

INVESTIGATION OF SPECIAL ASYMMETRICAL MODES OF THREE-PHASE THREE-LEG AUTOTRANSFORMERS

Bosneaga V.A., Suslov V.M.

Power Engineering Institute of Academy of Sciences of Moldova

Abstract. On the base of earlier proposed model calculations were made and were investigated peculiarities of special asymmetric modes of three-phase three legs autotransformer (AT) with tertiary winding, connected in triangle. Calculations were carried out taking into account the electromagnetic coupling of coils, located on different legs. Modules and angles of currents and voltages vectors in autotransformer windings were calculated at breakage of one of the phases of the supply voltage and its simultaneous fault to ground at the side of AT. Based on these data vector diagrams were constructed, which give a visual representation of specific features of such regimes. Considered mode at grounded neutral is characterized by the occurrence of significant currents of the same value in all windings, app. equal to nominal current. Voltage of the windings varies slightly from the nominal values, except for the short-circuited phase. Furthermore, there is a considerable flow of the zero sequence flux, which may lead to additional heating of AT. At ungrounded neutral in this particular mode and absence of load on the secondary AT side, only a small magnetizing currents flows and neutral is significantly displaced. If the load is present, despite of the absence of the current in the neutral, currents in the windings, comparable with the nominal one appeared, also zero sequence flux appeared. In the general case, the currents of this failure (as in the previous case) are much smaller, than the usual short-circuit currents, so are insufficient to trigger the relay protection, this may require additional measures to protect AT against such damage.

Keywords: Transformer model, special asymmetric modes, autotransformer, three legs core, zero sequence magnetic flux.

INVESTIGAREA REGIMURILOR SPECIFICE A AUTOTRANSFORMATORULUI TRIFAZAT CU MIEZ CU TREI COLONE

Boşneaga V.A., Suslov V.M.

Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei

Rezumat. În baza modelului propus anterior sunt investigate regimurile nesimetrice permanente în autotransformatorul de forţă trifazat cu miezul cu trei coloane dotat cu o înfăşurare terţă conectată în triunghi. Calculele au fost efectuate, ținând cont de amplasarea înfăşurărilor pe diferite coloane și legătura electromagnetică mutuală dintre aceste înfăşurări. S-au calculate valorile modulelor și a fazorilor curenților și tensiunilor înfăşurărilor autotransformatorului în regimurile la deconectarea unei faze în rețeaua de alimentare și regimului concomitent de scurtcircuit a ei din partea autotransformatorului. În baza datelor obținute s-au construit diagramele fazoriale ce elucidează particularitățile acestor regimuri. Regimul la legarea neutrului la pământ este caracterizat de scurgerea în toate înfăşurările a curenților cu valoarea apropiată de curenții nominali. Tensiunile pe înfăşurări deviază după valoare puțin de la valoarea lor nominală, cu excepția fazei care are regimul de scurtcircuit. Concomitent apare un flux homopolar, ceea ce poate influența semnificativ regimul termic staționar al autotransformatorului. Particularitățile regimului la ruperea legăturii de la pământ al neutrului sunt influențate de sarcina circuitului de medie tensiune. În cazul lipsei de sarcină are loc regimul de magnetizare a fierului autotransformatorului de curenții cu valoare mică și apariția potențialului semnificativ de tensiune în nodul neutrului. În caz de sarcină în circuitul de medie tensiune apare fluxul homopolar, iar curenții în înfăşurări devin egali cu cei nominali. La general, și, în primul caz și în cazul al doilea la astfel de defecte în circuitul autotransformatorului curenții regimului permanent au valori sub curenții ajustați pentru sistemul de protecție în caz de scurtcircuit, iar ca rezultat sistemul de protecție nu îi sesizează. În acest caz este necesar de elaborat măsuri speciale suplimentare pentru a asigura protecția autotransformatorului la apariția unor astfel de defecțiuni.

Cuvinte-cheie: Modelul transformatorului, regimuri nesimetrice speciale, autotransformator, miez cu trei coloane, flux magnetic homopolar.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЫХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ ТРЕХСТЕРЖНЕВЫХ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

Бошняга В.А., Суслов В.М.

