

Лекция №7

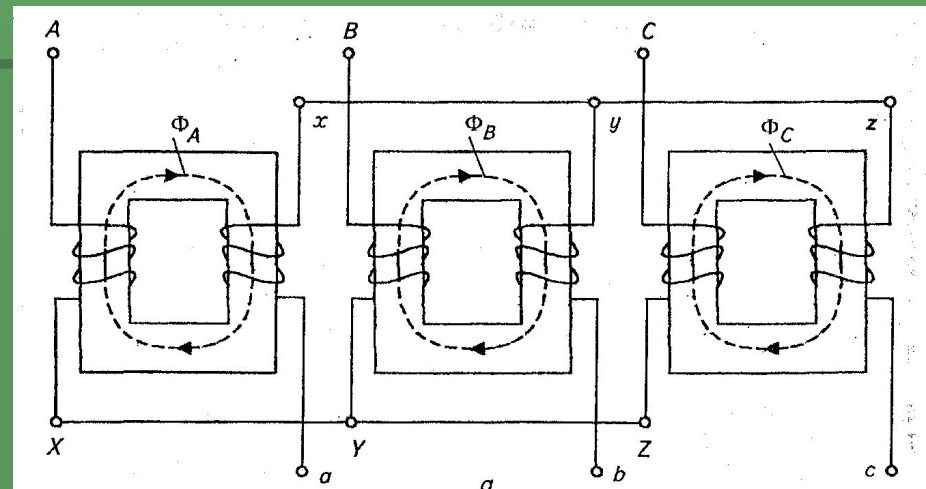
(Фамилия И. О.; группа; число)

Вопросы лекции: преобразование трёхфазного тока; схемы и группы соединения обмоток трёхфазных трансформаторов; особенности режима холостого хода трёхфазных трансформаторов.

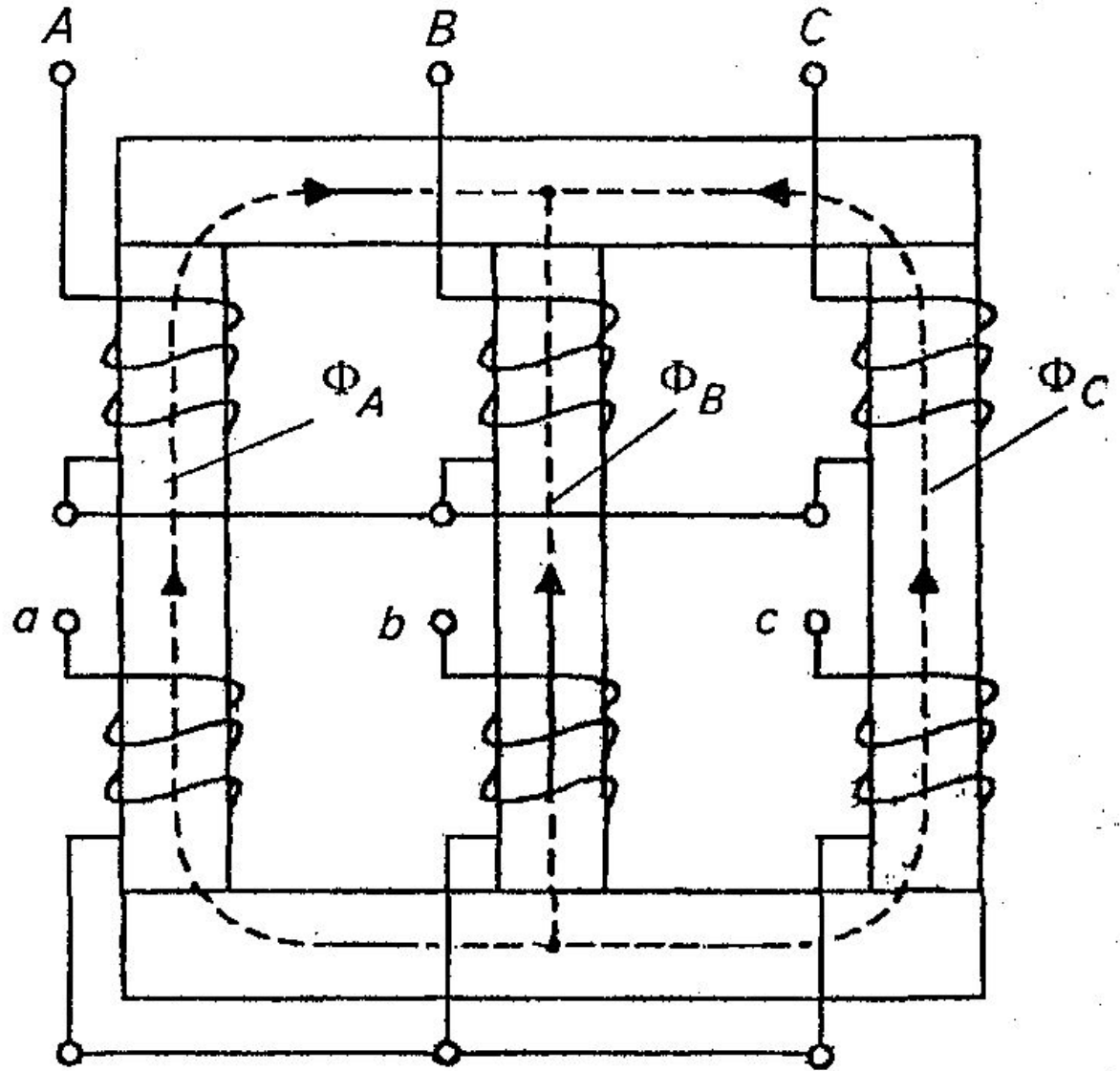
8. ТРЁХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

