

Calculation and Investigation of Steady-State Asymmetric Modes of Three-Windings Three-Legs Power Transformer with Star/Star/Delta Windings Connection

Bosneaga V., Suslov V.
Institute of Power Engineering
Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. For the purpose of calculation and studying of steady-state asymmetrical modes of operation of three-windings, three-leg power transformer with an arbitrary winding connection scheme the mathematical model is proposed. This model makes it possible to take into account electromagnetic coupling between the windings, located on different legs. Windings connection scheme in developed model can be arbitrary, including some more complex schemes such as “double zigzag”, “polygon”, “triangle with extended sides”, etc. As the initial data for the model elaboration it is used usual datasheet for power transformers, including nominal values of power and voltages of the windings, short circuit voltages of the winding pairs, power losses in no-load and short circuit modes, no-load current, as well as additional similar data on transformer zero sequence parameters, provided additionally by manufacturer. Use of zero-sequence data allows reflecting one of the most important features of a three-leg transformer, in comparison with three-phase group of single-phase transformers due to electromagnetic coupling between windings, located on different legs. This leads to some peculiarities of its asymmetric modes. Calculations and analysis of the usual steady-state asymmetric modes, including short circuits and phase breaks were carried out on the base of power transformer with windings connection scheme Yn/yn/d-11. The conditions were found out when the magnetic flux tends to exit the magnetic circuit, which can lead to additional losses and local overheating. For considered modes, vector diagrams of currents and voltages of the windings, as well as relative values of magnetic fluxes in the legs were constructed.

Keywords: transformer model, asymmetrical modes, three legs magnetic core, arbitrary winding connection circuits, unbalanced magnetic flux.

DOI: 10.5281/zenodo.2222333

Calcularea și investigarea regimurilor asimetrice staționare a transformatorului de putere trifazat cu trei înfășurări cu schema de conectare stea/stea/treunghi

Bosneaga V., Suslov V.
Institutul de Energetică
Chisinau, Republica Moldova

Rezumat. Pentru a atinge scopul calculării și studierii modurilor de funcționare staționare asimetrice a transformatorului de putere cu trei înfășurări, amplasate pe trei tije, cu schema de conectare a bobinelor arbitrară, este propus un model matematic, care da posibilitatea de a lua în considerație cuplajul electromagnetic a bobinelor, amplasate pe diferite tije. Schema conexiunii a înfășurărilor poate fi arbitrară, inclusiv scheme complexe ca "zigzag dublu", "poligon", "triunghi cu laturi extinse" etc. Ca date inițiale pentru construirea modelului sunt folosite datele de catalog a transformatorului de putere trifazat, care includ valorile nominale ale puterii și tensiunii înfășurărilor, tensiunea de scurtcircuit a perechilor de înfășurări, pierderile de putere în modurile de mers în gol și la scurtcircuit, curentul de mers în gol, precum și date similare suplimentare privind parametri la secvență zero ai transformatorului, furnizați de producător. Utilizarea datelor secvenței zero permite reflectarea uneia dintre cele mai importante caracteristici specifice ale unui transformator cu trei tije în comparație cu un grup trifazat de transformatoare monofazate, care constă în prezența cuplajului electromagnetic al înfășurărilor, amplasate pe tije diferite. Au fost efectuate calcule și analiza regimurilor caracteristice asimetrice staționare, cauzate de scurtcircuitele și rupturi de fază pe baza transformatorului de putere cu schema Yn/yn/d-11. Au fost evidențiate condițiile de apariție a regimurilor în care fluxurile magnetice ale tijelor sunt dezechilibrate și tind să iasă din circuitul magnetic, ceea ce poate duce la pierderi suplimentare și la supraîncălzire locală. Este subliniată importanța crucială a bobinei conectate în triunghi, care schimbă cardinal comportarea transformatorului în regim asimetric.

Cuvinte-cheie: Modelul transformatorului, moduri asimetrice, miez magnetic din trei tije, schema arbitrară de conectare, flux magnetic dezechilibrat.

Расчет и исследование установившихся несимметричных режимов трехобмоточного трехфазного силового трансформатора по схеме $Y_n/y_n/d-11$

Бошняга В., Суслов В.

Институт Энергетики

Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. С целью расчета и исследования установившихся несимметричных режимов работы силового трехобмоточного трехстержневого трансформатора при произвольной схеме соединения обмоток предложена его математическая модель, позволяющая учесть взаимное электромагнитное влияние обмоток, расположенных на разных стержнях магнитопровода. Схема соединения обмоток может быть любой, включая схемы типа «двойной зигзаг», «многоугольник», «треугольник с продолженными сторонами» и др. В качестве исходных данных для построения модели используются обычные каталожные данные силового трехфазного трансформатора, включающие номинальные величины мощностей и напряжений обмоток, напряжения короткого замыкания пар обмоток, потери мощности в режимах холостого хода и короткого замыкания, ток холостого хода, а также аналогичные дополнительные данные по параметрам нулевой последовательности трансформатора, предоставленные изготовителем по запросу. Использование данных по нулевой последовательности позволяет отразить одну из самых важных особенностей трехстержневого трансформатора по сравнению с трехфазной группой однофазных трансформаторов, заключающуюся в наличии электромагнитной связи обмоток, расположенных на различных стержнях, что приводит к особенностям несимметричных режимов работы по сравнению с трехфазной группой однофазных трансформаторов. Рассмотрение проведено на базе силового трансформатора с соединением обмоток по схеме $Y_n/y_n/d-0-11$. Проведены расчеты и анализ наиболее характерных установившихся несимметричных режимов, возникающих при коротких замыканиях и обрывах фаз. Выявлены условия возникновения режимов, при которых магнитный поток стремится выйти из магнитопровода, что может приводить к дополнительным потерям и местным перегревам. Для рассмотренных режимов построены векторные диаграммы токов и напряжений обмоток, а также относительных значений магнитного потока в стержнях, которые дают наглядное представление об их особенностях. Подчеркнута очень важная роль соединенной в треугольник третичной обмотки, наличие которой кардинально изменяет поведение трансформатора в несимметричных режимах.

Ключевые слова: модель трансформатора, несимметричные режимы, трехстержневой магнитопровод, произвольные схемы соединения обмоток, неравновешенный магнитный поток.

