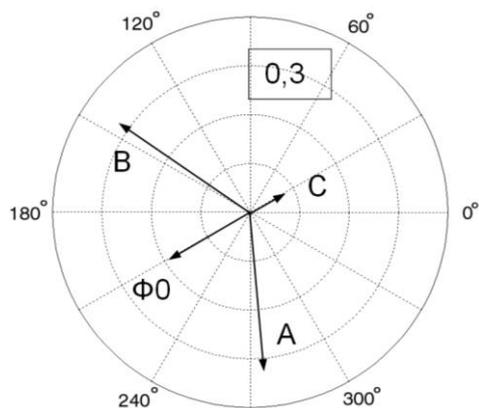


Рис. 17. ВД токов обмоток при обрыве фазы С и ТКЗ нагрузки

Аналогичная картина наблюдается на остальных стержнях. На рис. 18 представлена ВД напряжений обмоток для рассматриваемого режима. На нем видно, что напряжения здоровых фаз первичных

обмоток А1, В1 практически равны номинальному ($10/\sqrt{3} \approx 5,77$ кВ), а напряжение оборванной фазы С1 сильно падает и составляет приблизительно 14% от напряжения здоровых фаз.

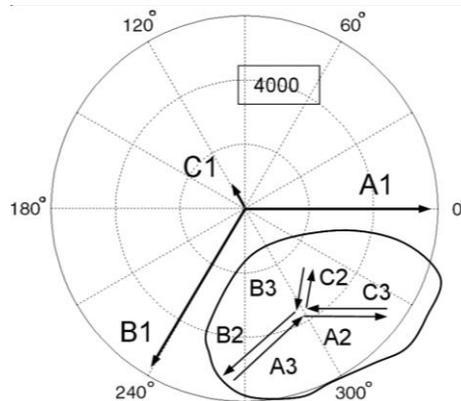


Рис. 18. ВД напряжений обмоток при ТКЗ и обрыве фазы С

Напряжения вторичных обмоток также приведены на этом же рисунке (см. обведенную кривой область ВД). Причем для наглядности они смещены из начала координат и увеличены в 1,5 раза при сохранении их относительного расположения, чтобы не накладываться на вектора напряжений первичных обмоток. Как и должно быть, при ТКЗ нагрузки, модули напряжений обмоток, прилегающих к одной вершине, одинаковы и противоположно направлены. Причем на обмотках С1, С2, С3 оборванной фазы также наводятся э.д.с. от имеющегося в стержне фазы С магнитного потока.

Относительные величины потоков в стержнях и поток, замыкающийся вне магнитопровода, приведены на ВД рис. 19. Видно, что поток нулевой последовательности в этом режиме достигает значительного относительного значения, сравнимого с потоками в стержнях фаз А и В, а поток в стержне фазы С имеет значительно меньшую величину.

Рассмотрим далее другое комбинированное повреждение - сочетание обрыва фазы С питания с однофазным коротким замыканием (ОКЗ) фазы В нагрузки. Условное обозначение для данного режима приведено в приложении (см. таблицу, пункт 6). Результаты, полученные для этого несимметричного режима, приведены в виде ВД на рис. 20 и 21.

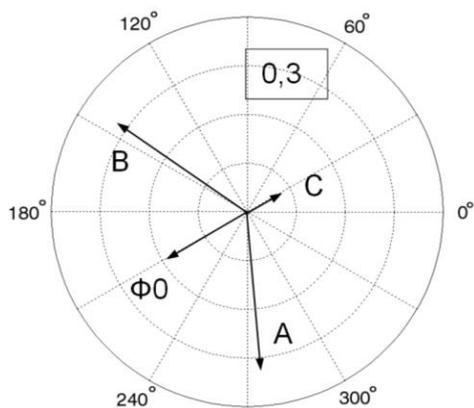


Рис. 19. ВД относительных значений потоков стержней при обрыве фазы С и ТКЗ нагрузки

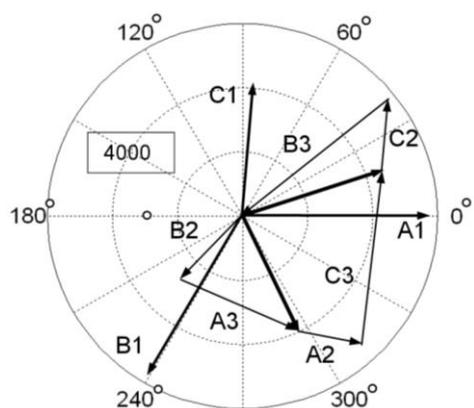


Рис. 20. ВД напряжений обмоток и нагрузки при ОКЗ фазы В нагрузки и обрыве фазы С источника питания.

