

Моделирование неполнофазных режимов работы силовых автотрансформаторов

В.А. Мартынов, А.Н. Голубев
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail:zav@toe.ispu.ru, alenikgo@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: При эксплуатации силовых автотрансформаторов, получивших широкое распространение в сетях 110 кВ и выше, нередко приходится иметь дело с неполнофазными режимами, вызванными отключениями одной или двух фаз при коротких замыканиях либо при пофазных ремонтах. Это приводит к несимметрии напряжений автотрансформаторов, что сказывается на качестве электроснабжения потребителей; для самого автотрансформатора неполнофазная работа может быть опасна в отношении перегрузки отдельных обмоток. Наличие электрической связи между высоким и средним напряжениями обуславливает специфику в анализе их режимов работы. И если теоретический анализ и общий подход к расчету несимметричных режимов двухобмоточных трансформаторов в настоящее время рассмотрены достаточно подробно, то задача анализа несимметричных режимов работы трехобмоточных автотрансформаторов сохраняет свою актуальность. В связи с этим поиск теоретических подходов к расчету несимметричных режимов работы силовых автотрансформаторов является актуальным направлением исследований.

Материалы и методы: В основу исследований положен метод симметричных составляющих, а также схемы замещения трехобмоточных автотрансформаторов для токов различных последовательностей.

Результаты: На основе метода симметричных составляющих разработан подход к расчету автотрансформаторных и комбинированных несимметричных режимов работы силовых автотрансформаторов. Предложены новые математические модели основных неполнофазных режимов. Приведен пример расчета комбинированного неполнофазного режима по паспортным данным автотрансформатора при очередном отключении линейных проводов со сторон среднего, низшего и высшего напряжений.

Выводы: Предложенная модель и полученные аналитические выражения позволяют определять токи и напряжения фазных обмоток автотрансформатора в самых различных несимметричных режимах работы на основе единого подхода.

Ключевые слова: автотрансформатор, метод симметричных составляющих, расчетная схема замещения, несимметричный режим, неполнофазный режим.

Modeling of incomplete-phase operating modes of power autotransformers

V.A. Martynov, A.N. Golubev
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: zav@toe.ispu.ru, alenikgo@yandex.ru

Abstract

Background: When operating power autotransformers that have become widely used in 110 kV and higher voltage networks, it is often necessary to deal with incomplete-phase modes caused by disconnections of one or two phases in case of short circuits or phase-by-phase repairs. This leads to asymmetry of the voltage of autotransformers, which affects the quality of power supply to consumers, and it is dangerous for the autotransformer itself as incomplete-phase operation may lead to overloading of individual windings. The presence of an electrical connection between high and medium voltages determines the approach to analyzing their operating modes. The theoretical analysis and the general approach to the calculation of asymmetric modes of two-winding transformers have been studied in detail but the asymmetric operating modes of three-winding autotransformers have not been analyzed well yet. Thus, it is quite urgent now to find theoretical approaches to the calculation of asymmetric operating modes of power autotransformers.

Materials and methods: The study is based on the method of symmetric components, as well as the substitution circuit of three-winding autotransformers for currents of different sequences.

Results: An approach has been developed to calculating autotransformer and combined asymmetric operating modes of power autotransformers based on the method of symmetrical components. New mathematical models of the main incomplete-phase modes have been proposed. An example has been given of calculating the combined incomplete-phase mode according to the autotransformer rated values for the next disconnection of the line wires of the middle, lower and higher voltages components.

Conclusion: The proposed model and obtained analytical expressions allow us to determine the currents and voltages of the phase windings of the autotransformer in a variety of asymmetric modes of operation based on a unified approach.

Key words: autotransformer, symmetric component method, design substitution circuit, asymmetric mode, incomplete-phase mode.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.3.040-047

Введение. Силовые автотрансформаторы получили широкое распространение в сетях с глухозаземленной нейтралью напряжением 110 кВ и выше. Мощные автотрансформаторы изготавливаются как трехфазными, так и однофазными. Схема включения обмоток обычного трехфазного силового автотрансформатора представлена на рис. 1. Чаще всего автотрансформаторы используются для связи электрических сетей с напряжениями 110, 220, 330 и 500 кВ на стороне высшего и среднего напряжений. При этом, кроме последовательной и общей обмоток, имеющих электрическую связь, силовые автотрансформаторы, как правило, имеют третичные обмотки низшего напряжения (НН), соединенные в треугольник, основное назначение которых состоит в компенсации гармонических составляющих напряжений и ЭДС, кратных трем. Номинальная мощность обмотки НН $S_{Н,ном}$ меньше номинальной мощности автотрансформатора $S_{ном}$ и не может превышать значения типовой мощности $S_{тип}$.

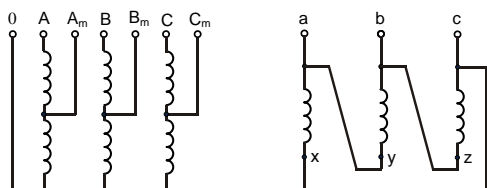


Рис. 1. Схема включения обмоток автотрансформатора

При эксплуатации силовых автотрансформаторов нередко приходится иметь дело с неполнофазными режимами работы, вызванными кратковременным отключением одной или двух фаз при коротких замыканиях либо более длительным отключением при пофазных ремонтах. Такие режимы могут возникать и при неполнофазных отключениях автотрансформаторов или при их пофазной коммутации. В ряде случаев для группы однофазных автотрансформаторов при аварийном отключении одной фазы может оказаться допустимой работа по двум фазам. В этом случае не требуется установки резервной фазы, особенно при наличии двух групп однофазных автотрансформаторов на подстанции [1]. Неполнофазные режимы приводят к несимметрии напряжений автотрансформаторов, что сказывается на качестве электроснабжения потребителей. Для самого автотрансформатора несимметричная работа может быть опасна в отношении перегрузки отдельных обмоток.

