

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА СО СХемой СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ТРЕУГОЛЬНИК С ЗИГЗАГОМ» ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

В.М. Збродыга,

зав. каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

М.А. Прищепов,

зав. каф. электрооборудования с.-х. предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, доцент

И.В. Протосовицкий,

декан агроэнергетического факультета БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

А.И. Зеленкевич,

доцент каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ, канд. техн. наук

В статье рассмотрены особенности работы трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» при несимметричном характере нагрузки, в том числе принцип компенсации симметричных составляющих нулевой последовательности.

Ключевые слова: трансформатор, несимметрия токов и напряжений, магнитодвижущая сила, магнитный поток.

The paper considers the features of transformer operation with the "star-delta zigzag" winding connection scheme at unbalanced load, including the compensation principle of symmetrical components of the zero sequence.

Key words: transformer, current and voltage unbalance, magnetomotive force, magnetic flux.

Введение

Несимметрия токов и напряжений отрицательно влияет на работу всех элементов электрической системы, вызывая дополнительные потери мощности, снижая срок службы электрооборудования и экономические показатели его работы. Уменьшение несимметрии можно обеспечить рациональным построением схемы электрической сети и применением специальных корректирующих устройств. Для этого авторы предлагают использовать, наряду с прочими устройствами, трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» [1-10].

Цель данных исследований – рассмотреть работу трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» с точки зрения его способности поддерживать симметрию напряжений при несимметричном характере нагрузки, а также получить математические зависимости, которые описывают снижение несимметрии напряжений вследствие компенсации составляющих нулевой последовательности.

Основная часть

Рассмотрим работу трансформатора с точки зрения его способности поддерживать симметрию напряжений при несимметричном характере нагруз-

ки. Воспользуемся методом симметричных составляющих, сущность которого состоит в том, что несимметричную систему токов, напряжений и потоков одинаковой частоты можно представить в виде трех симметричных систем: прямой, обратной и нулевой последовательности. При этом сопротивления одних и тех же элементов электрических систем различны для разных последовательностей, и они являются, соответственно, сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательности.

При исследовании примем допущения:

1. Трансформатор запитан от источника бесконечной мощности, и напряжение питания изменяется по синусоидальному закону.

2. Трансформатор является линейным элементом электрической сети.

При работе трансформатора на несимметричную нагрузку фазные напряжения его первичной обмотки, соединенной в звезду без нулевого провода (рис. 1), могут содержать составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\underline{U}_A = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0};$$

$$\underline{U}_B = \underline{U}_{B1} + \underline{U}_{B2} + \underline{U}_{B0};$$

$$\underline{U}_C = \underline{U}_{C1} + \underline{U}_{C2} + \underline{U}_{C0};$$

(1)

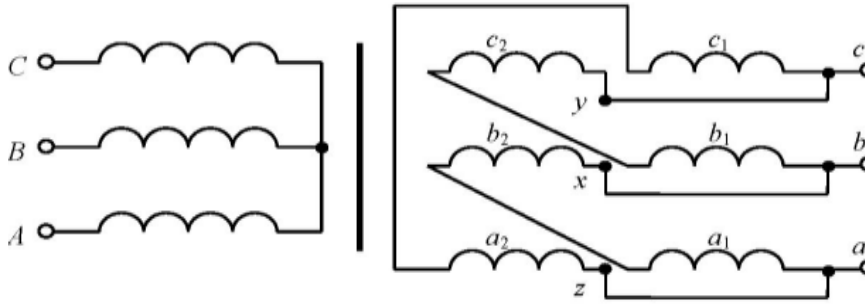


Рисунок 1. Схема соединения обмоток трехфазного трансформатора «звезда-треугольник с зигзагом»

где $\underline{U}_{A1}, \underline{U}_{B1}, \underline{U}_{C1}$ — напряжения прямой последовательности фаз «А», «В», «С» первичной обмотки, В;
 $\underline{U}_{A2}, \underline{U}_{B2}, \underline{U}_{C2}$ — напряжения обратной последовательности фаз «А», «В», «С» первичной обмотки, В;
 $\underline{U}_{A0}, \underline{U}_{B0}, \underline{U}_{C0}$ — напряжения нулевой последовательности фаз «А», «В», «С» первичной обмотки, В.

В первичной обмотке нет путей для протекания токов нулевой последовательности, и они равны нулю

$$\begin{aligned} \underline{I}_{A0} &= 0; \\ \underline{I}_{B0} &= 0; \\ \underline{I}_{C0} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Фазные токи первичной обмотки равны сумме составляющих прямой и обратной последовательности

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2}; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2}; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\underline{I}_{A1}, \underline{I}_{B1}, \underline{I}_{C1}$ — токи прямой последовательности фаз «А», «В», «С» первичной обмотки, А;
 $\underline{I}_{A2}, \underline{I}_{B2}, \underline{I}_{C2}$ — токи обратной последовательности фаз «А», «В», «С» первичной обмотки, А.