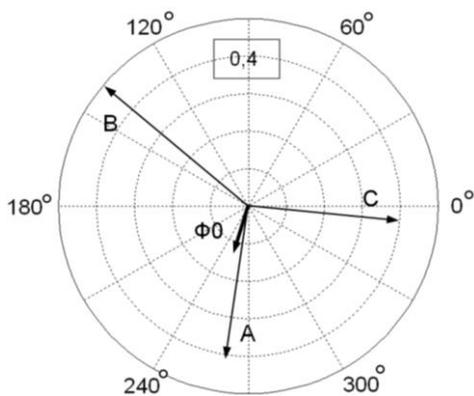


Рис. 21. ВД относительных магнитных потоков в стержнях и потока нулевой последовательности Φ_0 при ОКЗ фазы В нагрузки и обрыве фазы С

На них представлены напряжения обмоток и нагрузок и относительные значения магнитных потоков. Из рис. 20 следует, что

несмотря на обрыв питающего напряжения фазы С, величины напряжений в обмотках этой фазы достигают 67% напряжения других фаз, а точка соединения обмоток В2 и В3, вследствие к.з., «притянута» к началу координат. Вектора напряжений «здоровых» фаз нагрузки (показаны утолщенными линиями) значительно превышают номинальные (сравни с рис. 10). Токи повреждения в этом режиме в 3-4 раза превышают номинальные, а ток в нейтрали равен 31,3 А. На рис. 21 приведена ВД относительных значений магнитных потоков в стержнях. На нем видно наличие в этом режиме потока нулевой последовательности.

Рассмотрим далее аналогичный случай, отличающийся тем, что ОКЗ нагрузки происходит в той же фазе, где имеет место обрыв питания. Условное обозначение для данного режима приведено в приложении (см. таблицу, пункт 7). Результаты проведенных расчетов приведены на рис. 22, 23.

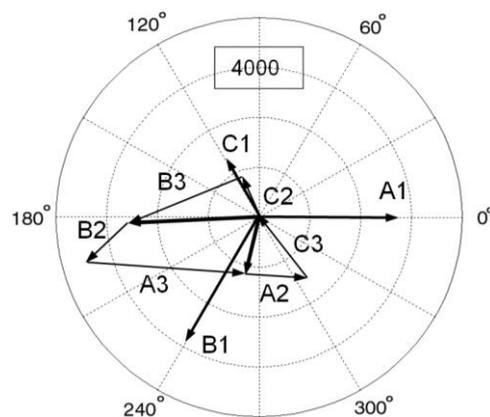


Рис. 22. ВД напряжений обмоток и нагрузки при ОКЗ фазы С нагрузки и обрыве той же фазы

Из рис. 22 видно, что в отличие от предыдущего режима величина напряжения в поврежденной фазе меньше приблизительно в 2 раза, величины напряжений на обмотках «здоровых» фаз также меньше. Это интуитивно понятно, так как энергия в поврежденную фазу может поступать только благодаря электромагнитной связи из других здоровых фаз. Токи обмоток и ток нейтрали (28,2 А) в этом режиме также меньше, чем в предыдущем случае. Как следует из рис. 23, в этом режиме также имеется поток нулевой последовательности. Однако несколько меньший, чем в предыдущем случае.

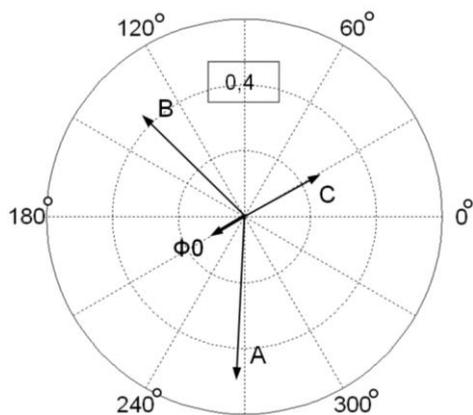


Рис. 23. ВД относительных магнитных потоков в стержнях и потока нулевой последовательности Φ_0 при ОКЗ фазы С нагрузки и обрыве фазы С

Рассмотрим далее режимы повреждений с обрывом фазы в комбинации с двухфазными к.з. разных видов. На рис. 24 и 25 представлены результаты расчета комбинированного повреждения – обрыва фазы С источника питания и ДКЗ фаз В и С нагрузки без земли при номинальной нагрузке. Условное обозначение для данного режима приведено в приложении, схема № 8. Из ВД рис. 24 видно, что, аналогично предыдущему, имеется напряжение в обмотках оборванной фазы С, вызванное магнитными потоками, приходящими из других стержней.

