

## **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**

**Bosneaga V.A., Suslov V.M.**

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

**Abstract.** The model for power three-phase three limbs phase-shifting transformer with “inverse double zig-zag connection” was investigated. Calculations and research of steady state asymmetric modes of transformer with such windings connection were fulfilled, taking into account the electromagnetic coupling of the windings, located on different legs. The analysis was made for the most specific steady state asymmetric modes, that occur during different short circuits and asymmetric no load regimes, associated with the appearance of zero sequence magnetic flux. Vector diagrams for windings currents and voltages were constructed, as well as for the relative values of magnetic fluxes in legs, which in ensemble give a clear idea about their particularities.

**Keywords:** model of power three legs transformer, asymmetric modes, zero-sequence magnetic flux.

### **Investigarea regimurilor nesimetrice a transformatorului de reglare a decalajului de fază cu trei coloane cu schemă de conexiune "zig-zag dublu invers" cu comutarea la punctul neutru**

**Boşneaga V.A., Suslov V.M.**

Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe,  
Chişinău, Republica Moldova

**Rezumat.** Este realizat modelul transformatorului trifazat de putere pentru reglarea fazei cu schema de conexiune în "zig-zag dublu invers" cu miez din trei coloane. Au fost efectuate calcule şi studiate particularităţile regimurilor permanente nesimetrice ale transformatorului cu această schemă de conexiune, ţinând cont de interacţiunea electromagnetică mutuală dintre înfăşurările amplasate pe diferite coloane a miezului de fier. S-au cercetat regimurile nesimetrice permanente, care apar în diverse regimuri de scurtcircuit şi de regimuri dezechilibrate ale transformatorului. Calculile şi analizele au fost efectuate în baza transformatorului de distribuţie şi includ cele mai tipice regimurile asimetrice, care apar la modurile asimetrice. Pentru regimurile examinate s-au construit diagrame fazorilor curenţilor şi tensiunilor înfăşurărilor, precum şi a valorilor fluxului magnetic în coloanele miezului transformatorului în sistemul de unităţi relative. Rezultatele obţinute permit o prezentare la general a particularităţilor funcţionării transformatorului examinat în regimuri nesimetrice.

**Cuvinte cheie:** modelul transformatorului trifazat, reglarea fazei, regim nesimetric, coloana miezului, conexiunea în "zig-zag dublu invers", flux magnetic, secvenţa homopolară.

### **Исследование несимметричных режимов трехстержневого фазоповоротного трансформатора по схеме «двойной обратный зигзаг» с переключением в нейтрале**

**Бошняга В.А., Суслов В.М.**

Институт энергетики Академии наук Молдовы  
Кишинев, Республика Молдова

**Аннотация.** Реализована расчетная модель силового трехфазного фазоповоротного трансформатора (ФПТ) для схемы соединения обмоток «двойной обратный зигзаг» с трехстержневой конструкцией магнитопровода, с целью расчета модулей и углов векторов токов и напряжений в обмотках трехстержневого ФПТ при любых несимметричных режимах. Предложенная модель позволяет исследовать все многообразие несимметричных режимов устройства на основе единого подхода. В результате исследования наиболее характерных установившихся несимметричных режимов, возникающих при различных коротких замыканиях и неполнофазных режимах, выявлены режимы, сопровождающиеся появлением магнитного потока нулевой последовательности, и построены векторные диаграммы токов и напряжений обмоток, относительных значений магнитного потока в стержнях.

**Ключевые слова:** модель, фазоповоротный трансформатора, несимметричные режимы, трехстержневой магнитопровод, схема двойного зигзага, магнитный поток нулевой последовательности.

## Введение.

Исследованию и расчету несимметричных режимов работы силовых фазоворотных трансформаторов, построенных на основе трехфазной группы, состоящей из однофазных единиц, посвящены, в частности, работы [1-6] и др. (перечень не является исчерпывающим). В [3-7] для расчетов была использована матрица узловых проводимостей рассмотренных устройств, построенная на основе парных сопротивлений к.з. обмоток. В [7] описана разработанная впоследствии на основе данного подхода программа для расчета несимметричных режимов участка электрической сети, содержащей как обычные автотрансформаторы с вольтодобавочными трансформаторами для продольного и поперечного регулирования напряжения, так и фазоворотные трансформаторы, построенные на основе трехфазных групп однофазных трансформаторов. Данная работа является фактически продолжением упомянутых работ. В ней сделана попытка распространить исследования несимметричных режимов такого рода устройств на схемы, содержащие также трехстержневые трансформаторы (в которых имеется существенная электромагнитная связь между обмотками, расположенными на различных стержнях) с использованием предложенной авторами модели трехфазного трехстержневого трансформатора, описанной в [8]. Это решение обладает большими возможностями по сравнению с [9], где предложена модель для фазоворотного трансформатора со схемой одинарного обратного зигзага на базе группы однофазных трансформаторов. Более близким к предлагаемому здесь решению является модель [10], где используется трехстержневая структура магнитопровода, однако эта модель не позволяет непосредственно реализовать какие-либо другие, более сложные схемы соединения обмоток, кроме тех, которые предусмотрены в ней изначально.

## ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ И ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим на основе упомянутой методики [8] особенности характерных установившихся несимметричных режимов трехстержневого силового фазоворотного трансформатора со схемой соединения обмоток

в «двойной зигзаг» [6] при наличии заземленной нейтрали, где и осуществляется переключение отводов регулировочных обмоток (см. рис.1).

