

Investigation of Steady State Two-Phase Short Circuit Modes Of Phase-Shifting Autotransformer with Hexagon Scheme and with Adjusting Autotransformer

Bosneaga V., Suslov V.

Institute of Power Engineering
Kishinau, Republic of Moldova

Abstract. The purpose of work is to investigate two - phase short-circuiting modes of new autotransformer FACT's - type device and is intended for power systems flexible connection. The developed mathematical model contains the main phase-shifting and additional regulating autotransformers. The model allows studying of asymmetrical modes of such schemes, including the un-identical load connection in different phases of phase-shifting transformers. Visual vector diagrams of winding's voltages, currents and relative magnetic fluxes of magnetic core legs for main and regulating autotransformers for the modes with two-phase short-circuiting with and without ground have been elaborated. It is shown that significant distortions of the polygon shape occurred. It is revealed that in two-phase short - circuiting mode without ground, and the loads identically connected in different phases, the relative magnetic fluxes of the legs of main and regulating autotransformers are asymmetrical, but their sum is zero, and the magnetic flux does not come out into surrounding space. Load currents in this mode contain only direct and reverse sequences components. When the load is un-identically connected in different phases, significant zero-sequence currents occur, and magnetic flux goes out into surrounding space. However, load currents do not contain symmetrical components of zero sequence. A similar analysis of two-phase short circuit modes with ground showed that even with the identical connection of the loads, there is zero sequence both in the magnetic fluxes and in the load currents. Moreover, zero sequence is present when the load is connected differently on the phases.

Keywords: phase - shifting autotransformer, power systems flexible connection, two - phase short circuit, symmetrical components of currents, voltages, magnetic fluxes.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.1-57.05>

UDC: 621.314.2

Investigarea modurilor staționare de scurtcircuit bifazat ale autotransformatorului cu decalaj de fază cu schema hexagonală și autotransformatorului de reglare

Bosneaga V., Suslov V.,

Institutul de Energetică, Chișinău, Republica Moldova

Rezumat. Scopul lucrării este cercetarea modurilor de scurtcircuit bifazat a dispozitivului nou de tip FACTS cu autotransformatoare pentru interconectarea flexibilă sistemelor energetice. A fost elaborat modelul matematic, care conține autotransformator principal cu decalaj de fază și unul suplimentar de reglare. Modelul permite cercetarea modurilor asimetrice ale astfel de circuite, inclusiv cu conexiunea diferită a sarcinii pe faze diferite. Sunt calculate valorile curenților și tensiunilor înfășurărilor în moduri de scurtcircuit bifazate fără și cu pământ. Sunt construite diagrame vectoriale ale tensiunilor, curenților înfășurărilor și fluxurilor magnetice relative ale coloanelor miezului pentru ambele autotransformatoare, care explică particularitățile regimurilor de funcționare a noului dispozitiv. Este demonstrat că în astfel de moduri există distorsiuni semnificative a formei poligonului de tensiuni în autotransformatorului principal. A fost evidențiat că în modul de scurtcircuit bifazat fără pământ și conectarea sarcinii similara în diferite faze, fluxurile magnetice relative ale coloanelor miezului în autotransformatoare sunt asimetrice, dar suma lor este zero și fluxul magnetic nu iese din miez. Curenții de sarcină în acest mod conțin numai componente de secvență pozitivă și negativă. În cazul conexiunii inegale a sarcinii, suma fluxurilor magnetice nu este egală cu zero și apar fluxuri semnificative cu secvență zero. Însă curenții de sarcină nu conțin secvență zero. O analiză similară a modurilor de scurtcircuit bifazat la pământ a arătat că în aceste moduri, chiar și la conexiunea similară de sarcină în diferite faze există secvența zero atât în fluxurile magnetice, cât și în curenții de sarcină. Cu atât mai mult, secvența zero este prezentă atunci când sarcina este conectată diferit pe faze.

Cuvinte-cheie: autotransformatoare pentru decalaj de fază, interconectarea flexibilă sistemelor energetice, scurtcircuit bifazat, componente simetrice, fluxurile magnetice.

Исследование установившихся режимов двухфазного короткого замыкания фазоповоротного автотрансформатора по схеме шестиугольника с регулировочным автотрансформатором
Бошняга В.А., Суслов В.М.

Институт энергетики, Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Целью работы является исследование режимов двухфазного короткого замыкания нового автотрансформаторного устройства для гибкой связи энергосистем, принадлежащего к классу устройств типа FACTS. Поставленная цель достигается посредством разработки математической модели новой схемы автотрансформаторного устройства, содержащего основной фазоповоротный и дополнительный регулировочный автотрансформаторы. Она позволяет исследовать несимметричные режимы таких схем, в том числе и при неодинаковом подключении нагрузки в разных фазах и является удобным инструментом для исследования фазосдвигающих трансформаторов. Наиболее важные результаты состоят в нахождении режимных параметров устройства при двухфазном коротком замыкании (д.к.з.) без земли и с землей. Построены наглядные векторные диаграммы напряжений, токов обмоток и относительных магнитных потоков стержней магнитопроводов, поясняющие особенности рассмотренных режимов работы нового устройства. Показано, что в таких режимах возникают существенные искажения формы многоугольника напряжений обмоток основного автотрансформатора, сопровождающиеся существенным изменением углов напряжений обмоток одной и той же фазы и даже их взаимным пересечением. Выявлено, что в режиме д.к.з. без земли при одинаковом подключении нагрузки в фазах относительные магнитные потоки стержней основного и регулировочного автотрансформаторов несимметричны, однако сумма их равна нулю. Токи нагрузки в этом режиме содержат только составляющие прямой и обратной последовательностей. При неодинаковом подключении нагрузки сумма магнитных потоков не равна нулю и возникают значительные потоки нулевой последовательности. Однако токи нагрузки не содержат симметричных составляющих нулевой последовательности. Анализ режимов д.к.з. с землей показал, что в данных режимах имеется существенная нулевая последовательность как в магнитных потоках, так и в токах нагрузки, и она проявляется сильнее при неодинаковом подключении нагрузки. Значимость работы состоит в исследовании нового варианта реализации гибкой связи энергосистем переменного тока без использования промежуточного преобразования в постоянный ток.

Ключевые слова: фазоповоротное автотрансформаторное устройство, гибкая связь энергосистем, двухфазное короткое замыкание, симметричные составляющие токов, напряжений, магнитных потоков.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что фазоповоротные трансформаторы являются эффективным средством управления потоками мощности в сложносвязанных электрических сетях. В частности, они позволяют перераспределять нагрузку параллельно работающим электропередам различного класса напряжения, в том числе и в линиях межсистемной связи на переменном токе [1-9]. Кроме использования в стационарных режимах, при условии их обеспечения быстродействующими коммутирующими аппаратами, они могут приобретать свойства устройств типа FACTS (Flexible Alternating Current Transmission), что позволяет их также использовать для управления переходными процессами [10-17]. С учетом этой их новой роли и развития тенденции повышения управляемости электрических сетей путем внедрения элементов smart grid возрастает актуальность исследований различных новых технических решений, связанных с

регулированием величины и фазы векторов напряжений в электрической сети в стационарных и переходных режимах. В связи с реализованным в текущем году включением энергосистем республики Молдова и Украины на параллельную работу с европейской энергосистемой ENTSO-E и намечаемым усилением электрических связей энергосистем Молдовы и Румынии приобретает актуальность вопрос о будущем оптимальном перераспределении нагрузки между параллельно работающими линиями различных классов напряжения в объединенной энергосистеме и регулировании перетоков мощности по линиям межсистемной связи.

Данная работа является продолжением ранее выполненных работ по исследованию нового устройства гибкой межсистемной связи автотрансформаторного типа [18] и посвящена исследованию режимов двухфазного короткого замыкания (д.к.з.) для новой схемы фазоповоротного автотрансформатора на базе многоугольника,

дополненного регулировочным автотрансформатором [19]. Целью исследования является расчет таких режимов и анализ их особенностей, которые могут влиять на возможности реализации и функционирования данного устройства. Рассматриваемое в данной работе техническое решение, базируется на достижениях твердотельной электроники [20 - 25], однако не содержит звена постоянного тока, что является определенным преимуществом. В связи бурным развитием в последние десятилетия технологий «FACTS» появилось большое количество различных управляемых с помощью полупроводниковых коммутаторов устройств. К ним можно отнести, например, устройства типа UPFC-«Unified Power Flow Controller». Эти устройства обеспечивают регулирование параметров режима электрической сети, таких как величина и фаза напряжения в узле, потока активной и реактивной мощностей в сети [26, 27]. Однако, для обеспечения гибкой управляемой связи несинхронно работающих энергосистем угол фазового сдвига между векторами напряжений систем должен изменяться в полном диапазоне 0 - 360°, что не обеспечивается упомянутыми устройствами.

