

## РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ДВОЙНОЙ ЗИГЗАГ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ» ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

**М.А. Прищепов,**

проректор по научной работе – директор НИИМЭСХ БГАТУ, докт. техн. наук, доцент

**В.М. Збродыга,**

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

**А.И. Зеленкевич,**

ст. преподаватель каф. электроснабжения БГАТУ

*В статье представлены результаты теоретических исследований работы трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке, в том числе принцип компенсации симметричных составляющих нулевой последовательности.*

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

*The article presents the results of theoretical studies of the operation of a transformer with a star-double zig-zag with zero-wire winding connection circuit under asymmetrical loading, including the principle of compensation of symmetrical components of zero sequence.*

*Keywords: transformer, asymmetry of currents and voltages, 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. В системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей авторы рассматривают возможность использования для этого трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» [1-3].

### Основная часть

Рассмотрим работу трансформатора с точки зрения его способности поддерживать симметрию напряжений при несимметричном характере нагрузки. 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, могут содержать составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0}; \\ \underline{U}_B &= \underline{U}_{B1} + \underline{U}_{B2} + \underline{U}_{B0}; \\ \underline{U}_C &= \underline{U}_{C1} + \underline{U}_{C2} + \underline{U}_{C0},\end{aligned}\tag{1}$$

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, соединенной в двойной зигзаг с нулевым проводом, могут содержать составляющие всех последовательностей, и равны:

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

где  $\underline{U}_{a1}, \underline{U}_{b1}, \underline{U}_{c1}$  – напряжения прямой последовательности фаз «а», «б», «с» вторичной обмотки, В;

$\underline{U}_{a2}, \underline{U}_{b2}, \underline{U}_{c2}$  – напряжения обратной последовательности фаз «а», «б», «с» вторичной обмотки, В;

$\underline{U}_{a0}, \underline{U}_{b0}, \underline{U}_{c0}$  – напряжения нулевой последовательности фаз «а», «б», «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», «б», «с» вторичной обмотки, А;

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

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

Токи прямой и обратной последовательности протекают по вторичным фазным обмоткам и замыкаются через нагрузку трансформатора. Их сумма в нейтральной точке вторичной стороны равна нулю:

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

Вторичные токи нулевой последовательности равны и одинаково направлены во всех трех фазах:

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

Замыкаясь через нулевой провод и нагрузку, они создают утроенный ток в нулевом проводе:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_{a0} + \underline{I}_{b0} + \underline{I}_{c0} = 3\underline{I}_{a0}. \quad (9)$$

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

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} = \\ &= -\underline{E}_{A1} - \underline{E}_{A2} - \underline{E}_{A0} + \underline{I}_{A1}\underline{Z}_{11} + \underline{I}_{A2}\underline{Z}_{12}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\underline{E}_{A1}, \underline{E}_{A2}, \underline{E}_{A0}$  – 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 (10) определим соотношения составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности фазы «А» первичной обмотки:

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

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

$$\underline{U}_{A0} = -\underline{E}_{A0}. \quad (13)$$

Для вторичной обмотки фазы «а» справедливо выражение:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} + \underline{U}_{a0} = \underline{E}_{a1} + \underline{E}_{a2} + \underline{E}_{a0} - \\ &- \underline{I}_{a1}\underline{Z}_{(2-4)1} - \underline{I}_{a2}\underline{Z}_{(2-4)2} - \underline{I}_{a0}\underline{Z}_{(2-4)0}, \end{aligned} \quad (14)$$

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;

$\underline{Z}_{(2-4)1}, \underline{Z}_{(2-4)2}, \underline{Z}_{(2-4)0}$  – полные сопротивления токам прямой, обратной и нулевой последовательностей вторичных фазных обмоток, Ом.

$$\underline{Z}_{(2-4)1} = \underline{Z}_{21} + \underline{Z}_{31} + \underline{Z}_{41};$$

$$\underline{Z}_{(2-4)2} = \underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{32} + \underline{Z}_{42}; \quad (15)$$

$$\underline{Z}_{(2-4)0} = \underline{Z}_{20} + \underline{Z}_{30} + \underline{Z}_{40},$$

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 четвертей  $a_2, b_2, c_2$  вторичных фазных обмоток соответственно токам прямой, обратной и нулевой последовательности, Ом;

$Z_{41}, Z_{42}, Z_{40}$  – полные сопротивления четвертей  $a_3, b_3, c_3$  вторичных фазных обмоток соответственно токам прямой, обратной и нулевой последовательности, Ом.