ВВЕДЕНИЕ

Несимметричные режимы работы трехфазных силовых трансформаторов могут возникать, например, при подключении к ним мощной однофазной нагрузки (дуговые электрические печи, сварочные аппараты, электровозы однофазного переменного тока и т.п.), при однофазных и двухфазных коротких замыканиях, а также при неполнофазных режимах работы, использование которых позволяет существенно повысить надежность электроснабжения потребителей. В таких режимах вследствие неравномерного распределения токов по фазам трансформатора происходит также искажение его напряжений, что приводит к ухудшению работы смежных потребителей. Особенно опасным является повышение напряжения. Действующие стандарты определяют допустимые показатели несимметрии токов и напряжений в сетях и у потребителей. Для проверки соответствия им фактических показателей необходимо производить расчеты несимметричных режимов. Кроме

того, могут возникать опасные для трансформатора режимы, связанные, например, с превышением номинальных токов обмоток, а также обусловленные выходом магнитного потока из магнитопровода. Это, как известно, может приводить к дополнительным потерям и местным перегревам. Иногда возникают несимметричные режимы, связанные с двумя и более источниками несимметрии, которые достаточно сложно поддаются расчету с применением метода симметричных составляющих. Например, сочетание двух одновременных повреждений - обрыва одной из фаз питающего напряжения и короткого замыкания в нагрузке.

Несмотря на наличие значительного количества работ (например, [1-34]), посвященных моделированию трехфазных трансформаторов, преимущественно двухобмоточных, где в основном описаны различные общие подходы в построении их математических моделей. Однако почти отсутствуют примеры конкретных расчетов, результаты которых могут быть проверены

другими методами (в том числе и экспериментально), и на базе которых можно провести сравнительный анализ получаемых результатов. То же самое (за редким исключением, например, [6]) можно сказать в отношении исследований, посвященных несимметричным режимам, в особенности применительно к трехобмоточным трансформаторам. Целью данной работы является проведение исследований несимметричных режимов на базе усовершенствованной авторами модели для случая трехобмоточного трансформатора с учетом электромагнитной связи обмоток разных фаз, и, таким образом, восполнить хотя бы частично этот пробел. Применяемая здесь для расчетов модель основана на описанной в [35] схеме замещения многообмоточного однофазного трансформатора. Одна из предыдущих ее модификаций была ранее использована в [36] для исследования несимметричных режимов двухобмоточного трехстержневого трансформатора. Здесь же используется несколько усовершенствованный вариант для случая трех обмоток (более детальное описание планируется опубликовать позднее). Отметим, что особенностью применяемой модели (как и ранее использованной в [36]) является учет электромагнитной связи обмоток, расположенных на разных стержнях магнитопровода, что отражает кардинальное отличие трехстержневого трансформатора от трехфазной группы однофазных трансформаторов. При этом в качестве исходных данных для построения модели предлагается использовать обычные каталожные данные трансформатора, а также некоторые параметры для нулевой последовательности, которые не входят в обычно предоставляемые производителями данные. Однако они могут быть определены сравнительно легко путем замеров на готовом трансформаторе в заводских условиях или даже на эксплуатируемом трансформаторе, аналогично тому, как определяются параметры для прямой последовательности.

РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ КРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Исследование особенностей различных несимметричных режимов короткого замыкания для определенности и возможности сравнения полученных

результатов проведем на конкретном трансформаторе. В качестве примера для расчета возьмем силовой трансформатор мощностью 6300 кВА (каталожные данные для него можно найти, например, в [37]). Схема соединений выбрана Уп/уп/д-0-11 (см. рисунок 1). Точками обозначены начала обмоток, буквами А, В, С – обмотки разных фаз, цифрами-первичная, вторичная и третичная обмотки. Номинальные напряжения обмоток равны 115, 38,5 и 11 кВ, парные напряжения к.з. обмоток $U_{квн-сн}=10,5\%$, $U_{квн-нн}=17\%$, $U_{ксн-нн}=6\%$. Кроме того, заданы ток холостого хода $I_{xx}=1,1\%$ и потери в режиме холостого хода $P_{xx}=12,5$ кВт и режиме короткого замыкания $P_{кз}=52$ кВт. К сожалению, это практически вся информация по параметрам трансформатора, которая обычно предоставляется изготовителями. Нами по запросу от одного из заводоизготовителей были также получены ориентировочные данные по параметрам нулевой последовательности, включающие парные напряжения к.з. обмоток, ток и потери холостого хода, потери для режима нулевой последовательности, которые были использованы при построении модели.

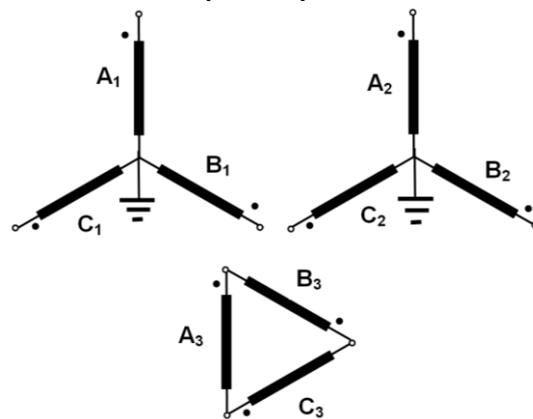


Рис. 1. Схема соединений обмоток рассматриваемого трансформатора.

Fig.1 Windings connection scheme of considered transformer.

Расчеты токов и напряжений схемы будем производить с помощью усовершенствованной авторами модели трехстержневого трехфазного трансформатора. Отличие от [36] заключается в том, что в модели был модернизирован блок, ответственный за более корректный учет параметров нулевой последовательности (более подробное описание усовершенствованной модели планируется опубликовать в последующих работах).

Результаты выполненных расчетов векторов токов и напряжений будем представлять для наглядности и облегчения анализа в графической форме, в виде векторных диаграмм (ВД). Рассмотрим далее некоторые наиболее характерные несимметричные режимы.

ОДНОФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ

Рассчитаем наиболее распространенный вид короткого замыкания, однофазное короткое замыкание на землю фазы А вторичной обмотки. Примем следующие исходные условия для расчета. Нейтрали первичной и вторичной звезд заземлены. К вторичной звезде подключена номинальная нагрузка чисто активного характера, а треугольник третичной обмотки работает на холостом ходу, хотя к нему в принципе может быть подключена любая нагрузка, которая моделируется комплексным сопротивлением или нагрузкой заданной мощности. На рис.2 представлена векторная диаграмма напряжений обмоток трансформатора, полученная для этого режима. Здесь и далее вектора величин (напряжений, токов), относящихся к обмоткам разных фаз, обозначены буквами А,В,С (фазы трансформатора) с цифровыми индексами 1,2,3, обозначающими первичную, вторичную и третичную обмотки соответственно. Масштабы величин указаны на рисунках.