В данной работе проведено исследование режимов д. к. з., которые могут возникать в процессе эксплуатации, с целью определения максимальных токов и напряжений обмоток устройства для оценки допустимой продолжительности таких режимов, а также необходимости разработки и применения мер защиты при их возникновении. Исследования были проведены с помощью пакета МАТЛАБ - СИМУЛИНК, который является, пожалуй, самым распространенным средством для моделирования FACTS устройств [28, 29]. Рассмотрено также влияние несимметричного подключения нагрузки по фазам, что также может происходить при эксплуатации. Это позволит в дальнейшем, после более детального изучения других режимов работы, сделать вывод о перспективах практического использования предлагаемого технического решения и проблемах, которые необходимо при этом решить.

I. Исследование режима двухфазного короткого замыкания нагрузки без земли

На рис. 1 приведена условная схема соединения обмоток основного

автотрансформатора в шестиугольник (они показаны зачерненными прямоугольниками). Причем они изображены в виде двух групп из 3-х последовательно соединенных обмоток,

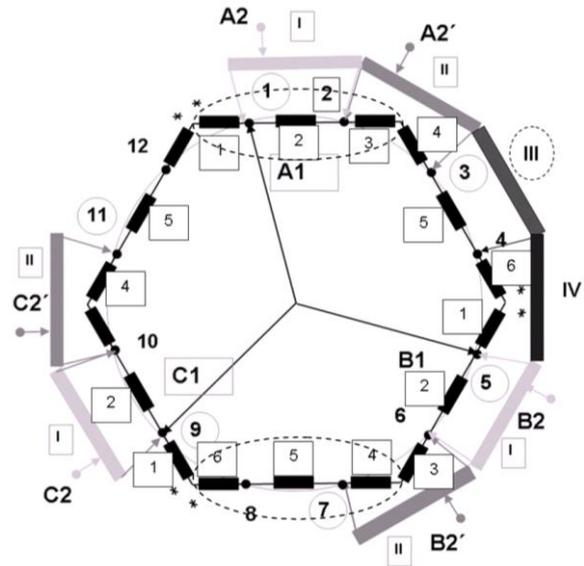


Рис. 1. Схема возможных вариантов подключения регулирующего дополнительного автотрансформатора.
Fig. 1. Scheme of possible options for connecting of regulating additional autotransformer.

составляющих противоположные стороны шестиугольника для каждой фазы. Например, это обмотки №1-6 (цифры в квадратах), отмеченные пунктирным овалом для одной из фаз основного автотрансформатора. Там же показаны некоторые варианты подключения обмоток дополнительного автотрансформатора к обмоткам многоугольника в процессе кругового регулирования угла фазового сдвига (показаны прямоугольниками с различными градациями серого фона, от светло-серого до черного).

Эти варианты подключения дополнительного автотрансформатора на рис.1 обозначены римскими цифрами от I до IV. Кроме того, стрелками A2, B2 и C2 показаны места подключения нагрузки к отводам регулировочной обмотки дополнительного автотрансформатора. Отметим, что в работе рассматриваются режимы как с одинаковым подключением нагрузки к регулировочным обмоткам фаз, так и с рассогласованием подключения нагрузки в разных фазах, которые тоже могут иметь место при неправильной работе коммутирующих устройств. Причем

рассматривается рассогласование в одной из фаз, а места подключения нагрузки показаны далее на векторных диаграммах (ВД) напряжений. Регулировочная обмотка в данном случае состоит из 6-ти одинаковых последовательно соединенных частей с 7-ю отводами, к которым может быть подключена нагрузка. В принципе, для получения полной картины происходящих в устройстве в несимметричных режимах процессов, необходимо рассмотреть их при всех 4-х возможных положениях автотрансформатора, при которых режимы будут разные даже при одинаковой нагрузке. Однако, исходя из опыта предыдущих расчетов, было решено сосредоточиться на анализе процессов в положении «Ш» (см. рис.1, справа сверху, обведено пунктиром). В этом положении нагрузка расположена «дальше» от источника питания и влияние сопротивлений рассеяния трансформаторов будет максимальным. Остальные режимы можно будет при необходимости рассмотреть впоследствии дополнительно. Поэтому в этом разделе будет исследована симметричная схема подключения всех фаз регулирующего автотрансформатора, обозначенная символом «Ш». Несимметрия будет определяться наличием д. к. з. нагрузки с землей или без, а нагрузка в разных фазах может быть подключена как одинаково, так и с рассогласованием по фазам. Для того, чтобы иметь базу для сравнения величин в несимметричных режимах сначала приведем результаты расчета симметричного режима номинальной нагрузки при подключении

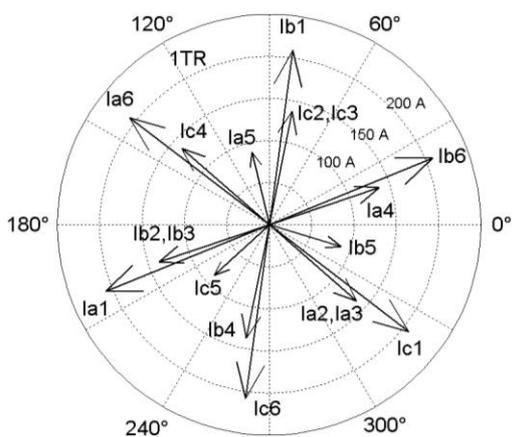


Рис. 2. ВД токов обмоток шестиугольника при подключении нагрузки к середине регулировочной обмотки.

Fig. 2. Vector diagram (VD) of hexagon windings currents at symmetrical load connection to the middle tap of the regulation winding.

нагрузки в середине регулировочной обмотки автотрансформатора. На рис.2 приведена ВД токов обмоток основного автотрансформатора. Из векторной диаграммы рис.2 видно, что соблюдается симметрия токов частей обмоток соответствующих фаз. Кроме того, есть пары совпадающих токов в частях одной обмотки, соединенных последовательно, а также токи, находящиеся в противофазе в частях обмоток разных фаз, также соединенных последовательно. Например, для рассматриваемой схемы «Ш» должны быть одинаковы токи I_{a2} и I_{a3} , а ток I_{c4} равен им по модулю, но находится в противофазе к ним. Аналогично на рис. 3 для дополнительного автотрансформатора приведена ВД токов в его обмотках.

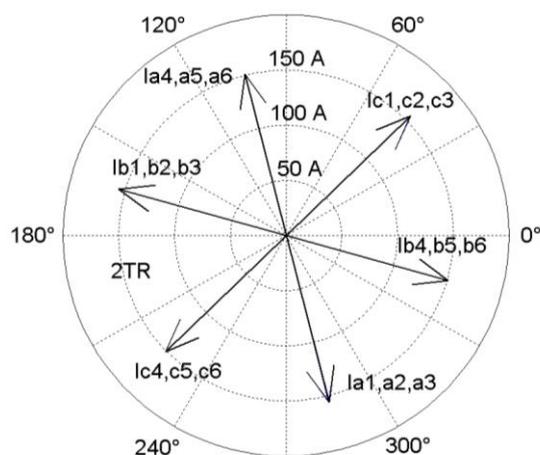


Рис. 3. ВД токов в обмотках регулирующего автотрансформатора.

Fig. 3. VD of currents in the windings of regulation autotransformer.

На ней видны симметрия токов и их равенство в частях обмоток, соединенных последовательно. Например, токи I_{a1} , I_{a2} и I_{a3} в частях регулировочной обмотки фазы А автотрансформатора одинаковы и находятся в противофазе к токам I_{a4} , I_{a5} и I_{a6} во второй половине регулировочной обмотки.

Отметим, что в симметричном режиме номинальной нагрузки вектора напряжений обмоток шестиугольника образуют симметричный шестиугольник.