Несмотря на появление в последние годы эффективных численных методов расчета электромагнитных устройств в инженерной

практике, анализ несимметричных режимов силовых трансформаторов, как правило, проводится на основе метода симметричных составляющих [2–6]. Основным достоинством данного подхода является возможность использования схем замещения приведенного трансформатора для токов различных последовательностей и проведение расчетов с помощью простых аналитических формул. При этом анализ многих несимметричных режимов может быть проведен по параметрам трансформаторов, взятым из справочника. К основным недостаткам метода симметричных составляющих следует отнести невысокую точность, обусловленную, главным образом, допущением о линейности магнитной цепи и постоянстве параметров намагничивающей ветви схемы замещения.

Методы исследования. Как известно [7], расчет симметричных трехфазных цепей ведется «на одну фазу». Схема соединения обмоток одной фазы трехобмоточного автотрансформатора приведена на рис. 2. Здесь, как и в общей теории трехобмоточных трансформаторов, приняты следующие обозначения фазных величин: \dot{U}_B , \dot{U}_C , \dot{U}_H – фазные напряжения обмоток высшего (ВН), среднего (СН) и низшего (НН) напряжений соответственно; \dot{i}_B , \dot{i}_C , \dot{i}_H – фазные токи ВН, СН и НН соответственно; $W_B = W_H + W_O$ – число витков обмотки ВН; $W_C = W_O$ – число витков обмотки СН; W_H – число витков обмотки НН.

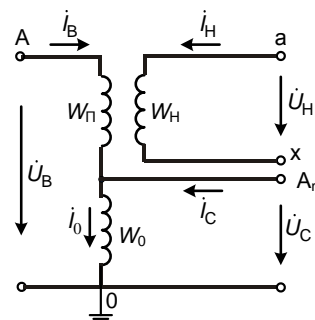


Рис. 2. Схема соединения обмоток одной фазы

Если пренебречь намагничивающим током автотрансформатора, то связь между токами \dot{i}_B , \dot{i}_C и \dot{i}_H определится уравнением

$$W_H \dot{i}_B + W_O \dot{i}_O + W_H \dot{i}_H = 0, \quad (1)$$

при этом

$$\dot{i}_O = \dot{i}_B + \dot{i}_C. \quad (2)$$

При анализе симметричных режимов автотрансформаторов, как и трехобмоточные трансформаторы, представляют схемой заме-

щения (рис. 3) [2], при этом током намагничивания, как правило, пренебрегают. Поскольку в схеме замещения все магнитные (трансформаторные) связи заменены электрическими, то напряжения и токи со стороны СН и НН должны быть приведены к числу витков обмотки (напряжению) ВН:

$$\begin{aligned} \dot{U}'_C &= \dot{U}_C k_{BC}; \quad \dot{U}'_H = \dot{U}_H k_{BH}; \\ i'_C &= i_C \frac{1}{k_{BC}}; \quad i'_H = i_H \frac{1}{k_{BH}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $k_{BC} = \frac{U_{B,ном}}{U_{C,ном}}$; $k_{BH} = \frac{U_{B,ном}}{U_{H,ном}}$ – коэффициенты трансформации трехобмоточного автотрансформатора.

При анализе несимметричных режимов автотрансформатора можно использовать упрощенную схему замещения автотрансформатора, вид и параметры которой будут одинаковыми для токов всех последовательностей, при этом для токов нулевой последовательности обмотка НН будет замкнута накоротко.

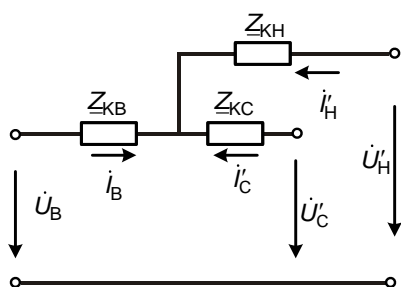


Рис. 3. Схема замещения автотрансформатора

Параметры схемы замещения на рис. 3 Z_{KB} , Z_{KC} и Z_{KH} нетрудно определить, например, по известным формулам [3], используя справочные данные [8]. Для исключения перегрузок обмоток автотрансформатора допустимыми будут являться режимы, при которых фазные токи последовательной $I_{\Pi} = I_B$, общей I_O и обмотки НН I_H автотрансформатора не будут превышать их номинальных значений. При использовании относительных единиц будем иметь:

$$I_{\Pi} = I_B \leq 1; \quad I_O \leq k_{тип}; \quad I'_H \leq \alpha, \quad (4)$$

где $k_{тип} = 1 - \frac{1}{k_{BC}}$ – коэффициент типовой мощности;

могут быть представлены в виде комплексных сопротивлений трех фаз. В симметричных режимах эти комплексные сопротивления равны. В несимметричных режимах в случае отсутствия в сетях ВН, СН и НН вращающихся электрических машин комплексы эквивалентных сопротивлений каждой из цепи, учитывающие и взаимную индукцию, будут одинаковы и для прямой, и для обратной последовательности. Однако комплекс эквивалентного сопротивления нулевой последовательности в сетях ВН и СН будет иметь иное значение, чем для прямой и обратной составляющих, так как, в отличие от последних, токи нулевой последовательности замыкаются по земле и заземляющим устройствам. При наличии в сетях вращающихся электрических машин эквивалентные комплексные сопротивления будут различны для всех симметричных составляющих.

$$\alpha = \frac{S_{H,ном}}{S_{ном}};$$

$$I_O = I_B + I'_C = I_B + k_{BC} i'_C. \quad (5)$$

В выражении (5) направление токов I_B , I_O и I'_C соответствует рис. 2.