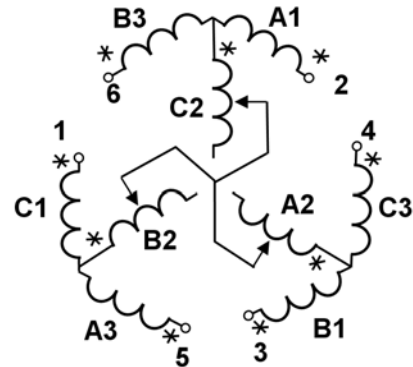


Рис. 1. Схема соединения обмоток рассматриваемого трехстержневого трансформатора.

Обмотки фаз, расположенные на каждом из трех стержней, обозначены буквами А, В, С с номерами 1, 2, 3, в соответствии с рис.1. Система питающего трехфазного напряжения приложена к началам обмоток А1, В1, С1, а нагрузка подключена к зажимам А3, В3, С3. Рассмотрение проведем на примере конкретного трансформатора класса напряжения 10 кВ на основе его параметров для прямой и нулевой последовательностей, предоставленных Минским трансформаторным заводом (<http://metz.by/>). Следует отметить, что как показали проведенные расчеты, качественные закономерности, присущие различным несимметричным режимам в основном определяются соотношениями параметров трансформатора прямой и нулевой последовательностей и схемой соединения обмоток. Поэтому они могут быть исследованы с помощью выбранного конкретного трансформатора класса напряжения 10 кВ. При необходимости аналогичные расчеты могут быть проведены и для реальных устройств более высоких классов напряжения при наличии значений их параметров. Применительно к трансформатору типа ТМГ мощностью 100 кВА, напряжением 10/0,4 кВ имеем следующие параметры:  $I_0 = 2,6 \%$ ,  $U_{кз} = 4,7 \%$ ,  $R_{хх} = 270$  Вт,  $R_{кз} = 2270$  Вт. Кроме того, для данного трансформатора изготовителем по запросу предоставлено измеренное сопротивление нулевой последовательности со стороны обмотки ВН (для схемы Y/y0):  $Z_0 = 1,3$  Ом и величина потерь в режиме холостого хода для нулевой последовательности  $P_{0xx} = 2000$  Вт.

Сохраним эти параметры для нашего случая фазоворотного трансформатора, считая рабочие обмотки первичными, а регулировочные – вторичными. При переключении числа включенных витков регулировочных обмоток обеспечивается регулирование фазового сдвига между точками приложения трехфазной питающей системы напряжений 1, 2, 3 и точками подключения нагрузки 4,5,6. Соотношение чисел витков рабочих обмоток (вектора A1, B1, C1 и A3, B3, C3) и соединенных в звезду с заземленной нейтралью регулировочных обмоток (вектора A2, B2, C2), выберем равным соответственно 2:1:2. На рис. 2 показаны векторные диаграммы (ВД) исходного симметричного режима при выбранных соотношениях чисел витков.

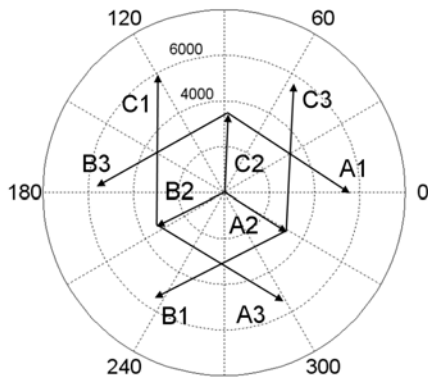


Рис.2. Векторная диаграмма напряжений обмоток для исходного симметричного режима.

При полностью включенной регулировочной обмотке, угол фазового сдвига между напряжениями обмоток A1 и A3

составит в соответствии с векторной диаграммой рис.2 -  $60^\circ$ , а номинальные напряжения рабочих и регулировочной обмоток при линейном напряжении, равном 10 кВ, соответственно, будут равны 6700 В и 3350 В. При полностью выведенной из работы регулировочной обмотке A2, B2, C2, как легко видеть из ВД рис.2, угол между теми же системами напряжений будет равен  $0^\circ$ . Этот режим практически совпадает с режимом работы трансформатора со схемой соединения обмоток Y/y0, рассмотренный, например, в [8], поэтому рассмотрим более подробно другой упомянутый крайний режим, обеспечивающий фазовый сдвиг в  $60^\circ$  при полностью включенной регулировочной обмотке.

На основании принятых исходных данных в соответствии с методикой [8] была построена модель устройства с упомянутой схемой соединения обмоток и исследованы особенности его несимметричных режимов. На рис. 3 приведена схема основного блока модели, содержащая блок "transformator", включающий 12 начал обмоток фаз A, B, C («In 1A, In2A, In3A» и аналогично для остальных фаз) и 12 расположенных напротив концов обмоток, составляющих схему «двойного зигзага», собранную с помощью соединительных линий со стрелками на концах. К блокам 1,2,3 (слева внизу на рис.3) подключена трехфазная система питающего напряжения, которая в рассматриваемом примере является симметричной, однако может быть задана любой. К блокам Out1, Out2, Out 3 (на рис.3 в середине внизу) подключается нагрузка.