Институт энергетики Академии наук Молдовы

Аннотация. На основе предложенной ранее модели проведены расчеты и изучены особенности установившихся особых несимметричных режимов работы трехфазного силового автотрансформатора с трехстержневой конструкцией магнитопровода с третичной обмоткой, соединенной в треугольник. Расчеты проведены с учетом электромагнитной связи обмоток, расположенных на различных стержнях. Рассчитаны модули и углы векторов токов и напряжений в обмотках автотрансформатора при обрыве одной из фаз питающего напряжения и ее одновременном

коротком замыкании на землю со стороны АТ, по этим данным построены векторные диаграммы, дающие наглядное представление об особенностях таких режимов. Рассмотренный режим при заземленной нейтрали характеризуется возникновением значительных токов во всех обмотках, такого же порядка, что и номинальные токи. Напряжения обмоток при этом изменяются незначительно по сравнению с номинальными величинами, за исключением закороченной фазы. Кроме того, возникает заметный поток нулевой последовательности, что может привести к дополнительному нагреву АТ. При разземлении нейтрали в рассмотренном режиме его особенности связаны с наличием или отсутствием нагрузки на стороне СН. При отсутствии нагрузки реализуется режим намагничивания АТ с малыми токами и значительным смещением нейтрали, а при ее наличии, несмотря на отсутствие тока в нейтрали, появляется поток нулевой последовательности и токи в обмотках, сравнимые с номинальными. В общем случае, токи данного повреждения (как и в предыдущем случае) значительно меньше обычных токов к.з., и недостаточны для срабатывания релейной защиты, что может потребовать принятия дополнительных мер для защиты от подобных повреждений.

Ключевые слова: Модель трансформатора, особые несимметричные режимы, автотрансформатор, трехстержневой магнитопрод, магнитный поток нулевой последовательности.

Введение. Исследованию и расчету несимметричных режимов работы силовых трансформаторов посвящено большое количество работ, начиная с классических книг Петрова Г.Н., Вольдека А.И., Васютинского С.Б. и др. авторов. Публикации, посвященные этой проблеме, включая методики расчета разнообразных режимов, в том числе и сложные комбинированные повреждения, продолжают появляться и в последние годы [1-5]. Значительно меньше публикаций, которые описывают полученные с помощью предложенных моделей конкретные результаты расчетов, или доведенные до практической реализации расчетные модели, позволяющие на основе доступных каталожных исходных заданных трансформатора провести расчет несимметричного установившегося режима для трехстержневого трансформатора, за исключением, пожалуй [6,7], где упоминается возможность использования разработанной модели также и для моделирования автотрансформатора, однако не приведено конкретных примеров расчета. В доступной авторам литературе нет какой-либо публикации, где были бы детально рассмотрены особые несимметричные режимы, заключающиеся, например, в одновременном обрыве фазы и ее коротком замыкании на землю со стороны автотрансформатора. Авторы данной статьи, на основе разработанной ими ранее модели трехстержневого трансформатора, описанной в [8], рассмотрели ряд подобных режимов, встречающихся в практике работы энергосистем.

Анализ особых режимов.

Рассмотрим с помощью упомянутой модели особенности некоторых установившихся несимметричных режимов трехстержневого силового автотрансформатора с глухозаземленной нейтралью, с последовательной и общей обмотками, соединенными в звезду с заземленной нейтралью, и третичной обмоткой, соединенной в треугольник. Будем рассматривать наиболее простой случай с отсутствием нагрузки или компенсирующих устройств на третичной обмотке (отметим, что расчет варианта с нагруженной третичной обмоткой также возможен при наличии соответствующих исходных данных). При этом, учитывая, что для нулевой последовательности она является короткозамкнутой, учтем для упрощения этот факт в параметрах нулевой последовательности для данного автотрансформатора (АТ). При расчетах используем каталожные исходные данные для силового автотрансформатора 330/150 кВ, мощностью 250 МВА для прямой последовательности ($I_0 = 0,5\%$, $U_{кВН-СН} = 10\%$, $P_{хх} = 180$ кВт, $P_{кз} = 600$ кВт). На основании этих данных по общеизвестным формулам (см. например [9], стр. 192-193) можно рассчитать действующие номинальные фазные напряжения последовательной ($U_{нпосл.} = 180/\sqrt{3} \approx 104$ кВ) и общей обмоток ($U_{нобщ} = 150/\sqrt{3} \approx 87$ кВ), значения номинальных токов

последовательной ($I_{\text{посл}}=437 \text{ A}$) и общей обмоток ($I_{\text{общ}}=523 \text{ A}$), необходимые при сравнительном анализе получаемых результатов (см. схему рис.1). Отметим также, что номинальные значения фазных напряжений на выводах АТ составляют: ВН- $330/\sqrt{3}\approx 190 \text{ кВ}$, СН- $150/\sqrt{3}\approx 87 \text{ кВ}$.