8.1. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТРЁХФАЗНОГО ТОКА

Групповой
трансформатор



Трёхфазный
трансформатор
со связанной
магнитной
системой



8.2. СХЕМЫ И ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ТРЁХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Первичная и вторичная обмотки одноимённых фаз:

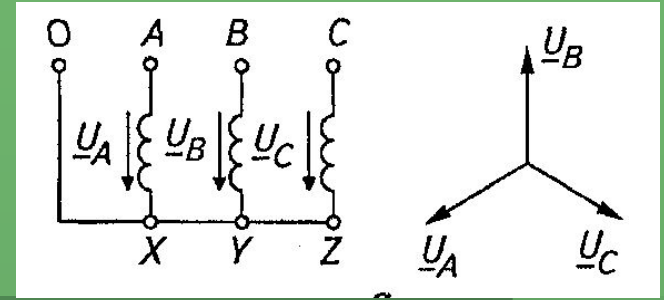
- размещаются на одном стержне;
- имеют одинаковое направление намотки;
- имеют симметричную маркировку выводов.

Принятые положительные направления:

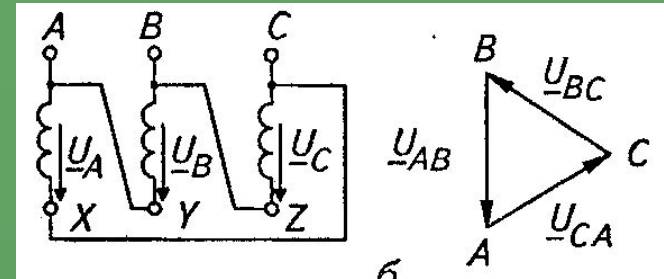
- ЭДС – от конца к началу обмотки;
- Напряжения – от начала к концу.

Возможные схемы соединения обмоток: треугольник (Δ, D)
звезда (Y, Y) , зигзаг (Y, Z) , звезда с нулём (Y, Y_N) ,
зигзаг с нулём (Y, Z_N) .

