

ОСОБЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ДВОЙНОЙ ЗИГЗАГ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ»

М.А. Прищепов,

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

В.М. Збродыга,

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

А.И. Зеленкевич,

ст. преподаватель каф. электроснабжения БГАТУ

В статье рассмотрено устройство и процессы преобразования электрической энергии в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

Ключевые слова: трехфазный трансформатор, несимметрия напряжения, несинусоидальность напряжения, группа соединений обмоток

The article deals with the processes of transformation of electric energy in a transformer with the connection scheme of windings "star-double zigzag with zero wire".

Keywords: three-phase transformer, voltage asymmetry, voltage nonsinusoidal, winding group.

Введение

При выборе способов и средств повышения качества электроэнергии в электроустановках сельскохозяйственного назначения авторы публикации считают наиболее целесообразным применение относительно недорогих, простых и надежных по конструктивному исполнению устройств, которые не требуют особых условий эксплуатации и не предъявляют высоких требований к квалификации обслуживающего персонала, в том числе и трансформаторов со специальными схемами соединения обмоток.

В частности, для снижения несимметрии и несинусоидальности напряжений на подстанциях 10/0,4 кВ применяют силовые трансформаторы со схемой «звезда-зигзаг с нулевым проводом», но они имеют одинаковую группу соединения обмоток и не могут работать параллельно с широко распространенными трансформаторами «звезда-звезда с нулевым проводом» и «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством», имеющим нулевую группу соединений.

Для решения этой проблемы авторы предлагают использовать трансформатор со специальной схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» с четной группой соединения обмоток [1, 2]. Предлагаемый трансформатор устойчив к искажающим воздействиям со стороны нагрузки и способен обеспечить высокий уровень симметрии и синусоидальности напряжения.

Цель данной работы – провести математическое моделирование процесса работы предложенного трансформатора.

Основная часть

Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» состоит из магнитной системы и системы обмоток с их изоляцией. По взаимному расположению стержней и ярм принят наиболее распространенный в практике трансформаторостроения плоский несимметричный трехстержневой тип магнитной системы со ступенчатой формой поперечного сечения стержня, вписанной в окружность, и с обмотками в виде круговых цилиндров.

Обмотки высшего напряжения 1 расположены на стержнях магнитопровода 2 и соединены по схеме «звезда» (рис. 1). Обмотки низшего напряжения состоят из трех частей – 3, 4, 5, размещенных на разных стержнях и соединенных последовательно, причем половина вторичной фазной обмотки располагается на том же стержне магнитопровода, что и первичная обмотка этой же фазы, а вторая половина, состоящая из двух одинаковых частей – на двух других стержнях магнитопровода. Например, на стержне фазы «а» соотношение числа витков в частях обмотки $a_1:a_2:a_3$ будет – 0,5:0,25:0,25. Вторичное напряжение трансформатора равно геометрической сумме напряжений трех частей обмотки, находящихся на разных стержнях магнитопровода.

Передача энергии переменного тока из первичной цепи трансформатора во вторичную цепь осуществляется посредством электромагнитного поля, что сопровождается сложными электромагнитными процессами.

Для упрощения анализа примем следующие допущения, которые существенно не искажают происходящие процессы:

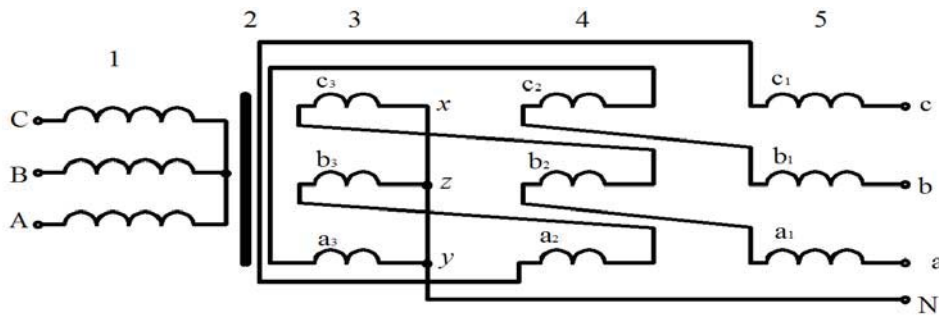


Рисунок 1. Схема соединения обмоток трехфазного трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

1. Система первичных напряжений трансформатора симметрична независимо от режима его работы.

2. Напряжение питания трансформатора синусоидальное.

3. Трансформатор понижающий.

4. Нагрузка трансформатора симметричная и носит линейный характер.

При работе трансформатора первичная обмотка подключается к трехфазной электрической сети переменного тока частотой f_1 и изменяющимся по синусоидальному закону, смещенными по фазе на $1/3$ периода, напряжениями (рис. 1):

$$\begin{aligned} u_A &= U_{Am} \sin \omega t, \\ u_B &= U_{Bm} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right), \\ u_C &= U_{Cm} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right), \end{aligned} \quad (1)$$

где U_{Am}, U_{Bm}, U_{Cm} – амплитудные значения напряжений фаз А, В, С соответственно, В;
 $\omega = 2\pi f_1$ – угловая частота тока, рад/с;
 t – рассматриваемый момент времени, с.

При работе трансформатора в режиме холостого хода напряжения вызывают протекание токов только по фазным обмоткам первичной стороны.

Трансформатор работает с насыщенной магнитной системой, являясь нелинейным элементом электрической цепи. Поэтому токи холостого хода будут несинусоидальны и содержат высшие нечетные гармоники, кроме гармоник, кратных трем, для которых в первичной обмотке, соединенной по схеме «звезда» без нулевого провода, отсутствуют пути для их протекания.