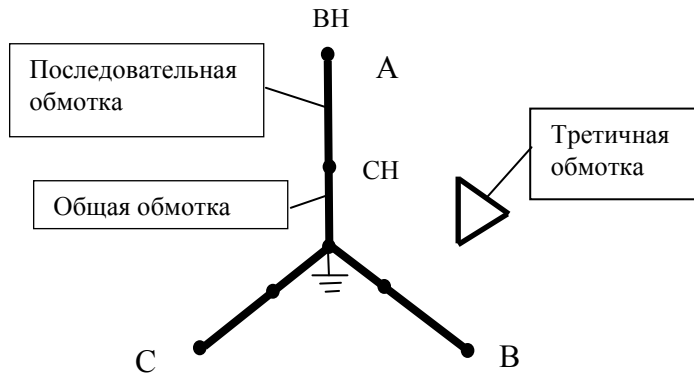


Рис.1. Условная схема соединения обмоток фаз АТ

Кроме того, для построения модели данного автотрансформатора необходимо задать параметры для нулевой последовательности, аналогичные используемым для прямой последовательности, такие как P_{0xx} и I_{0xx} [8]. Ввиду отсутствия опубликованных каталожных данных для нулевой последовательности для рассматриваемого АТ (в некоторых случаях они могут быть получены по запросу непосредственно у производителя автотрансформатора), примем в первом приближении их соответствующими 100% значению тока холостого хода для нулевой последовательности (см. например, [10]). В дальнейшем, при необходимости, или при получении уточненных данных, несложно пересчитать рассмотренные режимы и уточнить полученные результаты. Для большей наглядности результаты расчетов будем приводить не только в виде таблиц с числами, а также в виде векторных диаграмм (ВД), дающих наглядное представление об особенностях рассматриваемых режимов, а численные значения – будем приводить по мере необходимости. В качестве базы для сравнения и анализа получаемых результатов расчетов несимметричных режимов используем как исходный симметричный режим работы АТ в схеме рис.2, близкий к режиму номинальной нагрузки. Полученные на расчетной модели результаты для данного режима приведены в табл. 1

Таблица 1. Токи и напряжения обмоток в симметричном режиме нагрузки.

Обозначения обмоток		Токи обмоток, А		Напряжения обмоток, В	
		модуль	Угол, град.	модуль	Угол, град.
Последовательная обмотка	А	403.4	-4.212	1.067e+005	-1.086
	В	403.9	-124.2	1.068e+005	-121
	С	404	115.8	1.068e+005	118.9
Общая обмотка	А	483.2	176.4	8.866e+004	-3.9
	В	483.9	56.42	8.878e+004	-123.8
	С	484	-63.68	8.88e+004	116.1

Обмотки, расположенные на одном стержне и относящиеся к одной из фаз последовательной или общей обмотки обозначены, соответственно, буквами А, В, С. Как видно из приведенных значений токов и напряжений, режим симметричен с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Рассмотрим сначала один из несимметричных режимов, возникновение которого в одной из энергосистем, послужило толчком для написания настоящей статьи, а именно, обрыв одной из фаз питающего напряжения со стороны шин высшего напряжения (ВН) подстанции и замыкание ее на землю со стороны АТ. При этом выключатель со стороны шин СН разомкнут (см. рис.2).

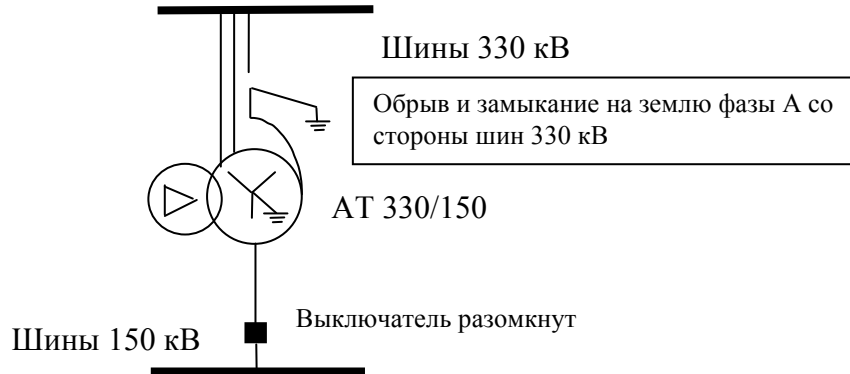


Рис.2. Однолинейная схема включения АТ между шинами 330 и 150 кВ подстанции

В известной авторам литературе отсутствует рассмотрение подобных режимов для случая трехфазного трехстержневого АТ, в котором обмотки, расположенные на разных стержнях имеют существенную электромагнитную связь. Результаты проведенных расчетов упомянутого режима приведены в таб.2 и на рис. 3-4. На рис.3 показана векторная диаграмма напряжений последовательной и общей обмоток в режиме обрыва фазы А и ее замыкания на землю со стороны АТ. (в расчете принято металлическое замыкание на землю, хотя в используемой модели не представляет принципиальной трудности учет реального сопротивления в месте замыкания). Токи на стороне СН равны нулю при разомкнутом выключателе со стороны шин 150 кВ (на рис.2 зачернен). В таблице 2 приведены полученные значения токов и напряжений обмоток АТ.

