

УДК 621.313

РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ДВОЙНОЙ ЗИГЗАГ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ» ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ХАРАКТЕРЕ НАГРУЗКИ

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 рассмотрены особенности работы трансформатора со специальной схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при нелинейной нагрузке, в том числе принцип компенсации высших гармоник, кратных трем.

Ключевые слова: трансформатор, высшие гармоники тока и напряжения, магнетодвижущая сила, магнитный поток.

In the article the features of the transformer operation with a special connection scheme for windings "star-double zigzag with zero conductor" are considered with nonlinear load, including the principle of compensation of multiple three higher harmonics.

Keywords: transformer, higher harmonics of current and voltage, magnetomotive force, magnetic flux.

Введение

Высшие гармоники токов и напряжений снижают эффективность процессов генерации, передачи и использования электроэнергии. Уменьшение уровней высших гармоник можно обеспечить рациональным построением схемы электрической сети и применением специальных электротехнических устройств: линейных дросселей, пассивных и активных фильтров высших гармоник, питающих трансформаторов со специальными схемами соединения обмоток. В частности, в сельских электрических сетях для этой цели возможно использование трансформаторов со схемой соединения

обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» [1, 2] (рис. 1).

Основная часть

При работе трансформатора на нелинейную трехфазную нагрузку его токи и напряжения могут содержать четные и нечетные высшие гармоники. При этом первая, четвертая, седьмая и т. д. гармоники образуют прямую последовательность. Вторая, пятая, восьмая и т. д. являются гармониками обратной последовательности. Третья и кратные трем – являются гармониками нулевой последовательности.

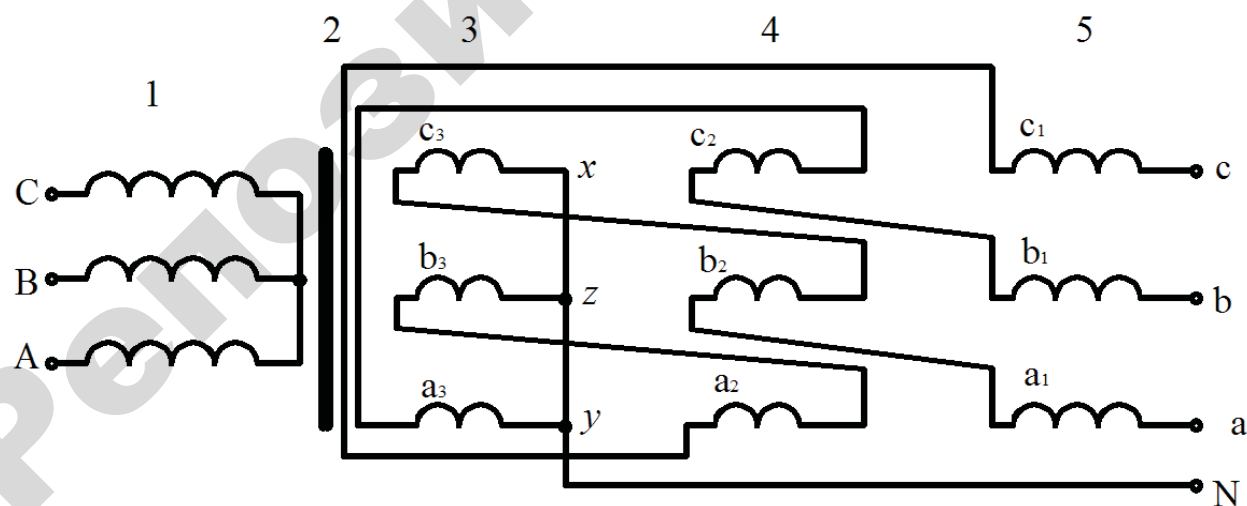


Рис. 1. Схема соединения обмоток трехфазного трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

Для упрощения приняты следующие допущения:

1. Трансформатор запитан от источника бесконечной мощности, а система его первичных напряжений симметрична независимо от режима работы.

2. Напряжение питания трансформатора изменяется по синусоидальному закону.

3. Нагрузка трансформатора носит активный характер.

При работе трансформатора на нелинейную нагрузку фазные напряжения его первичной обмотки, соединенной в звезду без нулевого провода, могут содержать гармоники всех последовательностей:

$$u_A = \sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \sum U_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}];$$

$$u_B = \sum U_{mB(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \sum U_{mB(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \sum U_{mB(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}];$$

$$u_C = \sum U_{mC(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \sum U_{mC(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \sum U_{mC(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}],$$

где $U_{mA(3n+e)}, U_{mB(3n+e)}, U_{mC(3n+e)}$ – амплитудные значения гармоник напряжений фаз «А», «В», «С» первичной обмотки соответственно, В;

ω_1 – угловая частота основной гармоники, рад/с;

φ – угол смещения гармоники по отношению к началу отсчета, рад;

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$;

e – индекс принадлежности гармоники к определенной последовательности (1 – прямая, 2 – обратная, 3 – нулевая);