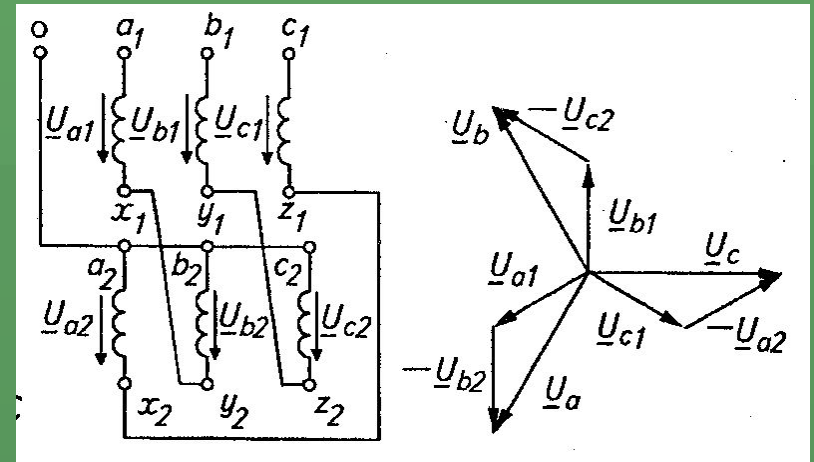
Звезда с нулём



Треугольник



Зигзаг с нулём

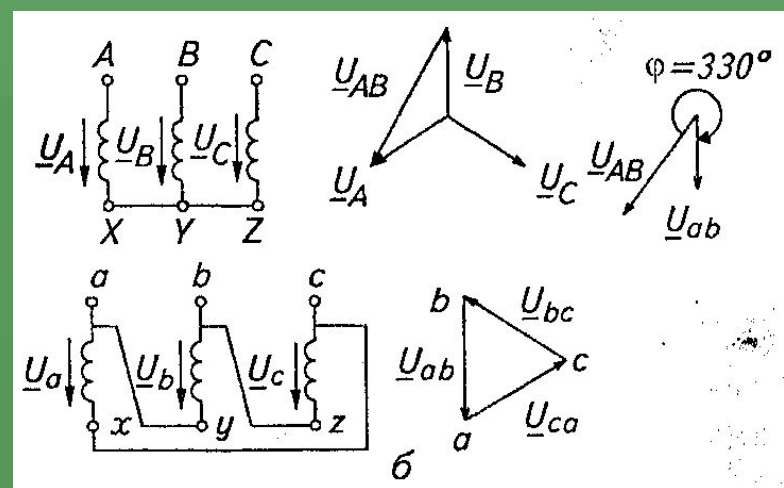
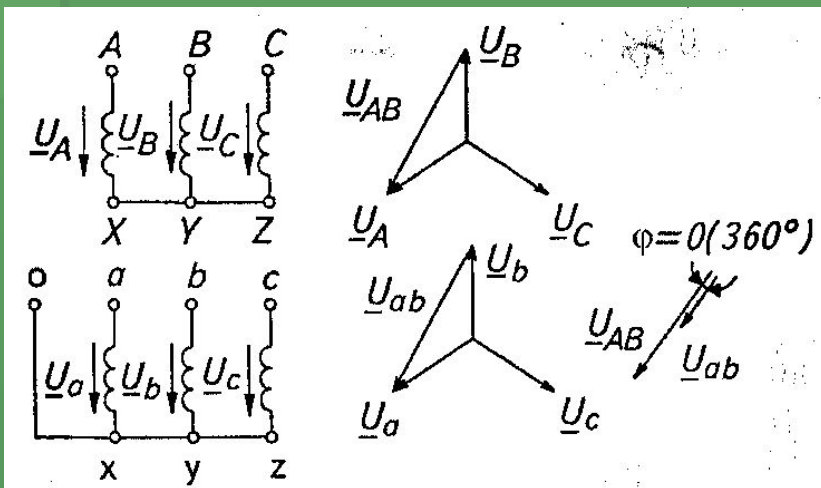