При этом система фазных токов первичной обмотки является уравновешенной, а их сумма равна нулю

$$\begin{aligned} \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C &= \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} + \\ &+ \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора могут содержать составляющие всех последовательностей

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} + \underline{U}_{a0}; \\ \underline{U}_b &= \underline{U}_{b1} + \underline{U}_{b2} + \underline{U}_{b0}; \\ \underline{U}_c &= \underline{U}_{c1} + \underline{U}_{c2} + \underline{U}_{c0}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\underline{U}_{a1}, \underline{U}_{b1}, \underline{U}_{c1}$ — напряжения прямой последовательности фаз «а», «b», «с» вторичной обмотки, В;
 $\underline{U}_{a2}, \underline{U}_{b2}, \underline{U}_{c2}$ — напряжения обратной последовательности фаз «а», «b», «с» вторичной обмотки, В;

$\underline{U}_{a0}, \underline{U}_{b0}, \underline{U}_{c0}$ — напряжения нулевой последовательности фаз «а», «b», «с» вторичной обмотки, В.

Фазные токи вторичной обмотки также могут содержать составляющие всех последовательностей

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= \underline{I}_{a1} + \underline{I}_{a2} + \underline{I}_{a0}; \\ \underline{I}_b &= \underline{I}_{b1} + \underline{I}_{b2} + \underline{I}_{b0}; \\ \underline{I}_c &= \underline{I}_{c1} + \underline{I}_{c2} + \underline{I}_{c0}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\underline{I}_{a1}, \underline{I}_{b1}, \underline{I}_{c1}$ — токи прямой последовательности фаз «а», «b», «с» вторичной обмотки, А;

$\underline{I}_{a2}, \underline{I}_{b2}, \underline{I}_{c2}$ — токи обратной последовательности фаз «а», «b», «с» вторичной обмотки, А;

$\underline{I}_{a0}, \underline{I}_{b0}, \underline{I}_{c0}$ — токи нулевой последовательности фаз «а», «b», «с» вторичной обмотки, А.

Токи прямой и обратной последовательности протекают по вторичным фазным обмоткам и замыкаются через нагрузку трансформатора. Они уравновешены, а их сумма равна нулю

$$\underline{I}_{a1} + \underline{I}_{a2} + \underline{I}_{b1} + \underline{I}_{b2} + \underline{I}_{c1} + \underline{I}_{c2} = 0. \quad (7)$$

Составляющие нулевой последовательности могут протекать по вторичной обмотке трансформатора, соединенной в треугольник, не выходя в линии. Они равны и одинаково направлены во всех трех фазах

$$\underline{I}_{a0} = \underline{I}_{b0} = \underline{I}_{c0}. \quad (8)$$

На основании второго закона Кирхгофа для первичной обмотки фазы «А» справедливо выражение

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} = -\underline{E}_{A1} - \\ &- \underline{E}_{A2} - \underline{E}_{A0} + \underline{I}_{A1} \underline{Z}_{11} + \underline{I}_{A2} \underline{Z}_{12}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\underline{E}_{A1}, \underline{E}_{A2}, \underline{E}_{A0}$ — электродвижущие силы (ЭДС) прямой, обратной и нулевой последовательности фазы «А» первичной обмотки, создаваемые основным магнитным потоком, В;

$\underline{Z}_{11}, \underline{Z}_{12}$ — полные сопротивления токам прямой и обратной последовательностей первичных фазных обмоток, Ом.

Из выражения (9) определим соотношения составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности фазы «А» первичной обмотки

$$\underline{U}_{A1} = -\underline{E}_{A1} + \underline{I}_{A1} \underline{Z}_{11}; \quad (10)$$

$$\underline{U}_{A2} = -\underline{E}_{A2} + \underline{I}_{A2} \underline{Z}_{12}; \quad (11)$$

$$\underline{U}_{A0} = -\underline{E}_{A0}. \quad (12)$$

Для вторичной обмотки фазы «а» справедливо выражение

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} + \underline{U}_{a0} = \underline{E}_{a1} + \underline{E}_{a2} + \underline{E}_{a0} - \\ &- \underline{I}_{a1} \underline{Z}_{(2-3)1} - \underline{I}_{a2} \underline{Z}_{(2-3)2} - \underline{I}_{a0} \underline{Z}_{(2-3)0}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\underline{E}_{a1}, \underline{E}_{a2}, \underline{E}_{a0}$ – ЭДС прямой, обратной и нулевой последовательности фазы «а» вторичной обмотки, создаваемые основным магнитным потоком, В;

$\underline{Z}_{(2-3)1}, \underline{Z}_{(2-3)2}, \underline{Z}_{(2-3)0}$ – полные сопротивления токам прямой, обратной и нулевой последовательностей вторичных фазных обмоток, Ом.