При симметричной нагрузке, токи третьей и кратных трех гармоник в первичной обмотке трансформатора отсутствуют. Фазные токи равны сумме основных гармоник и высших гармонических составляющих прямой и обратной последовательности:

$$i_A = \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}];$$

$$i_B = \sum I_{mB(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \sum I_{mB(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}];$$

$$i_C = \sum I_{mC(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \sum I_{mC(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}],$$

где $I_{mA(3n+e)}, I_{mB(3n+e)}, I_{mC(3n+e)}$ – амплитуды гармоник токов фаз «А», «В», «С» первичной обмотки соответственно, А;

Токи трех фаз каждой из этих гармоник создают симметричную трехфазную систему. Они протекают по первичным фазным обмоткам, замыкаясь через источник питания, а их сумма в нейтральной точке первичной стороны равна нулю:

$$\sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \sum I_{mB(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \sum I_{mB(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \sum I_{mC(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \sum I_{mC(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] = 0.$$

В фазных напряжениях вторичной обмотки трансформатора, соединенной в двойной зигзаг с нулевым проводом, могут присутствовать все гармоники:

$$u_a = \sum U_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \sum U_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}];$$

$$u_b = \sum U_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \sum U_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \sum U_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}];$$

$$u_c = \sum U_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \sum U_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \sum U_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}],$$

где $U_{ma(3n+e)}, U_{mb(3n+e)}, U_{mc(3n+e)}$ – амплитудные значения гармоник напряжений фаз «а», «b», «с» вторичной обмотки соответственно, В.

Фазные токи вторичной обмотки могут содержать гармоники всех последовательностей, включая третью и кратные трем:

$$\begin{aligned}
 i_a &= \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 &+ \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\
 i_b &= \sum I_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum I_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + (5) \\
 &+ \sum I_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\
 i_c &= \sum I_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum I_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 &+ \sum I_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}],
 \end{aligned}$$

где $I_{ma(3n+e)}, I_{mb(3n+e)}, I_{mc(3n+e)}$ – амплитуды гармоник токов фаз «а», «b», «с» вторичной обмотки соответственно, А.

Первые и все высшие гармоники токов трех фаз вторичной обмотки прямой и обратной последовательностей образуют симметричную трехфазную систему. Они протекают по вторичным фазным обмоткам, замыкаясь через нагрузку, а их сумма в нейтральной точке вторичной стороны равна нулю:

$$\begin{aligned}
 &\sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 &+ \sum I_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum I_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + (6) \\
 &+ \sum I_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum I_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] = 0.
 \end{aligned}$$

Фазные токи третьей и кратных трем гармоник протекают по вторичным фазным обмоткам, замыкаясь через нулевой провод и нагрузку (рис. 2). Они равны и одинаково направлены во всех трех фазах в любой момент времени:

$$\begin{aligned}
 &\sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\
 &= \sum I_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = (7) \\
 &= \sum I_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}].
 \end{aligned}$$

Кратные трем гармоники, суммируясь, создают утроенный ток в нулевом проводе:

$$\begin{aligned}
 &\sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] + \\
 &+ \sum I_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] + \\
 &+ \sum I_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = (8) \\
 &= 3 \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}].
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 u_A &= - \sum E_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\
 &- \sum E_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] - \\
 &- \sum E_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] + (9) \\
 &+ \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{1(3n+1)} + \\
 &+ \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{1(3n+2)},
 \end{aligned}$$

где $E_{mA(3n+1)}, E_{mA(3n+2)}, E_{mA(3n+3)}$ – амплитудные значения ЭДС высших гармоник соответственно прямой, обратной и нулевой последовательности фазы «А» первичной обмотки, В;

$Z_{1(3n+1)}, Z_{1(3n+2)}$ – полные сопротивления фаз первичной обмотки токам высших гармоник прямой последовательности и обратной последовательности соответственно, Ом.

С учетом выражения (1) получим:

$$\begin{aligned}
 &\sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 &+ \sum U_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\
 &= - \sum E_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\
 &- \sum E_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] - \\
 &- \sum E_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] + \\
 &+ \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{1(3n+1)} + \\
 &+ \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{1(3n+2)}. (10)
 \end{aligned}$$

Из выражения (10) определим сумму высших гармоник прямой и обратной последовательностей напряжения фазы «А» первичной стороны:

$$\begin{aligned}
 &\sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] = \\
 &= - \sum E_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\
 &- \sum E_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 &+ \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{1(3n+1)} + (11)
 \end{aligned}$$

$$+ \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{1(3n+2)}.$$

Для третьей и кратных трем высших гармоник напряжения:

$$\begin{aligned} & \sum U_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = - \sum E_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]. \end{aligned} \quad (12)$$

Для вторичной обмотки справедливо выражение:

$$\begin{aligned} u_a = & \sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] - \\ & - \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{2-4(3n+1)} - \\ & - \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{2-4(3n+2)} - \\ & - \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-4(3n+3)}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $E_{ma(3n+1)}$, $E_{ma(3n+2)}$, $E_{ma(3n+3)}$ – амплитудные значения ЭДС высших гармоник прямой, обратной и нулевой последовательности фазы «а» вторичной обмотки, В;

$Z_{2-4(3n+1)}$, $Z_{2-4(3n+2)}$, $Z_{2-4(3n+3)}$ – полные сопротивления фаз вторичной обмотки токам высших гармоник прямой, обратной и нулевой последовательности соответственно, Ом.