Е

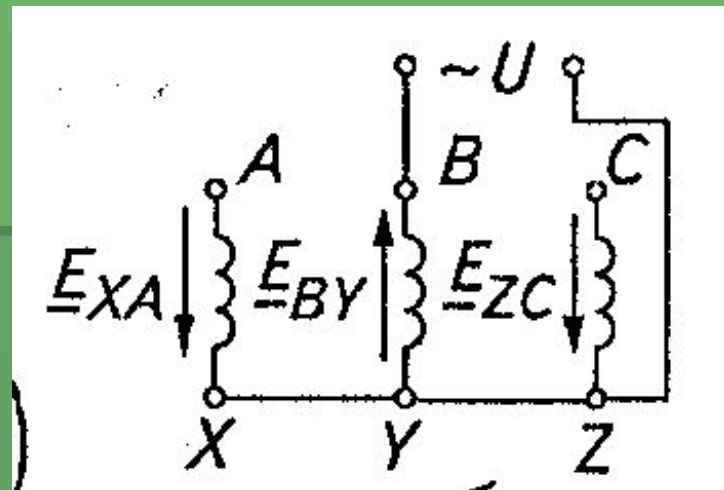
Группа соединения обмоток характеризует относительный сдвиг фаз линейных напряжений первичной и вторичной обмоток. Группа соединения обозначается цифрами от нуля до 12 и определяется следующим образом ...

Выпускаются трансформаторы

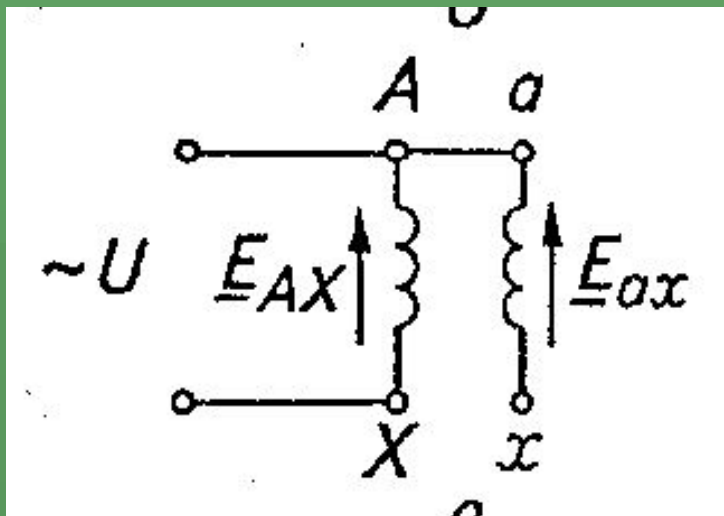
$$\begin{array}{l}
 \text{Y/Y}_H - 0, \quad \text{Y/D} - 11, \quad \text{Y}_H/\text{D} - 11 \\
 \text{D/Y}_{II} - 11, \quad \text{Y/Z}_H - 11.
 \end{array}$$



Маркировка выводов
первичной обмотки



Маркировка выводов
вторичной обмотки

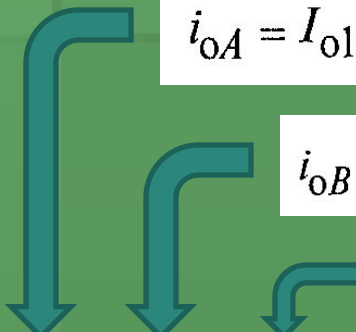


8.3 ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМА ХОЛОСТОГО ХОДА ТРЁХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В однофазном трансформаторе при синусоидальном магнитном потоке ток холостого хода из-за нелинейности магнитной характеристики будет несинусоидальным:

$$i_o \approx i_{op} = I_{o1m} \sin \omega t + I_{o3m} \sin 3\omega t + I_{o5m} \sin 5\omega t + \dots$$

