

А.И. Зеленкевич, *ст. преподаватель*,
 М.А. Прищепов, *д.т.н., доцент*,
 В.М. Збродыга, *к.т.н., доцент*,
 УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь.

СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА «ЗВЕЗДА- ДВОЙНОЙ ЗИГЗАГ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ» ДЛЯ ТОКОВ ПРЯМОЙ, ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

При несимметричной нагрузке трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» [1, 2] фазные напряжения его первичной обмотки могут содержать составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей, а фазные токи - только составляющие прямой и обратной последовательности. Но так как составляющие нулевой последовательности первичной обмотки равны нулю, а вторичная обмотка самостоятельно уравнивает свои намагничивающие силы нулевой последовательности, то искажение симметрии фазных напряжений первичной обмотки будет обусловлено только составляющими обратной последовательности. Для фазы «А» справедливо соотношение:

$$\underline{U}_A = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} = -\underline{E}_{A1} - \underline{E}_{A2} + \underline{I}_{A1} \underline{Z}_{11} + \underline{I}_{A2} \underline{Z}_{12}, \quad (1)$$

где $\underline{U}_{A1}, \underline{U}_{A2}$ - напряжения прямой и обратной последовательностей фазы «А» первичной обмотки, В;

$\underline{E}_{A1}, \underline{E}_{A2}$ - ЭДС прямой и обратной последовательностей фазы «А» первичной обмотки, В;

$\underline{I}_{A1}, \underline{I}_{A2}$ - токи прямой и обратной последовательностей фазы «А» первичной обмотки, А;

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

Для составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A1} &= -\underline{E}_{A1} + \underline{I}_{A1} \underline{Z}_{11}; \\ \underline{U}_{A2} &= -\underline{E}_{A2} + \underline{I}_{A2} \underline{Z}_{12}; \\ \underline{U}_{A0} &= -\underline{E}_{A0} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\underline{U}_{A0}, \underline{E}_{A0}$ - напряжение и ЭДС нулевой последовательности фазы «А» первичной обмотки, В.

Фазные напряжения и токи вторичной обмотки могут содержать составляющие всех последовательностей. 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. При этом 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»:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}'_{a1} + \underline{U}'_{b2} + \underline{U}'_{c3} = \underline{U}_{a11} + \underline{U}_{b21} + \underline{U}_{c31} + \underline{U}_{a12} + \underline{U}_{b22} + \underline{U}_{c32} + \underline{U}_{a10} + \underline{U}_{b20} + \underline{U}_{c30} = \\ &= \underline{E}_{a11} + \underline{E}_{b21} + \underline{E}_{c31} + \underline{E}_{a12} + \underline{E}_{b22} + \underline{E}_{c32} - \underline{I}_{a1}\underline{Z}_{21} - \underline{I}_{a1}\underline{Z}_{31} - \underline{I}_{a1}\underline{Z}_{41} - \underline{I}_{a2}\underline{Z}_{12} - \underline{I}_{a2}\underline{Z}_{32} - \\ &- \underline{I}_{a2}\underline{Z}_{42} - \underline{I}_{a0}r_{20} - \underline{I}_{a0}r_{30} - \underline{I}_{a0}r_{40}, \end{aligned} \quad (3)$$

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.

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

$$\begin{aligned} \underline{U}_{a11} &= \underline{E}_{a11} - \underline{I}_{a1}\underline{Z}_{21}; & \underline{U}_{a12} &= \underline{E}_{a12} - \underline{I}_{a2}\underline{Z}_{22}; & \underline{U}_{a10} &= -\underline{I}_{a0}r_{20}; \\ \underline{U}_{b21} &= \underline{E}_{b21} - \underline{I}_{a1}\underline{Z}_{31}; & \underline{U}_{b22} &= \underline{E}_{b22} - \underline{I}_{a2}\underline{Z}_{32}; & \underline{U}_{b20} &= -\underline{I}_{a0}r_{30}; \\ \underline{U}_{c31} &= \underline{E}_{c31} - \underline{I}_{a1}\underline{Z}_{41}; & \underline{U}_{c32} &= \underline{E}_{c32} - \underline{I}_{a2}\underline{Z}_{42}; & \underline{U}_{c30} &= -\underline{I}_{a0}r_{40}. \end{aligned} \quad (4)$$