Таблица 2. Токи и напряжения обмоток при обрыве фазы А и ее замыкании на землю со стороны АТ (нагрузка на стороне СН отключена).

Обозначения обмоток		Токи обмоток, А		Напряжения обмоток, В	
		модуль	Угол, град.	модуль	Угол, град.
Последовательная обмотка	А	370.2	90.79	181.3	179.6
	В	370.6	91.13	1.044e+005	-117
	С	371.8	90.54	1.039e+005	117.2
Общая обмотка	А	370.2	90.79	181.3	-0.8344
	В	371.3	91.07	8.682e+004	-116.9
	С	371	90.48	8.646e+004	117

Напряжения обмоток короткозамкнутой фазы А малы (порядка 180 В) и не видны на ВД, напряжения обмоток фаз В и С близки к их величинам в нормальном симметричном режиме нагрузки и несколько смещены по фазе от их нормального положения (см. рис.3). В фазах В и С со стороны шин 330 кВ текут практически одинаковые по модулю и фазе токи в 370А, а в закороченных обмотках фазы А текут такие же токи. В нейтрали течет значительный ток, равный 1112 А. В данном режиме возникает большой поток нулевой последовательности, замыкающийся вне магнитопровода. На рис.4 показана соответствующая ВД относительных значений

магнитных потоков в стержнях фаз В и С, а также суммарного потока нулевой последовательности, замыкающегося вне магнитопровода (утолщенная линия). Таким образом, рассмотренный режим характеризуется возникновением токов замыкания, близких по величине к нагрузочным токам в «здоровых» обмотках, появлением значительного тока в нейтрали и потока нулевой последовательности, замыкающегося вне магнитопровода.

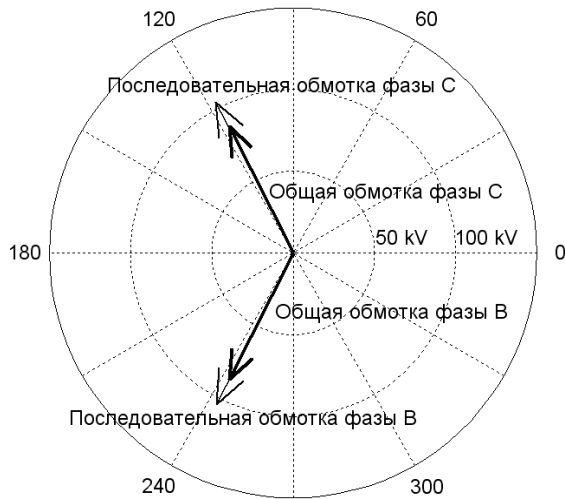


Рис. 3. ВД напряжений обмоток при к.з. фазы А на землю

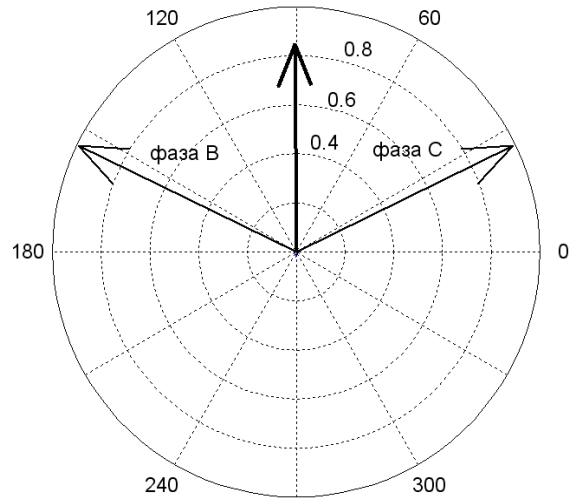


Рис.4. ВД относительных значений магнитных потоков в стержнях и суммарного потока в воздухе

Рассмотрим далее особенности этого же режима при наличии симметричной нагрузки близкой к номинальной на стороне СН. В таблице 3 приведены полученные значения токов и напряжений обмоток, а на рис. 5-7 - построенные по полученным данным ВД. Напряжения обмоток, как следует из сравнения данных таблиц 2,3 и ВД рис.3,5 несколько падают по модулю вследствие влияния токов нагрузки, и, кроме того, незначительно сдвигаются по фазе друг относительно друга. На рис.6 приведена построенная по данным таб. 3 ВД токов обмоток, которые значительно изменяются по фазе и величине при появлении нагрузки. Токи в закороченных на землю последовательной и общей обмотках фазе А, как и следовало ожидать, одинаковы и практически не изменились при появлении нагрузки. Однако заметно изменились величины токов в обмотках фаз В и С, которые увеличились приблизительно в 2 раза в фазе С последовательной обмотки и уменьшились в той же фазе общей обмотки и, наоборот, увеличились в общей обмотке фазы В и, соответственно, уменьшились в последовательной обмотке той же фазы. Таким образом, в некоторых обмотках токи в данном режиме могут значительно превышать номинальные. На рис.7 приведена ВД магнитных потоков для данного случая, которая практически мало отличается от предыдущего варианта. Отсюда следует, что токи нагрузки не оказывают существенного влияния на прохождение потока нулевой последовательности, однако приводят к увеличению приблизительно в 2 раза сверх номинальных значений токов в некоторых обмотках АТ.