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{(2-3)1} &= \underline{Z}_{21} + \underline{Z}_{31}; \\ \underline{Z}_{(2-3)2} &= \underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{32}; \\ \underline{Z}_{(2-3)0} &= \underline{Z}_{20} + \underline{Z}_{30}, \end{aligned} \quad (14)$$

где $\underline{Z}_{21}, \underline{Z}_{22}, \underline{Z}_{20}$ – полные сопротивления половин a_1, b_1, c_1 вторичных фазных обмоток соответственно токам прямой, обратной и нулевой последовательности, Ом;

$\underline{Z}_{31}, \underline{Z}_{32}, \underline{Z}_{30}$ – полные сопротивления половин a_2, b_2, c_2 вторичных фазных обмоток соответственно токам прямой, обратной и нулевой последовательности, Ом.

Из выражения (13) определим соотношения составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности фазы «а» вторичной обмотки

$$\begin{aligned} \underline{U}_{a1} &= \underline{E}_{a1} - \underline{I}_{a1} \underline{Z}_{(2-3)1}; \\ \underline{U}_{a2} &= \underline{E}_{a2} - \underline{I}_{a2} \underline{Z}_{(2-3)2}; \\ \underline{U}_{a0} &= \underline{E}_{a0} - \underline{I}_{a0} \underline{Z}_{(2-3)0}. \end{aligned} \quad (15)$$

Так как составляющие нулевой последовательности фазных токов первичной обмотки i_{A0}, i_{B0}, i_{C0} равны нулю, то создаваемые ими магнитодвижущие силы (МДС) также равны нулю (рис. 2)

$$\begin{aligned} i_{A0} W_1 &= 0; \\ i_{B0} W_1 &= 0; \\ i_{C0} W_1 &= 0, \end{aligned} \quad (16)$$

где W_1 – количество витков в одной фазе первичной обмотки, шт.