Если первичные обмотки и части вторичных обмоток, размещенные на одном стержне, рассматривать как обмотки четырехобмоточного трансформатора, то на основании приведенных выше выражений получим его схемы замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательности. На рисунках 1-3 представлены схемы замещения для обмоток, расположенных на стержне магнитопровода фазы «А». Стрелками показаны положительные направления напряжений, токов и ЭДС.

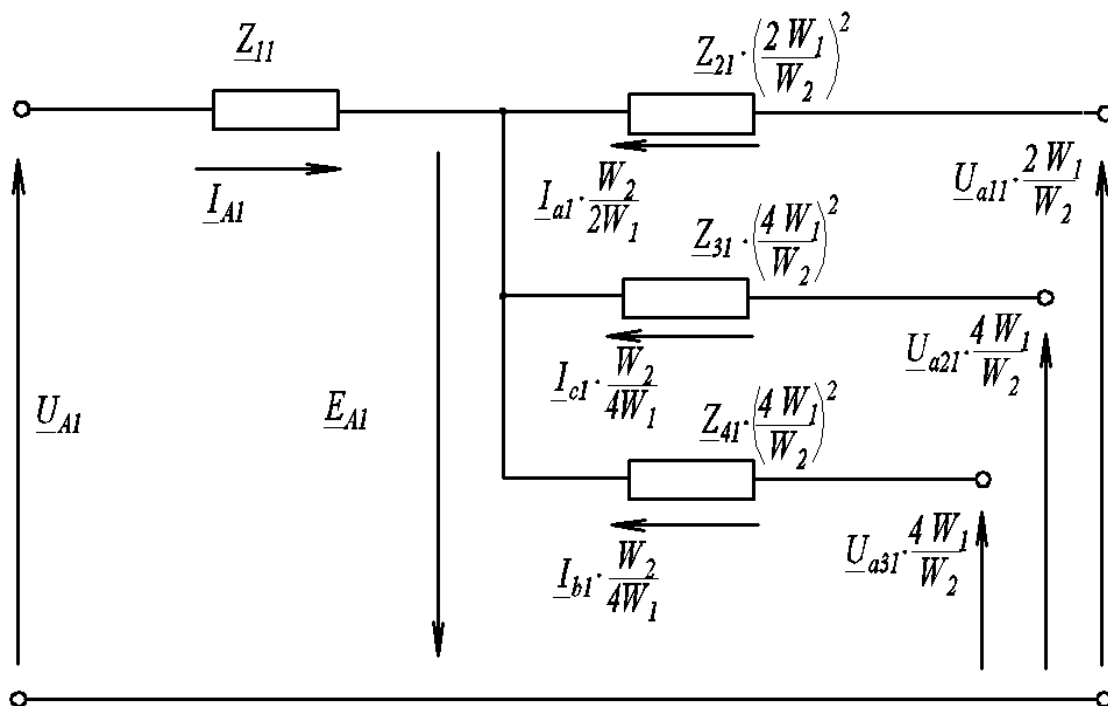


Рис. 1. Схема замещения трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» для токов прямой последовательности