Напряжения регулировочных обмоток дополнительного автотрансформатора также образуют симметричную систему и прилегают к соответствующим векторам обмоток шестиугольника, параллельно

которым они подключены согласно схеме рис. 1. При симметричном коротком замыкании через сопротивление 5 Ом картина напряжений существенно изменяется в соответствии с рис. 4. Синими отрезками показаны вектора напряжений питающей системы А, В и С, черными - напряжения на нагрузке. Фазное напряжение источника питания равно $110/\sqrt{3}$ кВ. Здесь и далее на ВД напряжений стрелки, указывающие

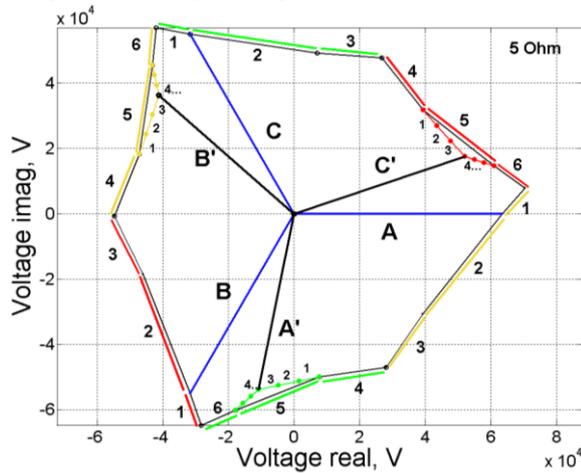


Рис. 4. ВД напряжений обмоток основного шестиугольника и регулирующего автотрансформатора при симметричном к. з.
Fig. 4. VD of voltages of the main hexagon (polygon in this case and further) and regulating autotransformer windings at symmetrical short circuit (s. c.)..

направление векторов для простоты начертания опущены. Видно, что имеет место падение напряжения на сопротивлениях трансформаторов, вследствие чего напряжение на нагрузке существенно ниже питающего. Симметричный шестиугольник также заметно деформирован, де факто он превратился в некоторый многоугольник ввиду взаимного расхождения фазовых углов напряжений обмоток, расположенных на одном и том же стержне магнитопровода. Для наглядности напряжения обмоток разных фаз основного трансформатора подкрашены различными цветами, все обмотки, принадлежащие одной фазе, обозначены одним цветом. Цифрами 1-6 обозначены обмотки основного автотрансформатора (более крупный шрифт) и дополнительного автотрансформатора (более мелкий шрифт). Видно, что вследствие падения напряжения в обмотках параллельность векторов напряжений обмоток одноименных фаз, обозначенных одинаковым цветом,

нарушена. Вследствие влияния большой нагрузки середины регулировочных обмоток автотрансформатора, куда она подключена, смещены в сторону центра шестиугольника.

Рассмотрим далее несимметричный режим в результате д. к. з. нагрузки без земли через сопротивление 2 Ом при подключении нагрузки к **средним отводам** регулировочной обмотки автотрансформатора. При таком замыкании шестиугольник напряжений основных обмоток существенно искажается в соответствии с рис. 5.

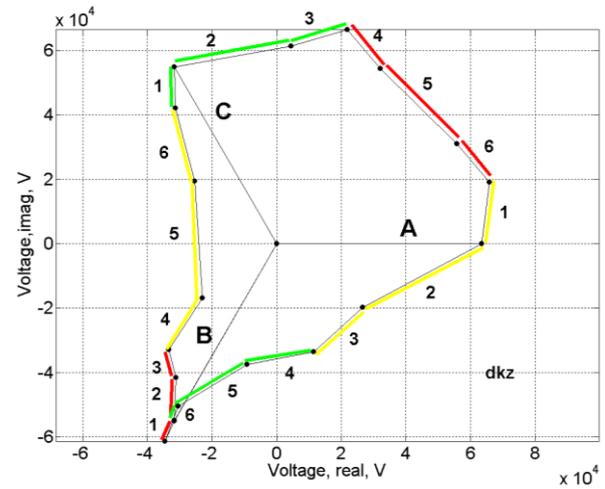


Рис. 5. ВД напряжений на обмотках основного шестиугольника при д. к. з. без земли.
Fig. 5. VD of the main hexagon windings voltages during two-phase s. c. without ground.

Аналогично предыдущему, разными цветами показаны напряжения обмоток разных фаз, а обмотки фаз, расположенные на одном стержне, выделены одинаковым цветом. Видно, что в таком режиме имеет место сильное искажение шестиугольника напряжений основных обмоток.

Рассмотрим далее магнитные потоки в стержнях магнитопроводов основного и дополнительного автотрансформаторов. На рис. 6 представлена ВД относительных магнитных потоков и их разложение на симметричные составляющие для основного трансформатора. Видно, что присутствуют только составляющие прямой и обратной последовательности. Составляющие прямой последовательности обозначены через a1, b1, c1, а составляющие обратной как a2, b2, c2. Как следует из рис.6, относительные магнитные потоки фаз, обозначенные буквами А, В и С при данном повреждении несимметричны, а поток фазы А превышает

номинальную величину приблизительно на 20%. При этом отсутствуют составляющие нулевой последовательности. Сумма потоков

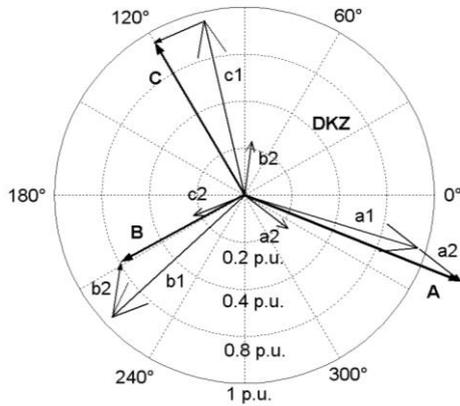


Рис. 6. ВД относительных магнитных потоков и их разложение на симметричные составляющие для основного автотрансформатора.
Fig. 6. VD of relative magnetic fluxes and their decomposition into symmetrical components for the main autotransformer.

стержней равна нулю, поток не выходит в окружающее пространство.

На следующем рис. 7 для вспомогательного автотрансформатора показана ВД относительных магнитных потоков и их разложение на симметричные составляющие. И в данном случае магнитные потоки стержней несимметричны и отсутствуют составляющие нулевой последовательности.

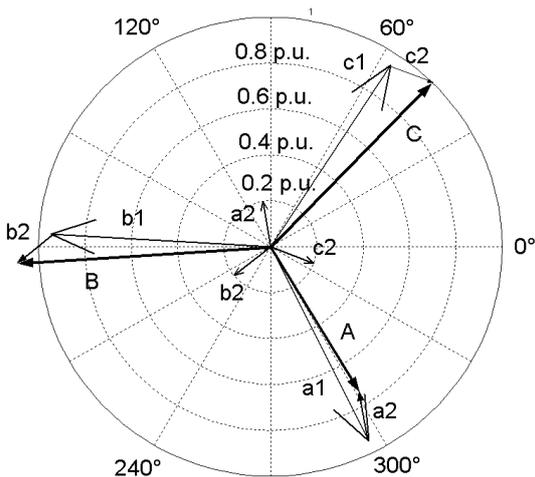


Рис. 7. ВД относительных магнитных потоков и их разложение на симметричные составляющие для вспомогательного автотрансформатора.
Fig. 7. VD of relative magnetic fluxes and their decomposition into symmetrical components for an auxiliary autotransformer.

Моделирование данного режима показало, что токи всех обмоток основного трансформатора и автотрансформатора значительно больше номинальных и все они направлены в основном вдоль одной прямой, вследствие чего ВД здесь не приводятся.

На рис. 8 приведены токи в нагрузке I_{na} и I_{nb} вместе с разложением на симметричные составляющие. Они значительно больше номинальных и направлены вдоль одной прямой.

Очевидно, что в них присутствуют только составляющие прямой и обратной последовательностей. Ток нагрузки «здоровой» фазы С по сравнению с токами к.з. очень мал (≈ 300 А) и на рисунке не показан.

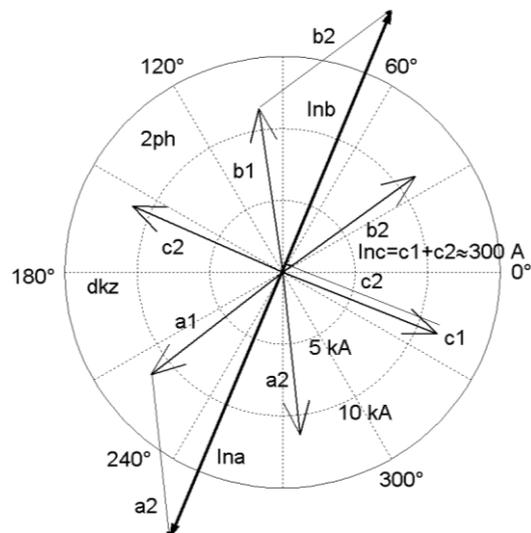


Рис. 8. Токи нагрузки при д. к. з. без земли и их разложение на симметричные составляющие..
Fig. 8. Load currents at two - phase s. c. without ground and their decomposition into symmetrical components.