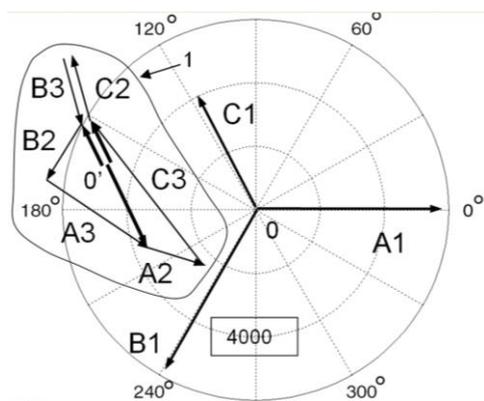


Рис. 24. ВД напряжений обмоток и нагрузки при ДКЗ фаз В и С и оборванной фазе С

Вектора напряжений вторичных обмоток изображены более тонкой линией по сравнению с первичными обмотками. При этом сохранен тот же масштаб и вектора тоже смещены из центра диаграммы для получения более ясной картины (область выделена кривой линией и обозначена цифрой 1).

Кроме того, совпадающие вектора для большей наглядности условно отображены параллельными линиями. Смещенная нулевая точка отсчета потенциалов обозначена $0'$. Напряжения нагрузок отображены также в выделенной области более толстыми линиями. Кроме того, видно, что замкнутые между собой обмотки В3 и С2, естественно, имеют одинаковые по модулю напряжения, а точка к.з. (отмечена на диаграмме кружком) имеет ненулевой потенциал относительно земли (точка $0'$). На рис. 25 показана ВД относительных магнитных потоков в стержнях и поток нулевой последовательности Φ_0 в данном режиме. Отметим, что в данном режиме имеется ток в нейтрали трансформатора, равный 16,3 А.

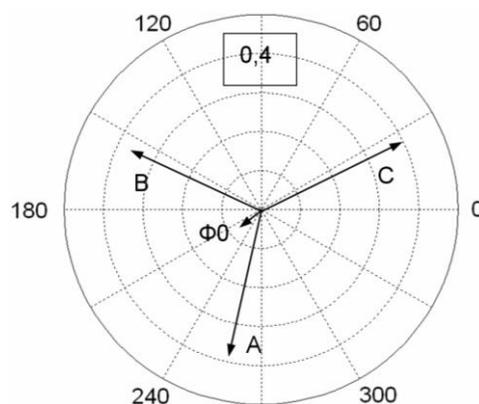


Рис. 25. ВД относительных магнитных потоков в стержнях и потока нулевой последовательности Φ_0 при ДКЗ фаз В и С и обрыве фазы С

Далее рассмотрим другой режим, когда замыкаются фазы А и С (фаза, в которой есть обрыв) без земли. Схема для данного режима аналогична приведенной в приложении, пункт 8. На первый взгляд, этот режим очень похож на предыдущий, однако, эти режимы, как показал расчет, хотя и не кардинально, но отличаются друг от друга. Результаты расчетов, как и ранее, показаны в виде ВД на рис. 26, 27. Аналогично предыдущему, на рис. 26 на ВД напряжений обмоток и нагрузок произведено смещение векторов вторичных обмоток и нагрузок по отношению к началу координат (см. область, ограниченную кривой и обозначенную цифрой 1). Визуально картинка схожа с приведенной на рис. 24, однако есть и существенные отличия данного режима от

предыдущего. Одно из отличий заключается в том, что величина тока нейтрали при таком замыкании значительно больше и составляет 41,4 А. Кроме того, напряжение на обмотке оборванной фазы С1 в данном режиме, как видно из сравнения рис. 24 и 26, практически вдвое меньше, чем в предыдущем случае.