Для упрощения заменим несинусоидальные кривые фазных токов эквивалентными синусоидами основной частоты с амплитудными значениями:

$$\begin{aligned} I_{Amx} &= \sqrt{I_{Amx1}^2 + I_{Amx5}^2 + I_{Amx7}^2 + \dots}, \\ I_{Bmx} &= \sqrt{I_{Bmx1}^2 + I_{Bmx5}^2 + I_{Bmx7}^2 + \dots}, \\ I_{Cmx} &= \sqrt{I_{Cmx1}^2 + I_{Cmx5}^2 + I_{Cmx7}^2 + \dots}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $I_{Amx1}, I_{Amx5}, I_{Amx7}, \dots$ – амплитудные значения токов первой, пятой, седьмой и других нечетных гармоник тока фазы А, А;

$I_{Bmx1}, I_{Bmx5}, I_{Bmx7}, \dots$ – амплитудные значения токов первой, пятой, седьмой и других нечетных гармоник тока фазы В, В;

$I_{Cmx1}, I_{Cmx5}, I_{Cmx7}, \dots$ – амплитудные значения токов первой, пятой, седьмой и других нечетных гармоник тока фазы С, А.

Тогда фазные токи холостого хода первичной обмотки трехфазного трансформатора равны:

$$\begin{aligned} i_{Ax} &= I_{Amx} \sin(\omega t - \varphi_{Ax}), \\ i_{Bx} &= I_{Bmx} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx}\right), \\ i_{Cx} &= I_{Cmx} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\varphi_{Ax}, \varphi_{Bx}, \varphi_{Cx}$ – угол сдвига фаз соответствующих токов холостого хода и напряжений первичной стороны, рад.

Реактивные составляющие токов холостого хода первичной обмотки создают переменное магнитное поле, фазные магнитодвижущие силы (МДС) которого равны:

$$\begin{aligned} f_A &= I_{Amxp} W_1 \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu}) = \\ &= I_{Am\mu} W_1 \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu}) = \\ &= F_{Am} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu}), \\ f_B &= I_{Bmxp} W_1 \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu}\right) = \\ &= I_{Bm\mu} W_1 \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu}\right) = \\ &= F_{Bm} W_1 \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} f_C &= I_{Cмвр} W_1 \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu}) = \\ &= I_{Cм\mu} W_1 \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu}) = \\ &= F_{Cm} \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu}), \end{aligned}$$

где $F_{Am} = I_{Am\mu} W_1$, $F_{Bm} = I_{Bm\mu} W_1$, $F_{Cm} = I_{Cm\mu} W_1$ – амплитудные значения фазных МДС первичной обмотки, А;

W_1 – количество витков в обмотке одной фазы первичной стороны трансформатора, шт;

$I_{Amвр}$, $I_{Bмвр}$, $I_{Cмвр}$ – реактивные составляющие соответствующих фазных токов холостого хода первичной обмотки, А;

$I_{Am\mu}$, $I_{Bm\mu}$, $I_{Cm\mu}$ – амплитудные значения намагничивающих токов соответствующих фаз, А;

α_{Am} , $\alpha_{B\mu}$, $\alpha_{C\mu}$ – угол фазового сдвига между токами холостого хода и МДС или магнитными потоками соответствующих фаз (угол магнитного запаздывания), рад.

Причем

$$\begin{aligned} I_{Am\mu} &= I_{Amвр} = I_{Amx} \cos \alpha_{Am}, \\ I_{Bm\mu} &= I_{Bмвр} = I_{Bmx} \cos \alpha_{B\mu}, \\ I_{Cm\mu} &= I_{Cмвр} = I_{Cmx} \cos \alpha_{C\mu}. \end{aligned} \quad (5)$$

Фазные МДС создают соответствующие магнитные потоки, кривые изменения которых из-за нелинейности магнитной характеристики трансформатора отличаются от синусоиды и содержат высшие гармоники, кратные трем, отсутствующие в намагничивающем токе. Основные магнитные потоки первой гармоники замыкаются по магнитопроводу по пути наименьшего магнитного сопротивления. Магнитные потоки высших гармоник, кратных трем, вынуждены замыкаться от ярма к ярму по воздуху и конструктивным элементам по пути со значительным магнитным сопротивлением. Поэтому они невелики, ими можно пренебречь и считать магнитные потоки, создаваемые намагничивающими токами, синусоидальными:

$$\begin{aligned} \Phi_A &= \frac{f_A}{R_{A\mu}} = \frac{F_{Am}}{R_{A\mu}} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu}) = \\ &= \Phi_{Am} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu}), \\ \Phi_B &= \frac{f_B}{R_{B\mu}} = \frac{F_{Bm}}{R_{B\mu}} \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu}) = \\ &= \Phi_{Bm} \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu}), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Phi_C &= \frac{f_C}{R_{C\mu}} = \frac{F_{Cm}}{R_{C\mu}} \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu}) = \\ &= \Phi_{Cm} \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu}), \end{aligned}$$

где $R_{A\mu}$, $R_{B\mu}$, $R_{C\mu}$ – сопротивления магнитных цепей соответствующих фаз, Гн⁻¹;

Φ_{Am} , Φ_{Bm} , Φ_{Cm} – амплитудные значения магнитного потока соответствующих фаз, Вб.

Трехстержневой магнитопровод трансформатора является несимметричной связанной магнитной системой. Магнитное сопротивление фазы, расположенной на среднем стержне магнитопровода, меньше, чем у двух других из-за разной длины их магнитной цепи.

При симметричной системе магнитных потоков это приводит к некоторой несимметрии фазных МДС и намагничивающих токов.