При анализе несимметричных режимов с использованием метода симметричных составляющих фазы автотрансформаторов, как и фазы трансформаторов, представляют схематически замещения соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей. При этом схема замещения автотрансформатора и ее параметры для токов обратной последовательности ничем не отличаются от схемы прямой последовательности.

Токи и потоки нулевой последовательности в автотрансформаторах появляются и действуют аналогично третьим гармоникам намагничивающего тока и потока, возникающим вследствие насыщения магнитной цепи. Разница заключается лишь в том, что первые изменяются с основной, а вторые – с трехкратной частотой. Силовые автотрансформаторы выполняются как трехфазными, так и однофазными. При этом сопротивления намагничивающей ветви токам нулевой последовательности в групповых и трехстержневых автотрансформаторах будут различными. Однако при наличии заземленной нейтрали токи нулевой последовательности могут протекать во всех обмотках. В этом случае намагничивающий ток составляет небольшую долю полного тока нулевой последовательности и им можно пренебречь. Следовательно, при анализе несимметричных режимов можно использовать упрощенную схему замещения автотрансформатора, вид и параметры которой будут одинаковыми для токов всех последовательностей, при этом для токов нулевой последовательности обмотка НН будет замкнута накоротко.

Таким образом, при анализе несимметричных режимов каждую фазу автотрансформатора можно рассматривать независимо от других фаз. При этом для исключения перегрузок обмоток выражения (4) нужно рассматривать для каждой фазы автотрансформатора.

Наиболее распространенными режимами работы силовых автотрансформаторов являются автотрансформаторные и комбинированные режимы, при которых происходят перетоки мощностей ВН \leftrightarrow СН и одновременно НН \leftrightarrow СН или НН \leftrightarrow ВН. В соответствии с принципом компенсации [6], сеть, в которую выдается комплексная мощность от автотрансформатора, может быть представлена в виде комплексных сопротивлений трех фаз. В симметричных режимах эти комплексные сопротивления равны. В несимметричных режимах в случае отсутствия в сетях ВН, СН и НН вращающихся электрических машин комплексы эквивалентных сопротивлений каждой из цепи, учитывающие и взаимную индукцию, будут одинаковы и для прямой, и для обратной последовательности. Однако комплекс эквивалентного сопротивления нулевой последовательности в сетях ВН и СН будет иметь иное значение, чем для прямой и обратной составляющих, так как, в отличие от последних, токи нулевой последовательности замыкаются по земле и заземляющим устройствам. При наличии в сетях вращающихся электрических машин эквивалентные комплексные сопротивления будут различны для всех симметричных составляющих.

Из вышеизложенного следует, что если сопротивления фаз цепи различны и не меняются для токов различных последовательностей, то расчет такой цепи можно вести для

каждой фазы отдельно относительно полных токов и напряжений, не раскладывая их на симметричные составляющие.

Нормальными режимами работы сетей напряжением 110 кВ и выше являются симметричные режимы. Длительные несимметричные режимы возникают при обрывах линейных и фазных проводов. При этом сопротивления фаз нагрузки в общем случае будут различными для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Результаты исследования. Рассмотрим комбинированный режим передачи мощности автотрансформаторным ВН → СН и трансформаторным ВН → НН путем. Схема соединения обмоток автотрансформатора и сопротивлений нагрузки в этом режиме представлена на рис. 4. Будем считать, что к фазам обмотки ВН подведена симметричная система фазных напряжений прямой последовательности \dot{U}_{BA} , \dot{U}_{BB} и \dot{U}_{BC} . Со сторон СН и НН к автотрансформатору подключена симметричная нагрузка с соответствующими сопротивлениями Z_C и Z_H .

Симметричный режим. Расчетная схема одной фазы автотрансформатора для анализа этого режима представлена на рис. 5.