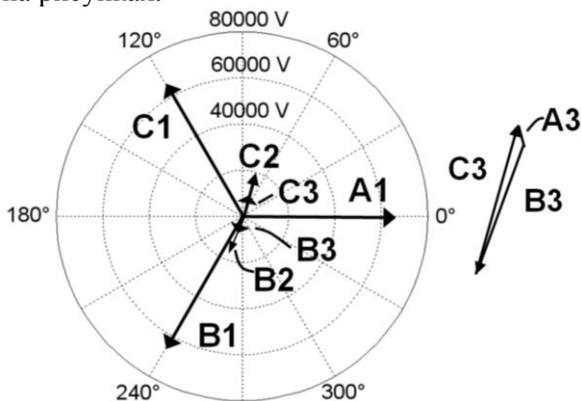


Рис. 2. Напряжения обмоток при ОКЗ фазы А вторичной звезды. Fig.2. Windings voltages at short-circuit of phase A of secondary star.

На рисунке 2 показана система симметричных приложенных напряжений A_1, B_1, C_1 , там же у пунктирных окружностей указаны для ориентира модули напряжений в вольтах. Напряжение на обмотке A_2 при к.з. по условию равно нулю (моделируется

металлическое к.з. с малым сопротивлением, однако может быть задано любое комплексное сопротивление в месте к.з.). Напряжение третичной обмотки A_3 , расположенной на стержне закороченной фазы А - мало, поэтому на ВД не показано. Напряжения вторичной и третичной обмоток B_2, C_2 и B_3, C_3 фаз В и С практически находятся в противофазе, значительно меньше номинальной величины и смещены от своего обычного симметричного расположения. Справа от основной ВД показан в увеличенном масштабе 1:10 треугольник напряжений третичной обмотки, который сильно искажен ввиду короткого замыкания.

На следующем рисунке 3 приведена ВД токов первичной обмотки. Видно, что сумма токов первичной звезды не равна нулю, т.е. через заземленную нейтраль первичной звезды протекают токи нулевой последовательности, замыкающиеся через

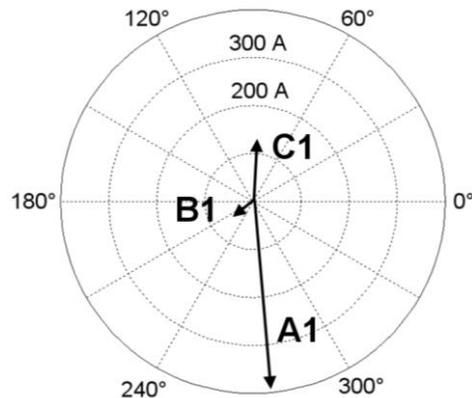


Рис. 3. Токи первичных обмоток при ОКЗ фазы А. Fig.3. Currents of primary windings at short-circuit of phase A.

землю на источник питания. Ток к.з. в первичной обмотке поврежденной фазы А (370 А) превышает номинальный ($I_{ном} = 31,6$ А) более чем в 10 раз. На рисунке 4 на отдельной ВД, ввиду значительной разницы модулей токов на первичной и вторичной сторонах, представлены токи вторичной и третичной обмоток. Ток вторичной обмотки C_2 на ВД не показан ввиду его незначительной величины по сравнению с токами фазы А, где произошло короткое замыкание. На этой же диаграмме показаны также токи третичных обмоток всех фаз (три параллельных вектора). Все три тока обмоток треугольника A_3, B_3, C_3 , одинаковы по модулю и совпадают по фазе, т.е. они представляют собой замыкающийся в

треугольнике ток нулевой последовательности. На следующем

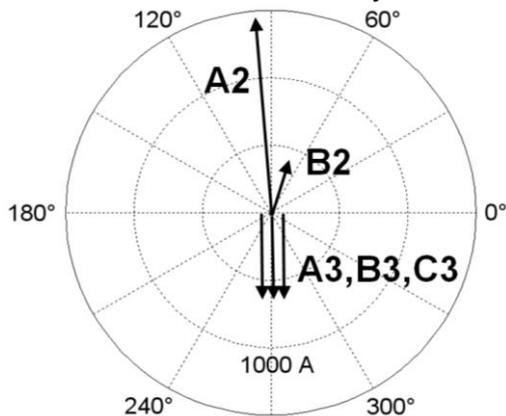


Рис.4. Токи вторичной и третичной обмоток при ОКЗ обмотки A_2 . Fig.4. Currents of secondary and tertiary windings at short-circuit of winding A_2 .

рисунке 5 показаны рассчитанные относительные значения магнитных потоков в стержнях магнитопровода (обозначены A, B, C). Как видно из рисунка, поток в стержне закороченной фазы относительно мал ввиду большой потери напряжения на первичной обмотке фазы A, при этом токи первичной и вторичной обмотках фазы A, противоположно направлены (см. рис.3,4), а их величина на порядок превышает номинальные значения. В стержнях фаз B и C потоки близки по величине и находятся в противофазе, т.е., поток как бы замыкается по контуру, образованному фазами B и C. Таким образом, в данном режиме, несмотря на присутствие токов нулевой последовательности на первичной и вторичной сторонах, благодаря наличию соединенной в треугольник третичной обмотки, в которой возникают уравновешивающие токи нулевой последовательности, магнитный поток циркулирует почти целиком внутри магнитопровода и в окружающее пространство практически не выходит. Очевидно (см. рис.4), что сумма токов обмоток вторичной звезды A_2, B_2, C_2 тоже не равна нулю, следовательно, в нейтрали вторичной звезды тоже есть токи нулевой последовательности. Во всех фазах третичной обмотки, соединенной в треугольник, протекает ток нулевой последовательности, равный 608 А (что более чем втрое превышает номинальный ток третичной обмотки, равный 190 А).

Рассмотрим еще одну из возможных разновидностей режима ОКЗ, возникающего при изолированной нейтрали первичной

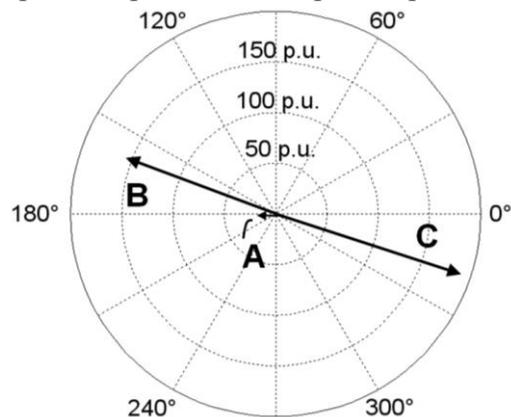


Рис. 5. Относительные магнитные потоки стержней. Fig.5. Relative magnetic fluxes of legs.