Рассмотрим далее, как влияет несогласованное подключение нагрузки в разных фазах к отводам регулировочной обмотки автотрансформатора в режиме д. к. з. Зададим несогласованное подключение нагрузки к отпайкам регулировочных обмоток дополнительного автотрансформатора в соответствии с рис. 9, где условно показаны все 7 отводов фаз А, В и С регулировочного автотрансформатора в виде 0 и 1. Задание единицы «1» во второй позиции первой фазы А соответствует подключению нагрузки ко 2-му отводу. Причем подключение нагрузки со смещением выполнено в той же фазе, где есть к. з. нагрузки. При этом в фазах В и С нагрузка

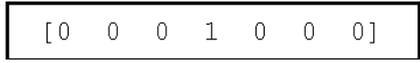
подключена к среднему отводу (задание единицы в средней позиции соответствует



Управление А, Control A



Управление В, Control B



Управление С, Control C

Рис. 9. Окно модели для изменения способа подключения нагрузки со смещением ее в фазе А к левому концу регулировочной обмотки.
Fig. 9. Model's window for changing the connection of load by its shift in phase A to the left end of the regulation winding.

подключению нагрузки к среднему отводу).

Приведем сначала результат моделирования напряжений обмоток шестиугольника. На рис.10 показана ВД напряжений обмоток многоугольника для данного случая.

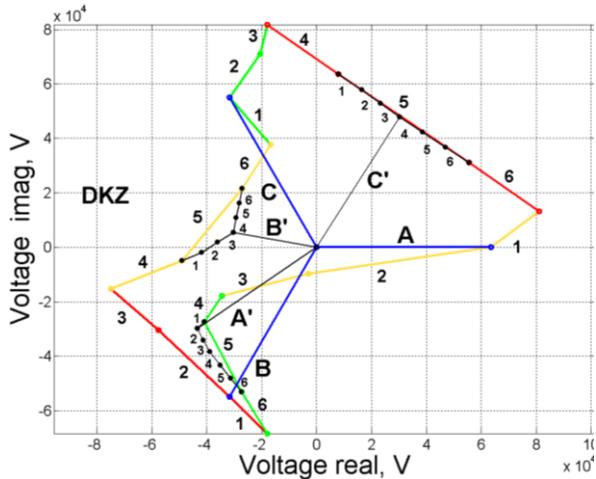


Рис. 10. ВД напряжений обмоток шестиугольника при смещенном положении нагрузки в фазе А автотрансформатора.
Fig. 10. VD of the hexagon windings voltages at displaced load position in phase A of the autotransformer.

Эта ВД отличается от предыдущей, показанной на рис. 5, тем, что кроме напряжений основных обмоток, показаны также напряжения обмоток вспомогательного автотрансформатора, подключенных к определенным отводам шестиугольника.

На ней видно, что каждая из регулировочных обмоток автотрансформатора состоит из 6 частей,

разделенных черными точками, к которым может быть подключена нагрузка, и что нагрузка одной из фаз А' подключена не к средней точке регулировочной обмотки, а со смещением.

Также можно заметить, как изменяются напряжения регулировочной обмотки в разных фазах и их расположение относительно напряжений обмоток основного шестиугольника.

Например, в фазе шестиугольника, обозначенной красным цветом, нет короткого замыкания нагрузки, и она подключена к середине регулировочной обмотки. В этом случае напряжения частей регулировочной обмотки и части обмотки основного автотрансформатора, куда она подключена, практически совпадают по фазе.

В то же время напряжения других регулировочных обмоток (обозначены черным цветом) «оттянуты» в сторону закороченной нагрузки.

Анализируя полученный результат, можно сделать вывод о том, что искажение шестиугольника кардинальным образом зависит не только от вида замыкания, но и от отвода, куда подключена замыкаемая нагрузка.

Рассмотрим величины относительных магнитных потоков, возникающих при наличии рассогласования в положении нагрузки. На рис. 11 показана ВД относительных магнитных потоков и их

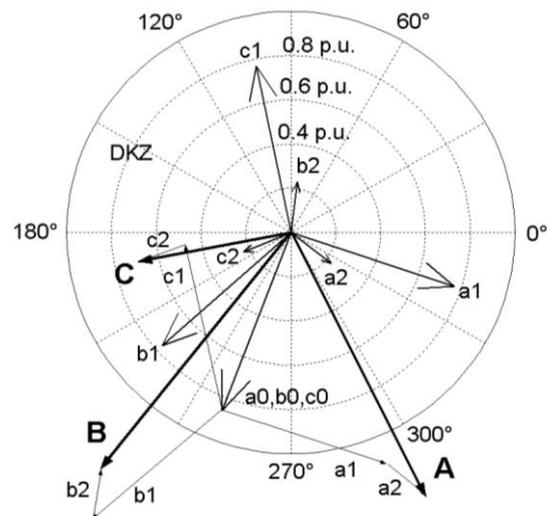


Рис. 11. ВД относительных магнитных потоков и разложение на симметричные составляющие для основного автотрансформатора.
Fig. 11. VD of leg's relative magnetic fluxes and decomposition into symmetrical components for the main autotransformer.

разложение на симметричные составляющие для основного автотрансформатора. На нем видно, что присутствуют составляющие всех трех последовательностей: прямой (a_1, b_1, c_1), меньшие по величине составляющие обратной последовательности (a_2, b_2, c_2), и составляющие нулевой последовательности (a_0, b_0, c_0).

Утолщенными линиями изображены результирующие вектора относительных магнитных потоков в стержнях основного трансформатора (А, В и С). Из полученных результатов видно, что симметрия магнитных потоков существенно нарушена, а их величина в фазах А и В превышает приблизительно на 40% номинальное значение потока.

Это означает, что в этом режиме могут насыщаться соответствующие стержни магнитопровода.

На следующем рис. 12 показана ВД относительных магнитных потоков и их разложение на симметричные составляющие для регулировочного автотрансформатора.

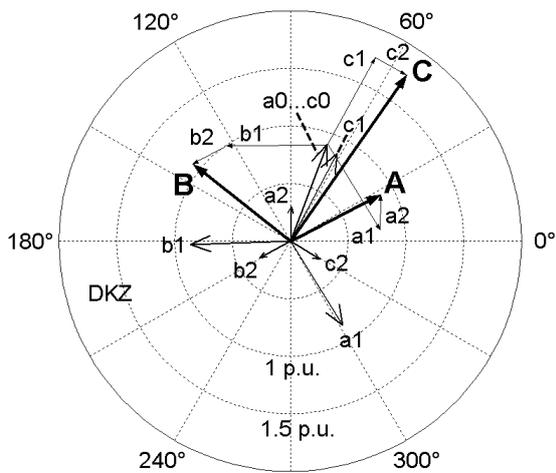


Рис. 12. ВД относительных магнитных потоков и разложение на симметричные составляющие для вспомогательного автотрансформатора.

Fig. 12. VD of relative magnetic fluxes and decomposition into symmetrical components for auxiliary autotransformer.

На нем видно присутствие составляющих всех трех последовательностей: прямой (a_1, b_1, c_1), меньших по величине составляющих обратной последовательности (a_2, b_2, c_2), и составляющих нулевой последовательности (a_0, b_0, c_0). Аналогично предыдущему утолщенными линиями изображены результирующие вектора

относительных магнитных потоков в стержнях регулирующего автотрансформатора (А, В и С).

Симметрия магнитных потоков существенно нарушена, а величина относительного магнитного потока в фазе С более существенно (около 70%) чем в основном автотрансформаторе, превышает номинальное значение потока.

Это означает, что в этом режиме насыщение данного стержня будет еще более заметным и должны быть приняты соответствующие меры для ограничения его влияния. Таким образом, рассогласование в подключении нагрузки по фазам приводит к возникновению потоков нулевой последовательности в магнитопроводах обоих автотрансформаторов даже в случае д.к.з. без земли.

Рассмотрение токов нагрузки в данном режиме показало (аналогично предыдущему режиму без рассогласования подключения нагрузок в разных фазах ВД показанному на рис. 8), что и в данном режиме в токах нагрузки нет токов нулевой последовательности.

Таким образом, при д.к.з. без земли имеют место существенные искажения формы шестиугольника напряжений обмоток основного автотрансформатора. Это сопровождается соответствующим искажением и напряжения на нагрузке. При этом наблюдается и значительное искажение магнитных потоков в стержнях основного и вспомогательного автотрансформаторов, но, как показало моделирование, потоки замыкаются в пределах магнитопровода. Однако при рассогласованном по фазам подключении нагрузки появляется поток нулевой последовательности, выходящий в окружающее пространство.

II. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ДВУХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НАГРУЗКИ С ЗЕМЛЕЙ

В данном разделе рассмотрим особенности режима д.к.з. с землей, которое моделируется путем задания сопротивлений нагрузки двух фаз равными 1 Ом и соединением нейтральной точки звезды нагрузки с землей. Сначала проанализируем результаты моделирования для самого простого случая, когда нагрузки фаз подключены одинаково к **серединам**

регулирующих обмоток дополнительного автотрансформатора.