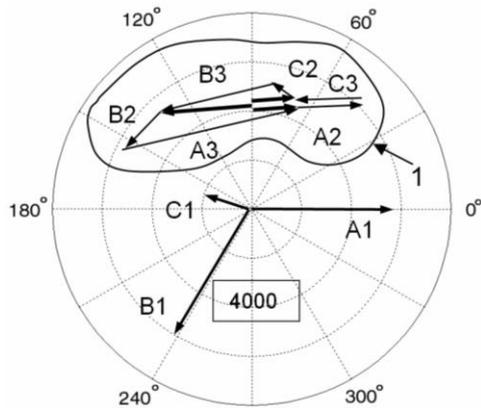


Рис. 26. ВД напряжений обмоток и нагрузки при ДКЗ фаз А и С и оборванной фазе С источника питания

На рис. 27 показаны соответствующие данному варианту относительные магнитные потоки. Видно, что в данном случае относительный магнитный поток нулевой последовательности примерно в 2 раза больше, чем в предыдущем случае, а магнитный поток в стержне фазы С – наоборот, в 2 раза меньше.

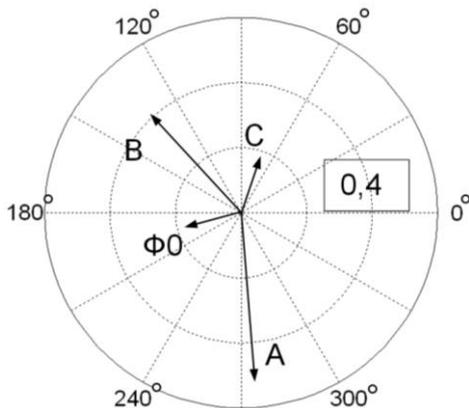


Рис. 27. ВД относительных магнитных потоков в стержнях и потока нулевой последовательности Φ_0 при ДКЗ фаз А и С и обрыве фазы С источника питания

На рис. 28 и 29 приведены ВД напряжений обмоток и нагрузок и относительных величин магнитных потоков для следующего из рассмотренных случаев. Данный режим

отличается от предыдущих тем, что ДКЗ происходит между фазами А и В, на которых нет обрыва питания (см. рис. 9 приложения).

На рис. 28 показана ВД напряжений обмоток и нагрузки при упомянутом ДКЗ фаз А и В и оборванной фазе С источника питания. На нем видно, что фазовые соотношения между векторами напряжений обмоток и нагрузок совершенно другие.

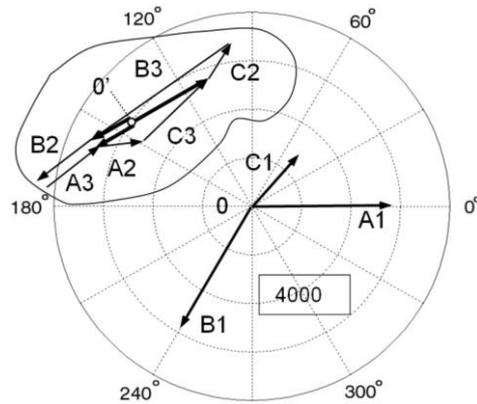


Рис. 28. ВД напряжений обмоток и нагрузки при ДКЗ фаз А и В и оборванной фазе С источника питания

Несмотря на некоторые аналогии, существующие во всех рассмотренных режимах ДКЗ при различных комбинациях оборванной и замыкаемых фаз, следует отметить, что в принципе это разные режимы, имеющие и заметные отличия. Например, в упомянутом режиме наблюдается наибольший среди всех рассмотренных до сих пор режимов ток в нейтрали, равный 51,2 А.

Из приведенной на рис. 29 ВД относительных значений магнитных потоков в стержнях и потока нулевой последовательности видно, что картина распределения магнитных потоков по совершенно другой вид по сравнению с предыдущими вариантами повреждений и сопровождается также наибольшим значением потока нулевой последовательности.

Рассмотрение, проведенное для режима с обрывом фазы и ДКЗ с землей (см. условное обозначение режима № 10 в приложении) показало, что общие закономерности распределения токов и напряжений в обмотках остаются теми же, однако, при наличии замыкания на землю несколько увеличиваются токи и поток нулевой последовательности.