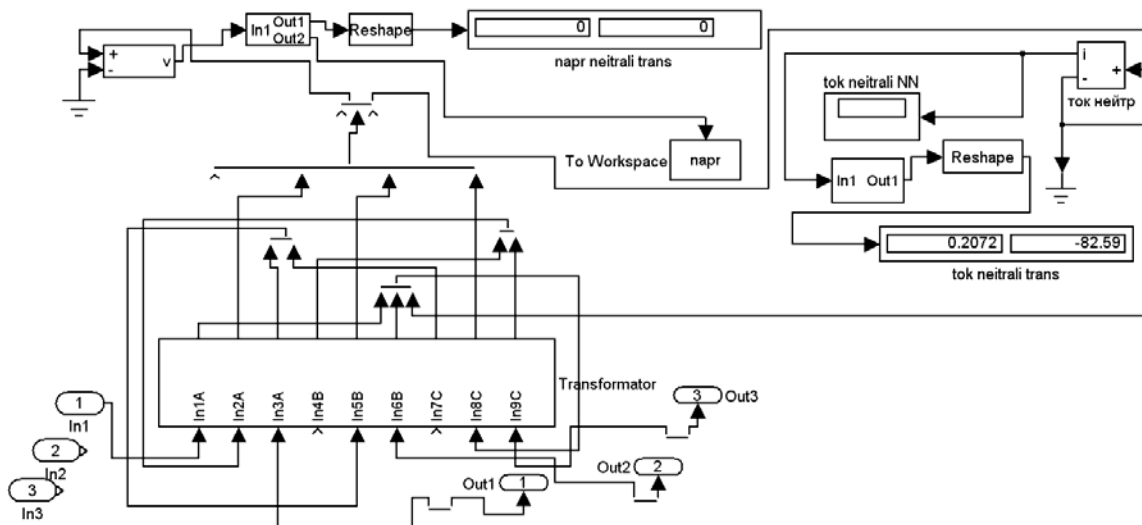


Рис. 3. Блок-схема модели фазоворотного трансформатора с соединением обмоток в «двойной обратный зигзаг».

Для сравнения и контроля величин токов и напряжений в несимметричных режимах в качестве ориентира целесообразно использовать результаты предварительного расчета токов и напряжений обмоток для исходного симметричного режима номинальной нагрузки (таблица 1, рис.2). Для большей наглядности результаты расчетов будем приводить не только в виде таблиц с числами, а и в виде векторных диаграмм (ВД). Модули и фазы напряжений на рис.2 соответствуют выбранным номинальным данным с учетом влияния нагрузки. Как следует из рис.2 и данных таблицы 1, системы трехфазных напряжений и токов в данном режиме практически симметричны.

Рассмотрим далее режим однофазного короткого замыкания (ОКЗ) одной из фаз нагрузки на землю при изолированной нейтрали схемы рис.1. Рассчитанные на модели значения токов и напряжений обмоток для данного режима работы фазоповоротного трансформатора приведены в таблице 2. Видно, что токи практически во всех обмотках увеличились при ОКЗ в несколько раз, и система токов стала существенно несимметричной, кроме того, как показали результаты расчетов, появилось заметное (696 В) смещение нейтрали, сопровождающееся током в ней, равным 69 А. Для получения наглядной картины искажения системы напряжений на рис. 4 построена ВД напряжений

ТАБЛИЦА 1. - ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ ОБМОТОК ДЛЯ ИСХОДНОГО СИММЕТРИЧНОГО РЕЖИМА

Обозначения обмоток		Токи обмоток, А		Напряжения обмоток, В	
		Модуль, А	Угол, град.	Модуль, кВ	Угол, град.
Рабочая обмотка	A1	5.537	-5.943	6509	-30.74
	B1	5.544	-125.9	6508	-150.6
	C1	5.545	114	6519	89.32
Регулировочная обмотка	A2	11.07	-125.1	3327	-32.93
	B2	11.07	114.8	3326	-152.8
	C2	11.05	-5.205	3332	87.13
Рабочая обмотка	A3	5.524	115.5	6365	-33.01
	B3	5.515	-4.464	6363	-152.9
	C3	5.522	-124.4	6374	87.06

обмоток при однофазном к.з. фазы нагрузки. На рис.4 отображено как смещение нейтральной точки соединения регулировочных обмоток по отношению к началу координат, так и то, что потенциал конца вектора В3 (ввиду того, что начало соответствующей

обмотки замкнуто на землю) близок к нулю. Вектора напряжений обмоток фаз В и С, непосредственно участвующих в данном повреждении, претерпевают наибольшие изменения модулей и фазовых углов.

ТАБЛИЦА 2. - ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ ОБМОТОК ДЛЯ РЕЖИМА ОДНОФАЗНОГО К.З. ПРИ ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛИ

Обозначения обмоток		Токи обмоток, А		Напряжения обмоток, В	
		Модуль, А	Угол, град.	Модуль, кВ	Угол, град.
Рабочая обмотка	A1	25.22	-58.57	5304	-37.51
	B1	42.96	118.5	5964	-146.8
	C1	51.18	112.4	6742	101.1
Регулировочная обмотка	A2	40.29	124.8	2213	-50
	B2	56.36	112.1	2764	-145.3
	C2	96.08	-62.59	3379	75.45
Рабочая обмотка	A3	5.187	109.3	4647	-44.9
	B3	70.95	-64.02	3575	-115.6
	C3	5.255	-117.8	6391	86.97