ВД напряжений обмоток шестиугольника показана на рис. 13. Видно, что по сравнению с симметричным режимом к. з. на рис. 4, многоугольник напряжений обмоток претерпевает значительные искажения, вызванные не только изменением углов напряжений обмоток одной и той же фазы, но и их взаимными пересечениями. При этом в отдельных точках соединения обмоток (например, в точках, показанных красными

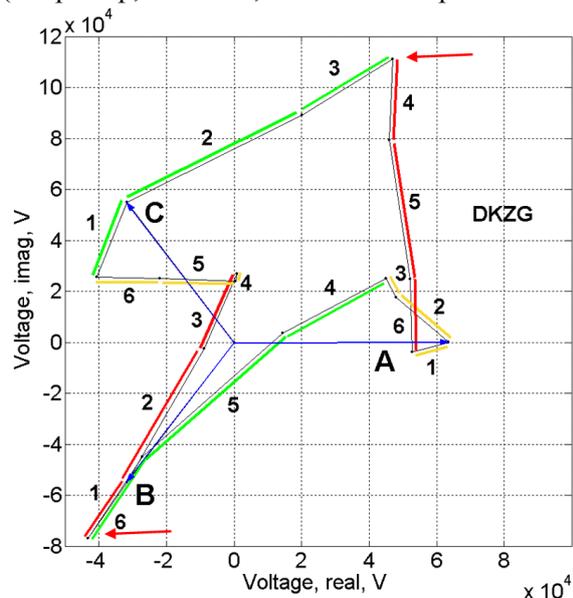


Рис. 13. ВД напряжений обмоток основного автотрансформатора при д.к.з. с землей и подключением нагрузки к середине регулировочной обмотки.

Fig. 13. VD of the main autotransformer windings voltages at double-phase s. c. with ground and load connection to the middle of the regulation winding.

стрелками на рис. 13) напряжения относительно земли могут почти в полтора раза превышать фазные, имеющиеся в нормальном режиме. Такой режим не должен существовать длительно и необходимо принять соответствующие меры для его ликвидации, а также обеспечить изоляцию обмоток, выдерживающую кратковременные возможные перенапряжения.

Рассмотрим далее величины относительных магнитных потоков в стержнях магнитопровода в данном режиме.

На рис. 14 показана ВД относительных магнитных потоков в стержнях основного автотрансформатора при д.к.з. с землей и подключении нагрузки к середине

регулирующей обмотки дополнительного автотрансформатора.

Аналогично предыдущему, приведены вектора симметричных составляющих относительных потоков стержней, в данном случае есть симметричные составляющие всех трех последовательностей-нулевой (обозначены как a_0 , b_0 и c_0), прямой (обозначены как a_1 , b_1 и c_1) и обратной последовательности (a_2 , b_2 и c_2). Видно, что вектора нулевой последовательности имеют наибольшие значения, а обратной последовательности - наименьшие. Складывая соответствующие вектора разных последовательностей,

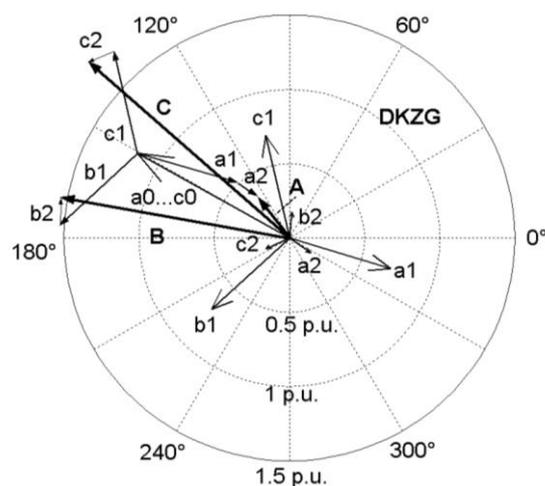


Рис. 14. ВД относительных магнитных потоков в стержнях основного автотрансформатора при д.к.з. с землей и нагрузкой в середине регулировочной обмотки автотрансформатора.

Fig. 14. VD of leg's relative magnetic fluxes for the main autotransformer at double-phase s.c. with ground and load in the middle of regulation autotransformer winding.

получим вектора реальных относительных магнитных потоков в стержнях основного трансформатора А, В и С. Видно что система магнитных потоков в этом режиме значительно искажена, причем потоки фаз В и С существенно превышают номинальные значения в 1 о.е. Это означает, что в реальном трансформаторе ввиду нелинейности кривой намагничивания стержни данных фаз будут испытывать сильное насыщения. Для более точного расчета таких режимов необходимо учитывать нелинейность характеристики намагничивания.

На следующем рис.15 показана ВД относительных магнитных потоков в стержнях дополнительного

автотрансформатора в этом же режиме д. к. з. с землей и подключении нагрузки к середине его регулировочной обмотки. Видно, что и в стержнях регулирующего автотрансформатора относительные потоки существенно несимметричны и содержат потоки всех трех последовательностей.

Кроме того, относительные потоки двух фаз сильно превышают номинальные и соответствующие стержни могут переходить в режим насыщения.

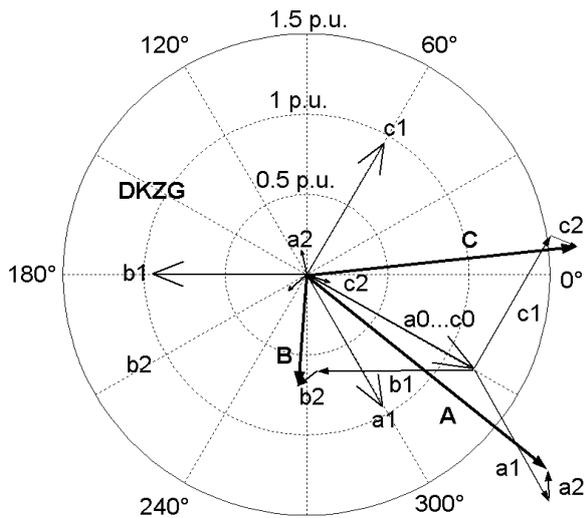


Рис. 15. ВД относительных магнитных потоков в стержнях дополнительного автотрансформатора при д. к. з. с землей и подключении нагрузки к середине его регулировочной обмотки.

Fig. 15. VD of leg's relative magnetic fluxes for the regulation autotransformer with two-phase s. c. with ground and load in the middle of regulation autotransformer winding.

Рассмотрим далее величины токов нагрузки в данном режиме.

На рис.16 представлена ВД симметричных составляющих токов нагрузки в режиме д.к.з. с землей и подключением нагрузки к серединам регулировочных обмоток.

Видно, что в токах нагрузки присутствуют все три симметричные составляющие, причем наименьшее значение имеют составляющие нулевой последовательности (a_0 , b_0 и c_0).

Токи короточенных фаз нагрузки I_{na} , I_{nb} , естественно, имеют большие значения, поэтому ток нагрузки «здоровой» фазы на этой диаграмме не виден ($I_{nc}=0$), а ток I_{nb} при выбранном масштабе выходит за рамки рисунка.

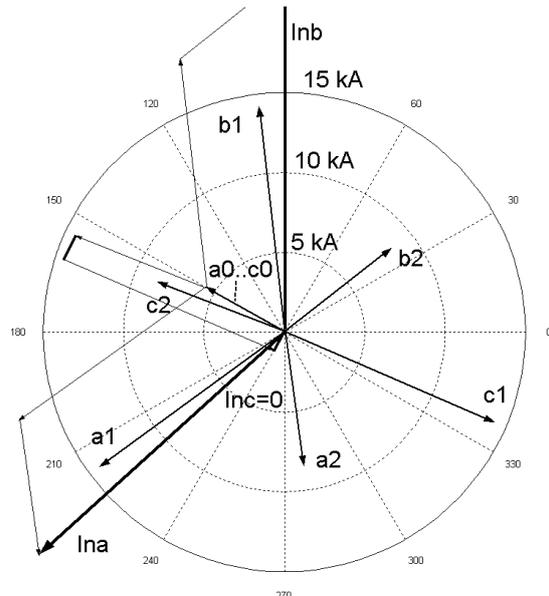


Рис. 16. ВД симметричных составляющих токов нагрузки в режиме д.к.з. с землей и подключением нагрузки к серединам регулировочных обмоток.

Fig. 16. VD of the symmetrical components of the load currents at two-phase s.c. mode with ground and load connection to the middle of the regulation windings.

Проанализируем значения токов в обмотках основного автотрансформатора.