Таблица 3. Токи и напряжения обмоток при обрыве фазы А и ее к.з. на землю со стороны АТ и наличии симметричной нагрузки.

Обозначения обмоток		Токи обмоток, А		Напряжения обмоток, В	
		модуль	Угол, град.	модуль	Угол, град.
Последовательная обмотка	А	368	87.45	180.3	174.9
	В	189.6	169.9	1.036e+005	-118.2
	С	743.7	100.5	1.043e+005	115.9
Общая обмотка	А	368.1	87.73	180	-5.615
	В	811.7	71.78	8.594e+004	-120.8
	С	211.5	-18.16	8.652e+004	112.9

Как следует также из полученных данных, напряжение на закороченной обмотке фазы А остается равным 180 В, а ток в нейтрали увеличивается до значения 1170 А.

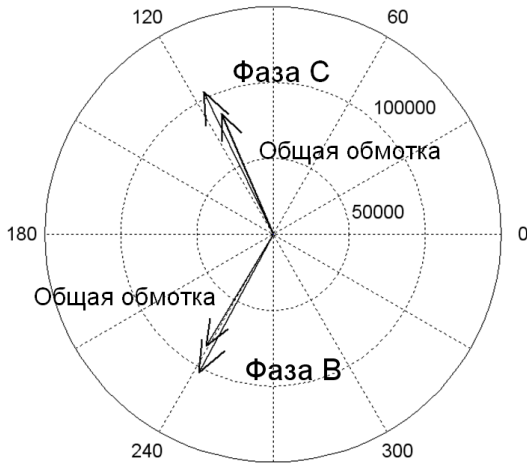


Рис. 5. Напряжения на обмотках при обрыве питания и замыкании фазы А (нагрузка подключена)

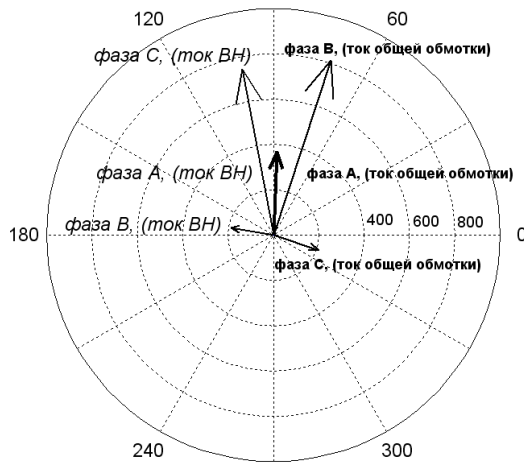


Рис.6. Распределение токов по обмоткам АТ при обрыве питания и замыкании фазы А (нагрузка подключена)

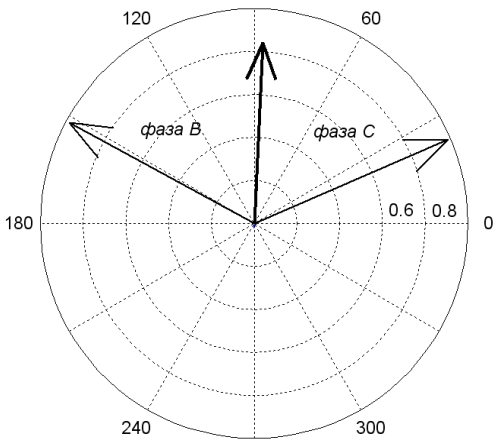


Рис. 7. Относительные значения магнитных потоков при наличии нагрузки

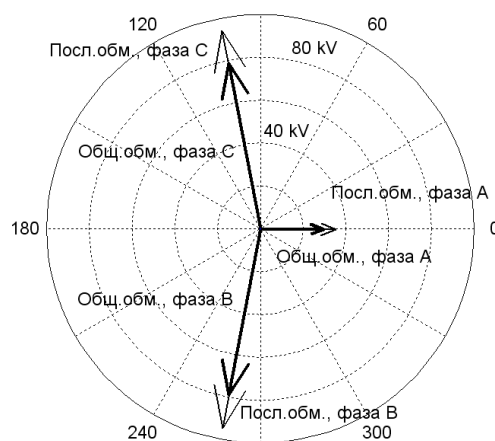


Рис. 8. Напряжения на обмотках АТ при обрыве фазы А, ее замыкании на землю со стороны АТ и разземлении нейтрали (нагрузка на стороне СН отсутствует)