Из выражения (14) определим соотношения составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности фазы «а» вторичной обмотки:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{a1} &= \underline{E}_{a1} - \underline{I}_{a1} Z_{(2-4)1}; \\ \underline{U}_{a2} &= \underline{E}_{a2} - \underline{I}_{a2} Z_{(2-4)2}; \\ \underline{U}_{a0} &= \underline{E}_{a0} - \underline{I}_{a0} Z_{(2-4)0}. \end{aligned} \quad (16)$$

Так как составляющие нулевой последовательности фазных токов первичной обмотки  $i_{A0}, i_{B0}, i_{C0}$  равны нулю, то создаваемые ими МДС также равны нулю (рис. 1):

$$\begin{aligned} i_{A0} W_1 &= 0; \\ i_{B0} W_1 &= 0; \\ i_{C0} W_1 &= 0, \end{aligned} \quad (17)$$

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

Токи нулевой последовательности, протекая по вторичным фазным обмоткам, создают равные между собой по величине и по фазе МДС половин обмоток  $a_1, b_1, c_1$  и равные между собой МДС четвертей  $a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ :

$$\begin{aligned} i_{a0} \frac{W_2}{2} &= i_{b0} \frac{W_2}{2} = i_{c0} \frac{W_2}{2}; \\ i_{a0} \frac{W_2}{4} &= i_{b0} \frac{W_2}{4} = i_{c0} \frac{W_2}{4}, \end{aligned} \quad (18)$$

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 четвертей  $a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ , расположенных на каждом из стержней магнитопровода, в противоположных направлениях (рис. 1). МДС нулевой последовательности в стержнях фаз «А», «В», «С» будут равны:

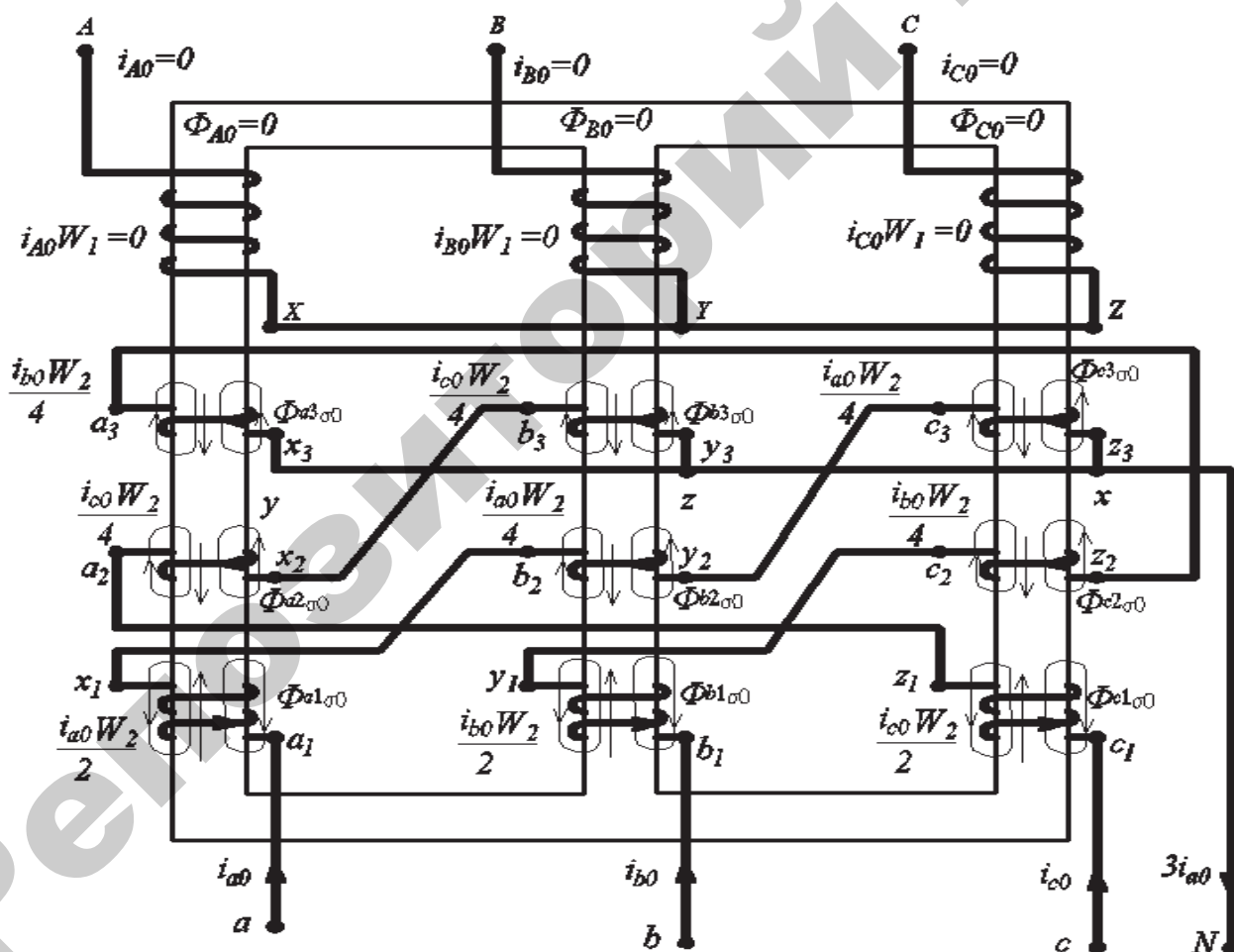


Рис. 1. Схема распределения МДС и магнитных потоков нулевой последовательности в трехфазном трансформаторе «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

$$\begin{aligned}
 f_{A0} &= 0 + i_{a0} \frac{W_2}{2} - i_{b0} \frac{W_2}{4} - i_{c0} \frac{W_2}{4} = \\
 &= i_{a0} \frac{W_2}{2} - i_{a0} \frac{W_2}{4} - i_{a0} \frac{W_2}{4} = 0; \\
 f_{B0} &= 0 + i_{b0} \frac{W_2}{2} - i_{a0} \frac{W_2}{4} - i_{c0} \frac{W_2}{4} = \\
 &= i_{a0} \frac{W_2}{2} - i_{a0} \frac{W_2}{4} - i_{a0} \frac{W_2}{4} = 0; \\
 f_{C0} &= 0 + i_{c0} \frac{W_2}{2} - i_{a0} \frac{W_2}{4} - i_{b0} \frac{W_2}{4} = \\
 &= i_{a0} \frac{W_2}{2} - i_{a0} \frac{W_2}{4} - i_{a0} \frac{W_2}{4} = 0.
 \end{aligned} \quad (19)$$

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

$$\begin{aligned}
 \Phi_{A0} &= \frac{f_{A0}}{R_{A\mu 0}} = 0; \\
 \Phi_{B0} &= \frac{f_{B0}}{R_{B\mu 0}} = 0; \\
 \Phi_{C0} &= \frac{f_{C0}}{R_{C\mu}} = 0,
 \end{aligned} \quad (20)$$

где  $R_{A\mu(3n+3)}, R_{B\mu(3n+3)}, R_{C\mu(3n+3)}$  — сопротивления магнитных цепей соответствующих фаз потока нулевой последовательности,  $\text{Гн}^{-1}$ .

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

Могут возникать только потоки рассеяния

$\Phi_{a1\sigma 0}, \Phi_{a2\sigma 0}, \Phi_{a3\sigma 0}, \Phi_{b1\sigma 0}, \Phi_{b2\sigma 0}, \Phi_{b3\sigma 0},$   
 $\Phi_{c1\sigma 0}, \Phi_{c2\sigma 0}, \Phi_{c3\sigma 0}$  (рис. 1), которые тем меньше, чем ближе расположены друг к другу части вторичной обмотки.