Основные магнитные потоки фаз индуцируют в первичной обмотке ЭДС, отстающие по фазе на угол $\pi/2$:

$$\begin{aligned} e_A &= -\frac{d\psi_A}{dt} = -W_1 \frac{d\Phi_A}{dt} = \\ &= -\omega W_1 \Phi_{Am} \cos(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu}) = \\ &= 2\pi f_1 W_1 \Phi_{Am} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{\pi}{2}) = \\ &= E_{Am} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{\pi}{2}), \\ e_B &= -\frac{d\psi_B}{dt} = -W_1 \frac{d\Phi_B}{dt} = \\ &= -\omega W_1 \Phi_{Bm} \cos(\omega t - \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu}) = \\ &= 2\pi f_1 W_1 \Phi_{Bm} \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{\pi}{2}) = \\ &= E_{Bm} \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{\pi}{2}), \\ e_C &= -\frac{d\psi_C}{dt} = -W_1 \frac{d\Phi_C}{dt} = \\ &= -\omega W_1 \Phi_{Cm} \cos(\omega t + \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu}) = \\ &= 2\pi f_1 W_1 \Phi_{Cm} \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{\pi}{2}) = \end{aligned} \quad (7)$$

$$= E_{Cm} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{C\alpha} - \alpha_{C\mu} - \frac{\pi}{2}\right),$$

где $\psi_A = W_1\Phi_A, \psi_B = W_1\Phi_B, \psi_C = W_1\Phi_C$ – потоки сцепления соответствующих первичных фазных обмоток, Вб;

$$E_{Am} = 2\pi f_1 W_1 \Phi_{Am}, \quad E_{Bm} = 2\pi f_1 W_1 \Phi_{Bm},$$

$E_{Cm} = 2\pi f_1 W_1 \Phi_{Cm}$ – амплитуды соответствующих фазных ЭДС первичной обмотки, В.

Индукцированные фазные ЭДС первичной обмотки уравновешивают соответствующие первичные напряжения трансформатора.

Основные магнитные потоки фаз также индуцируют ЭДС в трех частях вторичных обмоток, которые расположены на тех же стержнях магнитопровода.

Магнитный поток фазы А индуцирует ЭДС в частях вторичных обмоток a_1, a_2, a_3 , принадлежащих разным фазам (рис. 1). Так как части обмоток a_2, a_3 имеют противоположную маркировку выводов по отношению к a_1 , то их ЭДС дополнительно смещены по фазе на угол $-\pi$. Тогда

$$\begin{aligned} e_{a1} &= -\frac{d\psi_{a1}}{dt} = -\frac{W_2}{2} \frac{d\Phi_A}{dt} = \\ &= -\omega \frac{W_2}{2} \Phi_{Am} \cos(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu}) = \\ &= 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Am} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= E_{a1m} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{\pi}{2}\right), \\ e_{a2} &= -\frac{d\psi_{a2}}{dt} = -\frac{W_2}{4} \frac{d\Phi_A}{dt} = \\ &= -\omega \frac{W_2}{4} \Phi_{Am} \cos(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \pi) = \\ &= 2\pi f_1 \frac{W_2}{4} \Phi_{Am} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{3}{2}\pi\right) = (8) \\ &= -E_{a2m} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{3}{2}\pi\right), \\ e_{a3} &= -\frac{d\psi_{a3}}{dt} = -\frac{W_2}{4} \frac{d\Phi_A}{dt} = \\ &= -\omega \frac{W_2}{4} \Phi_{Am} \cos(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \pi) = \end{aligned}$$

$$= 2\pi f_1 \frac{W_2}{4} \Phi_{Am} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{3}{2}\pi\right) =$$

$$= E_{a3m} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{3}{2}\pi\right),$$

$$\text{где } E_{a1m} = 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Am}, \quad E_{a2m} = E_{a3m} = 2\pi f_1 \frac{W_2}{4} \Phi_{Am}$$

– амплитудные значения ЭДС вторичных обмоток на стержне магнитопровода фазы А, В;

W_2 – суммарное количество витков во вторичных обмотках трансформатора, находящихся на одном стержне магнитопровода, шт.

Магнитный поток фазы В аналогично индуцирует ЭДС в частях вторичных обмоток b_1, b_2, b_3 (рис. 1):

$$\begin{aligned} e_{b1} &= -\frac{d\psi_{b1}}{dt} = -\frac{W_2}{2} \frac{d\Phi_B}{dt} = \\ &= -\omega \frac{W_2}{2} \Phi_{Bm} \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu}\right) = \\ &= 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Bm} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= E_{b1m} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{\pi}{2}\right), \\ e_{b2} &= -\frac{d\psi_{b2}}{dt} = -\frac{W_2}{4} \frac{d\Phi_B}{dt} = \\ &= -\omega \frac{W_2}{4} \Phi_{Bm} \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \pi\right) = \\ &= 2\pi f_1 \frac{W_2}{4} \Phi_{Bm} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{3}{2}\pi\right) = (9) \\ &= E_{b2m} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{3}{2}\pi\right), \\ e_{b3} &= -\frac{d\psi_{b3}}{dt} = -\frac{W_2}{4} \frac{d\Phi_B}{dt} = \\ &= -\omega \frac{W_2}{4} \Phi_{Bm} \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \pi\right) = \\ &= 2\pi f_1 \frac{W_2}{4} \Phi_{Bm} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{3}{2}\pi\right) = \\ &= E_{b3m} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{3}{2}\pi\right), \end{aligned}$$

где $E_{b1m} = 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Bm}$, $E_{b2m} = E_{b3m} = 2\pi f_1 \frac{W_2}{4} \Phi_{Bm}$

– амплитудные значения ЭДС вторичных обмоток на стержне магнитопровода фазы В, В.