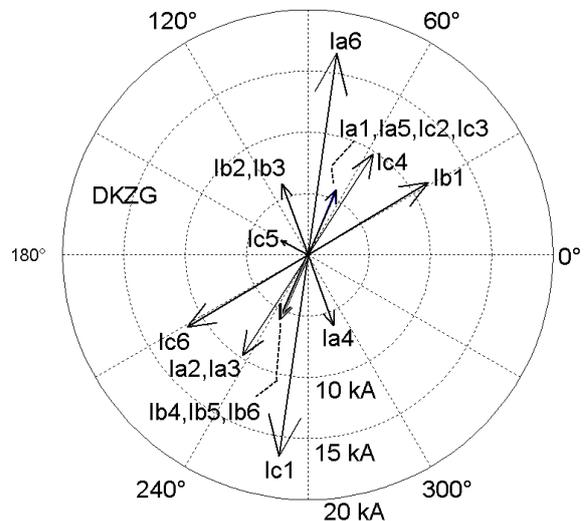


Рис. 17. ВД токов обмоток шестиугольника основного автотрансформатора.

Fig. 17. VD of currents of the main autotransformer hexagon windings.

На рис.17 показана ВД токов обмоток основного автотрансформатора, соединенных в многоугольник. Нумерация обмоток разных фаз соответствует рис.1, где номера обмоток каждой фазы указаны более мелкими

цифрами от 1 до 6 в квадратах возле обмоток. Например, для трех обмоток, к которым подключен вектор системы питающего напряжения A1, указаны цифры 1, 2 и 3, а для противоположных обмоток этой же фазы, составляющих шестиугольник – цифры 4, 5 и 6. Аналогично пронумерованы и обмотки остальных фаз. Из рис.17 видно, что наибольшие значения имеют противоположно направленные токи Ia6, Ic1, что соответствует последовательному включению данных обмоток в схеме рис.1. Аналогично этому наблюдается равенство модулей и противоположная фаза у токов Ib2, Ib3 и Ia4, а также у токов Ia2, Ia3 и Ic4 и других, включенных последовательно в схеме соединения обмоток. Кроме того, имеются группы близких по величине и фазе других токов, которые отображаются практически совпадающими векторами, например, токи Ib4, Ib5 и Ib6.

Для токов обмоток автотрансформатора, где имеются группы по 3 обмотки, соединенные в данном случае последовательно, картина получается проще и приведена на рис. 18. Токи Ic1, Ic2...Ic6 тех регулировочных обмоток, где нет к.з., малы и на рис.18 не показаны (Ic1–Ic6≈0). Остальные токи являются токами к.з. и направлены противоположно в частях регулировочной обмотки, разделенных нагрузкой,

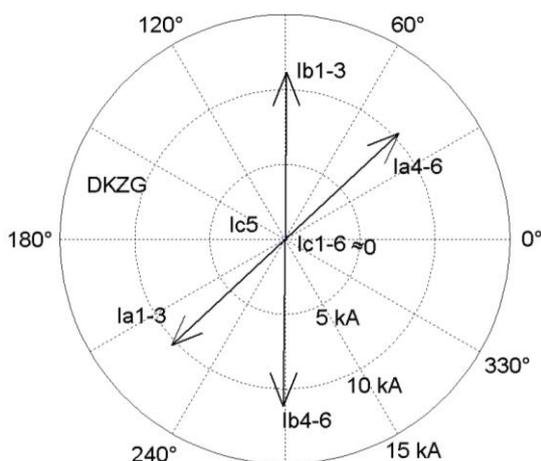


Рис. 18. ВД токов обмоток регулирующего автотрансформатора.
Fig. 18. VD of the currents of the regulating autotransformer windings.

подключенной в ее середине. Например, токи Ib1, Ib2 и Ib3 все одинаковы вследствие последовательного соединения частей

регулирующей обмотки и направлены встречно по отношению к таким же одинаковым токам из группы Ib4, Ib5 и Ib6.

Рассмотрим далее режим, реализующийся при д.к.з. с землей и несогласованном подключении нагрузки в одной из фаз. Способ подключения нагрузки отражен на рис. 19, где в фазе А нагрузка подключена к предпоследнему справа отводу регулировочной обмотки. Этому соответствует расположение единицы (1) в предпоследней позиции в первом ряду, в то время как во 2 и 3 рядах единицы расположены в средней позиции, что обеспечивает автоматическое подключение нагрузки к серединам регулировочных обмоток данных фаз.



Рис. 19. Несогласованное подключение нагрузки к обмоткам регулировочного автотрансформатора.

Fig. 19. Different connection of the load to the windings of the regulating autotransformer.

Рассмотрим сначала, как и ранее, напряжения обмоток. Рассчитанные для данного режима напряжения обмоток основного трансформатора показаны на ВД рис. 20. Черными линиями обозначены напряжения на нагрузке (А', В' и С'). Точками обозначены места сопряжения обмоток основного автотрансформатора, пронумерованных крупными цифрами от 1 до 6 для каждой фазы. Как и ранее, напряжения, принадлежащие обмоткам разных фаз обоих автотрансформаторов, обозначены разными цветами. Например, в фазе основного автотрансформатора, показанной зеленым цветом, имеются обмотки 1, 2 и 3 (вверху рисунка) и обмотки 4, 5 и 6 (в средней части).

Видно, что напряжения частей этой обмотки не всегда совпадают по фазе, в некоторых точках соединения обмоток наблюдаются заметные изломы. Черными

точками отмечены места соединения регулировочных обмоток, к которым может быть подключена

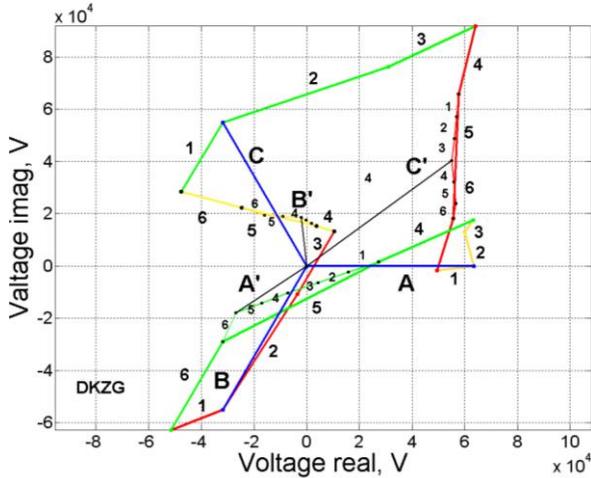


Рис. 20. ВД напряжений обмоток, составляющих шестиугольник и обмоток регулировочного автотрансформатора.
Fig. 20. VD of the voltages of main polygon windings and the windings of the regulating autotransformer.

нагрузка. Напряжения, относящиеся к регулировочным обмоткам, обозначены более мелкими цифрами от 1 до 6. Из рис.20 видно, что нагрузки, обозначенные как В' и С' подключены к серединам регулировочных обмоток, выделенных желтым и красным цветами, а нагрузка А' подключена несимметрично, между частями 5 и 6 обмотки регулировочного трансформатора, выделенной зеленым цветом.

В результате такого повреждения многоугольник основных обмоток сильно искажается, некоторые его стороны даже пересекаются между собой.

Важным является тот факт, что напряжение в точке соединения обмоток (например, в данном случае точка соединения обмоток 3 и 4, обозначенных соответственно зеленым и красным цветом, вверху рис. 20) увеличивается сверх номинального фазного в нормальном режиме до линейного значения. Это необходимо будет учитывать при проектировании изоляции обмоток для данного устройства.

Далее рассмотрим распределение относительных магнитных потоков в стержнях магнитопроводов в данном режиме. На рис. 21 приведена ВД относительных магнитных потоков в стержнях основного трансформатора при д.к.з. с землей и заданном в соответствии с рис.22

несогласованным подключением нагрузки к регулировочной обмотке автотрансформатора. Показаны относительные потоки в стержнях, обозначенные как А, В и С и их симметричные составляющие нулевой (a0, v0 и c0), прямой (a1, v1 и c1) и обратной (a2, v2 и c2) последовательностей. Видно, что наибольшую величину имеют составляющие нулевой последовательности. Система векторов относительных магнитных потоков сильно искажена по сравнению с нормальным симметричным режимом. Потоки в двух стержнях в разы превышают номинальные значения, что свидетельствует о том, что в этом режиме будет наблюдаться насыщение магнитопровода. Поэтому для получения более корректных результатов необходимо обязательно учитывать нелинейность магнитопровода.