обмотки. Отметим здесь некоторые особенности этого режима ОКЗ на основе результатов проведенных расчетов данного режима. Очевидно, в данном режиме исключается протекание токов нулевой последовательности по первичной обмотке, в связи с чем вид векторных диаграмм токов обмоток несколько видоизменяется, однако в целом они аналогичны представленным на рис. 3-4. Наиболее существенными особенностями являются те, что через нейтраль вторичной звезды и в треугольнике по-прежнему протекают токи нулевой последовательности, которые в треугольнике в этом режиме увеличиваются приблизительно на 20% и составляют 792 А. При этом картина распределения магнитных потоков несущественно отличается от приведенной на рис.5, магнитный поток по-прежнему в основном сосредоточен в магнитопроводе.

Для того, чтобы подчеркнуть, что наличие замкнутого треугольника очень существенно влияет на режимы при наличии токов нулевой последовательности, была рассмотрена еще одна разновидность режима ОКЗ, при которой, кроме разземленной первичной нейтрали, разомкнут еще и треугольник. Полученные результаты показали, что в этом режиме по вторичной обмотке по-прежнему протекают токи нулевой последовательности, а значительный магнитный поток выходит из магнитопровода. При этом картина становится похожей на описанную ранее в [38], так как схемы соединений обмоток в обоих случаях (с учетом разорванного

треугольника) совпадают, отличие лишь количественное, вызванное разными параметрами рассмотренных трансформаторов. Как и следовало ожидать, разрыв треугольника препятствует появлению в нем токов, уравнивающих токи нулевой последовательности вторичной обмотки, что приводит к резкому изменению картины магнитных потоков. Таким образом, если схема соединения обмоток такова, что протекающие в различных обмотках токи нулевой последовательности могут взаимно уравниваться, то поток почти не выходит из сердечника.

ДВУХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ

Рассмотрим другой вероятный режим - двухфазное к.з. (ДКЗ) обмоток A_2 и B_2 вторичной звезды. Как и ранее, на этой обмотке есть номинальная активная нагрузка, на третичной обмотке - режим холостого хода. На рис. 6 представлены в виде векторных диаграмм результаты расчета напряжений вторичной и третичной обмоток. Симметричная система напряжений,

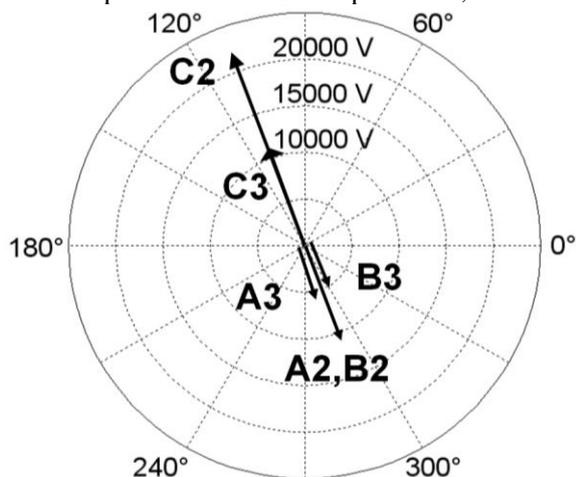


Рис. 6. Напряжения вторичной и третичной обмоток при ДКЗ без земли обмоток A_2, B_2 .
Fig.6. Voltages of secondary and tertiary windings at short-circuit between windings A_2, B_2 .

приложенная к первичным обмоткам неизменна, соответствует рисунку 2, и поэтому не показана. Видно, что система напряжений обмоток A_3, B_3, C_3 , составляющих стороны треугольника, сильно искажена, при этом повреждении треугольник практически стягивается в одну линию, а напряжения обмоток A_3, B_3 закороченных фаз А и В становятся приблизительно равны половине напряжения обмотки C_3 . Вектора напряжений A_2, B_2 вторичной обмотки, как и должно быть, совпадают. Напряжения обмоток,

расположенных на стержне фазы С, приблизительно вдвое больше, чем напряжения обмоток, расположенных на стержнях фаз А и В. Кроме того, напряжения обмоток на стержнях А и В находятся практически в противофазе по отношению к напряжениям обмоток фазы С. Как будет дополнительно показано также далее, это соответствует картине распределения магнитных потоков по стержням, магнитные потоки фаз А и В складываются в стержне фазы С и наводят в соответствующих обмотках этой фазы двойное напряжение.

На следующих рисунках 7 и 8 показаны ВД токов в первичных и вторичных обмотках в рассматриваемом режиме ДКЗ.

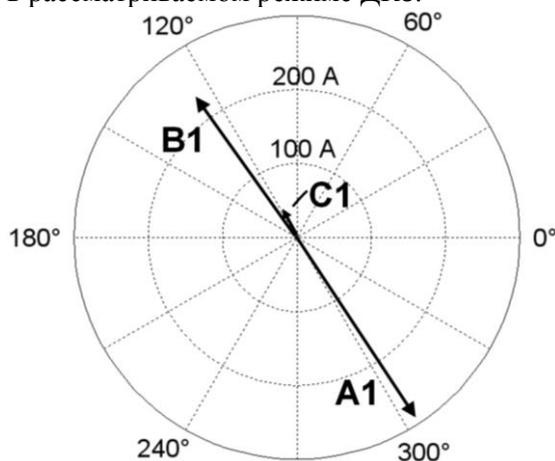


Рис. 7. Токи первичной обмотки при ДКЗ без земли. Fig.7. Currents of primary windings at short-circuit between windings A_2, B_2 .