Соответственно магнитный поток фазы С индуцирует ЭДС в частях вторичных обмоток c_1 , c_2 , c_3 (рис. 1):

$$\begin{aligned} e_{c1} &= -\frac{d\psi_{c1}}{dt} = -\frac{W_2}{2} \frac{d\Phi_C}{dt} = \\ &= -\omega \frac{W_2}{2} \Phi_{Cm} \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu}) = \\ &= 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Cm} \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{\pi}{2}) = \\ &= E_{c1m} \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{\pi}{2}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_{c2} &= -\frac{d\psi_{c2}}{dt} = -\frac{W_2}{4} \frac{d\Phi_C}{dt} = \\ &= -\omega \frac{W_2}{4} \Phi_{Cm} \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \pi) = \\ &= 2\pi f_1 \frac{W_2}{4} \Phi_{Cm} \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{3}{2}\pi) = (10) \end{aligned}$$

$$= E_{c2m} \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{3}{2}\pi),$$

$$\begin{aligned} e_{c3} &= -\frac{d\psi_{c3}}{dt} = -\frac{W_2}{4} \frac{d\Phi_C}{dt} = \\ &= -\omega \frac{W_2}{4} \Phi_{Cm} \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \pi) = \\ &= 2\pi f_1 \frac{W_2}{4} \Phi_{Cm} \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{3}{2}\pi) = \\ &= E_{c3m} \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{3}{2}\pi), \end{aligned}$$

где $E_{c1m} = 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Cm}$, $E_{c2m} = E_{c3m} = 2\pi f_1 \frac{W_2}{4} \Phi_{Cm}$

– амплитудные значения ЭДС вторичных обмоток на стержне магнитопровода фазы С, В.

Фазные ЭДС вторичной стороны трансформатора, индуцируемые основным магнитным потоком, будут равны сумме ЭДС трех частей вторичной обмотки, расположенных на разных стержнях магнитопровода:

$$\begin{aligned} e_a &= e_{c3} + e_{b2} + e_{a1} = \\ &= E_{c3m} \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{3}{2}\pi) + \\ &+ E_{b2m} \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{3}{2}\pi) + \\ &+ E_{a1m} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{\pi}{2}) = \\ &= 1,5 E_{a1m} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{\pi}{2}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_b &= e_{a3} + e_{c2} + e_{b1} = E_{a3m} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \\ &- \alpha_{A\mu} - \frac{3}{2}\pi) + \\ &+ E_{c2m} \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{3}{2}\pi) + \\ &+ E_{b1m} \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{\pi}{2}) = \\ &= 1,5 E_{b1m} \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{\pi}{2}), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} e_c &= e_{b3} + e_{a2} + e_{c1} = \\ &= E_{b3m} \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{3}{2}\pi) + \\ &+ E_{a2m} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{3}{2}\pi) + \\ &+ E_{c1m} \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{\pi}{2}) = \\ &= 1,5 E_{c1m} \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{\pi}{2}). \end{aligned}$$

Анализ полученных выражений (11) показывает, что фазные ЭДС вторичной обмотки совпадают по фазе с одноименными ЭДС первичной обмотки. Следовательно, предложенная схема имеет нулевую группу соединения обмоток. При этом вторичные фазные ЭДС предложенной схемы на 25 % меньше ЭДС схемы соединения «звезда» при том же количестве витков вторичной обмотки. Поэтому предложенная схема требует увеличения количества витков во вторичной обмотке на 25 % для получения требуемого вторичного напряжения.

Если к трансформатору подключить симметричную нагрузку, то под воздействием этих ЭДС через нагрузку и вторичную обмотку будут протекать токи:

$$i_a = I_{am} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \gamma_a - \frac{\pi}{2}),$$

$$i_b = I_{bm} \sin(\omega t - \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \gamma_b - \frac{\pi}{2}),$$

$$i_c = I_{cm} \sin(\omega t + \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \gamma_c - \frac{\pi}{2}),$$

где I_{am}, I_{bm}, I_{cm} – амплитудные значения соответствующих фазных токов вторичной стороны, А;

$\gamma_a, \gamma_b, \gamma_c$ – углы фазового сдвига между токами и соответствующими ЭДС вторичной обмотки соответствующих фаз, рад.

Результирующее магнитное поле трансформатора в нагрузочном режиме создается первичной и вторичной обмотками.

Тогда МДС в стержнях магнитопровода, на которых расположены первичные обмотки фаз «А», «В» «С», будут равны соответственно:

$$i_A W_1 + i_a \frac{W_2}{2} - i_b \frac{W_2}{4} - i_c \frac{W_2}{4} = i_{A\mu} W_1 = const,$$

$$i_B W_1 + i_b \frac{W_2}{2} - i_a \frac{W_2}{4} - i_c \frac{W_2}{4} = i_{B\mu} W_1 = const,$$

$$i_C W_1 + i_c \frac{W_2}{2} - i_a \frac{W_2}{4} - i_b \frac{W_2}{4} = i_{C\mu} W_1 = const,$$

где $i_{A\mu}, i_{B\mu}, i_{C\mu}$ – мгновенные значения намагничивающих токов соответствующих фаз, А;

i_A, i_B, i_C – мгновенные значения соответствующих фазных токов первичной стороны, А.

На рис. 2 представлена схема распределения МДС и магнитных потоков трехфазного трансформатора в момент времени, соответствующий заданному направлению токов в обмотках. Первичные фазные обмотки оказывают намагничивающее действие на стержни магнитопровода, половины обмоток этих же фаз размагничивающие, а четверти обмоток двух других фаз часть периода изменения тока подмагничивают стержни, а часть периода – размагничивают.

Если рассматривать трехстержневой магнитопровод в целом, то видно, что результирующая МДС трехфазной первичной

обмотки оказывает намагничивающее действие на трансформатор, а МДС вторичной обмотки – размагничивающее.

Результирующее магнитное поле не зависит от величины нагрузки, потому что пропорционально изменению вторичных токов изменяются токи первичной обмотки, а изменение размагничивающего действия вторичной обмотки компенсируется пропорциональным изменением намагничивающего действия первичной обмотки. Следовательно, основной магнитный поток и индуцируемые им ЭДС в обмотках также не зависят от величины нагрузки.