Токи нулевой последовательности, протекая по

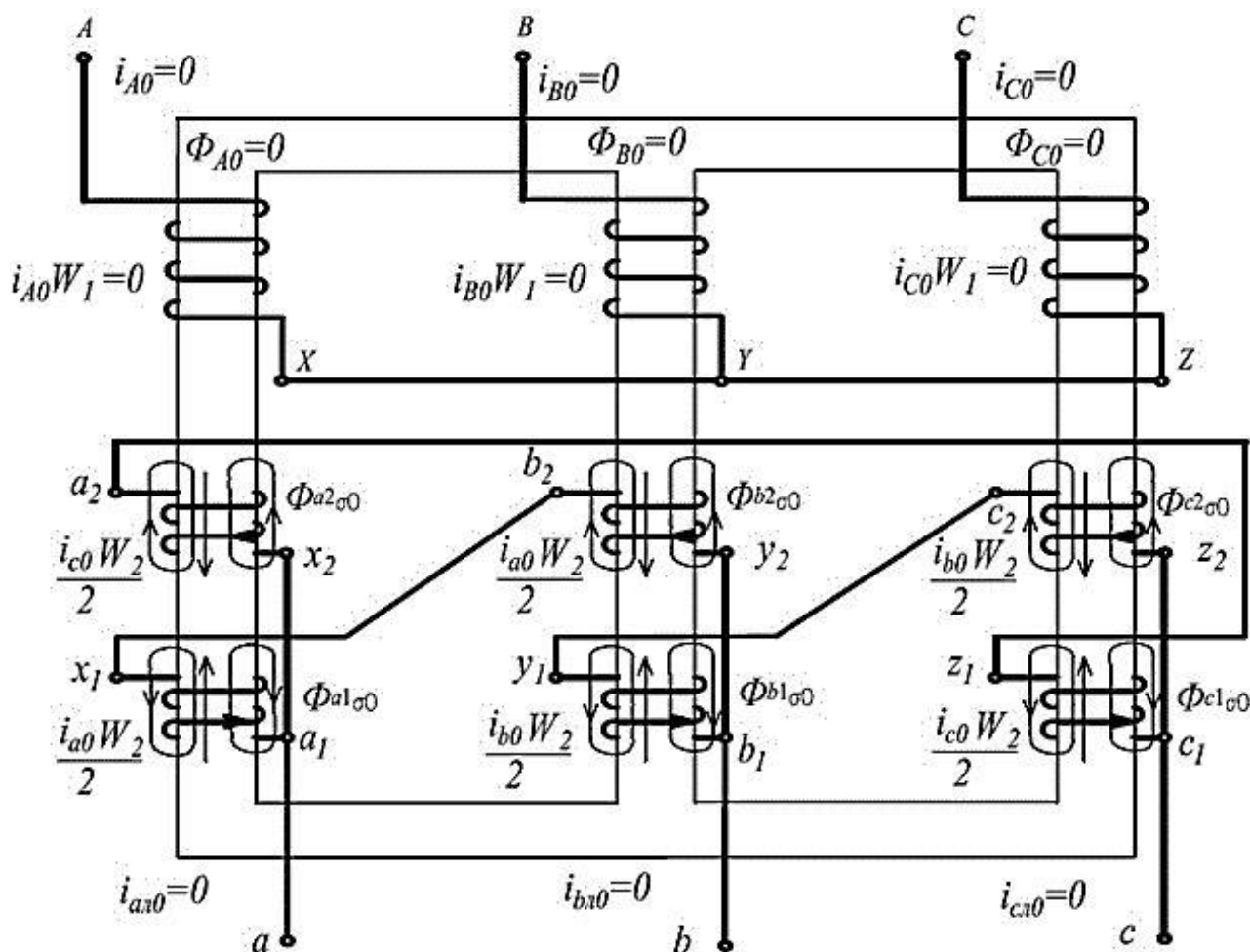


Рисунок 2. Схема распределения МДС и магнитных потоков нулевой последовательности в трехфазном трансформаторе «звезда-треугольник с зигзагом»

вторичным фазным обмоткам внутри треугольника, создадут равные между собой по величине МДС половин обмоток $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$

$$i_{a0} \frac{W_2}{2} = i_{b0} \frac{W_2}{2} = i_{c0} \frac{W_2}{2}, \quad (17)$$

где W_2 – количество витков в одной фазе вторичной обмотки, шт.

С учетом направления намотки и маркировки выводов токи нулевой последовательности обтекают половины фаз вторичных обмоток a_1, b_1, c_1 и a_2, b_2, c_2 , расположенных на каждом из стержней магнитопровода, в противоположных направлениях (рис. 2). МДС нулевой последовательности в стержнях фаз «А», «В», «С» будут равны

$$\begin{aligned} f_{A0} &= 0 + i_{a0} \frac{W_2}{2} - i_{c0} \frac{W_2}{2} = i_{a0} \frac{W_2}{2} - i_{a0} \frac{W_2}{2} = 0; \\ f_{B0} &= 0 + i_{b0} \frac{W_2}{2} - i_{a0} \frac{W_2}{2} = i_{a0} \frac{W_2}{2} - i_{a0} \frac{W_2}{2} = 0; \\ f_{C0} &= 0 + i_{c0} \frac{W_2}{2} - i_{b0} \frac{W_2}{2} = i_{a0} \frac{W_2}{2} - i_{a0} \frac{W_2}{2} = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Происходит компенсация МДС нулевой последовательности, а их магнитные потоки в стержнях магнитопровода будут равны нулю

$$\begin{aligned} \Phi_{A0} &= \frac{f_{A0}}{R_{A\mu 0}} = 0; \\ \Phi_{B0} &= \frac{f_{B0}}{R_{B\mu 0}} = 0; \\ \Phi_{C0} &= \frac{f_{C0}}{R_{C\mu 0}} = 0, \end{aligned} \quad (19)$$

где $R_{A\mu 0}, R_{B\mu 0}, R_{C\mu 0}$ – сопротивления магнитных цепей соответствующих фаз потокам нулевой последовательности, Гн^{-1} .

Вторичная обмотка самостоятельно уравнивает свои намагничивающие силы нулевой последовательности, устраняя процесс дополнительного подмагничивания ими магнитопровода.

Могут возникать только потоки рассеяния $\Phi_{a1\sigma 0}, \Phi_{a2\sigma 0}, \Phi_{b1\sigma 0}, \Phi_{b2\sigma 0}, \Phi_{c1\sigma 0}, \Phi_{c2\sigma 0}$ (рис. 2), которые тем меньше, чем ближе расположены друг к другу части вторичной обмотки.