Видно, что все токи направлены почти по одной прямой, наибольшие токи, как и следовало ожидать (см. рис. 7,8), наблюдаются в обмотках A_1, A_2 и B_1, B_2 тех фаз, которые закорочены. Видно, что токи первичной и вторичной обмоток A_1, A_2 и B_1, B_2 находятся в противофазе, как и должно быть. В обмотках здоровой фазы C_2, C_3 токи лишь немного превышают номинальные. Как показал расчет, максимальный ток, потребляемый от источника, при данном замыкании меньше, чем в предыдущем случае при ОКЗ. На рис. 9 представлена ВД относительных магнитных потоков в стержнях магнитопровода при ДКЗ. Видно, что суммарный магнитный поток трех стержней приблизительно равен нулю, это означает, что магнитный поток циркулирует в пределах магнитопровода и не выходит в окружающее пространство. Кроме того, относительный поток в стержне фазы С приблизительно вдвое больше, чем потоки в

стержнях фаз А,В, и получается суммированием этих потоков, что

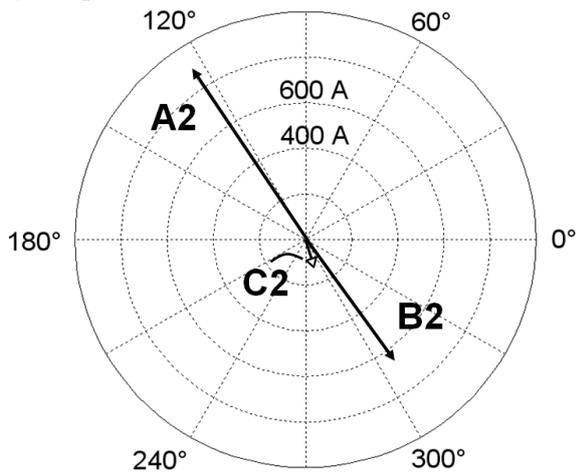


Рис. 8. Токи вторичной обмотки при ДКЗ без земли. Fig.8. Currents of secondary windings at short-circuit between windings A₂,B₂.

согласуется с ВД напряжений обмоток рис. 6: напряжения обмоток фазы С приблизительно вдвое больше, чем напряжения соответствующих обмоток фаз А и В и находятся в противофазе по отношению к ним.

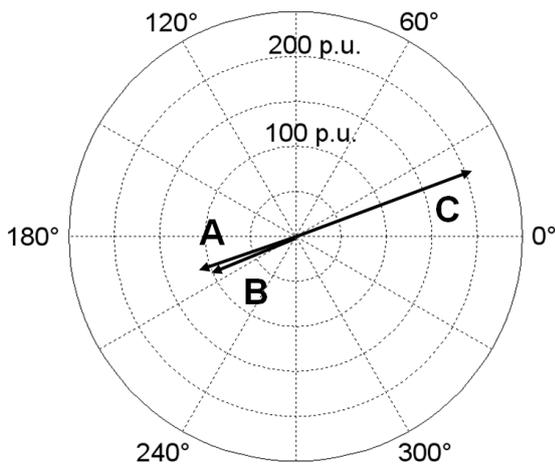


Рис. 9. Относительные магнитные потоки в стержнях при ДКЗ. Fig.9. Relative magnetic fluxes of legs at short-circuit between windings A₂,B₂.

ДВУХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ С ЗЕМЛЕЙ

Рассмотрим далее еще один вид возможного повреждения, двухфазное короткое замыкание с землей. Результаты расчета напряжений обмоток представлены в виде ВД на рисунке 10. Как видно из рисунка 10, напряжение здоровой фазы С₂ в результате КЗ становится значительно меньше номинального (номинальное

напряжение этой обмотки равно $38,5/\sqrt{3}$ кВ=22,2 кВ), напряжения обмоток, образующих стороны треугольника А₃,В₃, соответствующие поврежденным фазам, значительно пониженные. Напряжение обмотки С₃ здоровой фазы тоже пониженное, однако, все-таки заметно больше, чем напряжения поврежденных фаз этой обмотки, треугольник сильно искажен (изображен рядом справа на том же рисунке в масштабе 1:3).

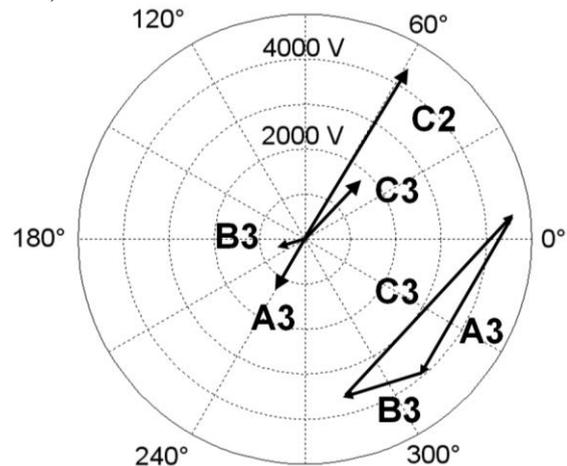


Рис. 10. Напряжения вторичных и третичных обмоток при ДКЗ с землей обмоток А₂,В₂. Fig.10. Voltages of secondary and tertiary windings at short-circuit between windings A₂,B₂ with ground.

Картина токов в обмотках представлена на рис.11. Все токи значительно превышают номинальные (ток обмотки С₂ не показан ввиду малости). В треугольнике возникает значительный ток нулевой последовательности (вектора А₃,В₃,С₃), превышающий номинальный более чем в четыре раза. Как показал расчет, магнитные потоки стержней в этом режиме

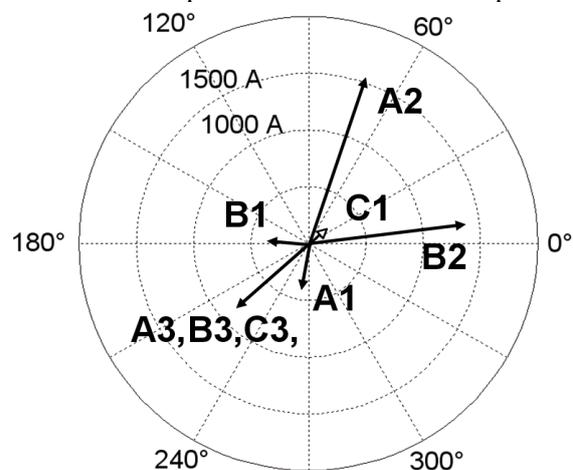


Рис. 11. Токи обмоток при ДКЗ с землей фаз А, В вторичной звезды. Fig.11. Currents of

windings at short-circuit between windings A_2, B_2 with ground.

несимметричные и значительно меньшие, чем при нормальном режиме. Магнитный поток частично выходит в окружающее пространство. В отличие от предыдущего случая ДКЗ без земли, токи замкнутых обмоток A_2, B_2 становятся неодинаковыми ввиду соединения точки их замыкания с землей, и появляются заметные токи в обмотках A_3, B_3, C_3 , соединенных в треугольник.

Таким образом, рассмотрены три основных режима, связанных с несимметричными короткими замыканиями. Во всех этих режимах в обмотке, соединенной в треугольник, возникают токи нулевой последовательности, уравнивающие токи нулевой последовательности других обмоток, в результате, магнитный поток замыкается внутри магнитопровода почти полностью, практически не выходя в окружающее пространство. Аналогичное явление происходит при несимметричной нагрузке фаз, поэтому соединенная в замкнутый треугольник третичная обмотка играет важную роль и способствует симметрированию режима трансформатора.