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

$$\begin{aligned}
 e_{A0} &= -W_1 \frac{d\Phi_{A0}}{dt} = 0; e_{a0} = -W_2 \frac{d\Phi_{A0}}{dt} = 0; \\
 e_{B0} &= -W_1 \frac{d\Phi_{B0}}{dt} = 0; e_{b0} = -W_2 \frac{d\Phi_{B0}}{dt} = 0;
 \end{aligned} \quad (21)$$

$$e_{C0} = -W_1 \frac{d\Phi_{C0}}{dt} = 0; e_{c0} = -W_2 \frac{d\Phi_{C0}}{dt} = 0.$$

Следовательно, трансформатор не будет генерировать напряжения нулевой последовательности в питающую сеть, так как с учетом выражения (13):

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{A0} &= -\underline{E}_{A0} = 0; \\
 \underline{U}_{B0} &= -\underline{E}_{B0} = 0; \\
 \underline{U}_{C0} &= -\underline{E}_{C0} = 0.
 \end{aligned} \quad (22)$$

Искажение симметрии фазных напряжений первичной обмотки будет обусловлено только составляющими обратной последовательности. С учетом выражений (10) и (22), первичные фазные напряжения равны:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_A &= \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} = -\underline{E}_{A1} - \underline{E}_{A2} + \underline{I}_{A1} \underline{Z}_{11} + \underline{I}_{A2} \underline{Z}_{12}; \\
 \underline{U}_B &= \underline{U}_{B1} + \underline{U}_{B2} = -\underline{E}_{B1} - \underline{E}_{B2} + \underline{I}_{B1} \underline{Z}_{11} + \underline{I}_{B2} \underline{Z}_{12}; \\
 \underline{U}_C &= \underline{U}_{C1} + \underline{U}_{C2} = -\underline{E}_{C1} - \underline{E}_{C2} + \underline{I}_{C1} \underline{Z}_{11} + \underline{I}_{C2} \underline{Z}_{12}.
 \end{aligned} \quad (23)$$

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

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{a0} &= 0 - \underline{I}_{a0} \underline{Z}_{(2-4)0} = -\underline{I}_{a0} \underline{Z}_{(2-4)0}; \\
 \underline{U}_{b0} &= 0 - \underline{I}_{b0} \underline{Z}_{(2-4)0} = -\underline{I}_{b0} \underline{Z}_{(2-4)0}; \\
 \underline{U}_{c0} &= 0 - \underline{I}_{c0} \underline{Z}_{(2-4)0} = -\underline{I}_{c0} \underline{Z}_{(2-4)0}.
 \end{aligned} \quad (24)$$

Так как на каждом из стержней магнитопровода четверти вторичных фазных обмоток  $a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$  намотаны встречно половинам  $a_1, b_1, c_1$ , то индуктивные составляющие их сопротивлений токам нулевой последовательности в значительной степени будут взаимно компенсироваться, и преобладает активная составляющая:

$$\underline{Z}_{(2-4)0} \approx r_{(2-4)0}. \quad (25)$$

Тогда

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{a0} &= -\underline{I}_{a0} r_{(2-4)0}; \\
 \underline{U}_{b0} &= -\underline{I}_{b0} r_{(2-4)0}; \\
 \underline{U}_{c0} &= -\underline{I}_{c0} r_{(2-4)0}.
 \end{aligned} \quad (26)$$