ЭДС, создаваемые магнитными потоками нулевой последовательности в обмотках, также будут равны нулю

$$e_{A0} = -W_1 \frac{d\Phi_{A0}}{dt} = 0; e_{a0} = -W_2 \frac{d\Phi_{A0}}{dt} = 0;$$

$$\begin{aligned} e_{B0} &= -W_1 \frac{d\Phi_{B0}}{dt} = 0; e_{b0} = -W_2 \frac{d\Phi_{B0}}{dt} = 0; \\ e_{C0} &= -W_1 \frac{d\Phi_{C0}}{dt} = 0; e_{c0} = -W_2 \frac{d\Phi_{C0}}{dt} = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Следовательно, трансформатор не будет генерировать напряжения нулевой последовательности в питающую сеть, так как с учетом выражения (12)

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A0} &= -\underline{E}_{A0} = 0; \\ \underline{U}_{B0} &= -\underline{E}_{B0} = 0; \\ \underline{U}_{C0} &= -\underline{E}_{C0} = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Искажение симметрии фазных напряжений первичной обмотки будет обусловлено только составляющими обратной последовательности. С учетом выражений (9) и (21) первичные фазные напряжения равны

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} = -\underline{E}_{A1} - \underline{E}_{A2} + \underline{I}_{A1} \underline{Z}_{11} + \underline{I}_{A2} \underline{Z}_{12}; \\ \underline{U}_B &= \underline{U}_{B1} + \underline{U}_{B2} = -\underline{E}_{B1} - \underline{E}_{B2} + \underline{I}_{B1} \underline{Z}_{11} + \underline{I}_{B2} \underline{Z}_{12}; \\ \underline{U}_C &= \underline{U}_{C1} + \underline{U}_{C2} = -\underline{E}_{C1} - \underline{E}_{C2} + \underline{I}_{C1} \underline{Z}_{11} + \underline{I}_{C2} \underline{Z}_{12}. \end{aligned} \quad (22)$$

Напряжения нулевой последовательности вторичной обмотки будут вызваны только падениями напряжений от соответствующих токов на сопротивлениях фаз

$$\begin{aligned} \underline{U}_{a0} &= 0 - \underline{I}_{a0} \underline{Z}_{(2-3)0} = -\underline{I}_{a0} \underline{Z}_{(2-3)0}; \\ \underline{U}_{b0} &= 0 - \underline{I}_{b0} \underline{Z}_{(2-3)0} = -\underline{I}_{b0} \underline{Z}_{(2-3)0}; \\ \underline{U}_{c0} &= 0 - \underline{I}_{c0} \underline{Z}_{(2-3)0} = -\underline{I}_{c0} \underline{Z}_{(2-3)0}. \end{aligned} \quad (23)$$

Вторичные фазные напряжения будут равны

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} + \underline{U}_{a0} = \underline{E}_{a1} + \underline{E}_{a2} - \\ &\quad - \underline{I}_{a1} \underline{Z}_{(2-3)1} - \underline{I}_{a2} \underline{Z}_{(2-3)2} - \underline{I}_{a0} \underline{Z}_{(2-3)0}; \\ \underline{U}_b &= \underline{U}_{b1} + \underline{U}_{b2} + \underline{U}_{b0} = \underline{E}_{b1} + \underline{E}_{b2} - \\ &\quad - \underline{I}_{b1} \underline{Z}_{(2-3)1} - \underline{I}_{b2} \underline{Z}_{(2-3)2} - \underline{I}_{b0} \underline{Z}_{(2-3)0}; \\ \underline{U}_c &= \underline{U}_{c1} + \underline{U}_{c2} + \underline{U}_{c0} = \underline{E}_{c1} + \underline{E}_{c2} - \\ &\quad - \underline{I}_{c1} \underline{Z}_{(2-3)1} - \underline{I}_{c2} \underline{Z}_{(2-3)2} - \underline{I}_{c0} \underline{Z}_{(2-3)0}. \end{aligned} \quad (24)$$

Каждая из составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности вторичных напряжений будет равна сумме соответствующих значений половин вторичных фазных обмоток. В частности, для фазы «а»

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}'_{a1} + \underline{U}'_{b2} = \underline{U}_{a11} + \underline{U}_{b21} + \\ &\quad + \underline{U}_{a12} + \underline{U}_{b22} + \underline{U}_{a10} + \underline{U}_{b20} = \\ &= \underline{E}_{a11} + \underline{E}_{b21} + \underline{E}_{a12} + \underline{E}_{b22} - \\ &\quad - \underline{I}_{a1} \underline{Z}_{21} - \underline{I}_{a1} \underline{Z}_{31} - \underline{I}_{a2} \underline{Z}_{22} - \end{aligned}$$

$$-I_{a2}Z_{32} - I_{a0}Z_{20} - I_{a0}Z_{30}, \quad (25)$$

где $\underline{U}'_{a1}, \underline{U}'_{b2}$ – напряжения половин a_1 и b_2 вторичной обмотки фазы «а», В;

$\underline{U}_{a11}, \underline{U}_{a12}, \underline{U}_{a10}$ – напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности половины a_1 вторичной обмотки фазы «а», В;

$\underline{U}_{b21}, \underline{U}_{b22}, \underline{U}_{b20}$ – напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности половины b_2 вторичной обмотки фазы «а», В;

$\underline{E}_{a11}, \underline{E}_{a12}$ – ЭДС прямой и обратной последовательности половины a_1 вторичной обмотки фазы «а», В;

$\underline{E}_{b21}, \underline{E}_{b22}$ – ЭДС прямой и обратной последовательности половины b_2 вторичной обмотки фазы «а», В.