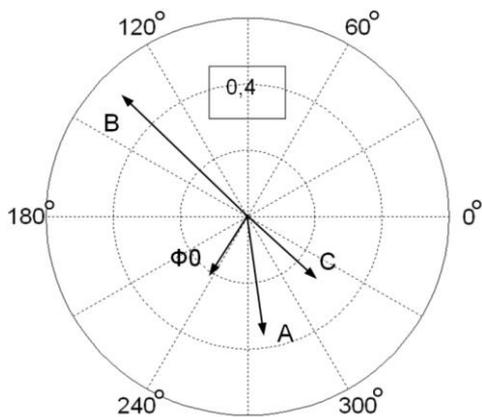


Рис. 29. ВД относительных магнитных потоков в стержнях и потока нулевой последовательности Φ_0 при ДКЗ фаз А и В и обрыве фазы С источника питания

ВЫВОДЫ

1. Построенная расчетная модель позволяет вычислить модули и углы векторов токов и стержням имеет для данного случая напряжений в обмотках трехфазного трехстержневого совмещенного трансформатора-фазорегулятора с последовательным соединением вторичных обмоток с различным соотношением витков в треугольник при разных режимах короткого замыкания на стороне нагрузки и обрыве одной из фаз напряжения питания.

При этом учтено наличие электромагнитной связи обмоток разных стержней, которая приводит к возникновению специфических режимов, отсутствующих в устройстве, собранном на основе трехфазной группы однофазных трансформаторов.

2. Выявлены режимы работы, при которых возникает магнитный поток нулевой последовательности, замыкающийся вне магнитопровода по воздуху и деталям конструкции трансформатора, который может вызвать потенциально опасные местные перегревы конструктивных элементов, влияющие на безопасность работы и срок службы трансформатора.

3. Получаемые с помощью построенной модели величины токов и напряжений, имеющие место при различных замыканиях, а также рассчитанные величины напряжений между различными обмотками могут быть использованы при проектировании подобных устройств для оценки усилий, возникающих при КЗ, а также требований к прочности изоляции обмоток, а построенные по этим данным векторные диаграммы токов, напряжений и относительных значений магнитных потоков позволяют дать наглядное описание особенностей таких режимов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пояснения к условным обозначениям режимов в соответствии с принятой нумерацией.

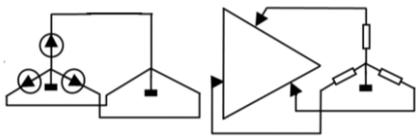
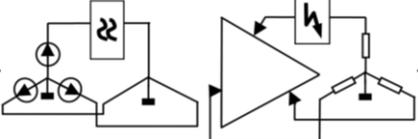
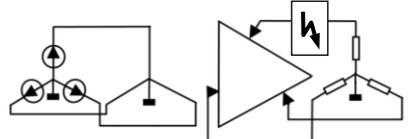
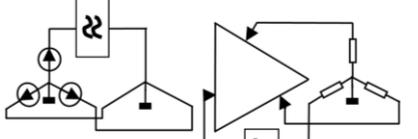
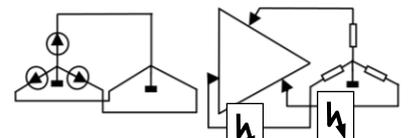
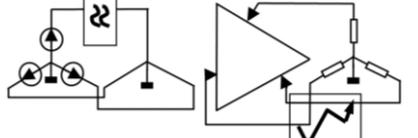
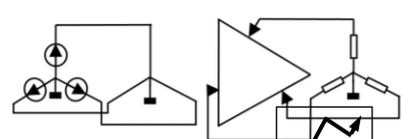
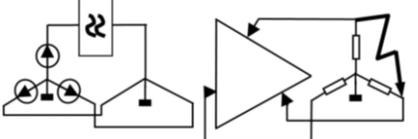
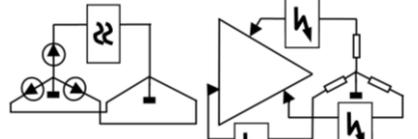
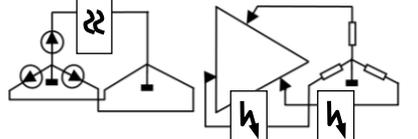
Обмотки трансформатора-фазорегулятора условно изображены прямыми линиями.