$$\begin{aligned} Z_{2-4(3n+1)} &= Z_{2(3n+1)} + Z_{3(3n+1)} + Z_{4(3n+1)}; \\ Z_{2-4(3n+2)} &= Z_{2(3n+2)} + Z_{3(3n+2)} + Z_{4(3n+2)}; \\ Z_{2-4(3n+3)} &= Z_{2(3n+3)} + Z_{3(3n+3)} + Z_{4(3n+3)}, \end{aligned} \quad (14)$$

где $Z_{2(3n+1)}$, $Z_{2(3n+2)}$, $Z_{2(3n+3)}$ – полные сопротивления половин a_1 , b_1 , c_1 вторичных фазных обмоток токам высших гармоник соответственно прямой, обратной и нулевой последовательности, Ом;

$Z_{3(3n+1)}$, $Z_{3(3n+2)}$, $Z_{3(3n+3)}$ – полные сопротивления четвертой a_2 , b_2 , c_2 вторичных фазных обмоток токам высших гармоник соответственно прямой, обратной и нулевой последовательности, Ом;

$Z_{4(3n+1)}$, $Z_{4(3n+2)}$, $Z_{4(3n+3)}$ – полные сопротивления четвертой a_3 , b_3 , c_3 вторичных фазных обмоток токам высших гармоник соответственно прямой, обратной и нулевой последовательности, Ом.

На основании выражений (4) и (13) получим:

$$\begin{aligned} & \sum U_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = \sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & + \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] - \\ & - \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{2-4(3n+1)} - \\ & - \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{2-4(3n+2)} - \\ & - \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-4(3n+3)}. \end{aligned}$$

Из выражения (15) определим сумму высших гармоник прямой и обратной последовательности напряжения фазы «а» вторичной стороны:

$$\begin{aligned} & \sum U_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] = \\ & = \sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] - \\ & - \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{2-4(3n+1)} - \\ & - \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{2-4(3n+2)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Для третьей и кратных трем высших гармоник фазы «а» вторичной стороны:

$$\begin{aligned} & \sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] - \\ & - \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-4(3n+3)}. \end{aligned} \quad (17)$$

Так как фазные токи кратных трем высших гармоник первичной обмотки $i_{A(3n+3)}$, $i_{B(3n+3)}$, $i_{C(3n+3)}$ равны нулю, то создаваемые ими МДС также равны нулю (рис. 2):

$$\begin{aligned} i_{A(3n+3)} W_1 &= 0; \\ i_{B(3n+3)} W_1 &= 0; \\ i_{C(3n+3)} W_1 &= 0, \end{aligned} \quad (18)$$

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

Токи кратных трем гармоник равны по величине и имеют одинаковое направление во всех трех фазах вторичной обмотки в любой момент времени (рис. 2):

$$i_{a(3n+3)} = i_{b(3n+3)} = i_{c(3n+3)}. \quad (19)$$

Протекая по вторичным фазным обмоткам, они создают соответствующие МДС. С учетом выражения (19) МДС половин обмоток a_1 , b_1 , c_1 равны между собой по величине и по фазе, а МДС четвертой a_2 , b_2 , c_2 , a_3 , b_3 , c_3 – между собой:

$$\begin{aligned} i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} &= i_{b(3n+3)} \frac{W_2}{2} = i_{c(3n+3)} \frac{W_2}{2}; \\ i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{4} &= i_{b(3n+3)} \frac{W_2}{4} = i_{c(3n+3)} \frac{W_2}{4}, \end{aligned} \quad (20)$$

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

С учетом направления намотки и маркировки выводов токи гармоник 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. 2).

Учитывая выражения (18) и (19), МДС гармоник нулевой последовательности в стержнях фаз «А», «В», «С» будут равны:

$$f_{A(3n+3)} = i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{b(3n+3)} \frac{W_2}{4} - i_{c(3n+3)} \frac{W_2}{4} =$$

$$= i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{4} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{4} = 0;$$

$$f_{B(3n+3)} = i_{b(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{4} - i_{c(3n+3)} \frac{W_2}{4} =$$
(21)