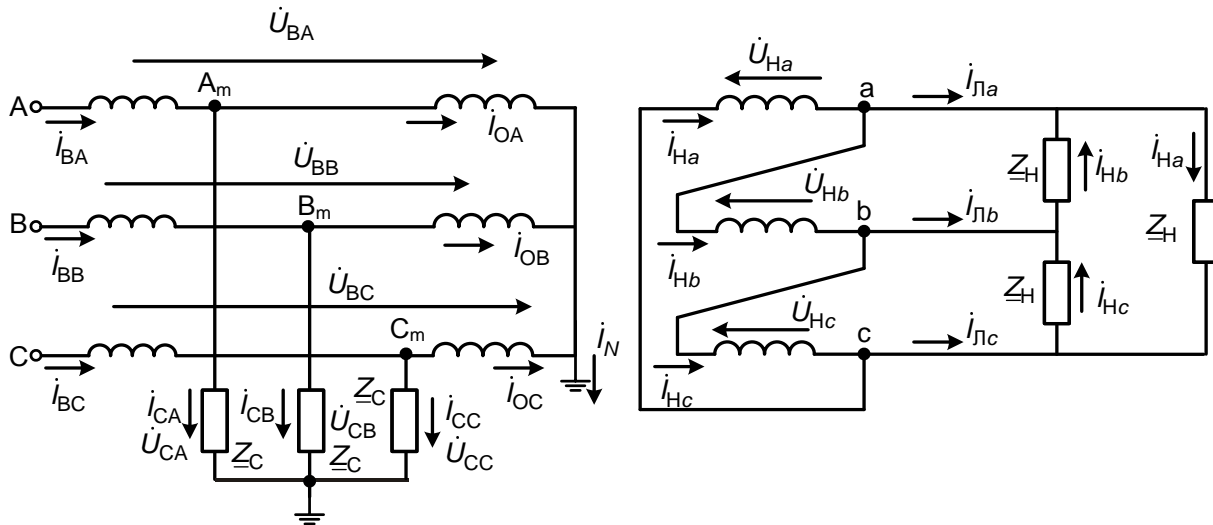


Рис. 4. Комбинированный режим передачи мощности ВН → СН и ВН → НН

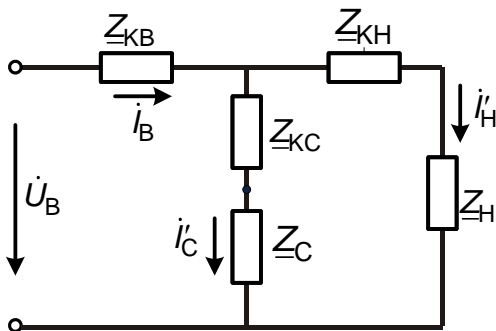


Рис. 5. Схема замещения автотрансформатора в симметричном режиме

Для симметричного режима выполняются следующие соотношения:

$$i_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_{KB} + \frac{(Z_{KC} + Z_C)(Z_{KH} + Z_H)}{Z_{KC} + Z_C + Z_{KH} + Z_H}};$$

$$i'_C = i_B \frac{(Z_{KH} + Z_H)}{Z_{KC} + Z_C + Z_{KH} + Z_H}; \quad i'_H = i_B - i'_C;$$

$$i_O = i_B - k_{BC} i'_C. \quad (6)$$

Рассмотрим случай, когда параметры автотрансформатора и нагрузки имеют следующие значения в относительных единицах:

$$\dot{U}_B = \dot{U}_{BA} = 1; \quad k_{BC} = 2; \quad \alpha = k_{тип} = 0,5;$$

$$Z_{KB} = 0,048 + j0,12; \quad Z_{KC} = 0,048; \quad Z_{KH} = j0,22;$$

$$Z_C = 1,2 + j0,8; \quad Z_H = 1,41 + j1,41. \quad (7)$$

Сопротивления нагрузки токам прямой, обратной и нулевой последовательности рассчитываются следующим образом:

$$Z_{C1} = Z_C = 1,2 + j0,8; \quad Z_{C2} = 0,08 + j0,11;$$

$$Z_{C0} = 0,05 + j0,05;$$

$$Z_{H1} = Z_H = 1,41 + j1,41; \quad Z_{H2} = 0,06 + j0,2.$$

Для симметричного режима по формулам (6) получим:

$$i_B = 0,998 e^{-j43^\circ}; \quad i'_C = 0,597 e^{-j36^\circ};$$

$$i'_H = 0,411 e^{-j53^\circ}; \quad i_O = 0,234 e^{j174^\circ}.$$

Таким образом, в рассматриваемом симметричном режиме последовательная обмотка нагружена практически номинальным током ($I_{\Pi} = I_B = 0,998$), а обмотка НН и общая обмотка нагружены токами меньше номинальных. Действующие значения токов в обмотках автотрансформатора для этого режима приведены в таблице.

| Режим работы | Значения токов в обмотках автотрансформатора и нейтрали (о.е.) | | | | | | | | | |
|---|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| | I_{BA} | I_{BB} | I_{BC} | I_{OA} | I_{OB} | I_{OC} | I_{Na} | I_{Nb} | I_{Nc} | I_N |
| Симметричный | 0,998 | 0,998 | 0,998 | 0,234 | 0,234 | 0,234 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0 |
| Отключение линейного провода фазы А со стороны СН | 0,591 | 1,19 | 1,124 | 0,591 | 0,54 | 0,583 | 0,591 | 0,324 | 0,334 | 1,375 |
| Отключение линейного провода фазы А со стороны НН | 0,772 | 0,937 | 1,113 | 0,793 | 0,529 | 0,33 | 0,343 | 0,343 | 0,686 | 0 |
| Отключение линейного провода фазы А со стороны ВН | 0 | 1,353 | 1,349 | 0,35 | 0,576 | 0,42 | 0,175 | 0,467 | 0,56 | 1,009 |

Отключение (обрыв) линейного провода фазы А со стороны СН. В соответствии с [7], данный режим может быть смоделирован включением трех несимметричных источников ЭДС в линейные провода на стороне СН (рис. 6).