1. Симметричный режим нагрузки (СРН).
2. Однофазное короткое замыкание нагрузки (ОКЗ).
3. Двухфазное короткое замыкание нагрузки с землей (ДКЗЗ).
4. Двухфазное короткое замыкание нагрузки без земли (ДКЗ).
5. Обрыв фазы источника питания и трехфазное короткое замыкание нагрузки с землей (О и ТКЗ).
6. Обрыв фазы источника питания и однофазное короткое замыкание

разноименной фазы нагрузки (О и ОКЗР).

7. Обрыв фазы источника питания и однофазное короткое замыкание одноименной фазы нагрузки (О и ОКЗО).
8. Обрыв фазы источника питания и двухфазное короткое замыкание с участием одноименной фазы нагрузки (О и ДКЗО).
9. Обрыв фазы источника питания и ДКЗ без земли разноименных здоровых фаз (О и ДКЗР).
10. Обрыв фазы источника питания и ДКЗ с землей с участием здоровой фазы (О и ДКЗЗ).

Таблица. Перечень рассмотренных несимметричных режимов с их условными обозначениями

№	Условная поясняющая схема рассчитываемого режима	Усл. Обоз	№	Условная поясняющая схема рассчитываемого режима	Усл. Обоз
1		СРН	6		О и ОКЗР
2		ОКЗ	7		О и ОКЗО
3		ДКЗЗ	8		О и ДКЗО
4		ДКЗ	9		О и ДКЗР
5		О и ТКЗ	10		О и ДКЗЗ

Литература. (References)

- [1] Petrov G.N. [Transformers, vol.1, Basics of theory]. *Transformatori, osnovi teorii, tom 1*, GEI, 1934, 445 pp. (in Russian)
- [2] Petrov G.N. [Electrical machines. 3 volumes, vol.1, Introduction. Transformers]. *V 3-h chasteah. Chasti 1. Vvedenie. Transformatori*. M., «Energia», 1974, 240 pp. (in Russian)
- [3] Volidek A.I. [Electrical machines]. *Elektricheskie mashini*. – L.: Energia, 1978, 832 pp. (in Russian).
- [4] Vasiutinski S.B. [Theory and design of transformers]. *Voprosi teorii i rascheta transformatorov*. L., Energia, 1970, 432 pp. (in Russian).
- [5] Sergeenkov B.N [Electrical machines. Transformers]. Editor Kopilov I.P., *Elektricheskie mashini. Transformatori, redactor Kopilov*, M. Vishaia shkola, 1989, 352 pp. (In Russian).
- [6] Zabudski E.I. [Electrical machines, vol.1, Transformers] *Elektricheskie mashini, chasti 1. Transformatori*. M, 2002, 168 pp. (In Russian).
- [7] Losev S.B., Chernin A.B. [Calculation of systems]. *Vichislenie elektricheskikh velichin v nesimetrichnih rejimakh elektricheskikh system*. M, Energoatomizdat, 1983, 527 pp. (In Russian)
- [8] Berman A.P. [Calculation of asymmetric modes of electrical systems using phase coordinates]. *Raschet nesimetrichnih rejimov elektricheskikh*