Тогда для составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности половин a_1 и b_2 вторичной обмотки фазы «а» будут справедливы соотношения

$$\begin{aligned} \underline{U}_{a11} &= \underline{E}_{a11} - I_{a1}Z_{21}; \\ \underline{U}_{b21} &= \underline{E}_{b21} - I_{a1}Z_{31}; \\ \underline{U}_{a12} &= \underline{E}_{a12} - I_{a2}Z_{22}; \\ \underline{U}_{b22} &= \underline{E}_{b22} - I_{a2}Z_{32}; \end{aligned} \quad (26)$$

$$\underline{U}_{a10} = -I_{a0}Z_{20};$$

$$\underline{U}_{b20} = -I_{a0}Z_{30}.$$

Для половин b_1 и c_2 фазы «b» вторичной обмотки

$$\begin{aligned} \underline{U}_{b11} &= \underline{E}_{b11} - I_{b1}Z_{21}; \\ \underline{U}_{c21} &= \underline{E}_{c21} - I_{b1}Z_{31}; \\ \underline{U}_{b12} &= \underline{E}_{b12} - I_{b2}Z_{22}; \\ \underline{U}_{c22} &= \underline{E}_{c22} - I_{b2}Z_{32}; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\underline{U}_{b10} = -I_{b0}Z_{20};$$

$$\underline{U}_{c20} = -I_{b0}Z_{30}.$$

Для половин c_1 и a_2 фазы «с» вторичной обмотки

$$\begin{aligned} \underline{U}_{c11} &= \underline{E}_{c11} - I_{c1}Z_{21}; \\ \underline{U}_{a21} &= \underline{E}_{a21} - I_{c1}Z_{31}; \\ \underline{U}_{c12} &= \underline{E}_{c12} - I_{c2}Z_{22}; \\ \underline{U}_{a22} &= \underline{E}_{a22} - I_{c2}Z_{32}; \end{aligned} \quad (28)$$

$$\underline{U}_{c10} = -I_{c0}Z_{20};$$

$$\underline{U}_{a20} = -I_{c0}Z_{30}.$$

Если первичные обмотки и половины вторичных обмоток, размещенные на одном стержне, рассматривать как обмотки трехобмоточного трансформатора,

то на основании выражений (10), (11), (21), (26)-(28) получим его схемы замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательности. На рисунках 3-5 представлены схемы замещения для обмоток, расположенных на стержне магнитопровода фазы «А». Стрелками показаны положительные направления напряжений, токов и ЭДС.

Для обмоток фазы «А» будет следующее соотношение составляющих прямой и обратной последовательностей первичной и вторичной стороны:

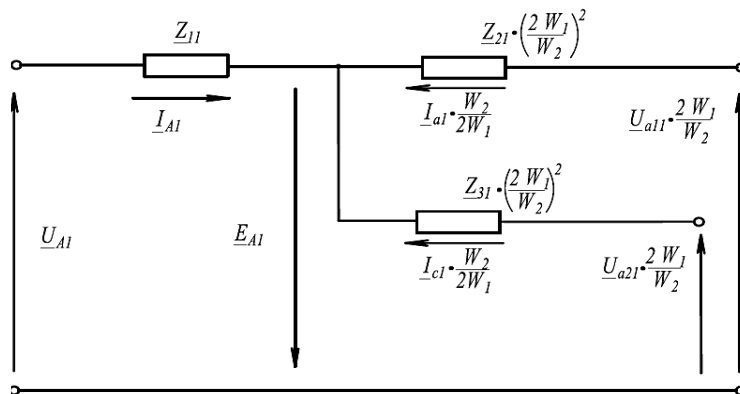


Рисунок 3. Схема замещения трансформатора «звезда-треугольник с зигзагом» для токов прямой последовательности