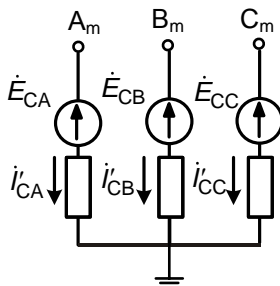


Рис. 6. Моделирование отключения линейного провода со стороны СН

Расчетные схемы для токов прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей рассматриваемого режима приведены на рис. 7. В этих схемах неизвестными величинами являются токи и ЭДС \dot{E}_{C1} , \dot{E}_{C2} и \dot{E}_{C0} . Произведя преобразования схем рис. 7, получим схемы, приведенные на рис. 8, в которых параметры определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{C3} &= \dot{U}_B \frac{Z_{KH} + Z_{H1}}{Z_{KB} + Z_{KH} + Z_{H1}}; \\ Z_{C31} &= Z_{KC} + Z_{C1} + \frac{Z_{KB}(Z_{KH} + Z_{H1})}{Z_{KB} + Z_{KH} + Z_{H1}}; \\ Z_{C32} &= Z_{KC} + Z_{C2} + \frac{Z_{KB}(Z_{KH} + Z_{H2})}{Z_{KB} + Z_{KH} + Z_{H2}}; \\ Z_{C30} &= Z_{KC} + Z_{C0} + \frac{Z_{KB}Z_{KH}}{Z_{KB} + Z_{KH}}. \end{aligned}$$

В соответствии с методом симметричных составляющих, для трех источников ЭДС (рис. 6) будем иметь:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{CB} &= a^2 \dot{E}_{C1} + a \dot{E}_{C2} + \dot{E}_{C0} = 0; \\ \dot{E}_{CC} &= a \dot{E}_{C1} + a^2 \dot{E}_{C2} + \dot{E}_{C0} = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где $a = e^{j120^\circ}$.

Из (8) следует, что

$$\dot{E}_{C1} = \dot{E}_{C2} = \dot{E}_{C0}. \quad (9)$$

Для схем рис. 8 справедливы соотношения:

$$i'_{C1} = \frac{\dot{E}_{C3} - \dot{E}_{C1}}{Z_{C31}}; \quad i'_{C2} = \frac{-\dot{E}_{C2}}{Z_{C32}}; \quad i'_{C0} = \frac{-\dot{E}_{C0}}{Z_{C30}}. \quad (10)$$

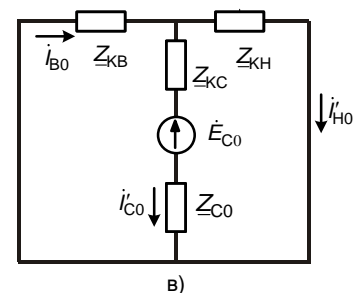
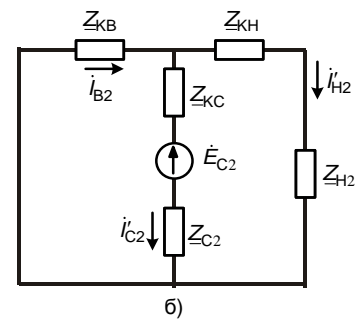
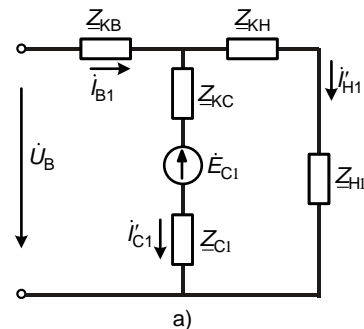


Рис. 7. Расчетные схемы для токов прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей при обрыве провода со стороны СН

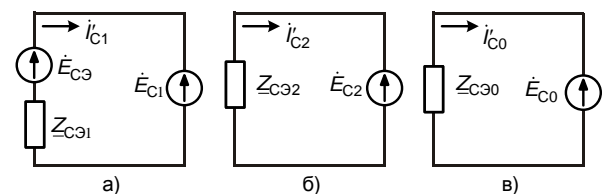


Рис. 8. Эквивалентные расчетные схемы

При отключении линейного провода фазы А со стороны СН получим выражение для ЭДС

$$i'_{CA} = i'_{C1} + i'_{C2} + i'_{C0} = 0. \quad (11)$$

Подставляя в (11) выражения (10) с учетом (9), получим

$$\dot{E}_{C1} = \dot{E}_{C2} = \dot{E}_{C0} = \frac{\dot{E}_{CЭ}}{\frac{1}{Z_{CЭ1}} + \frac{1}{Z_{CЭ2}} + \frac{1}{Z_{CЭ0}}}. \quad (12)$$

Определив по формулам (12) значения ЭДС $\dot{E}_{C1} = \dot{E}_{C2} = \dot{E}_{C0}$, по (10) можно найти токи i'_{C1} , i'_{C2} и i'_{C0} . Остальные неизвестные токи в схемах рис. 7 определяются по следующим формулам:

$$i_{B1} = \frac{\dot{U}_B - \dot{E}_{C1} - i'_{C1}(Z_{KC} + Z_{C1})}{Z_{KB}};$$

$$i_{B2} = \frac{-\dot{E}_{C2} - i'_{C2}(Z_{KC} + Z_{C2})}{Z_{KB}};$$

$$i_{B0} = \frac{-\dot{E}_{C0} - i'_{C0}(Z_{KC} + Z_{C0})}{Z_{KB}};$$

$$i'_{H1} = i_{B1} - i'_{C1}; \quad i'_{H2} = i_{B2} - i'_{C2}; \quad i'_{H0} = i_{B0} - i'_{C0}.$$

Зная симметричные составляющие токов, нетрудно найти результирующие токи в каждой фазе. Фазные токи общей обмотки определяются по (6). Действующие значения токов в обмотках автотрансформатора для этого режима, определенные по параметрам (7), приведены в таблице. Согласно результатам расчета, в этом режиме токи превышают номинальные значения в фазах В и С последовательной обмотки, во всех фазах общей обмотки и в фазе А обмотки НН.