Рассмотрим далее для иллюстрации расчетных возможностей модели еще один несимметричный режим, возникающий вследствие обрыва одной из фаз питающей системы напряжений при симметричной номинальной нагрузке вторичных обмоток. На рис.12 представлены токи обмоток при обрыве фазы С.

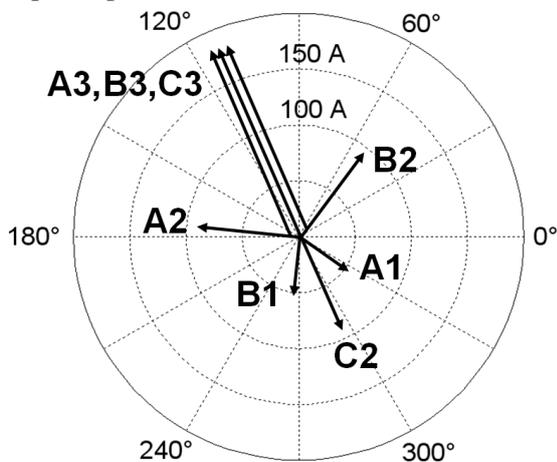


Рис. 12. Токи обмоток при обрыве фазы С и симметричной нагрузке. Fig.12. Currents of windings at phase C break and balanced load.

Очевидно, что в этом случае ток обмотки C_1 равен нулю, что подтверждается и проведенным расчетом. Как следует из рисунка 12, токи в здоровых фазах в обмотках A_1, B_1 превышают номинальный на 65%, токи во всех обмотках треугольника A_3, B_3, C_3 одинаковы и почти номинальные. Токи нагрузки вторичных обмоток остаются практически симметричными, отличие по модулю составляет приблизительно 1% , т.е. степень несимметрии при таком повреждении невелика, что иллюстрирует существенные симметрирующие свойства трехстержневого трансформатора по сравнению с трехфазной группой однофазных трансформаторов. Отметим, что магнитные потоки стержней в этом режиме также симметричны.

Далее, для уяснения влияния и роли замкнутого треугольника, проведен расчет при тех же условиях, но при разорванном треугольнике. Как следует из рис. 13, в отличие от предыдущего варианта с замкнутым треугольником, токи нагрузок в обмотках A_2, B_2, C_2 вследствие разрыва треугольника становятся существенно несимметричными. Токи в треугольнике, естественно, отсутствуют, также равен нулю ток в оборванной первичной обмотке C_1 . Для получения полной картины данного режима, на рис. 14 приведены также результаты расчета напряжений обмоток в этом режиме. Как и ранее, показаны только напряжения вторичных и третичных обмоток. Отдельно слева показаны в увеличенном масштабе 1:2 напряжения третичных обмоток. Как видно из рисунка, система напряжений на нагрузке

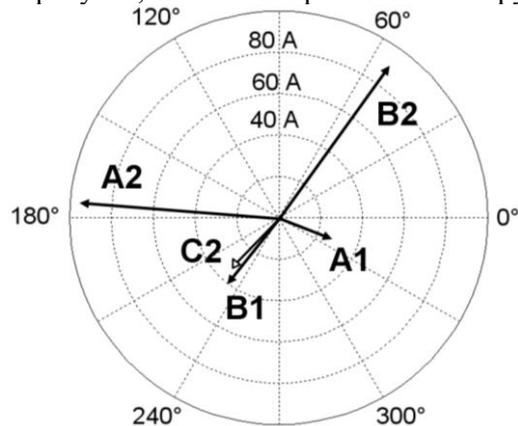


Рис. 13. Токи обмоток при обрыве фазы С, симметричной нагрузке и разорванном треугольнике третичных обмоток. Fig.13. Currents of windings at supply phase C break, balanced load and disconnected tertiary winding.

(см. вектора напряжений A_2, B_2, C_2) при разрыве треугольника становится существенно несимметричной, вектора напряжений на обмотках разорванного треугольника A_3, B_3, C_3 с

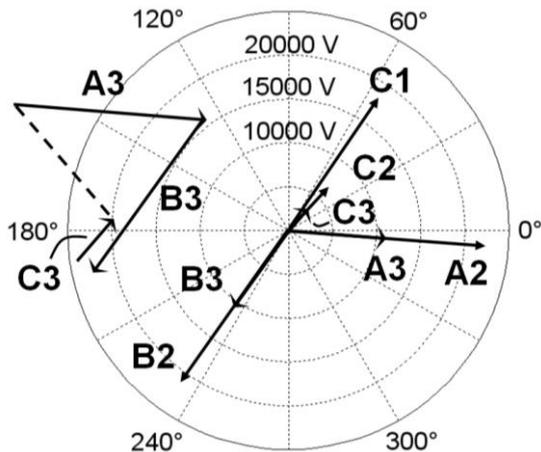


Рис.14. Векторные диаграммы напряжений обмоток при разомкнутом треугольнике. Fig.14. Voltages of windings at disconnected triangle.

соответствующим коэффициентом трансформации повторяют напряжения вторичной звезды. Показан вектор напряжения на первичной обмотке C_1 , которая не подключена вследствие разрыва к источнику питания, однако на ней тем не менее, наводится заметное напряжение. Из рис. 14 видно, что вследствие разрыва треугольника третичных обмоток, вектора их напряжений не образуют замкнутого треугольника, между концом обмотки C_3 и

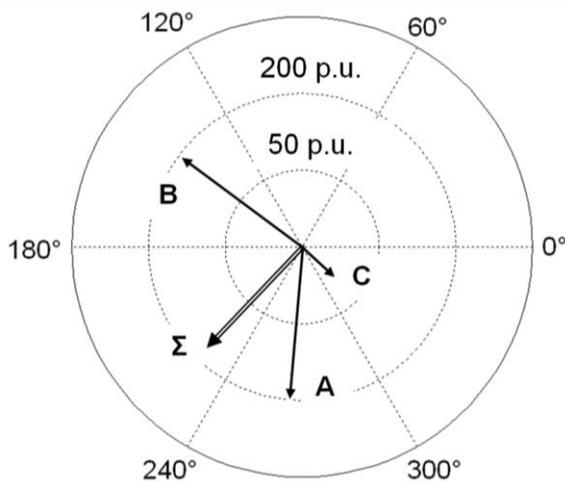


Рис.15. Относительные значения магнитных потоков в стержнях. Двойной линией показан выходящий из магнитопровода поток. Fig.15. Relative magnetic fluxes of legs. Doubled line indicate magnetic flux outside of the core.