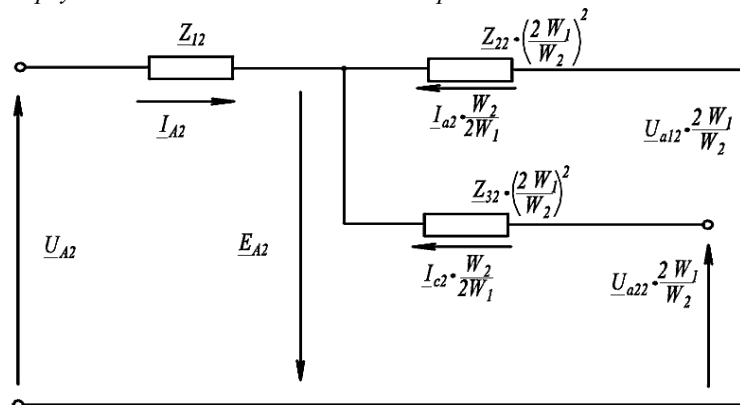


Рисунок 4. Схема замещения трансформатора «звезда-треугольник с зигзагом» для токов обратной последовательности

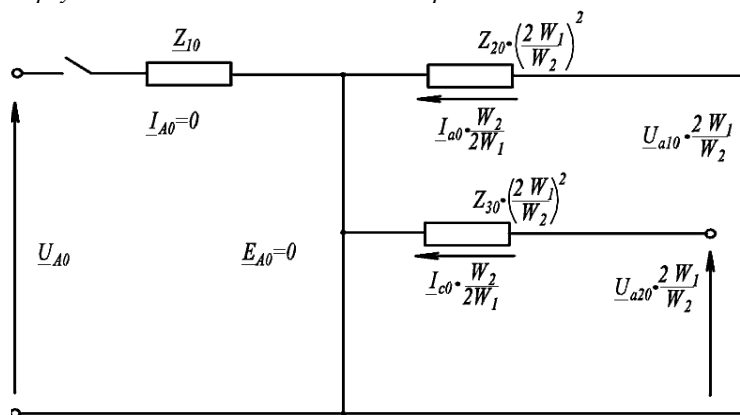


Рисунок 5. Схема замещения трансформатора «звезда-треугольник с зигзагом» для токов нулевой последовательности

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A1} - \underline{I}_{A1} \underline{Z}_{11} &= -\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a1} - \frac{W_2}{W_1} \underline{I}_{a1} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 Z_{(2-3)1}; \\ \underline{U}_{A2} - \underline{I}_{A2} \underline{Z}_{12} &= -\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a2} - \frac{W_2}{W_1} \underline{I}_{a2} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 Z_{(2-3)2}. \end{aligned} \quad (29)$$

Системы токов прямой и обратной последовательности трансформируются с вторичной стороны на первичную и наоборот, и являются уравновешенными.

Сопротивления короткого замыкания трансформатора токам прямой и обратной последовательностей равны

$$\begin{aligned} Z_{K1} &= Z_{11} + \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 Z_{(2-3)1}; \\ Z_{K2} &= Z_{12} + \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 Z_{(2-3)2}. \end{aligned} \quad (30)$$

С учетом того, что

$$\begin{aligned} \frac{W_2}{W_1} I_{ma1} &= I_{mA1}; \\ \frac{W_2}{W_1} I_{ma2} &= I_{mA2}, \end{aligned} \quad (31)$$

получим

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A1} - \underline{I}_{A1} \underline{Z}_{K1} &= -\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a1}; \\ \underline{U}_{A2} - \underline{I}_{A2} \underline{Z}_{K2} &= -\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a2}. \end{aligned} \quad (32)$$

Для составляющих нулевой последовательности

$$\underline{U}_{A0} = -\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a0} - \frac{W_2}{W_1} \underline{I}_{a0} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 Z_{(2-3)0} = 0, \quad (33)$$

откуда

$$-\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a0} = \frac{W_2}{W_1} \underline{I}_{a0} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 Z_{(2-3)0}. \quad (34)$$

Сложив выражения (32) и (34), получим

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= -\frac{W_2}{W_1} (\underline{U}_{A1} - \underline{U}_{A2} + \underline{I}_{A1} \underline{Z}_{K1} + \underline{I}_{A2} \underline{Z}_{K2}) - \\ & - \underline{I}_{a0} Z_{(2-3)0}. \end{aligned} \quad (35)$$

Аналогично определим вторичные напряжения фаз «В» и «С»

$$\begin{aligned} \underline{U}_b &= -\frac{W_2}{W_1} (\underline{U}_{B1} - \underline{U}_{B2} + \underline{I}_{B1} \underline{Z}_{K1} + \underline{I}_{B2} \underline{Z}_{K2}) - \\ & - \underline{I}_{b0} Z_{(2-3)0}; \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_c &= -\frac{W_2}{W_1} (\underline{U}_{C1} - \underline{U}_{C2} + \underline{I}_{C1} \underline{Z}_{K1} + \underline{I}_{C2} \underline{Z}_{K2}) - \\ & - \underline{I}_{c0} Z_{(2-3)0}. \end{aligned} \quad (37)$$

Заключение

1. Несимметрия напряжений трансформатора обусловлена, главным образом, составляющими прямой и обратной последовательности, которые трансформируются с первичной на вторичную сторону и наоборот, а также падениями напряжений от токов прямой и обратной последовательности на сопротивлениях обмоток, которые незначительны.