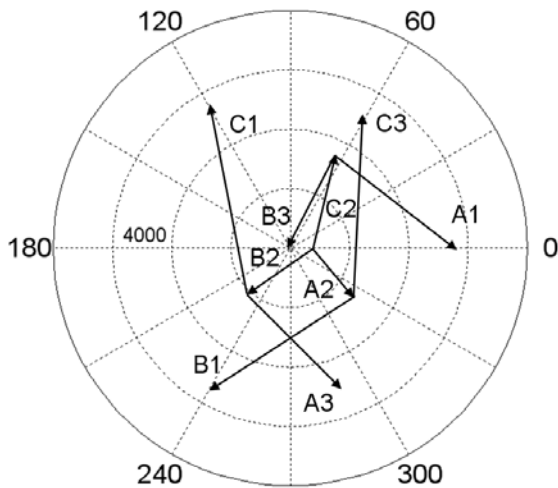


Рис. 4. ВД напряжений обмоток при однофазном к.з. фазы нагрузки и изолированной нейтрали трансформатора.

На рис.5 приведена ВД токов источника питания, которая существенно искажена и неуравновешенна. К земле источника возвращается, как уже было указано, ток из нейтрали нагрузки. В изолированной от земли нейтрали трансформатора тока, очевидно, нет. При этом, как показали проведенные расчеты, магнитные потоки стержней образуют несимметричную, но уравновешенную трехфазную систему без потока нулевой последовательности. Далее рассмотрим режим ОКЗ при заземленной

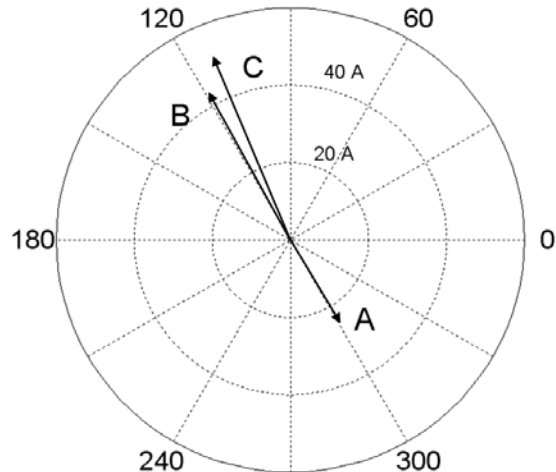


Рис.5. ВД токов от источника питания для режима ОКЗ при изолированной нейтрали трансформатора.

нейтрали трансформатора. Проведенные расчеты показали, что токи и напряжения обмоток при заземлении нейтральной точки обмоток изменяются незначительно по сравнению с предыдущим режимом (см. таблицу 3). Однако есть и существенное различие, заключающееся в появлении в этом режиме небольшого (менее 1 А) тока нулевой последовательности в нейтрали трансформатора, которому сопутствует соответствующий магнитный поток, замыкающийся вне магнитопровода (см. рис 6). Векторная

**ТАБЛИЦА 3. - ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ ОБМОТОК ДЛЯ РЕЖИМА ОДНОФАЗНОГО К.З. ПРИ ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛИ ТРАНСФОРМАТОРА**

Обозначения обмоток		Токи обмоток, А		Напряжения обмоток, В	
		Модуль, А	Угол, град.	Модуль, кВ	Угол, град.
Рабочая обмотка	A1	25.43	-58.94	5698	-34.87
	B1	42.8	118.7	5602	-144
	C1	51	112.5	6642	97.23
Регулировочная обмотка	A2	40.14	124.9	2376	-45.92
	B2	56.18	112.2	2588	-142.1
	C2	96.36	-62.71	3432	71.61
Рабочая обмотка	A3	5.181	109.3	4998	-41.36
	B3	71.01	-64.06	3427	-108.5
	C3	5.258	-117.8	6408	82.84

диаграмма напряжений обмоток аналогична представленной на рис. 4, однако смещения нейтрали в этом режиме, естественно, нет, поскольку она заземлена. Кроме того, в нейтральных источнике и нагрузки протекают практически такие же токи, как и в

предыдущем режиме. На рис. 6 приведена ВД относительных значений магнитных потоков при однофазном к.з. фазы нагрузки и заземленной нейтрали трансформатора. Трехфазная система магнитных потоков

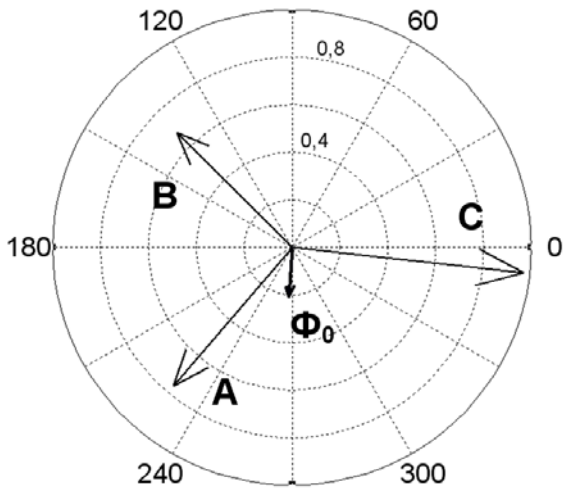


Рис. 6. ВД относительных магнитных потоков при однофазном к.з. фазы нагрузки и заземленной нейтрали трансформатора.