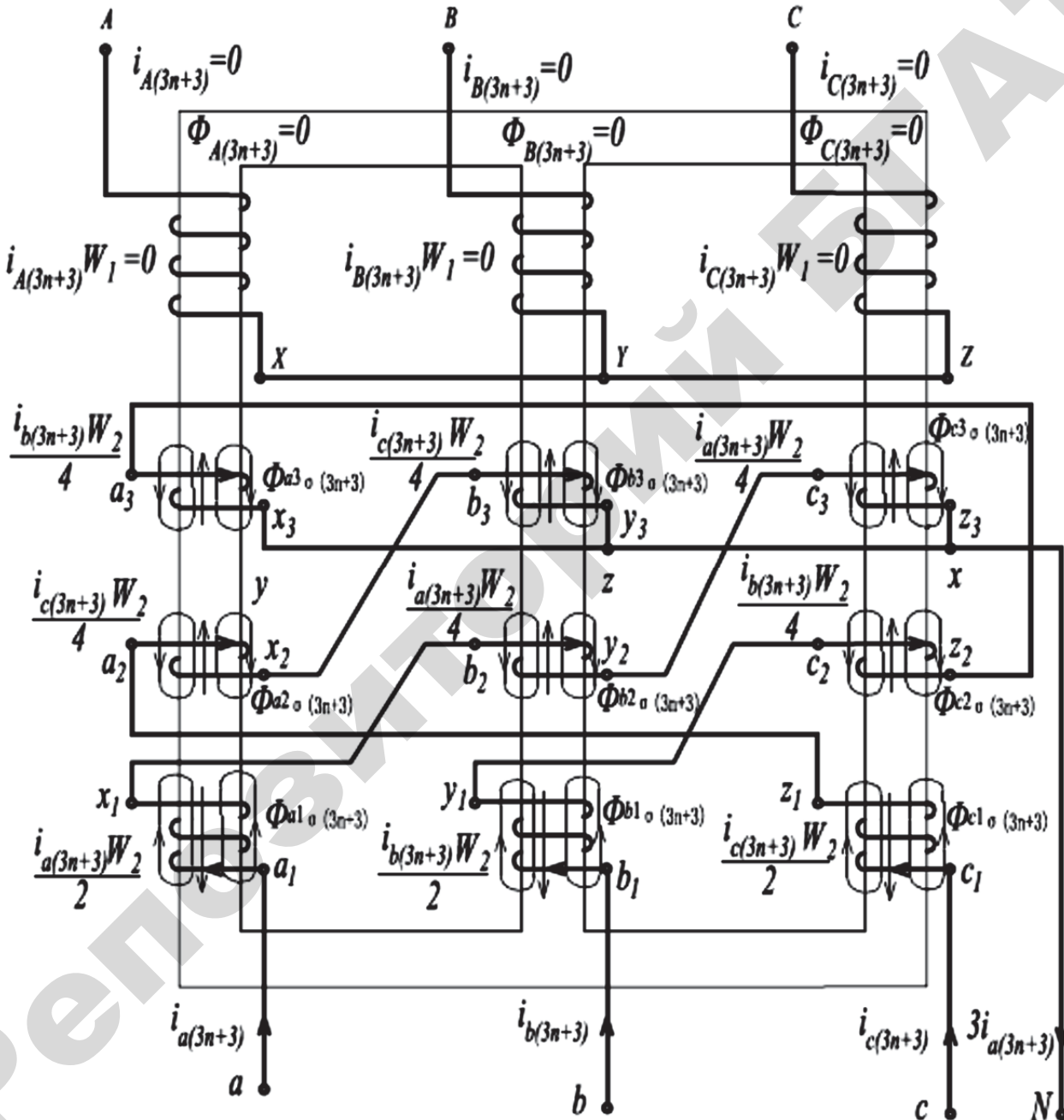


Рис. 2. Схема распределения МДС и магнитных потоков высших гармоник, кратных трем, в трехфазном трансформаторе «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

$$= i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{4} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{4} = 0;$$

$$f_{C(3n+3)} = i_{c(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{4} - i_{b(3n+3)} \frac{W_2}{4} =$$

$$= i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{4} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{4} = 0.$$

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

$$\Phi_{A(3n+3)} = \frac{f_{A(3n+3)}}{R_{A\mu(3n+3)}} = 0;$$

$$\Phi_{B(3n+3)} = \frac{f_{B(3n+3)}}{R_{B\mu(3n+3)}} = 0; \quad (22)$$

$$\Phi_{C(3n+3)} = \frac{f_{C(3n+3)}}{R_{C\mu(3n+3)}} = 0,$$

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

Вторичная обмотка самостоятельно уравнивает свои намагничивающие силы гармоник нулевой последовательности, устраняя процесс дополнительного подмагничивания ими магнитопровода, что уменьшает магнитные потери в трансформаторе и повышает его КПД.

Токи гармоник нулевой последовательности вторичной обмотки могут создавать только потоки рассеяния $\Phi_{a1\sigma(3n+3)}, \Phi_{a2\sigma(3n+3)}, \Phi_{a3\sigma(3n+3)}, \Phi_{b1\sigma(3n+3)}, \Phi_{b2\sigma(3n+3)}, \Phi_{b3\sigma(3n+3)}, \Phi_{c1\sigma(3n+3)}, \Phi_{c2\sigma(3n+3)}, \Phi_{c3\sigma(3n+3)}$ (рис. 2). Причем поля рассеяния будут тем меньше, чем ближе расположены друг к другу части обмотки.