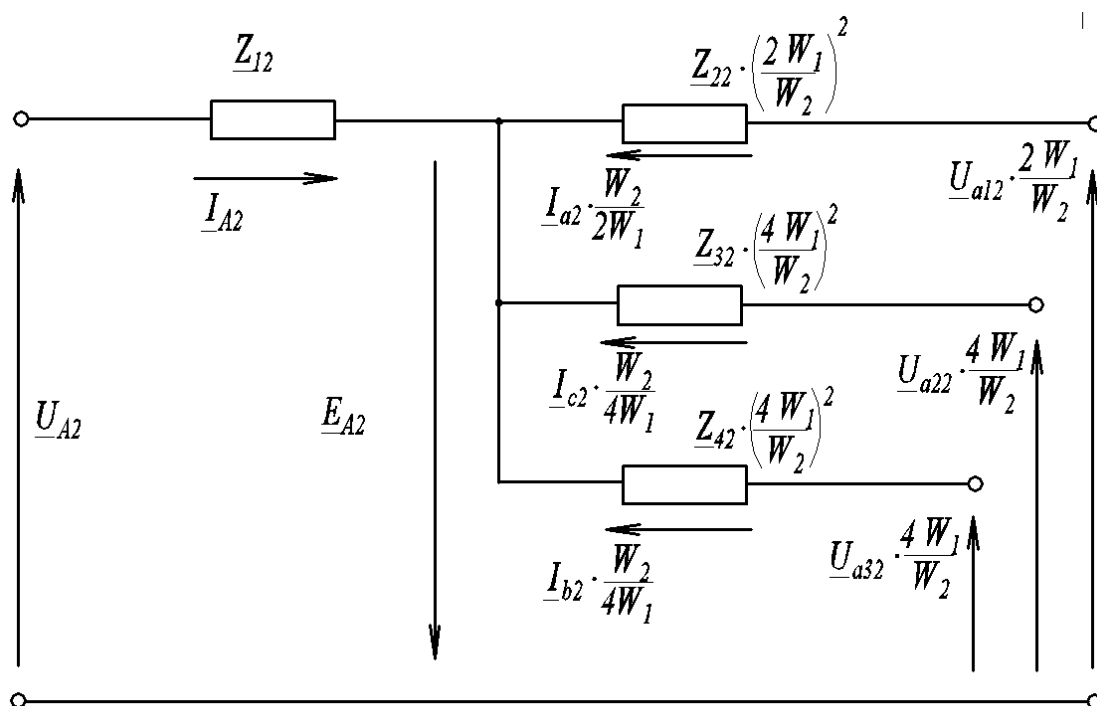


Рис. 2. Схема замещения трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» для токов обратной последовательности