Отключение (обрыв) линейного провода фазы А со стороны НН. В этом случае режим работы сети со стороны НН будет однофазным. При этом токи нулевой последовательности в обмотках автотрансформатора протекать не будут. Данный режим может быть смоделирован включением трех несимметричных источников ЭДС в линейные провода на стороне НН (рис. 9,а). Произведя перенос этих источников через узлы а, b и с, получим схему, приведенную на рис. 9,б. Расчетные схемы для токов прямой и обратной последовательностей рассматриваемого режима приведены на рис. 10. В этих схемах неизвестными величинами являются токи и ЭДС \dot{E}_{a1} и \dot{E}_{a2} . Произведя преобразования схем рис. 10, получим схемы, приведенные на рис. 11, в которых параметры определяются по следующим формулам:

$$\dot{E}_{aЭ} = \dot{U}_B \frac{Z_{KC} + Z_{C1}}{Z_{KB} + Z_{KC} + Z_{C1}};$$

$$Z_{aЭ1} = Z_{KH} + Z_{H1} + \frac{Z_{KB}(Z_{KC} + Z_{C1})}{Z_{KB} + Z_{KC} + Z_{C1}};$$

$$Z_{aЭ2} = Z_{KH} + Z_{H2} + \frac{Z_{KB}(Z_{KC} + Z_{C2})}{Z_{KB} + Z_{KC} + Z_{C2}}.$$

Для трех источников ЭДС (рис. 9,а) будем иметь:

$$\dot{E}_{Hb} = a^2 \dot{E}_{a1} + a \dot{E}_{a2} + \dot{E}_{a0} = 0;$$

$$\dot{E}_{Hc} = a \dot{E}_{a1} + a^2 \dot{E}_{a2} + \dot{E}_{a0} = 0.$$

Из этого следует

$$\dot{E}_{a1} = \dot{E}_{a2} = \dot{E}_{a0}. \quad (13)$$

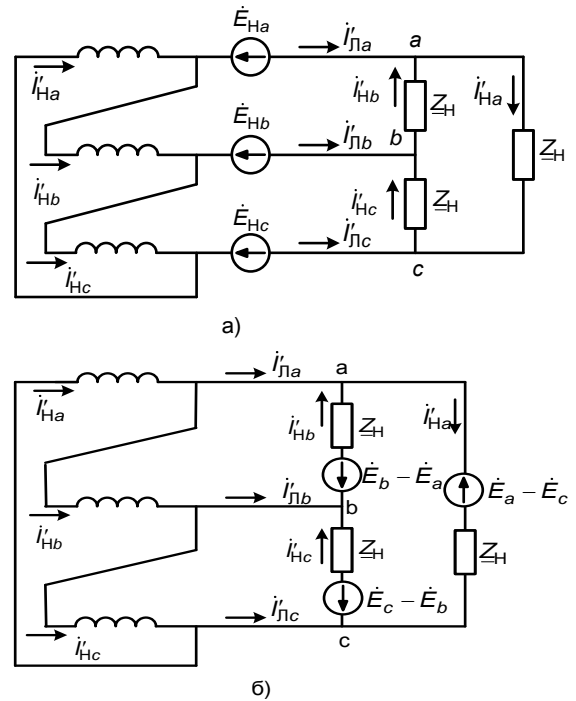


Рис. 9. Моделирование отключения линейного провода со стороны НН

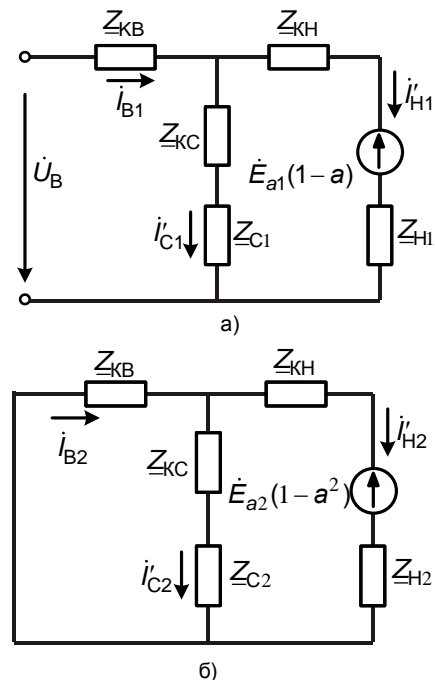


Рис. 10. Расчетные схемы для токов прямой (а) и обратной (б) последовательностей

Для схем рис. 11 справедливы следующие соотношения:

$$i'_{H1} = \frac{\dot{E}_{aЭ} - \dot{E}_{a1}(1-a)}{Z_{aЭ1}}; \quad i'_{H2} = \frac{-\dot{E}_{a2}(1-a^2)}{Z_{aЭ2}}. \quad (14)$$

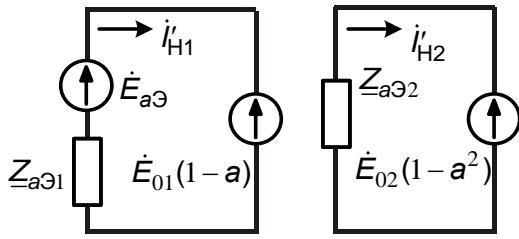


Рис. 11. Эквивалентные расчетные схемы для токов прямой и обратной последовательностей