началом обмотки A_3 имеется напряжение, отображенное пунктирной линией. Расчет

показывает, что в этом режиме заметный магнитный поток выходит из сердечника. На рис. 15 приведена ВД относительных значений потоков в стержнях в этом режиме. Видно, что сумма магнитных потоков стержней А, В, С не равна нулю (показана двойным вектором), это означает, что существенный магнитный поток выходит из магнитопровода в окружающее пространство.

ВЫВОДЫ

1. С помощью разработанной модели трехобмоточного трехстержневого трансформатора проведены расчеты и исследованы особенности некоторых наиболее характерных установившихся несимметричных режимов трех-обмоточного силового трансформатора со схемой соединения $Y_n/y_n/d-11$. Рассмотрены различные виды коротких замыканий, а также несимметричный режим, вызванный обрывом одной из фаз. Рассчитаны модули и углы векторов токов и напряжений в обмотках трехстержневого трансформатора для нескольких несимметричных режимов, построены векторные диаграммы, наглядно иллюстрирующие величины токов и напряжений. Построены векторные диаграммы относительных магнитных потоков в стержнях, что позволяет идентифицировать подобные режимы, характеризующиеся потенциально опасными местными перегревами.

2. Предложенная модель позволяет рассчитать практически любые несимметричные режимы, как относительно простые, вызванные несимметрией нагрузки, короткими замыканиями и др, так и сложные, обусловленные комбинацией одновременных несимметрий или повреждений разного рода, например, несимметрией приложенной системы напряжений, сочетанием коротких замыканий и обрывов фаз.

3. Показано, что режимы с существенным выходом магнитного потока из магнитопровода могут возникать в случаях, когда токи нулевой последовательности протекают только на одной из сторон трансформатора, и отсутствуют обмотки, соединенные в замкнутый треугольник.

4. Описанная модель является удобным инструментом, позволяющим исследовать все многообразие несимметричных режимов трехобмоточных трехстержневых трансформаторов на основе единого подхода.

ЛІТЕРАТУРА (REFERENCES)

- [1] Losev S.B., Chernin A.B. Vichislenie elektricheskikh velichin v nesimmetrichnih regimakh elektricheskikh sistem. [Calculation of electrical values in asymmetric modes of electrical systems], M, Energoatomizdat, 1983, 527 pages. (In Russian)
- [2] Berman A.P. Raschet nesimmetrichnih regimov elektricheskikh sistem s ispolizovaniem faznih koordinat.[Calculation of asymmetric modes of electrical systems with using of phase coordinates]. Elektrichestvo, 1985, No.12, pages 6-12.(In Russian)
- [3]. Guseinov A.M. Raschet v faznih koordinatakh nesimmetrichnih ustanovivshihsea regimov v slozhnykh sistemakh [Calculation in phase coordinates of asymmetric steady-state modes of complex systems]. Elektrichestvo, 1989, No.3. (In Russian)
- [4] Zakoriukin V.P., Kriukov A.V. Slojno-nesimmetrichnie rejimi elektricheskikh sistem [Complex asymmetric modes of electrical systems]. Printing house of Irkutsk State University, 2005, 274 pages (page 45 –transformer model).(In Russian)
- [5] Gusev A.S., Svechkarev S.V., Plodistii I.L. Universalnaia matematicheskaia modeli trehfaznykh transformatorov i avtotransformatorov [Universal mathematical model of three-phase transformers and autotransformers].// Izvestia Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta. 2007. Vol. 311, No.4, pages 77–81. (In Russian)
- [6] Martinov V.A. Nesimmetrichnie rejimi raboti silovykh transformatorov so shemoi soedinenia obmotok Y/Y-0 [Asymmetric modes of power transformers with windings connection scheme Y/Y-0].”Vestnik IGEU”, Issue 2, 2009, pages 1-5.(In Russian).
- [7] Pustovetov M.Yu. Matematicheskaia modeli trehfaznogo transformatora [Mathematical model of three-phase transformer], Izvestia Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta. 2012. Vol. 321. No.4. (In Russian) .
- [8] Martinov V.A. Raschet nepolnofaznykh regimov raboti trehfaznykh transformatorov [Calculation of incomplete phase regimes of three-phase transformers]. Elektrichestvo, No.9, 2003, pages 54–61. (In Russian)
- [9] Sahno L.I. Metod rascheta magnitnogo polea v magnitoprovode dvuhobmotochnogo transformatora pri ustanovivshemsea regime korotkogo zamikania [Method for magnetic field calculation in magnetic core of two-winding transformer in steady-state short-circuit mode]. [26](http://cgi-bin/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe%3fLNG=&Z21ID=&I21DBN=SPEC_PRINT&P21DBN=SPEC&S21STN=1&S21REF=&S21FMT=FULLW_print&C21COM=S&S21CNR=500&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=M=&S21STR=//Elektrichestvo. 2011, No.11, pages 55-65.(In Russian)</p><p>[10] Leon F., Martinez J.A. Dual Three-winding Transformer Equivalent Circuit matching Leakage measurements. IEEE transactions on power delivery. January 2009. Vol. 24. No. 1. P. 160–168.</p><p>[11] Juan A. Martinez-Velasco, Bruce A. Mork. Transformer Modeling For Simulation Of Low Frequency Transients In Power Systems. CIREC. 17th International Conference on Electricity Distribution Barcelona, 12-15 May 2003. Session 1, Paper No 92.</p><p>[12] Lambert Mathieu. Transformer Modeling For Low- And Mid-Frequency Electromagnetic Transients Simulation, PhD thesis, Universite De Montreal. 2014.</p><p>[13] J. A. Martinez and B. A. Mork, “Transformer modeling for low- and mid-frequency transients—a review,” IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pt. 2, pp. 1625–1632, Apr. 2005.</p><p>[14] Zakoriukin V.P. Algoritm rascheta skhemi zameschenia trekhfaznogo transformatora v faznykh koordinatakh [Algorithm of calculation of equivalent scheme of three phase transformer in phase coordinates]// Novie tehnologii upravleniia i metodi analiza elektricheskikh sistem i sistem teagovogo elektrosnabzheniia . Irkutsk 2000. Issue 1, pp. 31-38. (In Russian).</p><p>[15] C. Alvares-Marino, F. de Leon, X.M.Lopez-Fernandes. Equivalent Circuit for the Leakage Inductance of Multiwinding Transformers: Unification of Terminal and Duality Models. IEE Transaction On Power Delivery, vol. 27, NO 1, January 2012. pp. 353-361.</p><p>[16] Quing Chen, F. C. Lee, Jian Zhong Jang, M. M. Jovanovic. A New Model for Multiple-Winding Transformer. IEE Power Electronics Specialists Rec., 1994, pp. 864-871.</p><p>[17] Tadeusz J. Sobczyk, Joseph EL Hayek. On parameters determination of multi-port equivalent scheme for multi-winding traction transformers. Archives Of Electrical Engineering, vol. 64(1), pp. 17-27 (2015). DOI 10.1515/ae-2015-0003.</p><p>[18] Luis Guasch, Felipe Corcoles, Joaquin Pedra, Luis Sainz. Effects of Symmetrical Voltage Sags on Three-Phase Three-Legged Transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, VOL. 19, NO. 2, APRIL 2004, pages 875-883.</p><p>[19] Joseph El Hayek, Tadeusz Sobczyk. Estimation Of Parameters Of Multi-Port Equivalent Scheme For Multi-Winding Traction Transformers. University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland, School of Engineering, Sion. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 3/2014 (103).</p><p>[20] Carl Michael F. Odulio, Miguel T. Escoto, Jr. Multiple Winding Transformer Model for Power Supply Applications in Circuit Simulations. Proceedings of the World Congress on Engineering 2013 Vol II, WCE 2013, July 3 - 5, 2013, London, U.K. ISBN: 978-988-19252-8-2.</p><p>[21]. Sahno L.I. K voprosu o sheme zameschenia trehobmotochnogo transformatora [About the</p></div><div data-bbox=)