В трёхфазном трансформаторе:


$$i_{oA} = I_{o1m} \sin \omega t + I_{o3m} \sin 3\omega t + \dots;$$

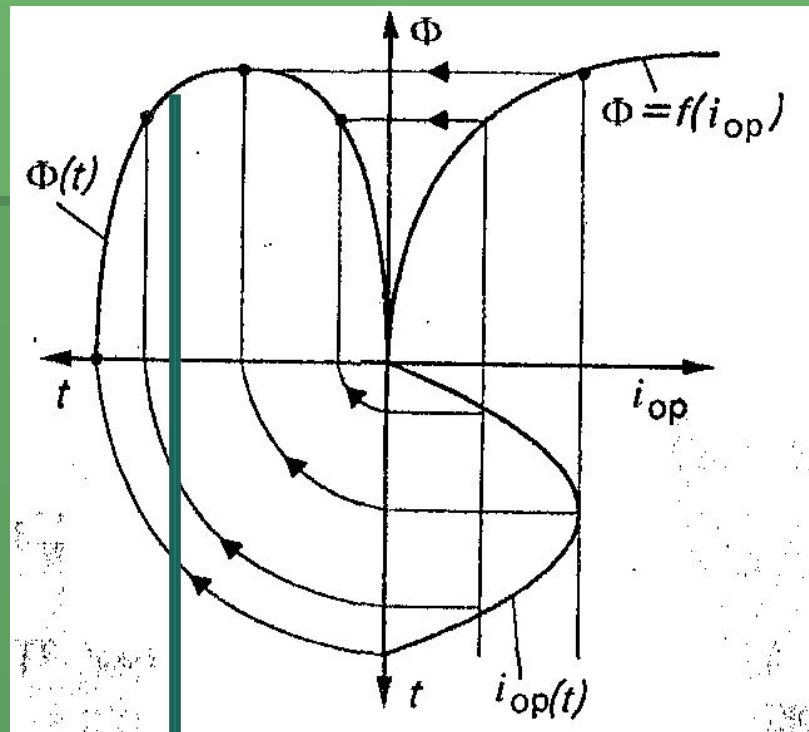
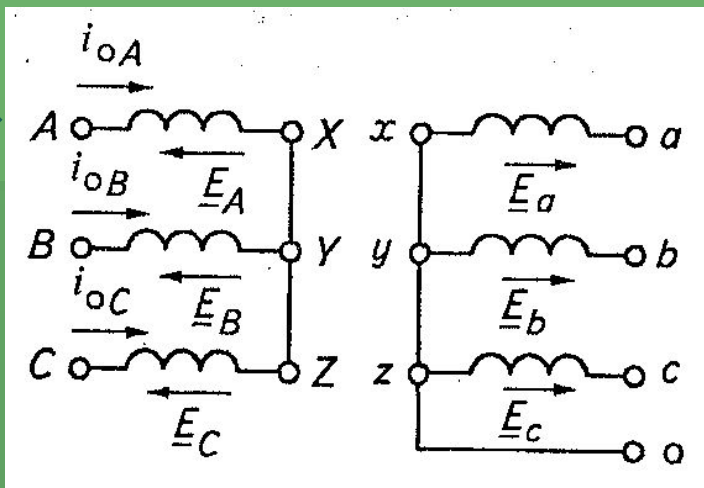
$$i_{oB} = I_{o1m} \sin (\omega t - 120^\circ) + I_{o3m} \sin^3 (\omega t - 120^\circ) + \dots;$$

$$i_{oC} = I_{o1m} \sin (\omega t + 120^\circ) + I_{o3m} \sin^3 (\omega t + 120^\circ) + \dots$$

$$i_{o3A} = i_{o3B} = i_{o3C} = I_{o3m} \sin 3\omega t.$$

$$\Phi_A = \Phi_{1m} \sin \omega t + \Phi_{3m} \sin 3\omega t + \dots$$

Схема звезда – звезда с нулём - ($y/y_H=0$).