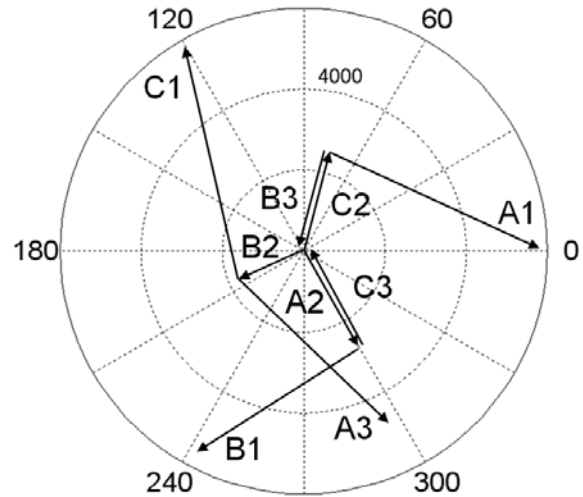


Рис. 7. ВД напряжений обмоток при двухфазном к.з. на землю со стороны нагрузки (нейтраль трансформатора заземлена).

становится неуравновешенной, появляется заметный поток нулевой последовательности  $\Phi_0$ , аналогично тому, как это происходит в обычном силовом трансформаторе.

Рассмотрим далее следующий вид повреждений – двухфазное к.з. на стороне нагрузки на землю (ДКЗ с землей), при этом нагрузка остается подключенной, и ее нейтраль, как и в предыдущих случаях, заземлена. В таблице 4 приведены значения токов и напряжений обмоток для режима двухфазного к.з. на

землю (при заземленной нейтрали трансформатора). Построенная по этим данным ВД напряжений обмоток приведена на рис. 7. Как видно из данной диаграммы, концы векторов напряжений замкнутых между собой и на землю обмоток В3 и С3 оказываются практически в начале координат. Для наглядности эти вектора напряжений изображены параллельными, чтобы не сливаться на рисунке с векторами А2, С2. Значения токов в обмотках в этом режиме, как правило, больше, чем в случае ОКЗ.

ТАБЛИЦА 4. - ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ ОБМОТОК ДЛЯ РЕЖИМА ДВУХФАЗНОГО К.З. НА ЗЕМЛЮ (ПРИ ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛИ ТРАНСФОРМАТОРА)

Обозначения обмоток		Токи обмоток, А		Напряжения обмоток, В	
		Модуль, А	Угол, град.	Модуль, кВ	Угол, град.
Рабочая обмотка	A1	58.74	-22.32	5675	-24.79
	B1	53.49	133.8	4944	-148
	C1	54.58	57.22	5860	102.9
Регулировочная обмотка	A2	111.4	161.3	2715	-61.14
	B2	57.18	61.31	1725	-155.6
	C2	115.6	-48.14	2457	75.57
Рабочая обмотка	A3	4.759	116.2	5112	-44.13
	B3	67.73	-70.33	2450	-104.4
	C3	68.54	-177.5	2718	118.7

На рис.8 приведена ВД токов источника питания. На нем видно, что система питающих токов резко несимметрична, сопровождается значительным током в нейтрали источника. Таким образом, по обмоткам А1, В1, С1 протекает ток нулевой последовательности. На рис.9 показана ВД относительных магнитных потоков в данном режиме. На нем видно,

что, также как и в случае ОКЗ, имеется поток нулевой последовательности, вызванный неуравновешенными токами обмоток. На рис.10 приведена ВД токов в обмотках устройства в данном режиме. Ввиду того, что ток обмотки А3 значительно меньше остальных токов, он на диаграмме не показан. Можно заметить, что с достаточной точностью

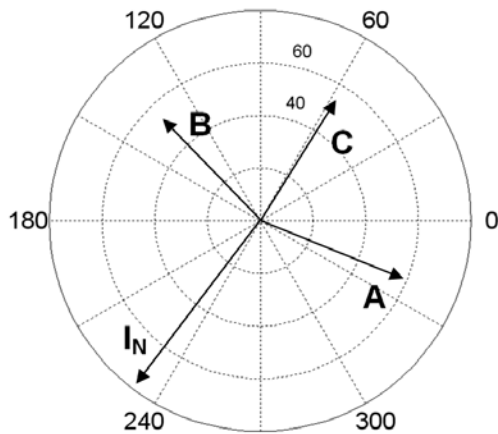


Рис. 8. ВД токов фаз и нейтрали источника питания при двухфазном к.з. с землей на стороне нагрузки.

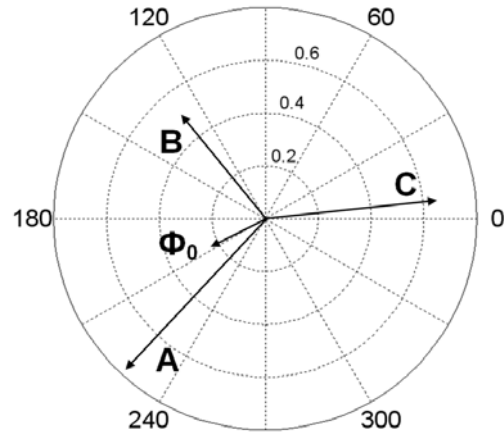


Рис. 9. ВД относительных магнитных потоков при ДКЗ фаз нагрузки с землей и заземленной нейтрали трансформатора.

соблюдается первый закон Кирхгофа для токов в узлах, где соединяются все обмотки. Например: для нейтральной точки обмоток A2, B2, C2 сумма соответствующих токов, как видно из рис.10, равна нулю. То же соотношение, с учетом направлений токов относительно начал обмоток, имеет место для токов обмоток A1, B3, C2 и A2, B1, C3 и т.д.