Вторичные фазные напряжения будут равны:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_a &= \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} + \underline{U}_{a0} = \\
 &= \underline{E}_{a1} + \underline{E}_{a2} - \underline{I}_{a1} \underline{Z}_{(2-4)1} - \underline{I}_{a2} \underline{Z}_{(2-4)2} - \underline{I}_{a0} r_{(2-4)0}; \\
 \underline{U}_b &= \underline{U}_{b1} + \underline{U}_{b2} + \underline{U}_{b0} = \\
 &= \underline{E}_{b1} + \underline{E}_{b2} - \underline{I}_{b1} \underline{Z}_{(2-4)1} - \underline{I}_{b2} \underline{Z}_{(2-4)2} - \underline{I}_{b0} r_{(2-4)0}; \\
 \underline{U}_c &= \underline{U}_{c1} + \underline{U}_{c2} + \underline{U}_{c0} = \\
 &= \underline{E}_{c1} + \underline{E}_{c2} - \underline{I}_{c1} \underline{Z}_{(2-4)1} - \underline{I}_{c2} \underline{Z}_{(2-4)2} - \underline{I}_{c0} r_{(2-4)0}.
 \end{aligned} \quad (27)$$

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

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}'_{a1} + \underline{U}'_{b2} + \underline{U}'_{c3} = \underline{U}_{a11} + \underline{U}_{b21} + \underline{U}_{c31} + \\ &+ \underline{U}_{a12} + \underline{U}_{b22} + \underline{U}_{c32} + \underline{U}_{a10} + \underline{U}_{b20} + \underline{U}_{c30} = \\ &= \underline{E}_{a11} + \underline{E}_{b21} + \underline{E}_{c31} + \underline{E}_{a12} + \underline{E}_{b22} + \underline{E}_{c32} - \\ &- \underline{I}_{a1} \underline{Z}_{21} - \underline{I}_{a1} \underline{Z}_{31} - \underline{I}_{a1} \underline{Z}_{41} - \underline{I}_{a2} \underline{Z}_{12} - \underline{I}_{a2} \underline{Z}_{32} - \\ &- \underline{I}_{a2} \underline{Z}_{42} - \underline{I}_{a0} r_{20} - \underline{I}_{a0} r_{30} - \underline{I}_{a0} r_{40}, \end{aligned} \quad (28)$$

где  $\underline{U}'_{a1}, \underline{U}'_{b2}, \underline{U}'_{c3}$  – напряжения частей  $a_1, b_2, c_3$  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 четверти  $b_2$  вторичной обмотки фазы «а», В;

$\underline{U}_{c31}, \underline{U}_{c32}, \underline{U}_{c30}$  – напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности четверти  $c_3$  вторичной обмотки фазы «а», В;

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

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

$\underline{E}_{c31}, \underline{E}_{c32}, \underline{E}_{c30}$  – ЭДС прямой, обратной и нулевой последовательности четверти  $c_3$  вторичной обмотки фазы «а», В;

$r_{20}, r_{30}, r_{40}$  – активные сопротивления частей  $a_1, b_2, c_3$  вторичной обмотки фазы «а» току нулевой последовательности, Ом.

Тогда для составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности частей  $a_1, b_2, c_3$  вторичной обмотки фазы «а» будут справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{a11} &= \underline{E}_{a11} - \underline{I}_{a1} \underline{Z}_{21}; \\ \underline{U}_{b21} &= \underline{E}_{b21} - \underline{I}_{a1} \underline{Z}_{31}; \\ \underline{U}_{c31} &= \underline{E}_{c31} - \underline{I}_{a1} \underline{Z}_{41}; \\ \underline{U}_{a12} &= \underline{E}_{a12} - \underline{I}_{a2} \underline{Z}_{22}; \\ \underline{U}_{b22} &= \underline{E}_{b22} - \underline{I}_{a2} \underline{Z}_{32}; \\ \underline{U}_{c32} &= \underline{E}_{c32} - \underline{I}_{a2} \underline{Z}_{42}; \\ \underline{U}_{a10} &= -\underline{I}_{a0} r_{20}; \\ \underline{U}_{b20} &= -\underline{I}_{a0} r_{30}; \\ \underline{U}_{c30} &= -\underline{I}_{a0} r_{40}. \end{aligned} \quad (29)$$