Так как магнитные потоки гармоник нулевой последовательности в стержнях равны нулю, то и ЭДС, создаваемые ими в обмотках, также будут равны нулю:

$$e_{A(3n+3)} = -W_1 \frac{d\Phi_{A(3n+3)}}{dt} = 0;$$

$$e_{B(3n+3)} = -W_1 \frac{d\Phi_{B(3n+3)}}{dt} = 0;$$

$$e_{C(3n+3)} = -W_1 \frac{d\Phi_{C(3n+3)}}{dt} = 0; \quad (23)$$

$$e_{a(3n+3)} = -W_2 \frac{d\Phi_{A(3n+3)}}{dt} = 0;$$

$$e_{b(3n+3)} = -W_2 \frac{d\Phi_{B(3n+3)}}{dt} = 0;$$

$$e_{c(3n+3)} = -W_2 \frac{d\Phi_{C(3n+3)}}{dt} = 0.$$

Следовательно, трансформатор не будет генерировать высшие гармоники напряжений нулевой последовательности, обусловленные нелинейной нагрузкой, в питающую сеть, так как

$$\begin{aligned} & \sum U_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = -\sum E_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = 0; \\ & \sum U_{mB(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = -\sum E_{mB(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = 0; \quad (24) \\ & \sum U_{mC(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = -\sum E_{mC(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = 0. \end{aligned}$$

Фазные напряжения первичной обмотки будут содержать только гармоники прямой и обратной последовательности. С учетом выражений (1) и (10) фазное напряжение первичной обмотки фазы «А» равно:

$$\begin{aligned} u_A = & \sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] = \\ & = -\sum E_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\ & - \sum E_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{1(3n+1)} + \\ & + \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{1(3n+2)}. \end{aligned} \quad (25)$$

Для фаз «В», «С» выражения получаем аналогично.

Для вторичных фазных обмоток с учетом (23) получим:

$$\begin{aligned} & \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = 0; \\ & \sum E_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = 0; \quad (26) \\ & \sum E_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = 0. \end{aligned}$$

Тогда с учетом выражения (17), высшие гармоники нулевой последовательности будут вызваны только падениями напряжений от соответствующих токов на сопротивлениях фаз вторичной обмотки:

$$\begin{aligned} & \sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = -\sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-4(3n+3)}; \\ & \sum U_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = -\sum I_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-4(3n+3)}; \\ & \sum U_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = -\sum I_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-4(3n+3)}. \end{aligned} \quad (27)$$

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 гармоникам токов нулевой последовательности в значительной степени будут взаимно компенсироваться. Поэтому с небольшой погрешностью можно допустить, что в полных сопротивлениях преобладает активная составляющая:

$$Z_{2-4(3n+3)} \approx r_{2-4(3n+3)}. \quad (28)$$

Тогда

$$\begin{aligned} & \sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = -\sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot r_{2-4(3n+3)}; \\ & \sum U_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = -\sum I_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot r_{2-4(3n+3)}; \\ & \sum U_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = -\sum I_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot r_{2-4(3n+3)}. \end{aligned} \quad (29)$$

Вторичное фазное напряжение фазы «А» с учетом вышеизложенного будет равно:

$$\begin{aligned} u_a = & \sum U_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = \sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] - \\ & - \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{2-4(3n+1)} - \\ & - \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{2-4(3n+2)} - \\ & - \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot r_{2-4(3n+3)}. \end{aligned} \quad (30)$$

Для фаз «В», «С» выражения получаем аналогично.

Каждая из гармоник прямой, обратной и нулевой последовательности вторичных напряжений будет равна сумме соответствующих значений трех ее частей. Например, для фазы «а»:

$$\begin{aligned} u_{a(3n+1)} = & U_{mc3(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)} - \pi] + \\ & + U_{mb2(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)} - \pi] + \\ & + U_{ma1(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] = \\ & = E_{mc3(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)} - \pi] + \\ & + E_{mb2(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)} - \pi] + \\ & + E_{ma1(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\ & - I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{4(3n+1)} - \\ & - I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{3(3n+1)} - \\ & - I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{2(3n+1)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{a(3n+2)} = & U_{mc3(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)} - \pi] + \\ & + U_{mb2(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)} - \pi] + \\ & + U_{ma1(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] = \\ & = E_{mc3(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)} - \pi] + \\ & + E_{mb2(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)} - \pi] + \\ & + E_{ma1(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] - \\ & - I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{4(3n+2)} - \\ & - I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{3(3n+2)} - \\ & - I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{2(3n+2)}; \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} u_{a(3n+3)} = & U_{mc3(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)} - \pi] + \\ & + U_{mb2(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)} - \pi] + \\ & + U_{ma1(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = -I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot r_{4(3n+3)} - \\ & - I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot r_{3(3n+3)} - \\ & - I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot r_{2(3n+3)}, \end{aligned}$$

где $U_{ma1(3n+1)}, U_{ma1(3n+2)}, U_{ma1(3n+3)}$ – амплитудные значения гармоник напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности половины a_1 вторичной обмотки фазы «а», В;

$U_{mb2(3n+1)}, U_{mb2(3n+2)}, U_{mb2(3n+3)}$ – амплитудные значения гармоник напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности четверти b_2 вторичной обмотки фазы «а», В;

$U_{mc3(3n+1)}, U_{mc3(3n+2)}, U_{mc3(3n+3)}$ – амплитудные значения гармоник напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности четверти c_3 вторичной обмотки фазы «а», В;

$E_{ma1(3n+1)}, E_{ma1(3n+2)}, E_{ma1(3n+3)}$ – амплитудные значения гармоник ЭДС прямой, обратной и нулевой последовательности половины a_1 вторичной обмотки фазы «а», В;

$E_{mb2(3n+1)}, E_{mb2(3n+2)}, E_{mb2(3n+3)}$ – амплитудные значения гармоник ЭДС прямой, обратной и нулевой последовательности четверти b_2 вторичной обмотки фазы «а», В;