Фазные токи не содержат 3-й гармоники, поэтому практически синусоидальны

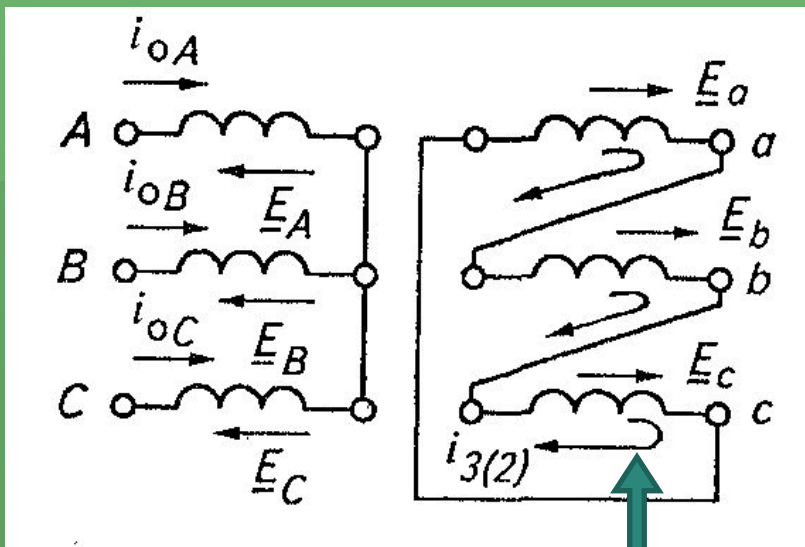
В групповом трансформаторе фазные ЭДС несинусоидальные

Линейные ЭДС не содержат третьих гармоник

$$\Phi_A = \Phi_{1m} \sin \omega t + \Phi_{3m} \sin 3\omega t + \dots$$

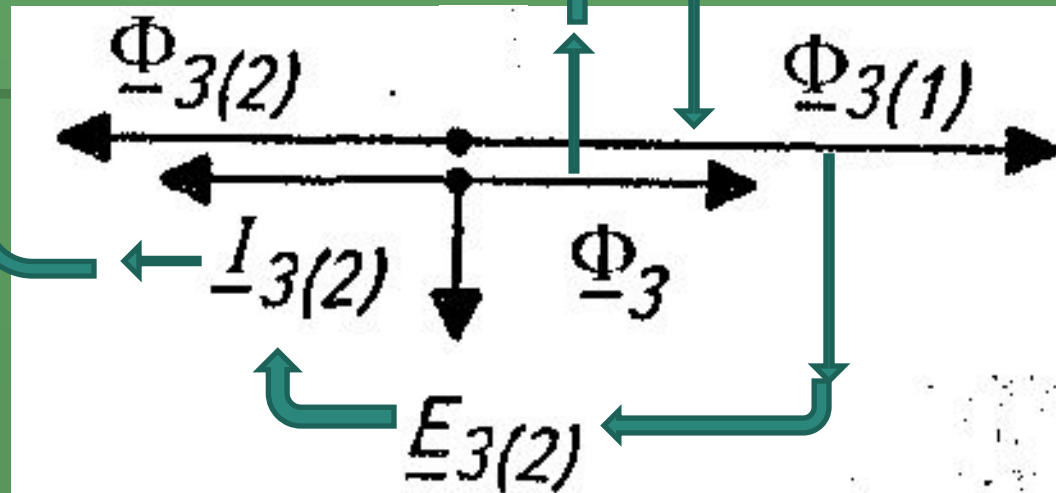
В трёхстержневом трансформаторе потоки третьей гармоники малы, поэтому фазные ЭДС искажены в меньшей степени

Схема звезда – треугольник - У/Д-11



Фазные токи также не содержат 3-й гармоники, поэтому будут практически синусоидальны, магнитный же поток будет содержать 3-и гармоники

Результирующий магнитный поток будет скомпенсирован и ЭДС будет синусоидальна



8.4. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

Причины несимметрии ...