Далее рассмотрим аналогичное предыдущему повреждение - ДКЗ на стороне нагрузки, но без соединения с землей. Результаты расчетов токов и напряжений обмоток для данного режима приведены в таблице 5. По полученным данным также построена ВД напряжений обмоток, приведенная на рис. 11. Потенциал в точке соединения обмоток C3-B3 (вектор

**ТАБЛИЦА 5. - ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ ОБМОТОК ДЛЯ РЕЖИМА ДВУХФАЗНОГО К.З. БЕЗ ЗЕМЛИ (ПРИ ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛИ ТРАНСФОРМАТОРА)**

Обозначения обмоток		Токи обмоток, А		Напряжения обмоток, В	
		Модуль, А	Угол, град.	Модуль, кВ	Угол, град.
Рабочая обмотка	A1	57.27	-35.17	6514	-30.72
	B1	52.59	147.9	4925	-149.5
	C1	5.545	114	5987	103.1
Регулировочная обмотка	A2	105.1	147.9	2842	-61.46
	B2	11.07	114.8	1737	-151.4
	C2	114.5	-35.12	3332	87.12
Рабочая обмотка	A3	5.525	115.5	5703	-46.77
	B3	57.24	-35.08	1594	-148.4
	C3	52.5	147.9	5603	117.1

показан пунктиром), как следует из ВД, не равен нулю, что и следовало ожидать. Вектора напряжений всех обмоток, как и в предыдущих случаях, приблизительно параллельны. Отклонение от параллельного положения связано с наличием токов в обмотках. В данном режиме, как показали проведенные расчеты, отсутствует ток нулевой последовательности в обмотках трансформатора, и соответственно, поток нулевой последовательности. Это следует также из ВД на рис. 12,

где показаны относительные значения магнитных потоков фаз, геометрическая сумма векторов которых равна нулю. Кроме того, отсутствует ток в нейтрали источника питания, вследствие чего сумма векторов токов от источника питания (см. ВД рис. 13) также равна нулю. Таким образом, в режимах несимметричных повреждений с землей (ОКЗ, ДКЗ с землей), как и в обычных трансформаторах, имеются токи и магнитные потоки нулевой последовательности.

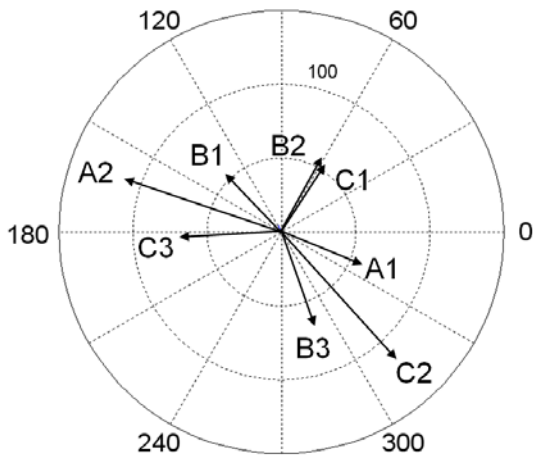


Рис. 10. ВД токов обмоток при двухфазном к.з. на землю со стороны нагрузки (нейтраль трансформатора заземлена).

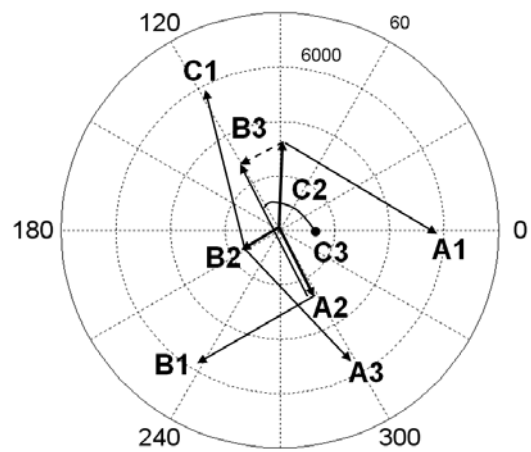


Рис. 11. ВД напряжений обмоток при двухфазном к.з. без земли со стороны нагрузки (нейтраль трансформатора заземлена).

При повреждениях без земли упомянутые токи и потоки отсутствуют. Следует отметить, что предложенная модель позволяет также выявить различное поведение фазоповоротного устройства на основе трехфазной

группы и трехстержневого трансформатора в специфических режимах, в которых сказывается наличие электромагнитной связи обмоток, расположенных на разных стержнях. Для иллюстрации этого рассмотрим, например,

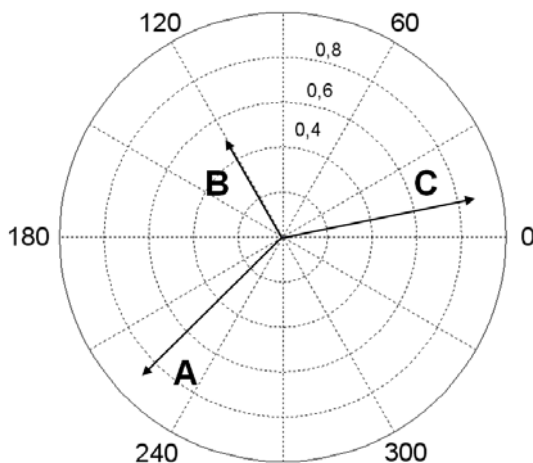


Рис. 12. ВД относительных магнитных потоков при ДКЗ фаз нагрузки без земли (нейтраль трансформатора заземлена).