Таким образом, обрыв фазы питающего напряжения со стороны ВН и ее замыкание на землю не приводит к возникновению в обмотках АТ сверхтоков такого порядка, как токи обычных к.з. Эти токи при отсутствии нагрузки на стороне СН даже меньше номинальных, а при наличии симметричной нагрузки, в некоторых фазах превышают номинальные в 1,5-1,7 раза. При этом также наблюдаются значительные токи в

нейтральном проводе, превышающие 1000 А, что необходимо учитывать при выборе сечения заземляющего проводника.

Если по какой-либо причине соединение с заземляющим устройством нарушается, режим кардинально изменится. Рассмотрим более подробно режимы, аналогичные предыдущим, однако сопровождающиеся разземлением нейтрали АТ. В таблицах 4,5 приведены результаты расчета токов и напряжений обмоток для двух упомянутых режимов, а на рис. 6-9 приведены соответствующие ВД. Из данных табл. 4 следует, что в рассматриваемом режиме (при разземленной нейтрали и отсутствии нагрузки) АТ переходит в режим намагничивания, по обмоткам протекают только небольшие намагничивающие токи.

Таблица 4. Токи и напряжения обмоток в режиме обрыва фазы А и ее замыкания на землю со стороны АТ (нагрузка на стороне СН отсутствует) и разземлении нейтрали АТ.

Обозначения обмоток		Токи обмоток, А		Напряжения обмоток, В	
		модуль	Угол, град.	модуль	Угол, град.
Последовательная обмотка	А	3.312	-167.7	3.554e+004	-0.5061
	В	5.503	-177.6	9.465e+004	-100.8
	С	1.975	148.8	9.414e+004	100.9
Общая обмотка	А	2.966	-166.1	2.961e+004	-0.4973
	В	4.73	173.5	7.886e+004	-100.8
	С	0.9237	164.5	7.846e+004	100.9

Как видно из ВД напряжений обмоток, исходящих из точки нейтрали, показанной на рис.8., система напряжений обмоток искажена, а модули в «здоровых» фазах несколько ниже номинального напряжения, в закороченной фазе А напряжения обмоток более чем вдвое ниже номинальных значений. В данном режиме имеет место существенное увеличение потенциала нейтрали относительно земли, равное 65 кВ. Вследствие этого, несмотря на одинаковые фазовые углы напряжений самих обмоток, происходит фазовое смещение векторов напряжений на выводах ВН и СН автотрансформатора относительно земли, наглядно представленное на рис. 9.

Таблица 5. Токи и напряжения обмоток в режиме обрыва фазы А и ее замыкания на землю со стороны АТ (имеется нагрузка на стороне СН) и разземлении нейтрали АТ.

Обозначения обмоток		Токи обмоток, А		Напряжения обмоток, В	
		модуль	Угол, град.	модул ь	Угол, град.
Последовательная обмотка	А	417.8	137.2	3.051e+004	-57.43
	В	510.7	-176.6	1.162e+005	-106.4
	С	810.8	124.5	7.914e+004	111.8
Общая обмотка	А	144.9	169.4	2.541e+004	-53.53
	В	416.6	76.5	9.429e+004	-108
	С	434.1	-84.03	6.658e+004	106.5

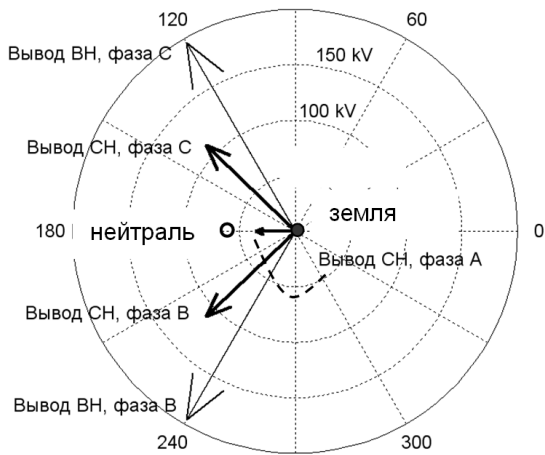


Рис.9. Напряжения на выводах ВН и НН АТ в режиме обрыва фазы А и ее к.з. на землю со стороны АТ при разземленной нейтрали (нагрузка отсутствует)