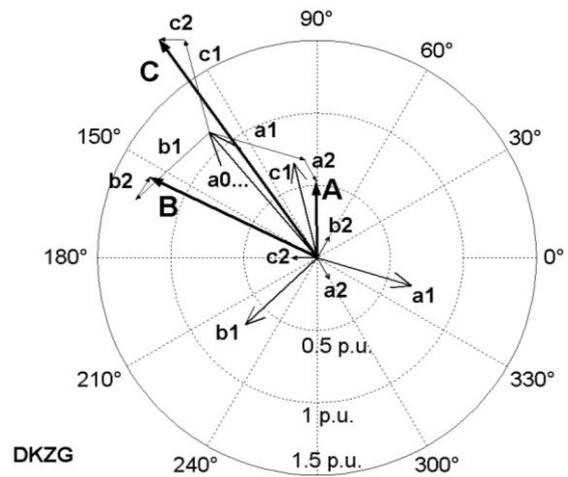


Рис. 21. ВД относительных магнитных потоков в стержнях основного автотрансформатора при д.к.з. с землей и несимметричном подключении нагрузки.
Fig. 21. VD of relative magnetic fluxes in the legs of the main autotransformer at double-phase s.c. with ground and different load connection.

Аналогичный расчет был проведен для величины относительных магнитных потоков в регулирующем автотрансформаторе, результаты в виде ВД приведены на рис. 22.

Полученные результаты похожи на предыдущие, также имеется поток нулевой последовательности.

Рассмотрим далее величины токов нагрузки в данном режиме. На рис.23. представлена ВД симметричных составляющих токов нагрузки в режиме д. к.

з. с землей и упомянутым несимметричным подключением нагрузки к регулировочным

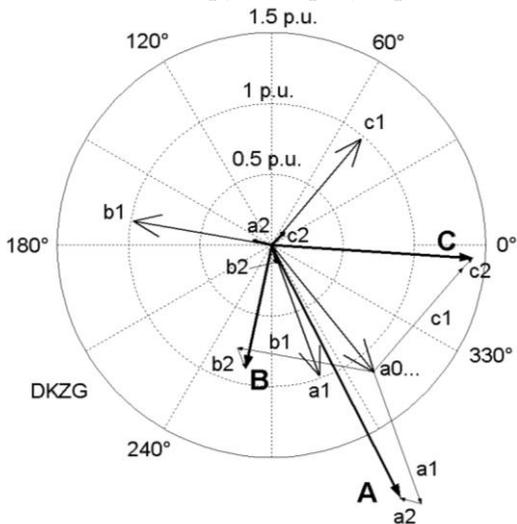


Рис. 22. ВД магнитных потоков в стержнях автотрансформатора при д.к.з. с землей и неодинаковом подключении нагрузки.
Fig. 22. VD of magnetic fluxes in autotransformer legs at double-phase s.c. with ground and different connection of the load.

обмоткам разных фаз. Видно, что в токах нагрузки присутствуют все три симметричные составляющие, причем наименьшее значение имеют составляющие нулевой последовательности (a_0 , b_0 и c_0). Токи закороченных фаз I_{na} , I_{nb} естественно имеют большие значения, характерные для токов к. з., выражаемые в кА, поэтому ток нагрузки «здоровой» фазы на этой диаграмме не виден ($I_{nc} \approx 0$), а ток I_{nb} при выбранном масштабе выходит за рамки рисунка.

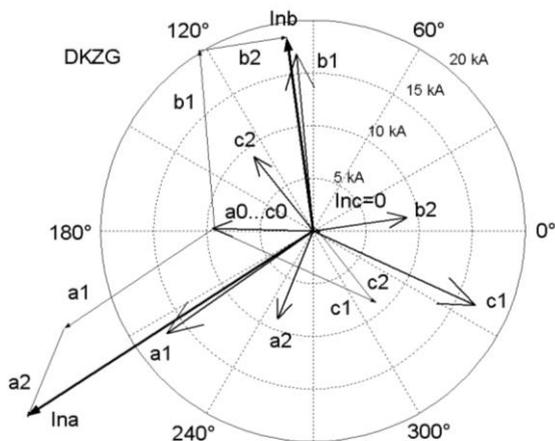


Рис. 23. ВД симметричных составляющих токов нагрузки в режиме д.к.з. с землей и неодинаковом подключении.

Fig. 23. VD of the symmetrical components of the load currents at double-phase s.c. with ground mode and different connection of load.

Теперь проанализируем закономерности распределения токов в обмотках основного и регулирующего автотрансформаторов в данном режиме. Моделирование показало, что при наличии рассогласования в подключении нагрузки по фазам общий характер распределения токов в обмотках, составляющих шестиугольник, остается приблизительно таким же, как на рис. 17, хотя имеются и некоторые различия в фазовых углах токов. Ввиду этого ВД этих токов для данного случая не приводится. Распределение же токов в обмотках регулирующего автотрансформатора существенно отличается, главным образом за счет того, что различаются результирующие числа витков частей регулировочной обмотки, через которые текут токи в нагрузку.

На рис. 24 представлена ВД токов в обмотках регулирующего автотрансформатора. Токи $I_{c1} \dots I_{c6}$ тех регулировочных обмоток, где нет к.з., малы и на рис. 24 не показаны ($I_{c1} - I_{c6} \approx 0$).

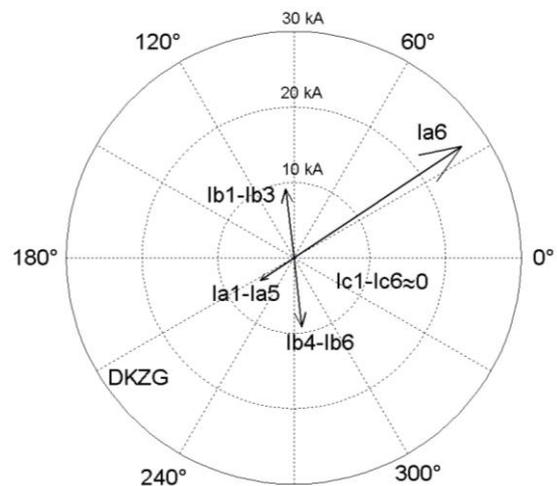


Рис. 24. ВД токов обмоток регулирующего автотрансформатора при несогласованном подключении нагрузки.
Fig. 24. VD of the windings currents of regulating autotransformer with different load connection.

Остальные токи являются токами к.з. и направлены противоположно в частях регулировочной обмотки, разделенных нагрузкой, которая подключена со сдвигом

относительно ее середины в соответствии с рис. 19. Отметим, что, как и должно быть, токи I_{b1} , I_{b2} , I_{b3} фазы В, где нагрузка включена посередине, все одинаковы вследствие последовательного соединения соответствующих частей регулировочной обмотки и направлены встречно по отношению к таким же одинаковым токам из группы I_{b4} , I_{b5} и I_{b6} . В то же время токи I_{a1} и I_{a1} - I_{a5} в частях регулировочной обмотки фазы А, где нагрузка подключена со смещением относительно середины, неодинаковы. Их соотношение соответствует количеству включенных витков регулировочной обмотки, то есть ток I_{a6} , протекающий по одной секции обмотки, приблизительно в 5 раз больше токов I_{a1} - I_{a5} , протекающих по последовательно включенным 5 секциям.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель нового автотрансформаторного трехфазного устройства для связи энергосистем на переменном токе, содержащего два автотрансформатора – основной фазоповоротный и дополнительный регулировочный, позволяющая моделировать и исследовать как симметричные, так и практически любые его несимметричные режимы, в том числе и при несогласованном подключении нагрузки к отводам регулировочной обмотки в разных фазах. Кроме того, при определенной ее модификации, она позволит анализировать также и любые другие схемные решения, имеющие аналогичный набор трансформаторов. Т.е., модель может быть удобным инструментом для исследования трансформаторных устройств со сложными схемами соединения обмоток, характерными для фазосдвигающих трансформаторов.

2. Определены значения токов и напряжений обмоток устройства в режимах д. к. з. без земли и с землей для наиболее критичного способа подключения регулирующего автотрансформатора, в том числе и при несогласованном подключении нагрузки в разных фазах к отводам его обмотки.

Построены наглядные ВД напряжений и токов обмоток, как для основного, так и для регулирующего автотрансформаторов,

поясняющие особенности рассмотренных режимов работы предложенного устройства.

Показано, что в таких режимах возникают существенные искажения формы многоугольника, составленного из обмоток основного автотрансформатора, сопровождающиеся существенным изменением фазы векторов напряжений обмоток одного стержня и даже их взаимным пересечением.

3. Проанализировано распределение в рассмотренных режимах относительных магнитных потоков в стержнях основного и дополнительного автотрансформаторов с помощью построенных ВД.

Показано, что в режиме д.к.з. **без земли** при симметричном подключении нагрузки относительные магнитные потоки стержней основного и регулировочного автотрансформаторов несимметричны, однако сумма их равна нулю и магнитный поток не выходит в окружающее пространство.