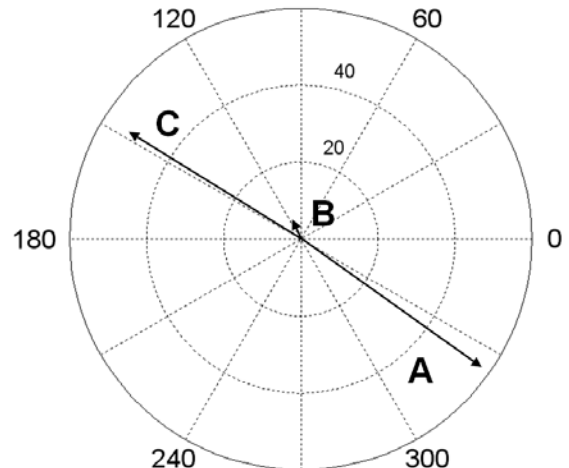


Рис. 13. ВД токов от источника питания для режима ДКЗ без земли (нейтраль трансформатора заземлена).

однофазный режим холостого хода. При этом питание фазоповоротного трансформатора производится от одной фазы А, при холостом ходе на стороне нагрузки. Напряжение одной из фаз источника питания оказывается приложенным к последовательно соединенным обмоткам фаз А1 и С2, имеющих разное число витков. На рис. 14, 15 приведены результаты, полученные для этого режима соответственно для трехфазной группы и трехстержневого трансформатора. Из ВД напряжений обмоток рис. 14 следует, что при раздельных магнитопроводах для

каждой из фаз, имеются напряжения только на обмотках фаз А и С, к которым приложено питающее напряжение, причем их величины соответствуют числам витков обмоток. Напряжения А1, А3 – одинаковы, напряжение на обмотке А2 вдвое меньше. Такое же соотношение выполняется для напряжений обмотки фазы С, а на обмотке фазы В вообще нет заметного напряжения. Кардинально другой результат получается в случае трехстержневого магнитопровода, где между обмотками разных фаз имеется электромагнитная связь (см. ВД рис.15). В этом случае напряжения на обмотках фазы С



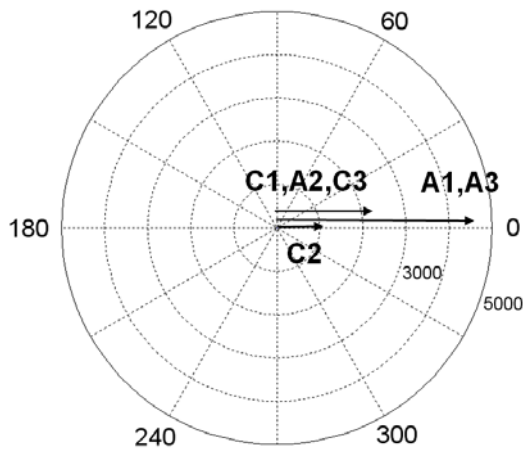


Рис. 14. ВД напряжений обмоток рассматриваемого фазоповоротного трансформатора, построенного на основе трехфазной группы однофазных трансформаторов.

практически отсутствуют (и соответственно отсутствует магнитный поток в стержне фазы С). Получается эффект, эквивалентный как бы частичному закорачиванию обмотки фазы С. На обмотках фаз А и В имеются напряжения в противофазе (ввиду замыкания магнитного потока)

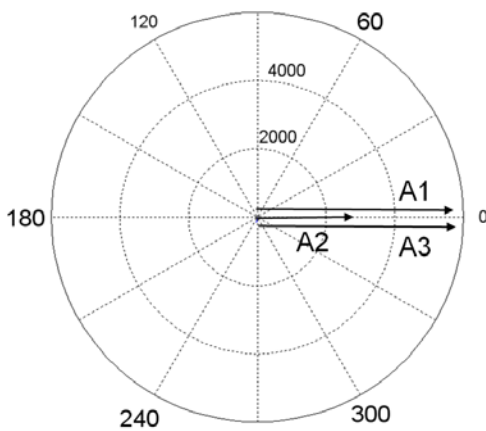


Рис. 16. ВД напряжений обмоток фазоповоротного трансформатора (обмотка С2 закорочена), на основе трехфазной группы однофазных трансформаторов.

выполненного на трехстержневом сердечнике. Рассмотрим еще один аналогичный режим холостого хода, более простой для понимания, который отличается от предыдущего тем, что дополнительно закорочена обмотка С2. При этом напряжение источника прикладывается полностью к обмотке А1. На рис. 16, 17 представлены ВД напряжений обмоток в данном режиме для трехфазной группы (рис.16) и трехстержневого

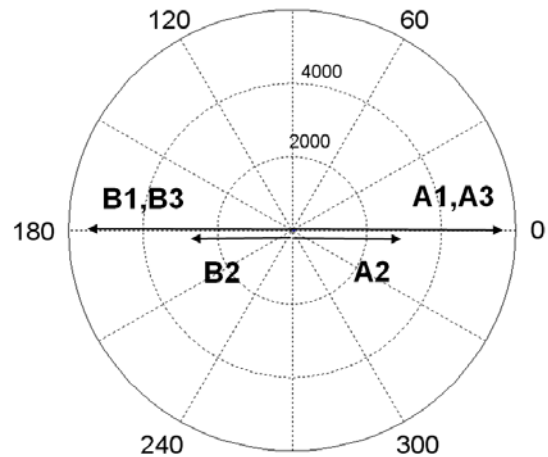


Рис. 15. ВД напряжений обмоток рассматриваемого фазоповоротного трансформатора, построенного на основе трехстержневого магнитопровода.