- system v faznih koordinatah. *Elektrichestvo*, 1985, No. 12, pp. 6-12. (In Russian).
- [9]. Guseinov A.M. [Calculation of state-steady asymmetric modes in phase coordinates for complex systems]. *Raschet ustanovivshihsea nesimetrichnih rejimov slojnih system v faznih koordinatah. Elektrichestvo*, 1989, No. 3. (In Russian).
- [10]. Karasev D.D., Karasev E.D. [Calculation of electrical networks modes with "FAZAN" software]. *Raschet rejimov elektricheskikh setei po programme "FAZAN"*. Editor Artemov A.I. M.: Moskovskii energeticheskii institut, 1989. (In Russian).
- [11]. Evdokunin G.A., Dmitriev M.V. [Transformers In Electrical Network. Transitions Modeling With The Account Of Magnetic Core Configuration]. *Transformatori v elektricheskoi seti. Modelirovanie perehodnih protsessov s uchetom konfiguratsii magnitnoi sistemi. "Novosti elektrotehniki" No.5 (53) 2008.* (In Russian).
- [12]. Zakariukin V.P., Kriukov A.V. [Complex asymmetric modes of electrical systems]. *Slojnesimetrichnie rejimi elektricheskikh sistem*. Published by Irkutsk State University, 2005. – 274 pp. ,p. 45 –transformer model. (In Russian).
- [13]. Gusev A.S., Svechkarev S.V., Plodistii I.L. [Universal mathematical model of three-phase transformers and autotransformers]. *Universalinaia matematicheskaiia modeli trehfaznih transformatorov i avtotransformatorov*. Proceedings of Tomsk polytechnic university. 2007. V. 311. No. 4. – pp. 77–81. (In Russian).
- [14]. Martinov V.A. [Asymmetric modes of power transformers operation]. *Nesimetrichnie rejimi raboti silovih transformatorov so shemoi soedinenia obmotok Y/Y0*. "Proceeding of Irkutsk State Energy University". Issue 2, 2009, pp. 1-5. (In Russian).
- [15]. Pustovetov M.Iu. [Mathematical model of three-phase transformer]. *Matematicheskaiia modeli trehfaznogo transformatora*, Proceedings of Tomsk polytechnic University. 2012. V. 321. No. 4. (In Russian).
- [16]. Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings). [URL:http://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypetwowindings.html](http://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypetwowindings.html) (last accessed on 1st of June 2015)
- [17]. Three-Phase Transformer 12 Terminals. [URL:http://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/threephasetransformer12terminals.html](http://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/threephasetransformer12terminals.html) (last accessed on 1st of June 2015).
- [18]. [URL:http://www.mathworks.com/help/phymod/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypethreewindings](http://www.mathworks.com/help/phymod/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypethreewindings).
- [19]. Bosneaga V.A., Suslov V.M. [Modelling of three-phase transformers with three leg core for Three-phase transformers with three leg core for engineering calculations of asymmetric modes at different diagrams of windings connections] *Modelirovanie trehfaznih transformatornih ustroystv s trehsterjnevimi magnitoprovodom dlea ingenernih raschetov nesimetrichnih rejimov pri razlichnih shemah soedinenia obmotok*. PROBLEMS OF REGIONAL ENERGETICS, NO. 2(22), 2013. (In Russian).
- [20]. Bosneaga V.A., Suslov V.M. [[Investigation of asymmetrical modes of three-phase transformer with zigzag windings connection](#)]. *Issledovanie nesimetrichnih rejimov trehfaznih trehsterjnevih transformatorov so shemoi soedinenia obmotok v zigzag*. PROBLEMS OF REGIONAL ENERGETICS, NO. 3(23), 2013. (In Russian).
- [21]. Bosneaga V.A., Suslov V.M. [[Investigation Of Special Asymmetrical Modes Of Three-Phase Three-Leg Autotransformers](#)] *Issledovanie osobih rejimov trehfaznih trehsterjnevih avtotransformatorov*. PROBLEMS OF REGIONAL ENERGETICS, NO. 1(24), 2014. (In Russian).
- [22]. Bosneaga V.A., Suslov V.M. [[Investigation Of Asymmetric Modes Of Three-Phase Three Legs Phase Shifting Transformer With Connection In Delta And Two Additional Windings](#)]. *Modelirovanie I raschet nesimetrichnih rejimov fazopovorotnogo transformatora po sheme "treugolinik s dopolnitelinimi obmotkami"*. PROBLEMS OF REGIONAL ENERGETICS, NO. 2(25), 2014. (In Russian).
- [23]. Bosneaga V.A., Suslov V.M. [[Investigation Of Asymmetric Modes Of Three-Phase Three - Legs Phase-Shifting Transformer With "Inverse Double Zigzag" Scheme Of Windings Connections And Commutation In Neutral Point](#)]. *Issledovanie nesimetrichnih rejimov trehsterjnevogo fazopovorotnogo transformatora po sheme "dvoinoi obratnii zigzag"* PROBLEMS OF REGIONAL ENERGETICS, NO. 1(27), 2015. (In Russian).
- [24]. Bosneaga V.A., [Determination of rated power and equivalent short-circuit impedance combined transformer-phase-shifter with connection of regulating windings in delta]. *Opređenje tipovoi moschnosti I ekvivalentnogo soprotivlenia korotkogo zamikania sovmeschnogo transformatora-fazoreguleatora s soedineniem regulirovochnih obmotok v treugolinik*. Collection of articles "Upravleaemie elektroperedachi", issue 1, 1989, pp. 62-68. (In Russian).
- [25]. <http://metz.by/products/catalog/20.html>. (last accessed on 1st of June 2015)

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



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.

E-mail: svictorm46@gmail.com