Величины токов первичной обмотки и их фазовый сдвиг относительно напряжений в нагрузочном режиме будут иными, чем в режиме холостого хода. Первичные токи можно определить из уравнений МДС трансформатора (13):

$$i_A = i_{A\mu} - i_a \frac{W_2}{2W_1} + i_b \frac{W_2}{4W_1} + i_c \frac{W_2}{4W_1},$$

$$i_B = i_{B\mu} - i_b \frac{W_2}{2W_1} + i_a \frac{W_2}{4W_1} + i_c \frac{W_2}{4W_1},$$

$$i_C = i_{C\mu} - i_c \frac{W_2}{2W_1} + i_a \frac{W_2}{4W_1} + i_b \frac{W_2}{4W_1}.$$

Или

$$i_A = I_{Am} \sin(\omega t - \varphi_A),$$

$$i_B = I_{Bm} \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_B),$$

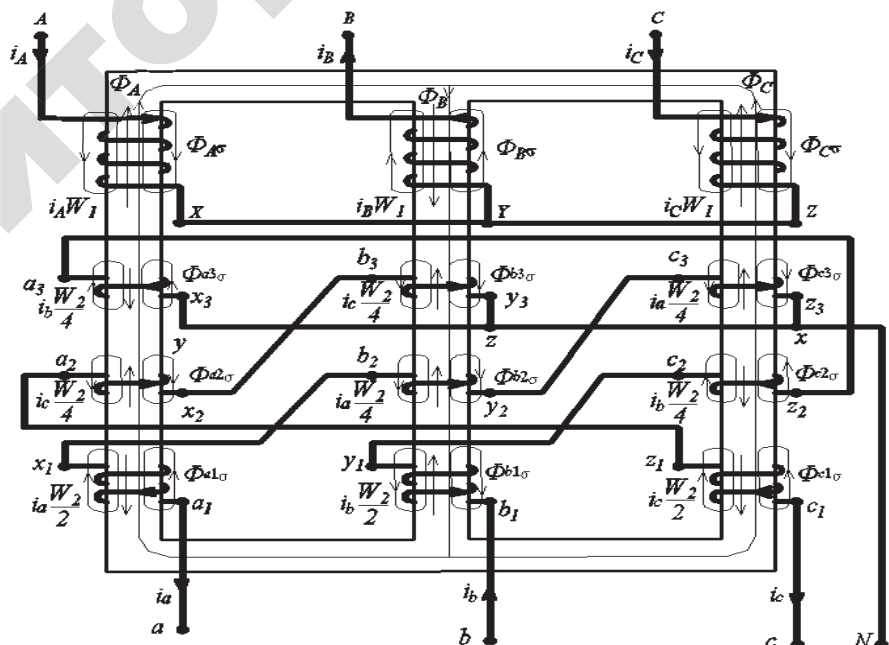


Рисунок 2. Схема распределения МДС и магнитных потоков трехфазного трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

$$i_c = I_{Cm} \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_c),$$

где I_{Am}, I_{Bm}, I_{Cm} – амплитудные значения первичных соответствующих фазных токов при нагрузке, А;

$\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ – углы сдвига векторов токов и напряжений соответствующих фаз первичной стороны, рад.

Так как магнитное поле трансформатора имеет пространственное распределение, то часть его силовых линий замыкается, минуя магнитопровод и создавая потоки рассеяния первичной обмотки $\Phi_{A\sigma}, \Phi_{B\sigma}, \Phi_{C\sigma}$, а также частей вторичной обмотки $\Phi_{a1\sigma}, \Phi_{a2\sigma}, \Phi_{a3\sigma}, \Phi_{b1\sigma}, \Phi_{b2\sigma}, \Phi_{b3\sigma}, \Phi_{c1\sigma}, \Phi_{c2\sigma}, \Phi_{c3\sigma}$ (рис. 2). Магнитные потоки рассеяния в основном сцеплены с создающими их обмотками и индуцируют в них ЭДС рассеяния.

ЭДС рассеяния первичных фазных обмоток будут равны:

$$\begin{aligned} e_{A\sigma} &= -L_{A\sigma} \frac{di_A}{dt} = -L_{A\sigma} \frac{d(I_{Am} \sin(\omega t - \varphi_A))}{dt} = \\ &= -L_{A\sigma} \omega I_{Am} \cos(\omega t - \varphi_A) = \\ &= I_{Am} x_A \sin(\omega t - \varphi_A - \frac{\pi}{2}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_{B\sigma} &= -L_{B\sigma} \frac{di_B}{dt} = -L_{B\sigma} \frac{d(I_{Bm} \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_B))}{dt} = \\ &= -L_{B\sigma} \omega I_{Bm} \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_B) = \\ &= I_{Bm} x_B \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_B - \frac{\pi}{2}), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} e_{C\sigma} &= -L_{C\sigma} \frac{di_C}{dt} = -L_{C\sigma} \frac{d(I_{Cm} \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_C))}{dt} = \\ &= -L_{C\sigma} \omega I_{Cm} \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_C) = \\ &= I_{Cm} x_C \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_C - \frac{\pi}{2}), \end{aligned}$$

где $L_{A\sigma}, L_{B\sigma}, L_{C\sigma}$ – индуктивности рассеяния соответствующих первичных фазных обмоток, Гн;

$x_A = \omega L_{A\sigma}, x_B = \omega L_{B\sigma}, x_C = \omega L_{C\sigma}$ – индуктивные сопротивления рассеяния соответствующих фаз первичной обмотки, Ом.