$E_{mc3(3n+1)}, E_{mc3(3n+2)}, E_{mc3(3n+3)}$ – амплитудные значения гармоник ЭДС прямой, обратной и нулевой последовательности четверти c_3 вторичной обмотки фазы «а», В;

$r_{2(3n+3)}$ – активные сопротивления половин a_1, b_1, c_1 вторичных фазных обмоток токам высших гармоник нулевой последовательности, Ом;

$r_{3(3n+3)}$ – активные сопротивления четвертей a_2, b_2, c_2 вторичных фазных обмоток токам высших гармоник нулевой последовательности, Ом;

$r_{4(3n+3)}$ – активные сопротивления четвертей a_3, b_3, c_3 вторичных фазных обмоток токам высших гармоник нулевой последовательности, Ом.

Тогда для высших гармоник частот a_1, b_2, c_3 вторичной обмотки фазы «а» будут справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} & U_{ma1(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] = \\ & = E_{ma1(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\ & - I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{2(3n+1)}; \\ & U_{mb2(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)} - \pi] = \\ & = E_{mb2(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)} - \pi] - \\ & - I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{3(3n+1)}; \\ & U_{mc3(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)} - \pi] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & = E_{mc3(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)} - \pi] - \\ & - I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{4(3n+1)}; \\ & U_{ma1(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] = \\ & = E_{ma1(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] - \\ & - I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{2(3n+2)}; \\ & U_{mb2(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)} - \pi] = \\ & = E_{mb2(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)} - \pi] - \\ & - I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{3(3n+2)}; \\ & U_{mc3(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)} - \pi] = \\ & = E_{mc3(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)} - \pi] - \\ & - I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{4(3n+2)}; \\ & U_{ma1(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = -I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot r_{2(3n+3)}; \\ & U_{mb2(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)} - \pi] = \\ & = -I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot r_{3(3n+3)}; \\ & U_{mc3(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)} - \pi] = \\ & = -I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot r_{4(3n+3)}. \end{aligned} \quad (32)$$

Так как токи, напряжения и ЭДС изменяются по синусоидальному закону, то соотношения (32) можно представить в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{a1(3n+1)} &= \underline{E}_{a1(3n+1)} - \underline{I}_{a(3n+1)} \underline{Z}_{2(3n+1)}; \\ \underline{U}_{b2(3n+1)} &= \underline{E}_{b2(3n+1)} - \underline{I}_{a(3n+1)} \underline{Z}_{3(3n+1)}; \\ \underline{U}_{c3(3n+1)} &= \underline{E}_{c3(3n+1)} - \underline{I}_{a(3n+1)} \underline{Z}_{4(3n+1)}; \\ \underline{U}_{a1(3n+2)} &= \underline{E}_{a1(3n+2)} - \underline{I}_{a(3n+2)} \underline{Z}_{2(3n+2)}; \\ \underline{U}_{b2(3n+2)} &= \underline{E}_{b2(3n+2)} - \underline{I}_{a(3n+2)} \underline{Z}_{3(3n+2)}; \\ \underline{U}_{c3(3n+2)} &= \underline{E}_{c3(3n+2)} - \underline{I}_{a(3n+2)} \underline{Z}_{4(3n+2)}; \\ \underline{U}_{a1(3n+3)} &= -\underline{I}_{a(3n+3)} r_{2(3n+3)}; \\ \underline{U}_{b2(3n+3)} &= -\underline{I}_{a(3n+3)} r_{3(3n+3)}; \\ \underline{U}_{c3(3n+3)} &= -\underline{I}_{a(3n+3)} r_{4(3n+3)}. \end{aligned} \quad (33)$$

Аналогичным образом получим соотношения для частот вторичной обмотки фазы «b» и «с».

Для высших гармоник первичных фазных напряжений:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A(3n+1)} &= -\underline{E}_{A(3n+1)} + \underline{I}_{A(3n+1)} \underline{Z}_{1(3n+1)}; \\ \underline{U}_{B(3n+1)} &= -\underline{E}_{B(3n+1)} + \underline{I}_{B(3n+1)} \underline{Z}_{1(3n+1)}; \\ \underline{U}_{C(3n+1)} &= -\underline{E}_{C(3n+1)} + \underline{I}_{C(3n+1)} \underline{Z}_{1(3n+1)}; \\ \underline{U}_{A(3n+2)} &= -\underline{E}_{A(3n+2)} + \underline{I}_{A(3n+2)} \underline{Z}_{1(3n+2)}; \\ \underline{U}_{B(3n+2)} &= -\underline{E}_{B(3n+2)} + \underline{I}_{B(3n+2)} \underline{Z}_{1(3n+2)}; \\ \underline{U}_{C(3n+2)} &= -\underline{E}_{C(3n+2)} + \underline{I}_{C(3n+2)} \underline{Z}_{1(3n+2)}; \end{aligned} \quad (34)$$

$$\underline{U}_{A(3n+3)} = 0;$$

$$\underline{U}_{B(3n+3)} = 0;$$

$$\underline{U}_{C(3n+3)} = 0.$$

Если первичные обмотки и части вторичных обмоток, размещенные на одном стержне, рассматривать как обмотки четырехобмоточного трансформатора, то на основании выражений (33) – (34) получим схемы замещения для токов высших гармоник прямой, обратной и нулевой последовательности. На рисунках 3-5 представлены схемы замещения для обмоток, расположенных на стержне магнитопровода