equivalent scheme of three-windings transformer], *Elektrichestvo*, 2003. No.8, pp.25 – 33. (In Russian)

[22]. De Leon F., Martinez J.A. Dual three-winding transformer equivalent circuit matching leakage measurements // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2009, 24(1). P. 160–168.

[23] Varlamov Yu.V., Sahno L.I., Sahno O.I. Raschet koefficienta vzaimnoi induktsii po potokam rasseiania v sheme zameschenia trehobmotochnogo transformatora [Calculation of mutual induction coefficient on leakage fluxes in the equivalent scheme of three-winding transformer]. *Elektrichestvo*, No.2, 2007, pages 57-62. (In Russian)

[24] Serebriakov A.S., Osokin V.L. Nesimmetrichnaia nagruzka trehfaznih transformatorov pri soedinenii obmotok po sheme Y/Y0-0 [Asymmetric load of three-phase transformers at connection scheme Y/Y0-0]. // *Vestnik NGIEI*, 2017, No.3 (70), pp. 50–57. (In Russian)

[25] Alexeenko E.A., Bulatov Yu.N., Zakariukin V.P., Kriukov A.V. Modelirovanie avariinnykh regimov v sistemakh electrosnabzhenia jeleznykh dorog [Modelling of emergency regimes in energy supply systems of rail roads], monografiya:// Editor Kriukov A.V. Irkutsk: IrGUPS, 2016, 169 pages.(In Russian).

[26] Joseph El Hayek, Tadeusz Sobczyk. Estimation of parameters of multi-port equivalent Scheme for multi-winding traction transformers. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* Nr 3/2014 (103), Pp. 19-24.

[27] El Hayek J., Sobczyk T.J.: Multi-port equivalent scheme for multi-winding traction transformers, *COMPEL*, Vol. 31, Issue 2, 2012, pp. 726-737.

[28] Erickson R.W., Maksimovič D. A multiple-winding magnetic model having directly measurable parameters, *IEEE PESC*, Vol.2, 1998, pp. 1472-1478.

[29] J. Pedra, L. Sainz, F. Corcoles, R. Lopez, and M. Salichs. PSPICE Computer Model of a Nonlinear Three-Phase Three-Legged Transformer. *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 19, no. 1, January 2004.

[30] Xusheng Chen, S.S. Venkata. A Three-Phase Three-Winding Core-Type Transformer Model For

Low-Frequency Transient Studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, July 1996.

[31] Pedra, J., Sainz, L., Corcoles, F., & Guasch, L. (2005). Symmetrical and Unsymmetrical Voltage Sag Effects on Three-Phase Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2), 1683–1691.

[32] Julieta Z. Vernieri, M. Beatriz Barbieri, Patricia L. Amara. Consequence of an unbalanced supplying condition on a distribution transformer. Paper accepted for presentation at 2001 IEEE Porto Power Tech Conference, 13th September, Porto, Portugal. 0-7803-71 39-9/01/\$10.00 02001 IEEE.

[33] Martinez, J. A., & Mork, B. A. Transformer modeling for simulation of low-frequency transients. 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491). doi:10.1109/pes.2003.1270503

[34] L. Kasprzyk, Z.Stein, M.Zielińska. Basic equations for analysis of a three-phase three-winding transformer subjected to asymmetric load. *Computer Applications in Electrical Engineering*, pp.161-169, Poznań University of Technology, Institute Of Electrical Engineering and Electronics. IEEE Poland Section, Volume 9, editor Ryszard Nawrowski, 2011.

[35] Suslov V.M., Bosneaga V.A. Method of Parameters Determination for Multi-Winding Transformer Equivalent Circuit in the Form of Multi-BeamStar. Institutul de Energetica, “PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE”, 2 (37) 2018. URL <http://journal.ie.asm.md/ro/contents/electronni-jurnal-237-2018> (accessed 23.10.2018) (In Russian).

[36] Suslov V.M., Bosneaga V.A. Modeling of Three-Phase Three Leg Transformer Devices for Engineering Calculations of Asymmetrical Modes for Different Schemes of Winding Connections. Institutul de Energetica, PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 2(22) 2013,. URL <http://journal.ie.asm.md/en/contents/elektronnyj-zhurnal-n-222-2013> (accessed 23.12.2018) (In Russian).

[37] GOST 12965-85. Power Transformers oiled filled, general purpose, rated voltages 110, 150 kV. Technical requirements. Moscow. (In Russian).

Сведения об авторах.



Бошняга Валерий Андреевич, защитил диссертацию на степень кандидата технических наук в институте Электродинамики Академии наук Украины в 1988 г. Область научных интересов расчеты режимов электрических систем устройств.

valeriu.bosneaga@gmail.com



Суслов Виктор Миронович, научный сотрудник, область научных интересов связана с электропередачами переменного тока, режимами энергетических систем, переходными электро-механическими процессами, моделированием в энергетических системах.

E-mail: svictorm46@gmail.com