ЭДС рассеяния соответствующих вторичных фазных обмоток будут равны:

$$\begin{aligned} e_{a\sigma} &= e_{a1\sigma} + e_{b2\sigma} + e_{c3\sigma} = \\ &= -L_{a1\sigma} \frac{di_a}{dt} - L_{b2\sigma} \frac{di_a}{dt} - L_{c3\sigma} \frac{di_a}{dt} = \\ &= (-L_{a1\sigma} - L_{b2\sigma} - L_{c3\sigma}) \frac{di_a}{dt} = \\ &= (-L_{a1\sigma} - L_{b2\sigma} - L_{c3\sigma}) \times \\ &\quad \frac{d(I_{am} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \gamma_a - \frac{\pi}{2}))}{dt} = \\ &= (-L_{a1\sigma} - L_{b2\sigma} - L_{c3\sigma}) \omega I_{am} \times \\ &\quad \times \cos(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \gamma_a - \frac{\pi}{2}) = \\ &= (\omega L_{a1\sigma} + \omega L_{b2\sigma} + \omega L_{c3\sigma}) I_{am} \times \\ &\quad \times \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \gamma_a - \pi) = \\ &= I_{am} (x_{a1} + x_{b2} + x_{c3}) \times \\ &\quad \times \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \gamma_a - \pi), \\ e_{b\sigma} &= e_{b1\sigma} + e_{c2\sigma} + e_{a3\sigma} = \\ &= -L_{b1\sigma} \frac{di_b}{dt} - L_{c2\sigma} \frac{di_b}{dt} - L_{a3\sigma} \frac{di_b}{dt} = \\ &= (-L_{b1\sigma} - L_{c2\sigma} - L_{a3\sigma}) \frac{di_b}{dt} = \\ &= (-L_{b1\sigma} - L_{c2\sigma} - L_{a3\sigma}) \times \\ &\quad \frac{d(I_{bm} \sin(\omega t - \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \gamma_b - \frac{\pi}{2}))}{dt} = \\ &= (-L_{b1\sigma} - L_{c2\sigma} - L_{a3\sigma}) \omega I_{bm} \times \\ &\quad \times \cos(\omega t - \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \gamma_b - \frac{\pi}{2}) = \\ &= (\omega L_{b1\sigma} + \omega L_{c2\sigma} + \omega L_{a3\sigma}) I_{bm} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \times \sin\left(\omega t - \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \gamma_b - \pi\right) = \\
 & = I_{bm} (x_{b1} + x_{c2} + x_{a3}) \times \\
 & \times \sin\left(\omega t - \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \gamma_b - \pi\right), \\
 e_{c\sigma} & = e_{c1\sigma} + e_{a2\sigma} + e_{b3\sigma} = \\
 & = -L_{c1\sigma} \frac{di_c}{dt} - L_{a2\sigma} \frac{di_c}{dt} - L_{b3\sigma} \frac{di_c}{dt} = \\
 & = (-L_{c1\sigma} - L_{a2\sigma} - L_{b3\sigma}) \frac{di_c}{dt} = \\
 & = (-L_{c1\sigma} - L_{a2\sigma} - L_{b3\sigma}) \times \\
 & \times \frac{d\left(I_{cm} \sin\left(\omega t + \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \gamma_c - \frac{\pi}{2}\right)\right)}{dt} = \\
 & = (-L_{c1\sigma} - L_{a2\sigma} - L_{b3\sigma}) \omega I_{cm} \times \\
 & \times \cos\left(\omega t + \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \gamma_c - \frac{\pi}{2}\right) = \\
 & = (\omega L_{c1\sigma} + \omega L_{a2\sigma} + \omega L_{b3\sigma}) I_{cm} \times \\
 & \times \sin\left(\omega t + \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \gamma_c - \pi\right) = \\
 & = (x_{c1} + x_{a2} + x_{b3}) I_{cm} \times \\
 & \times \sin\left(\omega t + \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \gamma_c - \pi\right),
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

где $L_{a1\sigma}, L_{a2\sigma}, L_{a3\sigma}, L_{b1\sigma}, L_{b2\sigma}, L_{b3\sigma}, L_{c1\sigma}, L_{c2\sigma}, L_{c3\sigma}$ – индуктивности рассеяния частей вторичных фазных обмоток, соответственно, $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$, Гн;

$x_{a1}, x_{a2}, x_{a3}, x_{b1}, x_{b2}, x_{b3}, x_{c1}, x_{c2}, x_{c3}$ – индуктивные сопротивления рассеяния соответствующих частей вторичных фазных обмоток, Ом.

Соответственно

$$\begin{aligned}
 x_{a1} & = \omega L_{a1\sigma}, x_{a2} = \omega L_{a2\sigma}, x_{a3} = \omega L_{a3\sigma}, \\
 x_{b1} & = \omega L_{b1\sigma}, x_{b2} = \omega L_{b2\sigma}, x_{b3} = \omega L_{b3\sigma}, \\
 x_{c1} & = \omega L_{c1\sigma}, x_{c2} = \omega L_{c2\sigma}, x_{c3} = \omega L_{c3\sigma}.
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Протекая по обмоткам трансформатора, токи вызывают падения напряжений на их активных сопротивлениях.

Согласно второму закону Кирхгофа, фазные

напряжения первичной обмотки будут равны:

$$\begin{aligned}
 u_A & = -e_A - e_{A\sigma} + i_A R_A, \\
 u_B & = -e_B - e_{B\sigma} + i_B R_B, \\
 u_C & = -e_C - e_{C\sigma} + i_C R_C,
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

где R_A, R_B, R_C – активные сопротивления соответствующих первичных фазных обмоток, Ом.

Соответственно, уравнения фазных напряжений вторичной обмотки:

$$\begin{aligned}
 u_a & = e_a + e_{a\sigma} - i_a (R_{a1} + R_{b2} + R_{c3}) = \\
 & = e_{c3} + e_{b2} + e_{a1} + e_{a\sigma} - i_a (R_{a1} + R_{b2} + R_{c3}), \\
 u_b & = e_b + e_{b\sigma} - i_b (R_{b1} + R_{c2} + R_{a3}) = \\
 & = e_{a3} + e_{c2} + e_{b1} + e_{b\sigma} - i_b (R_{b1} + R_{c2} + R_{a3}), \\
 u_c & = e_c + e_{c\sigma} - i_c (R_{c1} + R_{a2} + R_{b3}) = \\
 & = e_{b3} + e_{a2} + e_{c1} + e_{c\sigma} - i_c (R_{c1} + R_{a2} + R_{b3}),
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

где $R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}, R_{b1}, R_{b2}, R_{b3}, R_{c1}, R_{c2}, R_{c3}$ – активные сопротивления соответствующих частей вторичных обмоток, Ом.