по стержням фаз А и В), также соответствующие их числам витков. Из приведенного примера следует, что в некоторых режимах поведение фазоповоротного трансформатора, построенного на основе трехфазной группы однофазных трансформаторов, может заметно отличаться от поведения трансформатора,

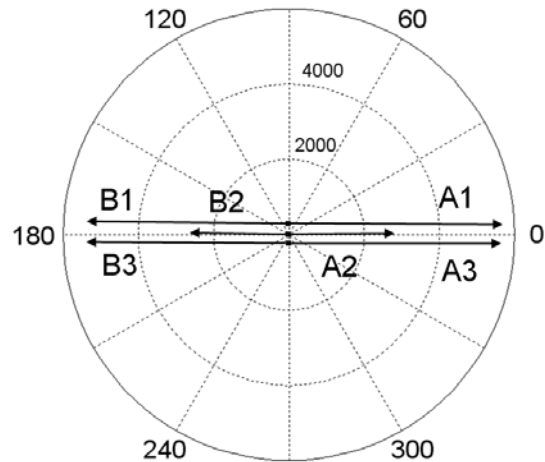


Рис. 17. ВД напряжений обмоток (обмотка С2 закорочена) фазоповоротного трансформатора, на основе трехстержневого магнитопровода.

трансформатора (рис.17, соответственно). Как и в предыдущем случае, ВД напряжений обмоток на рис.16, 17 отличаются существенно. В трехстержневом варианте (рис. 17) на обмотках фазы В появляется напряжение такой же величины, как и на фазе А, вызванное замыканием магнитного потока по стержням фаз А и В. Кроме того, из рис. 14 и 16 видно, что отличие между первым и вторым случаем состоит в том, что на рис.16 исчезло напряжение

обмотки фазы С, которая закорочена. Для трехстержневого же варианта магнитопровода ВД на рис. 15 и 17 практически совпадают. Из проведенных расчетов следует, что разница несущественна и заключается в том, что напряжение на обмотках закороченной фазы С равно нулю.

## ВЫВОДЫ

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

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

## Литература (References)

- [1] Losev S.B., Chernin A.B. [Calculation of electrical values in asymmetric modes of electrical systems]. *Vichislenie elektricheskikh velichin v nesimmetrichnih rejimakh elektricheskikh sistem*. M, Energoatomizdat, 1983, 527 pp. (In Russian)
- [2]. Karasev D.D., Karasev E.D [Calculation of electrical networks modes with software «Fazan»]. Editor Artemov A.I. . M.: *Moskovskii energeticheskii institut*, 1989.(In Russian)
- [3] Bosneaga V.A., Grimalski O.V. [Asymmetric modes of phase-shifting transformer]. *Izvestia Akademii nauk SSSR, Energetika I transport*, Nr. 2, 1989 г (In Russian)
- [4] Bosneaga V.A. [Calculation of asymmetric modes of phase-shifting transformer with zigzag windings connection]. *Electrichestvo*, Nr. 11, 1990 г.(In Russian)
- [5] Bosneaga V.A. [Calculation and investigation

Of asymmetric modes of phase-shifting transformer. *Izvestia vuzov, "Energetika"*, Nr. 11, 1991 г.(In Russian)

- [6] Bosneaga V.A., Voitovski A.V. [Investigation of asymmetrical conditions of phase-shifting transformer with windings connection in "double zigzag"]. *Collection of articles "Upravleaemie elektro-peredachi"*, issue 5., 1991 г. pp.39-47.(In Russian)
- [7] Bosneaga V.A. [Calculation and analysis of asymmetric modes of electrical grid portion with transformers]. *Electrichestkie stantsii*, 1997, Nr.3, pp. 58-63. (In Russian)
- [8] Bosneaga V.A., Suslov V.M.. [Modelling of three phase three leg transformer devices for engineering calculation of asymmetric modes at different windings connections]. *Problemi Regionalnoi Energetiki*, Nr.2(22), 2013, (<http://journal.ie.asm.md/ru/contents/elektronnyj-zhurnal-n-222-2013>). (In Russian)
- [9]<http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/zigzagphaseshiftingtransformer.html>
- [10]<http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixpethreewindings.html>

## Сведения об авторах:



Бошняга В.А. окончил Кишиневский политехнический институт в 1971 г. Защитил диссертацию на степень кандидата технических наук в Институте Электродинамики Академии наук Украины в 1988г. Ведущий научный сотрудник, область научных интересов связана с расчетами режимов электрических систем с использованием разрабатываемых моделей трансформаторных устройств.  
E-mail: [valeriu.bosneaga@gmail.com](mailto:valeriu.bosneaga@gmail.com)



Суслов В.М., окончил Кишиневский политехнический институт в 1972 г. Научный сотрудник, область научных интересов связана с электропередачами переменного тока повышенной пропускной способности, их влиянием на окружающую среду, режимами энергетических систем, переходными электромеханическими процессами, моделированием в энергетических системах.  
E-mail: [svictorm46@gmail.com](mailto:svictorm46@gmail.com)