Аналогичным образом получим соотношения для частей вторичной обмотки фазы «b»:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{b11} &= \underline{E}_{b11} - \underline{I}_{b1} \underline{Z}_{21}; \\ \underline{U}_{c21} &= \underline{E}_{c21} - \underline{I}_{b1} \underline{Z}_{31}; \\ \underline{U}_{a31} &= \underline{E}_{a31} - \underline{I}_{b1} \underline{Z}_{41}; \\ \underline{U}_{b12} &= \underline{E}_{b12} - \underline{I}_{b2} \underline{Z}_{22}; \\ \underline{U}_{c22} &= \underline{E}_{c22} - \underline{I}_{b2} \underline{Z}_{32}; \\ \underline{U}_{a32} &= \underline{E}_{a32} - \underline{I}_{b2} \underline{Z}_{42}; \\ \underline{U}_{b10} &= -\underline{I}_{b0} r_{20}; \\ \underline{U}_{c20} &= -\underline{I}_{b0} r_{30}; \\ \underline{U}_{a30} &= -\underline{I}_{b0} r_{40}. \end{aligned} \quad (30)$$

Для частей фазы «с» вторичной обмотки:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{c11} &= \underline{E}_{c11} - \underline{I}_{c1} \underline{Z}_{21}; \\ \underline{U}_{a21} &= \underline{E}_{a21} - \underline{I}_{c1} \underline{Z}_{31}; \\ \underline{U}_{b31} &= \underline{E}_{b31} - \underline{I}_{c1} \underline{Z}_{41}; \\ \underline{U}_{c12} &= \underline{E}_{c12} - \underline{I}_{c2} \underline{Z}_{22}; \\ \underline{U}_{a22} &= \underline{E}_{a22} - \underline{I}_{c2} \underline{Z}_{32}; \\ \underline{U}_{b32} &= \underline{E}_{b32} - \underline{I}_{c2} \underline{Z}_{42}; \\ \underline{U}_{c10} &= -\underline{I}_{c0} r_{20}; \\ \underline{U}_{a20} &= -\underline{I}_{c0} r_{30}; \\ \underline{U}_{b30} &= -\underline{I}_{c0} r_{40}. \end{aligned} \quad (31)$$

Если первичные обмотки и части вторичных обмоток, размещенные на одном стержне, рассматривать как обмотки четырехобмоточного трансформатора, то основании выражений (11), (12), (22), (29)–(31) получим его схемы замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательности. На рисунках 2–4 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:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A1} - \underline{I}_{A1} \underline{Z}_{11} &= -\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a1} - \frac{W_2}{W_1} \underline{I}_{a1} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 \underline{Z}_{(2-4)1}; \\ \underline{U}_{A2} - \underline{I}_{A2} \underline{Z}_{12} &= -\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a2} - \frac{W_2}{W_1} \underline{I}_{a2} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 \underline{Z}_{(2-4)2}. \end{aligned} \quad (32)$$

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 последовательности равны:

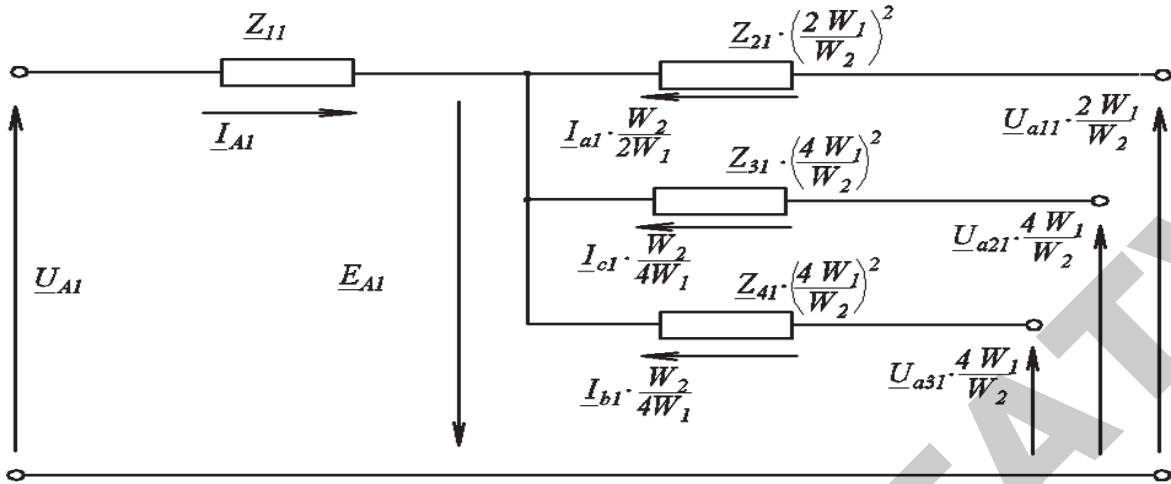


Рис. 2. Схема замещения трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» для токов прямой последовательности

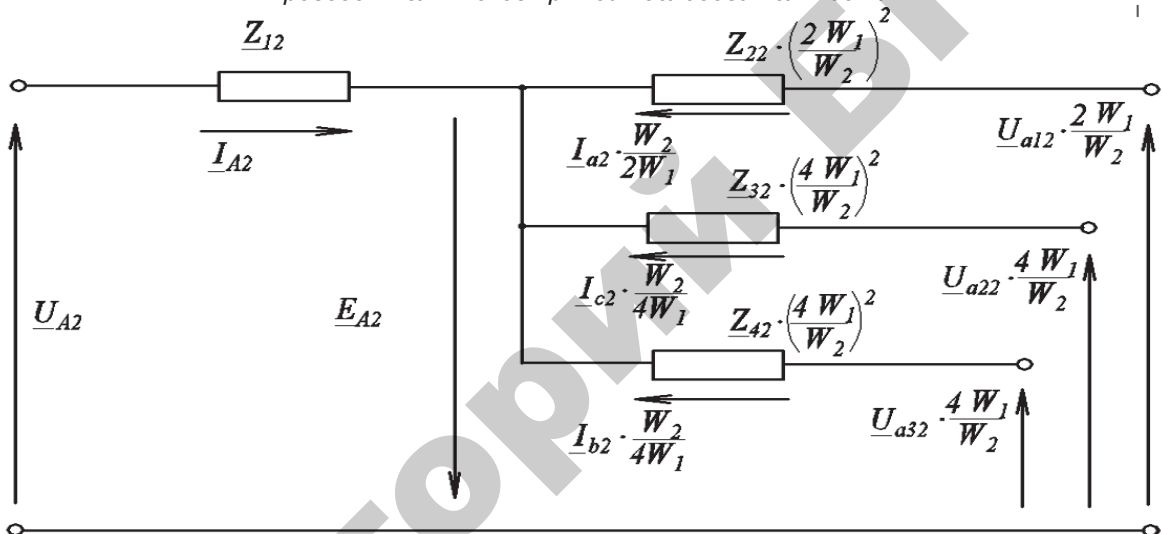


Рис. 3. Схема замещения трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» для токов обратной последовательности