При отключении линейного провода фазы А со стороны НН линейный ток, выраженный через симметричные составляющие фазного тока, будет равен

$$i'_{\text{Л}a} = i'_{\text{Л}a1} + i'_{\text{Л}a2} = \sqrt{3}i'_{\text{Н}1}e^{j30^\circ} + \sqrt{3}i'_{\text{Н}2}e^{-j30^\circ} = 0.$$

Так как

$$(1-a)e^{j30^\circ} = (1-a^2)e^{-j30^\circ} = \sqrt{3},$$

То, подставляя в последнее выражение формулы (14) с учетом (13), получим

$$\dot{E}_{a1} = \dot{E}_{a2} = \dot{E}_{a0} = \frac{\dot{E}_{a0}e^{j30^\circ}}{Z_{c01}} \cdot \sqrt{3} \left(\frac{1}{Z_{a01}} + \frac{1}{Z_{a02}} \right). \quad (15)$$

Определив по формулам (15) значения ЭДС $\dot{E}_{a1} = \dot{E}_{a2}$, по (14) можно найти токи $i'_{\text{Н}1}$ и $i'_{\text{Н}2}$. Остальные неизвестные токи в схемах рис. 10 определяются по следующим формулам:

$$i_{B1} = \frac{\dot{U}_B - \dot{E}_{a1}(1-a) - i'_{\text{Н}1}(Z_{\text{КН}} + Z_{\text{Н}1})}{Z_{\text{КВ}}};$$

$$i_{B2} = \frac{-\dot{E}_{a2}(1-a^2) - i'_{\text{Н}1}(Z_{\text{КН}} + Z_{\text{Н}2})}{Z_{\text{КВ}}};$$

$$i'_{\text{C}1} = i_{B1} - i'_{\text{Н}1}; \quad i'_{\text{C}2} = i_{B2} - i'_{\text{Н}2}.$$

По найденным симметричным составляющим нетрудно определить результирующие токи в каждой из обмоток автотрансформатора. Действующие значения этих токов для рассмотренного режима, определенные по параметрам (7), приведены в таблице. Согласно результатам расчета, в этом режиме токи превышают номинальные значения в фазе С последовательной обмотки, в фазах А и В общей обмотки и в фазе С обмотки НН.

Отключение (обрыв) линейного провода фазы А со стороны ВН. Анализ данного режима может быть проведен по аналогии с рассмотренным режимом отключения провода на стороне СН. Расчетные схемы для токов прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей рассматриваемого режима приведены на рис. 12. В этих схемах неизвестными величинами являются токи и ЭДС $\dot{E}_{B1} = \dot{E}_{B2} = \dot{E}_{B0}$. Произведя соответствующие преобразования, получим

$$i_{B1} = \frac{\dot{U}_B - \dot{E}_{B1}}{Z_{B01}}; \quad i_{B2} = \frac{-\dot{E}_{B2}}{Z_{B02}}; \quad i_{B0} = \frac{-\dot{E}_{B0}}{Z_{B00}},$$

где

$$\dot{E}_{B1} = \dot{E}_{B2} = \dot{E}_{B0} = \frac{\dot{U}_B}{\frac{1}{Z_{B01}} + \frac{1}{Z_{B02}} + \frac{1}{Z_{B00}}};$$

$$Z_{B01} = Z_{\text{КВ}} + \frac{(Z_{\text{КС}} + Z_{\text{C}1})(Z_{\text{КН}} + Z_{\text{Н}1})}{Z_{\text{КС}} + Z_{\text{C}1} + Z_{\text{КН}} + Z_{\text{Н}1}};$$

$$Z_{B02} = Z_{\text{КВ}} + \frac{(Z_{\text{КС}} + Z_{\text{C}2})(Z_{\text{КН}} + Z_{\text{Н}2})}{Z_{\text{КС}} + Z_{\text{C}2} + Z_{\text{КН}} + Z_{\text{Н}2}};$$

$$Z_{B00} = Z_{\text{КВ}} + \frac{(Z_{\text{КС}} + Z_{\text{C}0})Z_{\text{КН}}}{Z_{\text{КС}} + Z_{\text{C}0} + Z_{\text{КН}}}.$$

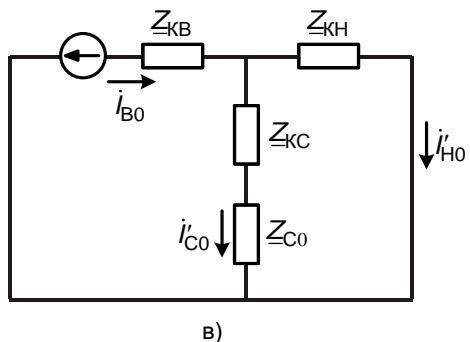
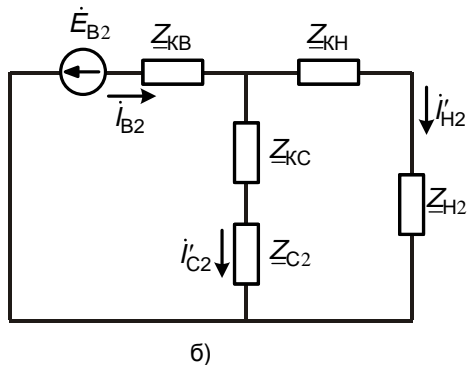
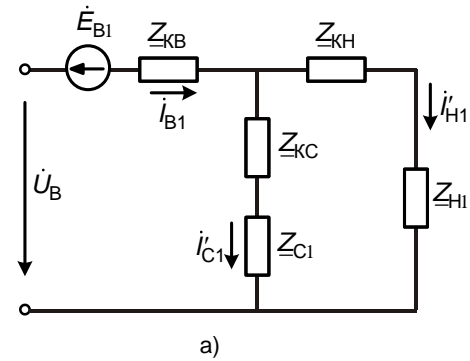