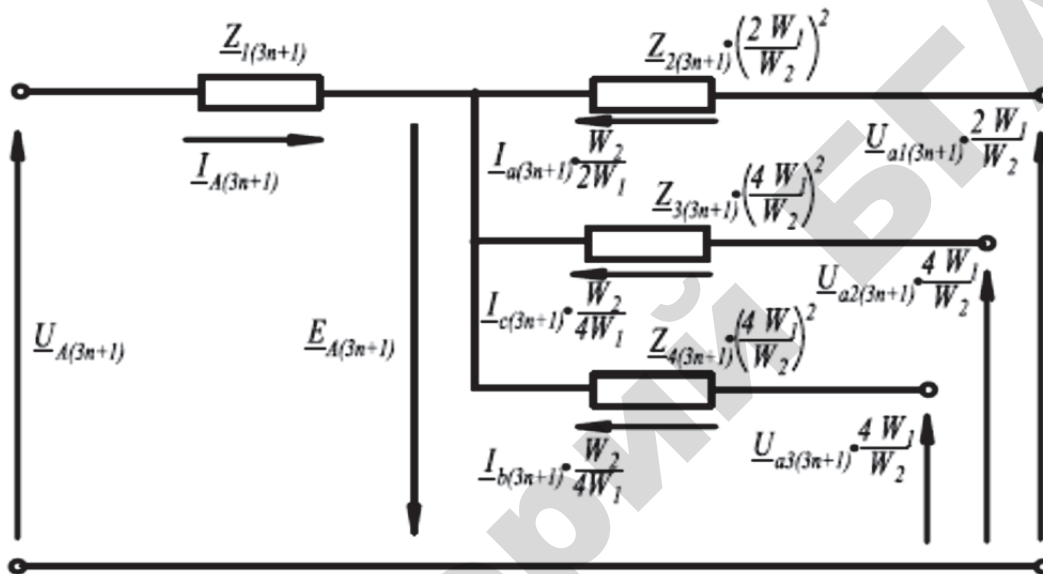


Рис. 3. Схема замещения трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» для токов высших гармоник прямой последовательности

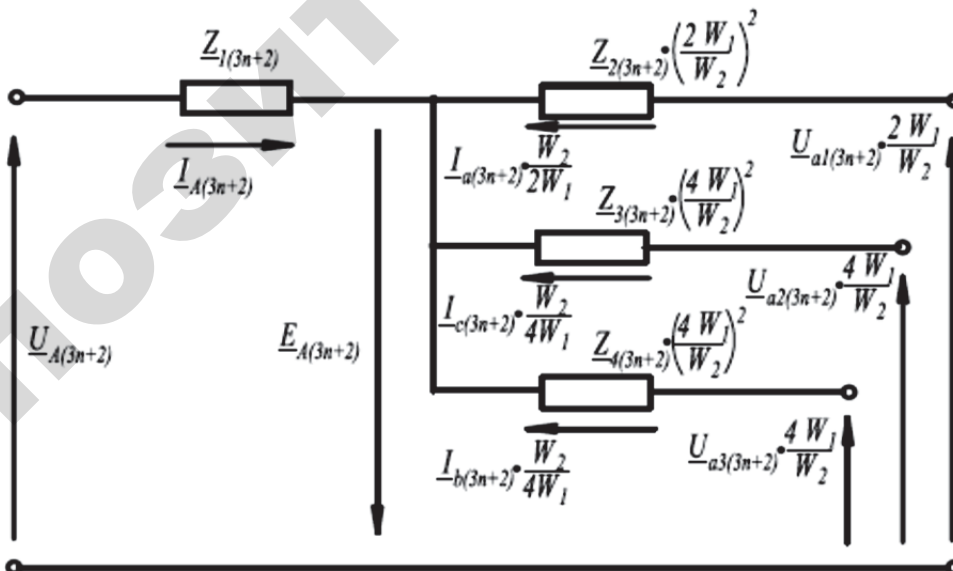


Рис. 4. Схема замещения трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» для токов высших гармоник обратной последовательности