Так как напряжения, ЭДС, токи, МДС и магнитные потоки трансформатора при принятых допущениях гармонически изменяются во времени по синусоидальному закону, то основные уравнения трансформатора могут быть представлены в комплексной форме, где мгновенные значения вышеперечисленных параметров заменены их действующими значениями. Тогда основные уравнения трансформатора будут иметь следующий вид:

– уравнения соответствующих напряжений первичной обмотки:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_A & = -\underline{E}_A - \underline{E}_{A\sigma} + \underline{I}_A R_A = \\
 & = -\underline{E}_A + \underline{I}_A (R_A + jx_A), \\
 \underline{U}_B & = -\underline{E}_B - \underline{E}_{B\sigma} + \underline{I}_B R_B = \\
 & = -\underline{E}_B + \underline{I}_B (R_B + jx_B), \\
 \underline{U}_C & = -\underline{E}_C - \underline{E}_{C\sigma} + \underline{I}_C R_C = \\
 & = -\underline{E}_C + \underline{I}_C (R_C + jx_C);
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

– уравнения соответствующих напряжений вторичной обмотки:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{-a} & = \underline{E}_{c3} + \underline{E}_{b2} + \underline{E}_{a1} + \underline{E}_{a\sigma} - \\
 & - \underline{I}_a (R_{a1} + R_{b2} + R_{c3}) = \\
 & = \underline{E}_{c3} + \underline{E}_{b2} + \underline{E}_{a1} - \\
 & - \underline{I}_a [(R_{a1} + R_{b2} + R_{c3}) + j(x_{a1} + x_{b2} + x_{c3})],
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_b &= \underline{E}_{a3} + \underline{E}_{c2} + \underline{E}_{b1} + \underline{E}_{b\sigma} - \\ & - \underline{I}_b (R_{b1} + R_{c2} + R_{a3}) = \\ & = \underline{E}_{a3} + \underline{E}_{c2} + \underline{E}_{b1} - \\ & - \underline{I}_b [(R_{b1} + R_{c2} + R_{a3}) + j(x_{b1} + x_{c2} + x_{a3})], \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_c &= \underline{E}_{b3} + \underline{E}_{a2} + \underline{E}_{c1} + \underline{E}_{c\sigma} - \\ & - \underline{I}_c (R_{c1} + R_{a2} + R_{b3}) = \\ & = \underline{E}_{b3} + \underline{E}_{a2} + \underline{E}_{c1} - \\ & - \underline{I}_c [(R_{c1} + R_{a2} + R_{b3}) + j(x_{c1} + x_{a2} + x_{b3})]; \end{aligned}$$

– уравнения МДС в стержнях магнитопровода:

$$\underline{I}_A W_1 + \underline{I}_a \frac{W_2}{2} - \underline{I}_b \frac{W_2}{4} - \underline{I}_c \frac{W_2}{4} = \underline{I}_{A\mu} W_1,$$

$$\underline{I}_B W_1 + \underline{I}_b \frac{W_2}{2} - \underline{I}_a \frac{W_2}{4} - \underline{I}_c \frac{W_2}{4} = \underline{I}_{B\mu} W_1, \quad (23)$$

$$\underline{I}_C W_1 + \underline{I}_c \frac{W_2}{2} - \underline{I}_a \frac{W_2}{4} - \underline{I}_b \frac{W_2}{4} = \underline{I}_{C\mu} W_1.$$

Основным уравнениям трансформатора (21-23) соответствует векторная диаграмма, представленная на рис. 3.

Заключение

1. Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» имеет нулевую группу соединения обмоток, так как ЭДС вторичной обмотки совпадают по фазе с одноименными ЭДС первичной обмотки, что позволяет включать их на параллельную работу с широко распространенными трансформаторами «звезда-звезда с нулевым проводом» с целью повышения качества электроэнергии.