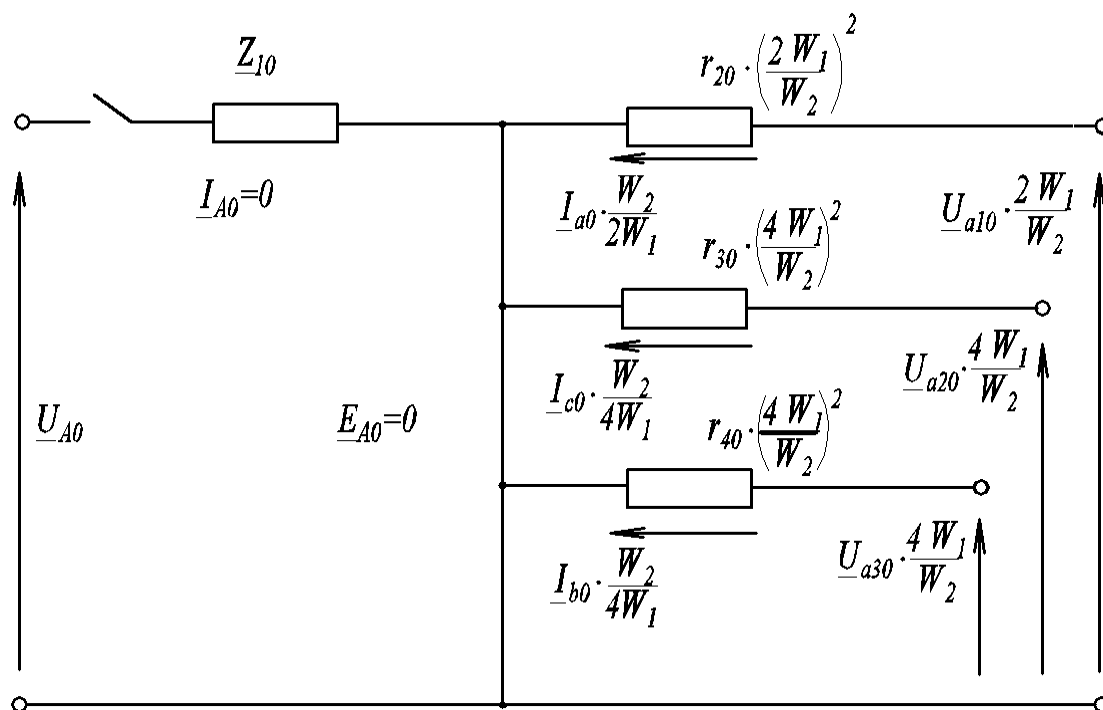


Рис. 3. Схема замещения трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» для токов нулевой последовательности

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

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A1} - \underline{I}_{A1} \underline{Z}_{11} &= -\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a1} - \frac{W_2}{W_1} \underline{I}_{a1} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 Z_{(2-4)1}; \\ \underline{U}_{A2} - \underline{I}_{A2} \underline{Z}_{12} &= -\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a2} - \frac{W_2}{W_1} \underline{I}_{a2} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 Z_{(2-4)2}. \end{aligned} \quad (5)$$

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:

$$\underline{Z}_{K1} = \underline{Z}_{11} + \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 Z_{(2-4)1}; \underline{Z}_{K2} = \underline{Z}_{12} + \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 Z_{(2-4)2}. \quad (6)$$

С учетом, что

$$\begin{aligned} \frac{W_2}{W_1} I_{ma1} &= I_{mA1}; \\ \frac{W_2}{W_1} I_{ma2} &= I_{mA2}, \end{aligned} \quad (7)$$

получим

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A1} - \underline{I}_{A1} \underline{Z}_{K1} &= -\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a1}; \\ \underline{U}_{A2} - \underline{I}_{A2} \underline{Z}_{K2} &= -\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для составляющих нулевой последовательности:

$$\underline{U}_{A0} = -\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a0} - \frac{W_2}{W_1} \underline{I}_{a0} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 r_{(2-4)0} = 0, \quad (9)$$

откуда

$$-\frac{W_1}{W_2} \underline{U}_{a0} = \frac{W_2}{W_1} \underline{I}_{a0} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 r_{(2-4)0}. \quad (10)$$

Сложив выражения (8) и (10), получим:

$$\underline{U}_a = -\frac{W_2}{W_1} (\underline{U}_{A1} - \underline{U}_{A2} + \underline{I}_{A1} \underline{Z}_{K1} + \underline{I}_{A2} \underline{Z}_{K2}) - \underline{I}_{a0} r_{(2-4)0}. \quad (11)$$

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

$$\underline{U}_b = -\frac{W_2}{W_1} (\underline{U}_{B1} - \underline{U}_{B2} + \underline{I}_{B1} \underline{Z}_{K1} + \underline{I}_{B2} \underline{Z}_{K2}) - \underline{I}_{b0} r_{(2-4)0}; \quad (12)$$

$$\underline{U}_c = -\frac{W_2}{W_1} (\underline{U}_{C1} - \underline{U}_{C2} + \underline{I}_{C1} \underline{Z}_{K1} + \underline{I}_{C2} \underline{Z}_{K2}) - \underline{I}_{c0} r_{(2-4)0}. \quad (13)$$

Вывод. Полученные схемы замещения трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» для токов прямой, обратной и нулевой последовательности, а также расчетные соотношения симметричных составляющих первичной и вторичной стороны позволяют упростить анализ сложных электромагнитных процессов при несимметричной нагрузке и могут иметь практическое применение при проектировании и эксплуатации вышеуказанного трансформатора.

Список использованных источников:

1. Патент №16008 Трехфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток: / А.И. Зеленкевич, В.М. Збродыга; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический 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. Збродыга, А.И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2017. – № 5. – С. 16-25.