Токи нагрузки в этом режиме содержат только составляющие прямой и обратной последовательности, и нет токов нулевой последовательности. Показано также, что **при несимметричном** подключении нагрузки в этом режиме возникают значительные потоки нулевой последовательности.

4. Проведен аналогичный анализ режимов д.к.з. **с землей**. Показано, что в этом режиме даже при симметричном подключении нагрузки имеются составляющие нулевой последовательности как в магнитных потоках, так и в токах нагрузки. Тем более они присутствуют при несимметричном подключении нагрузки. Разработанная модель апробирована для разных режимов, полученные результаты соответствуют ожидаемым, находятся в полном согласии с теорией электрических цепей. Она позволяет проводить дальнейшие исследования характеристик устройства и в других, не изученных до сих пор несимметричных режимах с целью оценки перспектив создания нового устройства гибкой межсистемной связи энергосистем без звена постоянного тока.

Литература (References)

[1] Giith G., "Static Thyristor-Controlled Regulating Transformer for AC Transmission," IEEE Interna-

- tional Conference on Thyristor and Variable Static Equipment for AC and DC Transmission, no. 205. London, November 30-December 3, 1981.
- [2] Gyugyi L. "Solid-State Control of Electric Power in AC Transmission Systems", International Symposium on Electric Energy Conversion in Power Systems', Invited Paper, no. T-IP. 4' Capri, Italy, 1989.
- [3] Mathur R. M., Basati R. S. "A Thyristor-Controlled Static Phase Shifter for AC Power Transmission," IEEE P15, vol. 100, no. 5, May 1981.
- [4] Gyugyi L. "Solid-State Control of AC Power Transmission," EPRI Conference on Flexible AC Transmission Systems (FACTS): The Future of High Voltage Transmission, Cincinnati, OH, November 14-16, 1990.
- [5] Irvani M. R., Maratukulam D. "Review of Semiconductor-Controlled (Static) Phase Shifters for Power System Applications". IEEE/PES Winter Meeting Paper no. 94 WM 182-6 PWRs, 1994.
- [6] Ooi, B.T., Dai S.Z., Galiana F.D., "A Solid-State PWM Phase-Shifter," IEEE Trans., PWRD-8, no.2, April 1993. DOI: 10.1109/61.216862.
- [7] Paweł Albrechtowicz, Jerzy Szczepanik. The Comparative Analysis of Phase Shifting Transformers. *Energies* 2021, 14, 4347. <https://doi.org/10.3390/en14144347>, <https://www.mdpi.com/journal/energies>.
- [8] Vidjei K., Sud. HVDC and FACTs Controllers: [Application of static converters in power systems]. *Primenenie staticheskikh preobrazovatelei v energeticheskikh sistemah*. Translation from Eng: "NIIA", 2009,-344 pp. (in Russian).
- [9] Integrating Power Systems across Borders. IEA Publications, International Energy Agency www.iea.org. Typeset in France by IEA - June 2019.
- [10] R. Baker, G. Guth, W. Egli, and O. Eglin, "Control Algorithm for a Static Phase Shifting Transformer to Enhance Transient and Dynamic Stability of Large Power Systems," IEEE Trans. PAS, Vol. 101, No. 9, 1982, pp. 3532-3542. DOI: 10.1109/TPAS.1982.317580
- [11] Baker, R., Guth G., Egli W., Eglin P., "Control Algorithm for a Static Phase Shifting Transformer to Enhance Transient and Dynamic Stability," IEEE PAS, vol. 101, no. 9, September 1982. DOI: 10.1109/TPAS.1982.317580
- [12] A. Edris, "Enhancement of First-Swing Stability Using a High-Speed Phase Shifter," IEEE Trans. PWRs, Vol. 6, No. 3, August 1991, pp. 1113-1118.
- [13] Thyristor-Controlled Phase Shifter (TCPS). IEEE Power Engineering Society, FACTS Overview. IEEE Special Publication 95TP108, 1995.
- [14] IEEE Power Engineering Society, FACTS Applications. IEEE Special Publication 96TP116-0, 1996.
- [15] Y. L. Tan, Y. Wang, "Nonlinear Excitation and Phase Shifter Controller for Transient Stability Enhancement of Power Systems Using Adaptive Control Law," *Int. J. Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 18, No. 6, 1996, pp. 397-403.
- [16] F. Jiang, S. Choi, G. Shrestha. "Power System Stability Enhancement Using Static Phase Shifter," *IEEE Trans. PWRs*, Vol. 12, No. 1, 1997, pp. 207-214.
- [17] Bindeshwar Singh, K.S. Verma, Pooja Mishra, Rashi Maheshwari, Utkarsha Srivastava, Aanchal Baranwal. Introduction to FACTS Controllers: A Technological Literature Survey. International Journal of Automation and Power Engineering. Volume 1, Issue 9, December 2012. www.ijape.org.
- [18] Bosneaga V., Suslov V. [Investigation of Supply Phase Failure in Phase-Shifting Transformer with Hexagon Scheme and Regulating Autotransformer]. *Issledovanie nepolnofaznih ustanovivshihsea regimov fazopovorotnogo transformatora po sheme shestiuogolnika s regulirovochnim avtotransformatorom*. *Revista electronica "Problemele energeticii regionale"*, nr. 3(51), 2021, DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.02>. (in Russian).
- [19] Bosneaga V., Suslov V., Tirsu M., Anisimov V. [Decision for the patent issue for "Transformer device for interconnection of power systems"]. *Decizia de acordare a brevetului pentru inventie "Dispozitiv tip transformator pentru interconectarea sistemelor energetice"*. AGEPI, Nr.10123 din 12 septembrie 2022. (In Romanian).
- [20] Pan J., Nuqui R., Srivastava K., Jonsson T., Holmberg P., Hafner Ying-Jiang. AC Grid with Embedded VSC-HVDC for Secure and Efficient Power Delivery. IEEE Energy 2030, Atlanta, GA USA, 17-18 November, 2008.
- [21] Yu J., Karady G., Lei G., "Applications of Embedded HVDC in Power System Transmission", IEEE Power Engineering and Automation Conference (PEAM), September 2012.
- [22] Jacobson B., Karlsson P., Asplund G., Harnefors L., Jonsson T., "VSC HVDC Transmission with Cascaded Two-Level Converters", CIGRE Conference 2010, Paris, France.
- [23] Marz M., Copp K., Manty A, Dickmander D., Danielsson J., Johansson F., Holmberg P., Bjorklund P., Duchon H., Lundberg P., Irwin G., Sankar S., Mackinac. "HVDC Converter –Automatic Runback Utilizing Locally Measured Quantities", CIGRE Conference, 2014, Toronto, Canada.
- [24] IGBT Application Note, R07AN0001EJ0410, Rev.4.10, Jul 13, 2018, © 2018 Renesas Electronics Corporation. URL:https://www.renesas.com/eu/en/doc/products/igbt/apn/r07an0001ej0410_igbt.pdf.
- [25] Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation. IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistor) Application Note 2018-09-01 © 2018, 40 pp. URL:<https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/product/bipolar-transistors-igbt.html>.
- [26] Ketan G. Damor, Dipesh M. Patel, Vinesh Agrawal, Hirenkumar G. Patel. Comparison of Different Facts Devices. *IJSTE–International Journal of*

Science Technology & Engineering. Vol. 1, Issue 1, July 2014.

[27] Gyugyi L., Schauder C.D., Williams S.L., etc. The Unified Power Flow controller: a new approach to power transmission control. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.2, April 1995. pp.1085-1097.

[28] Harshitha G. B., Santhosh D. S., K. Uday Bhargav. Modelling of Three-Phase Transformer in MATLAB/Simulink. International Journal of Innova-

tive Research in Science, Engineering and Technology, India. www.ijirset.com, Vol. 7, Issue 5, May 2018. DOI:10.15680/IJIRSET.2018.0705081, ISSN (Online): 2319-8753, ISSN (Print): 2347-6710.

[29] Rahul Agrawal, S.K. Bharadwaj, D. P. Kothari. SIMULATION TOOL FOR FACTS CONTROLLERS. "A REVIEW", International Journal of Development Research. Vol. 6, Issue, 04, pp. 7409-7416, April, 2016.

Сведения об авторах.



Бошняга Валерий Анатольевич, ведущий научный сотрудник. Занимается расчетами режимов энергосистем на базе моделей силовых трансформаторных устройств. Основные научные интересы лежат в области расчета несимметричных режимов работы электрических сетей.

valeriu.bosneaga@ie.utm.md



Суслов Виктор Миронович, научный сотрудник, научные интересы связаны с режимами энергетических систем, как установившимися, так и переходными, моделированием элементов энергосистем, в том числе с учетом нелинейности.

svictorm46@gmail.com