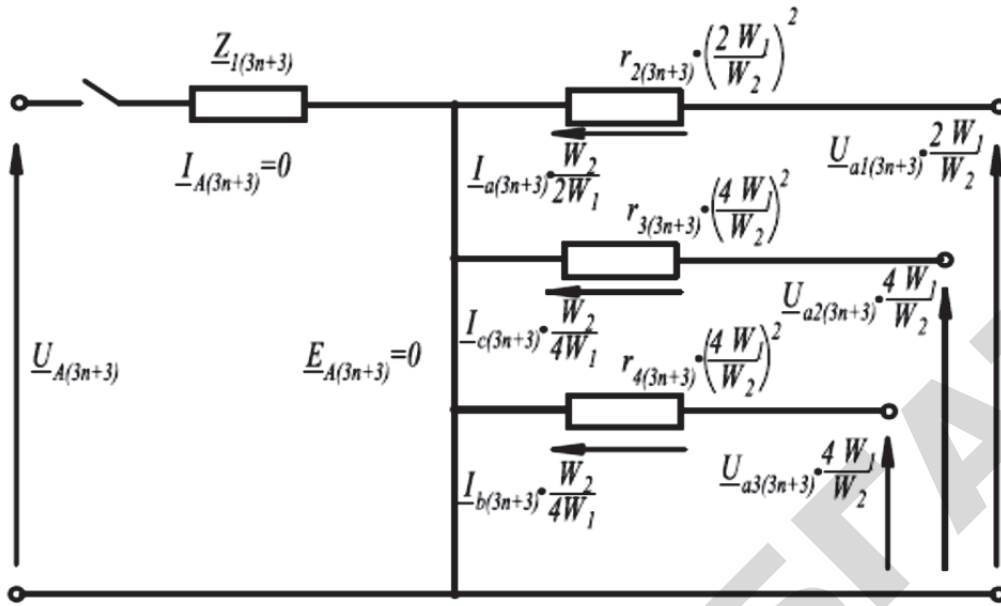


Рис. 5. Схема замещения трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» для токов высших гармоник нулевой последовательности

фазы «А». Стрелками показаны положительные направления напряжений, токов и ЭДС.

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

$$\begin{aligned} & \sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega t + \varphi_{(3n+2)}] - \\ & - \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{1(3n+1)} - \\ & - \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{1(3n+2)} = \\ & = - \sum \frac{W_1}{W_2} U_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega t + \varphi_{(3n+1)}] - \\ & - \sum \frac{W_1}{W_2} U_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega t + \varphi_{(3n+2)}] - \\ & - \sum \frac{W_2}{W_1} I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 Z_{2-4(3n+1)} - \\ & - \sum \frac{W_2}{W_1} I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 Z_{2-4(3n+2)}. \end{aligned} \quad (35)$$

Гармоники тока прямой и обратной последовательности трансформируются с вторичной стороны на первичную, и наоборот.

Сопротивление короткого замыкания трансформатора высшим гармоникам равно:

$$Z_{K(3n+e)} = Z_{1(3n+e)} + \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 Z_{2-4(3n+e)}, \quad (36)$$

С учетом, что

$$\frac{W_2}{W_1} I_{ma(3n+1)} = I_{mA(3n+1)}; \quad (37)$$

$$\frac{W_2}{W_1} I_{ma(3n+2)} = I_{mA(3n+2)},$$

получим

$$\begin{aligned} & \sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega t + \varphi_{(3n+2)}] - \\ & - \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{K(3n+1)} - \\ & - \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{K(3n+2)} = \\ & = - \sum \frac{W_1}{W_2} U_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega t + \varphi_{(3n+1)}] - \\ & - \sum \frac{W_1}{W_2} U_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega t + \varphi_{(3n+2)}]. \end{aligned} \quad (38)$$

Для высших гармоник нулевой последовательности:

$$\begin{aligned} & \sum U_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = - \sum \frac{W_1}{W_2} U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega t + \varphi_{(3n+3)}] - \\ & - \sum \frac{W_2}{W_1} I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot \\ & \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 r_{2-4(3n+3)} = 0, \end{aligned} \quad (39)$$

откуда

$$\begin{aligned}
 & -\sum \frac{W_1}{W_2} U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\
 & = \sum \frac{W_2}{W_1} I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot \\
 & \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 r_{2-4(3n+3)}.
 \end{aligned} \quad (40)$$

Сложив (38) и (40), получим:

$$\begin{aligned}
 u_a = & -\sum \frac{W_2}{W_1} U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\
 & -\sum \frac{W_2}{W_1} U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 & + \sum \frac{W_2}{W_1} I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{K(3n+1)} + \\
 & + \sum \frac{W_2}{W_1} I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{K(3n+2)} - \\
 & - \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot r_{2-4(3n+3)}.
 \end{aligned} \quad (41)$$

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

Заключение

1. Искажение синусоидальности напряжений трансформатора обусловлено высшими гармониками прямой и обратной последовательности, которые трансформируются с первичной на вторичную сторону, и наоборот, а также падениями напряжений от

токов высших гармоник прямой и обратной последовательности на сопротивлениях обмоток.

2. Улучшение формы кривой напряжения происходит вследствие компенсации кратных трем высших гармоник, а их остаточные значения обусловлены падениями напряжений от соответствующих токов на активных сопротивлениях фаз вторичной обмотки. Трансформатор не будет генерировать высшие гармоники напряжений нулевой последовательности, обусловленные нелинейной нагрузкой, в питающую сеть.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трехфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток: пат. 16008 Респ. Беларусь / А.И. Зеленкевич, В.М. Збродыга; заявитель Белор. гос. аграрн. технич. ун-т. – № а 20100121; заявл. 2010.02.01; опубл. 30.06.2012.

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.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 10.01.2018

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Журнал выходит один раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.

Стоимость подписки на 1-е полугодие 2018 года: для индивидуальных подписчиков - 18,30 руб., ведомственная подписка - 19,89 руб.