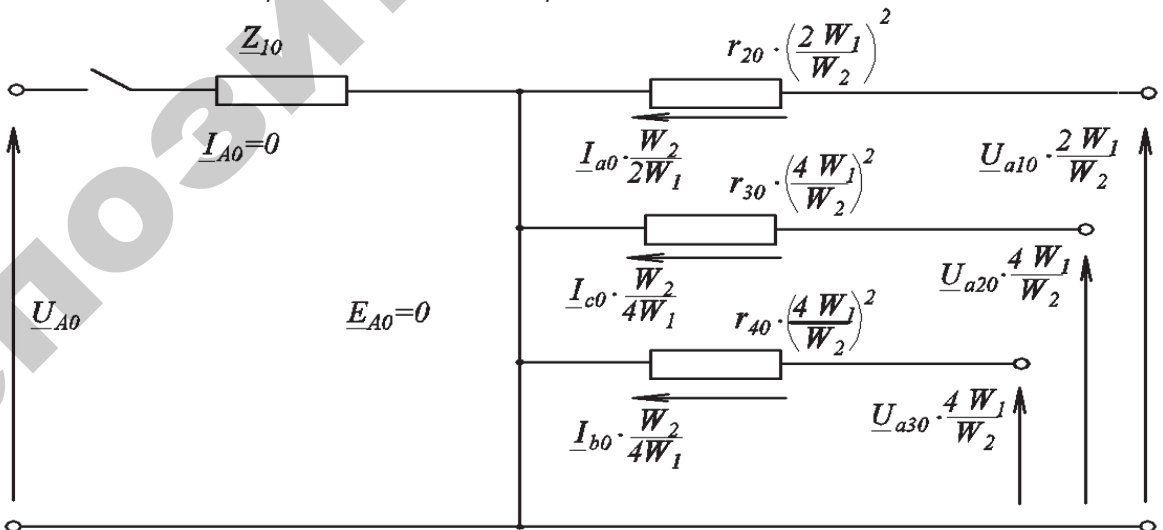


Рис. 4. Схема замещения трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» для токов нулевой последовательности

$$\begin{aligned} Z_{K1} &= Z_{11} + \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 Z_{(2-4)1}; \\ Z_{K2} &= Z_{12} + \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 Z_{(2-4)2}. \end{aligned} \quad (33)$$

С учетом, что

$$\begin{aligned} \frac{W_2}{W_1} I_{ma1} &= I_{mA1}; \\ \frac{W_2}{W_1} I_{ma2} &= I_{mA2}, \end{aligned} \quad (34)$$

получим

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A1} - \underline{I}_{A1} Z_{K1} &= -\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a1}; \\ \underline{U}_{A2} - \underline{I}_{A2} Z_{K2} &= -\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a2}. \end{aligned} \quad (35)$$

Для составляющих нулевой последовательности:

$$\underline{U}_{A0} = -\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a0} - \frac{W_2}{W_1} \underline{I}_{a0} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 r_{(2-4)0} = 0, \quad (36)$$

откуда

$$-\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a0} = \frac{W_2}{W_1} \underline{I}_{a0} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 r_{(2-4)0}. \quad (37)$$

Сложив выражения (35) и (37), получим:

$$\underline{U}_a = -\frac{W_2}{W_1} (\underline{U}_{A1} - \underline{U}_{A2} + \underline{I}_{A1} Z_{K1} + \underline{I}_{A2} Z_{K2}) - \underline{I}_{a0} r_{(2-4)0}. \quad (38)$$

Аналогичным образом определим напряжения фаз «В» и «С» вторичной стороны трансформатора:

$$\underline{U}_b = -\frac{W_2}{W_1} (\underline{U}_{B1} - \underline{U}_{B2} + \underline{I}_{B1} Z_{K1} + \underline{I}_{B2} Z_{K2}) - \underline{I}_{b0} r_{(2-4)0}; \quad (39)$$

$$\underline{U}_c = -\frac{W_2}{W_1} (\underline{U}_{C1} - \underline{U}_{C2} + \underline{I}_{C1} Z_{K1} + \underline{I}_{C2} Z_{K2}) - \underline{I}_{c0} r_{(2-4)0}. \quad (40)$$

### Заключение

1. Несимметрия напряжений трансформатора обусловлена 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 активных сопротивлениях фаз вторичной обмотки.

3. Вторичная обмотка самостоятельно уравнивает свои намагничивающие силы нулевой последовательности, устраняя процесс дополнительного подмагничивания ими магнитопровода. При этом магнитная система трансформатора уравновешена.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трехфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток: пат. 16008 Респ. Беларусь / А.И. Зеленкевич, В.М. Збродьга; заявитель Белор. гос. аграр. технич. университет. – № а 20100121; заявл. 2010.02.01; опубл. 30.06.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 3. – С. 180-181.

2. Прищепов, М.А. Особенности преобразования электрической энергии в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» / М.А. Прищепов, В.М. Збродьга, А.И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2017. – № 5. – С. 16-25.

3. Прищепов, М.А. Работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при нелинейном характере нагрузки / М.А. Прищепов, В.М. Збродьга, А.И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2018. – № 1. – С. 9-19.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 28.09.2018