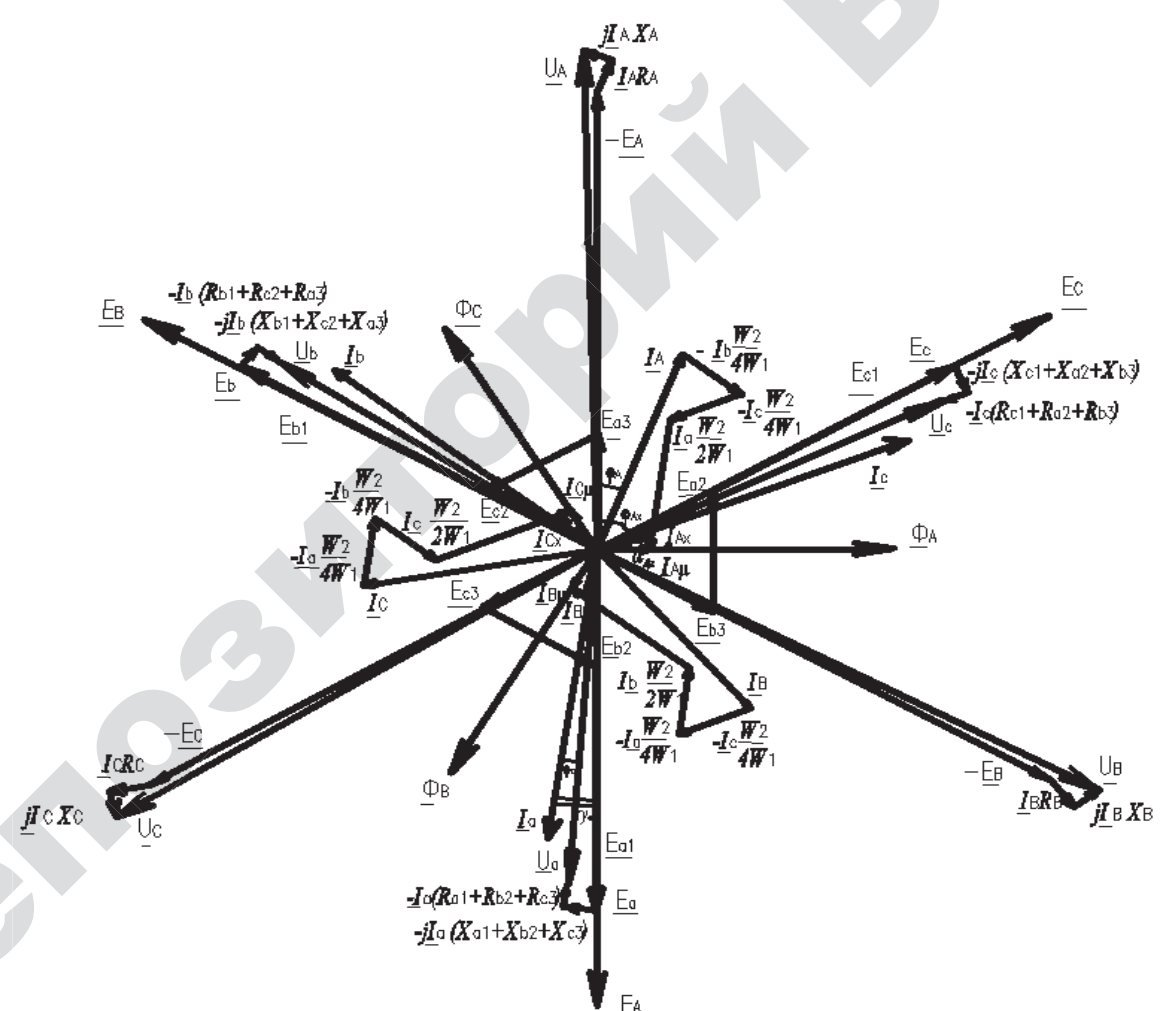


Рисунок 3. Векторная диаграмма напряжений, ЭДС и токов трехфазного трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

2. Результирующее магнитное поле трансформатора и индуцируемые им ЭДС в обмотках не зависят от величины нагрузки, потому что изменение размагничивающего действия вторичной обмотки компенсируется пропорциональным изменением намагничивающего действия первичной обмотки. При этом вторичные ЭДС предложенного трансформатора на 25 % меньше, чем у трансформатора «звезда-звезда с нулевым проводом» с тем же количеством витков, что требует соответствующего увеличения количества витков у его вторичной обмотки для получения одинакового напряжения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трехфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток: патент Респ. Беларусь 16008 / А.И. Зеленькевич, В.М. Збродыга; заявитель Белор. гос. аграрный технический ун-т. –

№ а 20100121; заявл. 2010.02.01; опубл. 30.06.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 3. – С. 180-181.

2. Збродыга, В.М. Трехфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток / В.М. Збродыга, А.И. Зеленькевич // Наука – образованию, производству, экономике: матер. 11-й междунар. науч.-технич. конф. – Минск, 2013 г. / БНТУ; редкол. Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2013. – Т. 1. – С. 62.

3. Збродыга, В.М. Применения трансформаторов со специальными схемами соединения обмоток для снижения несимметрии напряжений в сетях 0,4 кВ сельскохозяйственного назначения / В.М. Збродыга, А.И. Зеленькевич // Наука – образованию, производству, экономике: матер. 12-й междунар. научн.-технич. конф., Минск, 2014 г./ БНТУ; редкол. Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2014.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 25.09.2017

УДК 631.371:620.9

МЕХАНИЗМ ДОГОВОРНЫХ ОТНОШЕНИЙ СЕЛЬСКИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

Н.Г. Королевич,

зав. каф. экономики и организации предприятий АПК БГАТУ, канд. экон. наук, доцент

Г. И. Янукович,

профессор каф. электроснабжения БГАТУ, канд. техн. наук, профессор

Показано несовершенство, с точки зрения качества электроснабжения, системы экономических взаимоотношений между поставщиками электроэнергии и сельскохозяйственными потребителями. Приведена методика расчета платежа за электроэнергию, включающая штрафные санкции за нарушение договорных обязательств.

Ключевые слова: электроэнергия, система электроснабжения, надежность, качество электроэнергии, ущерб, штраф.

The imperfection, in terms of the quality of electricity supply, the system of economic relations between electricity suppliers and agricultural consumers is shown. The methodology for calculating the payment for electricity, including penalties for violation of contractual obligations, is given.

Keywords: electricity, power supply system, reliability, quality of electricity, damage, penalty.

Введение

Система электроснабжения в республике является важнейшей составной частью производственной инфраструктуры сельского хозяйства, как в рамках предприятия, так и в масштабе республики, и во многом определяет качество его функционирования. В связи с расширением индустриальных способов производства сельскохозяйственной продукции возрастают требования к организации электроснабжения. В производство внедряются новые электрифицированные технологические процессы, оборудование и электроприборы. Это в значительной степени и связано с определенными затратами денежных средств и материалов. Как следствие, под

влиянием требований сельскохозяйственных потребителей электроэнергии как объектов обслуживания развивается система электроснабжения.

Одновременно функционирование системы электроснабжения предполагает учет и контроль за использованием электроэнергии, своевременное осуществление текущих платежей, соблюдение правил эксплуатации электрооборудования и сокращение перетоков энергии и потерь путем установки средств компенсации реактивной мощности.

В Республике Беларусь система экономических взаимоотношений между поставщиками электроэнергии и сельскохозяйственными потребителями требует совершенствования. В настоящее время экономический