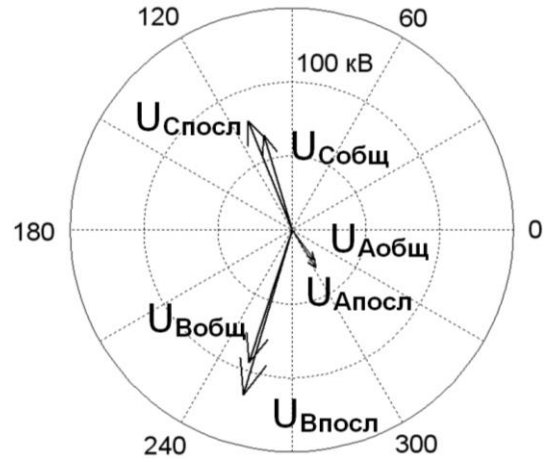


Рис. 10. Напряжения на обмотках АТ при обрыве фазы А, ее замыкании на землю со стороны АТ и разземлении нейтрали (есть нагрузка на стороне СН)

Там же показано положение нейтральной точки соединения обмоток. Таким образом, разземление нейтрали, как и следовало ожидать, приводит к значительному повышению ее потенциала относительно земли. Поток нулевой последовательности в этом режиме не возникает. Рассмотрим далее этот же режим при подключенной нагрузке на стороне СН. В таблице 5. представлены значения токов и напряжений обмоток для этого режима, сразу видно, что подключение нагрузки существенно его изменяет. Для анализа этого режима построены ВД на рис. 10- 14. Из сравнения рис. 8 и 10 видно, что подключенная нагрузка заметно изменяет картину напряжений на обмотках АТ, однако величины напряжений остаются приблизительно такими же. На рис. 11 приведена ВД токов в фазах последовательной (обозначены соответственно А_п, В_п и С_п) и общей обмоток АТ (обозначения приняты соответственно А_о, В_о, С_о). Видно, что системы токов последовательной и общей обмоток существенно несимметричны, причем заметно больше несимметрия на стороне ВН, а один из токов (С_п- ток последовательной обмотки фазы С) заметно превышает номинальное значение.

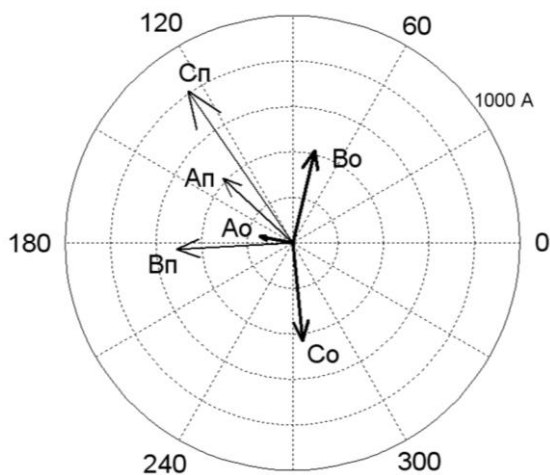


Рис.11. ВД токов в фазах последовательной (А_п, В_п и С_п) и общей (А_о, В_о, С_о) обмоток АТ

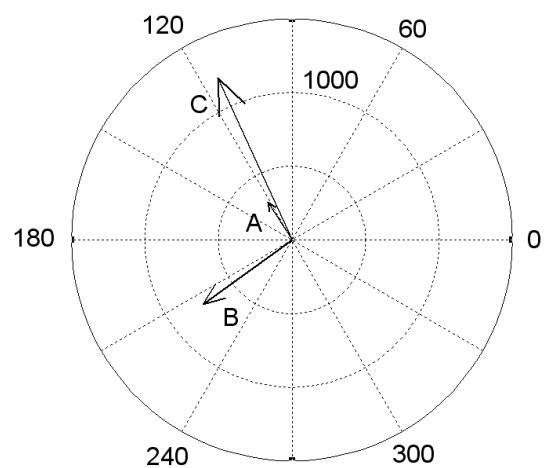
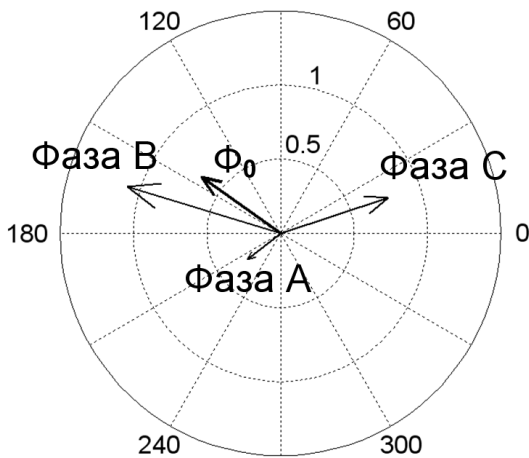


Рис. 12. ВД токов в фазах нагрузки (А, В и С) на стороне СН АТ общей (А_о, В_о, С_о) обмоток АТ

На рис. 12 приведена ВД токов в фазах нагрузки, которые также существенно несимметричны, и соответствуют токам обмоток на рис.11, т.е. ток нагрузки какой-либо из фаз равен геометрической разности векторов токов последовательной и общей обмоток соответствующей фазы. На рис. 13 приведена ВД магнитных потоков для



данного режима. Видно, что, несмотря на разземленную нейтраль и отсутствие тока в нейтральном проводе, поток нулевой последовательности, замыкающийся вне магнитопровода и равный геометрической сумме векторов потоков во всех трех стержнях, имеет заметную величину и равен Φ_0 .