2. Снижение несимметрии напряжений происходит вследствие компенсации составляющих нулевой последовательности, а их остаточные значения обусловлены падениями напряжений от токов нулевой последовательности на сопротивлениях фаз вторичной обмотки.

3. Вторичная обмотка самостоятельно уравнивает свои намагничивающие силы нулевой последовательности, устраняя процесс дополнительного подмагничивания ими магнитопровода, что уменьшает магнитные потери в трансформаторе и повышает его КПД. При этом магнитная система трансформатора уравновешена.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трехфазный трансформатор: пат. 2244 Рес. Беларусь / А.П. Сердешнов, Г.И. Янукович, Е.А. Сердешнов, Д.Г. Янукович; заявитель Белор. гос. аграрный техн. ун-т. – № а 950299; заявл. 1995.06. 09; опубл. 30.09.1998 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1998. – № 3(18). – С. 216-217.

2. Збродыга, В.М. Улучшение показателей несинусоидальности и несимметрии напряжений в электроустановках сельскохозяйственного назначения применением трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом»: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / В.М. Збродыга. – Минск, 2010. – 20 с.

3. Прищепов, М.А. Методика расчета конструктивных параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, Г.И. Янукович // Агропанорама. – 2010. – № 5. – С. 29-33.

4. Прищепов, М.А. Технико-экономическая оптимизация параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, Г.И. Янукович // Агропанорама. – 2010. – № 6. – С. 24-30.

5. Збродыга, В.М. К вопросу повышения качества электроэнергии / В.М. Збродыга, Г.И. Янукович, А.П. Сердешнов // Агропанорама. – 2006. – № 2. – С. 9-12.

6. Янукович, Г.И. Трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом / Г.И. Янукович, В.М. Збродыга, Н.Г. Королевич // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: материалы 8-й междунар. науч.-технич. конф., Москва, 16-17 мая 2012 г.: в 5 ч. / ГНУ ВИЭСХ; редкол. А.А. Артюшин [и др.]. – М., 2012. – Ч. 1. – С. 141-145.

7. Збродыга, В.М. Анализ работы трансформатора Y/Δ с зигзагом при нелинейном характере нагрузки / В.М. Збродыга // Агропанорама. – 2005. – № 6. – С. 10-14.

8. Збродыга, В.М. Анализ работы трансформатора Y/Δ с зигзагом при несимметричном характере нагрузки / В.М. Збродыга, Г.И. Янукович, А.П. Сердешнов // Агропанорама. – 2006. – № 5. – С. 8-12.

9. Янукович, Г.И. Трансформатор Y/Δ с зигзагом как источник питания нелинейных электроприемников / Г.И. Янукович, В.М. Збродыга, А.П. Сердешнов // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: материалы 5-й междунар. науч.-технич. конф., Москва, 16-17 мая 2006 г.: в 5 ч. / ГНУ ВИЭСХ; редкол. А.А. Артюшин [и др.]. – М., 2006. – Ч. 1. – С. 274-277.

10. Збродыга, В.М. Особенности преобразования электрической энергии в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» / В.М. Збродыга, М.А. Прищепов, А.И. Зеленкевич, Г.И. Янукович // Агропанорама. – 2022. – № 5. – С. 25-33.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 12.01.2023

Автоматизированная микропроцессорная система очистки воздуха от микрофлоры на предприятиях АПК

Предназначена для очистки и обеззараживания воздуха от микрофлоры в помещениях, к которым предъявляются повышенные требования по предельному уровню содержания бактерий, вирусов плесени, грибков и других вредных микроорганизмов.



Основные технические данные

тип облучателя	закрытый (рециркуляционный)
производительность установки, м ³ /ч	900
подаваемое напряжение, V	220 ± 22
частота питания, Гц	50 ± 2
источник ультрафиолетового излучения (УФИ)	разрядная лампа высокого давления ДРТ-400
облучённость в эффективном спектральном диапазоне 220-400 нм, Вт/м ²	45 ± 15
ресурс работы УФИ (не более), ч	2500
срок службы (не менее), лет	5
управление установкой	дистанционное (пульт ДУ)
снижение обсемененности воздуха на выходе из установки	95 %

Применение установки позволяет эффективно в автоматическом режиме по заданной программе очищать воздух в производственных помещениях предприятий, к которым предъявляются повышенные требования к чистоте воздуха.