Рис. 12. Расчетные схемы для токов прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей при обрыве провода со стороны ВН

Зная токи i_{B1} , i_{B2} и i_{B0} , нетрудно определить токи во всех обмотках автотрансформатора. Действующие значения этих токов для рассмотренного режима приведены в таблице.

Выводы. Предложенный подход и аналитические выражения позволяют определять токи и напряжения фазных обмоток автотрансформатора в самых различных несимметричных режимах работы, используя параметры, взятые из справочных данных. При использовании данной математической модели и результатов расчета неполнофазных режимов необходимо помнить, что метод симметричных составляющих базируется на допущении о постоянстве параметров схемы замещения и точность расчета некоторых несимметричных режимов работы может быть весьма невысокой.

Список литературы

1. Дулепов Д.Е., Тюндина Т.Е. Расчет несимметрии напряжений СЭС // Вестник НГИЭИ. – 2015. – № 4 (47). – С. 35–42.
2. Петров Г.Н. Трансформаторы. – М.: ОНТИ, 1934. – 445 с.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учеб. для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
4. Мартынов В.А. Расчет неполнофазных режимов работы трехфазных трансформаторов // Электричество. – 2003. – № 9. – С. 54–61. – № 10. – С. 17–24.
5. Бошняга В.А., Суслов В.М. Моделирование трехфазных трансформаторных устройств с трехстержневым магнитопроводом для инженерных расчетов несимметричных режимов при различных схемах соединения обмоток // Проблемы региональной энергетики. – 2013. – № 2(22). – С. 38–50.
6. Бошняга В.А., Суслов В.М. Исследование несимметричных режимов трехфазных трехстержневых трансформаторов со схемой соединения обмоток «в зигзаг» // Проблемы региональной энергетики. – 2013. – № 3(23). – С. 39–46.
7. Основы теории цепей: учеб. для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

Голубев Александр Николаевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий,
e-mail: alenikgo@yandex.ru

Golubev Aleksandr Nikolaevich,

Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of the Department of Theoretical Basics of Electrical Power Engineering and Electrical Technologies,
e-mail: alenikgo@yandex.ru

Мартынов Владимир Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники и электротехнологий,
e-mail: zav@toe.ispu.ru

Martynov Vladimir Aleksandrovich,

Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor, Head of the Department of Theoretical Basics of Electrical Power Engineering and Electrical Technologies,
e-mail: zav@toe.ispu.ru

8. **Электротехнический** справочник: в 3 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / под общ. ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И.Н. Орлов) и др. – 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 712 с.

References

1. Dulepov, D.E., Tyundina, T.E. Raschet nesimmetrii napryazheniy SES [Voltage Asymmetry Calculation in Rural Power Networks]. *Vestnik NGIEI*, 2015, no. 4 (47), pp. 35–42.
2. Petrov, G.N. *Transformatory* [Electrical Transformers]. Moscow, ONTI, 1934. 445 p.
3. Ivanov-Smolenskiy, A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical Machines]. Moscow, Energiya, 1980. 928 p.
4. Martynov, V.A. Raschet nepolnofaznykh rezhimov raboty trekhfaznykh transformatorov [Calculation of Incomplete-Phase Operating Modes of Three-Phase Electrical Transformers]. *Elektrichestvo*, 2003, no. 9, pp. 54–61; no. 10, pp. 17–24.
5. Boshnyaga, V.A., Suslov, V.M. Modelirovanie trekhfaznykh transformatornykh ustroystv s trekhstержневым magnitoprovodom dlya inzhenernykh raschetov nesimmetrichnykh rezhimov pri razlichnykh skhemakh soedineniya obmotok [Modeling of three-phase transformer devices with a three-rod magnetic tape for engineering calculations of asymmetric regimes for various winding connection schemes]. *Problemy regional'noy energetiki*, 2013, no. 2(22), pp. 38–50.
6. Boshnyaga, V.A., Suslov, V.M. Issledovanie nesimmetrichnykh rezhimov trekhfaznykh trekhstержневyykh transformatorov so skhemoy soedineniya obmotok «v zigzag» [Research into asymmetrical modes of three-phase three-rod transformers with a «zigzag» winding connection scheme]. *Problemy regional'noy energetiki*, 2013, no. 3(23), pp. 39–46.
7. Zeveke, G.V., Ionkin, P.A., Netushil, A.V., Strakhov, S.V. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of circuit theory]. Moscow, Energoatomizdat, 1989. 528 p.
8. *Elektrotekhnicheskiy Spravochnik v 3 t., t. 2. Elektrotekhnicheskie izdeliya i ustroystva* [Electrotechnical Reference Book in 3 vol., vol. 2. Electrical Products and Devices]. Moscow, Energoatomizdat, 1986. 712 p.