Рис.13. Относительные значения магнитного потока в стержнях и суммарный поток в воздухе Φ_0

ВЫВОДЫ.

1. Рассчитаны модули и углы векторов токов и напряжений в обмотках трехфазного трехстержневого автотрансформатора в одном из особых несимметричных режимов, при обрыве одной из фаз питающего напряжения и ее одновременном коротком замыкании на землю со стороны АТ с учетом электромагнитной связи обмоток разных стержней, по этим данным построены векторные диаграммы, дающие наглядное представление об особенностях таких режимов.
2. Рассмотренный особый режим с разрывом фазы питающего напряжения и ее одновременным замыканием на землю со стороны АТ при заземленной нейтрали характеризуется возникновением значительных токов во всех обмотках, такого же порядка, что и номинальные токи. Напряжения обмоток при этом изменяются незначительно по сравнению с номинальными величинами, за исключением закороченной фазы. Кроме того, возникает заметный поток нулевой последовательности, что может привести к дополнительному нагреву АТ.
3. При разземлении нейтрали в рассмотренном режиме его особенности связаны с наличием или отсутствием нагрузки на стороне СН. При отсутствии нагрузки реализуется режим намагничивания АТ с малыми токами и значительным смещением нейтрали. При наличии нагрузки, несмотря на отсутствие тока в нейтрали, появляется поток нулевой последовательности и токи в обмотках, сравнимые с номинальными. В общем случае, токи данного повреждения (как и в предыдущем случае) значительно меньше обычных токов к.з., и недостаточны для срабатывания релейной защиты, что может потребовать принятия дополнительных мер для защиты от подобных повреждений.

Литература.

- [1] Evdokunin G.A., Dmitriev M.V. Transformatory v electricheSCOI seti. Modelirovanie perehodnyh processov s uchetom konfiguratsii magnitnoi sistemy. "Novosti electrotehniki" Nr.5 (53) 2008 г. (in Russian)

- [2] V.P. Zakariukin, A.V. Kriukov. Slojnonesimetrichnyi rejimy electriceskikh sistem. Izd. Irkutskogo gosudarstvenogo universiteta, 2005 г. – 274 с. (s.45 – Modeli transformatora). (in Russian)
- [3] Gusev A.S., Svechkarev S.V., Plodisty I.L. Universalinaia matematichescaia modeli trehfaznyh transformatorov i avto- transformatorov // Izvestia Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta. – 2007. – Т. 311. – Nr. 4. – s. 77–81. (in Russian)
- [4] Martynov V.A. Nesimetrichnye rejimy raboty silovyh transformatorov so shemoi soedinenia obmotok Y/Y0. “Vestnik IGEU» Vyp. 2, 2009 г, с. 1-5. (in Russian)
- [5] Pustovetov M.Iu. Matematichescaia modeli trehfaznogo transformatora, Izvestia Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta. 2012. Т. 321. № 4. (in Russian)
- [6] Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings). 2012. URL:<http://www.mathworks.com/help/toolbox/phymod/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypetwowindings.html> (accessed: 06.04.2012).
- [7] URL: <http://www.mathworks.com/help/phymod/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypethreewindings.html> (accessed: 20.09.2013).
- [8] Boshneaga V.A., Suslov V.M. Modelirovanie trehfaznyh transformatornyh ustroystv s trehsterjnevym magnitoprovodom dlea ingenernyh raschetov nesimmetrichnyh rejimov pri razlichnyh shemah soedinenia obmotok. Problemy regionalnoi energhetiki, Nr.2(22), Kishinev, Academya Nauk Moldovy, Institut energhetiki, 2013 г. (in Russian)
- [9] Electrotehnicheskii spravochnik: v 3-h tomah, T.2. M, Energoatomizdat, 1986, 712 ss. 192-193. (in Russian)
- [10] ABB_11_E_03_druck.pdf, pp. 88. http://www.dii.unipd.it/~gobbo/didattica/corsi/Componenti_tecnologie_elettrici/ABB_swithgear_manual_E11/ (accessed 04.04.2014) (in Russian)

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.