Требуется определить: линейные и фазные напряжения вторичной обмотки, фазные напряжения и токи первичной обмотки.

Заданы: линейные напряжения первичной обмотки

$\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ и токи вторичной обмотки

I_a, I_b, I_c .

Общим методом анализа несимметричных режимов является метод симметричных составляющих .

Сущность метода симметричных составляющих:

любая несимметричная система токов или напряжений может быть представлена как сумма трёх симметричных систем прямой, обратной и нулевой последовательностей фаз.

Например для системы несимметричных токов



$$\begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}; \\ I_b &= I_{b1} + I_{b2} + I_{b0}; \\ I_c &= I_{c1} + I_{c2} + I_{c0}, \end{aligned}$$

где I_{a1}, I_{b1}, I_{c1} - уравновешенная ($\Sigma I_1 = 0$) симметричная ($I_{b1} = I_{a1}a^2; I_{c1} = I_{a1}a; a = e^{j120}$) система токов прямой последовательности фаз;

I_{a2}, I_{b2}, I_{c2} - уравновешенная ($\Sigma I_2 = 0$) симметричная ($I_{b2} = I_{a2}a; I_{c2} = I_{a2}a^2$) система токов обратной последовательности фаз;

$I_{a0}; I_{b0}; I_{c0}$ - неуравновешенная ($\Sigma I_0 \neq 0$) симметричная ($I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$) система токов нулевой последовательности фаз.

С учётом принятых обозначений

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}; \\ I_b &= I_{a1} a^2 + I_{a2} a + I_{a0}; \\ I_c &= I_{a1} a + I_{a2} a^2 + I_{a0}, \end{aligned}$$

Так как $1 + a + a^2 = 0$

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2 I_c); \\ I_{a2} &= \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + aI_c); \\ I_{a0} &= \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c). \end{aligned}$$

Проводится анализ работы трансформатора отдельно для каждой последовательности. При этом :

- для токов прямой и обратной последовательностей используется упрощенная схема замещения $Z_{тр} = Z_K$.
- для токов нулевой последовательности используется Г – образная схема замещения. При этом для трансформаторов D/Y_H и Y/Y_H со стороны звезды

$$Z_{0*} \approx Z_{K*} \text{ и } Z_{0*} = Z_{K*}/2 + Z_m,$$

$$Z_m^* = 0,3 \dots 1,0$$

8.4.1. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА НА НЕСИММЕТРИЧНУЮ НАГРУЗКУ ПРИ ОТСУТСТВИИ ТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Токов нулевой последовательности нет там, где нет нулевого провода, т. е. в схемах Y/Y или Y/Δ .

В этом случае отпадает необходимость разложения токов на симметричные составляющие, так как токи нулевой и обратной последовательности одинаково трансформируются из одной обмотки в другую.

Если пренебречь токами намагничивания и принять $K = w_2/w_1 = 1$, то $I_A = -I_a$; $I_B = -I_b$; $I_C = -I_c$, т. е. МДС обмоток уравнивается в каждой фазе и каждую фазу можно рассматривать отдельно. Тогда

$$\underline{U}_A - \underline{I}_A \underline{Z}_K = -\underline{U}_a; \quad \underline{U}_B - \underline{I}_B \underline{Z}_K = -\underline{U}_b; \quad \underline{U}_C - \underline{I}_C \underline{Z}_K = -\underline{U}_c.$$

Несимметрия напряжений мала, так как ...
Коэффициент несимметрии допускается 2%

$$\varepsilon_2 = \frac{U_2}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100$$

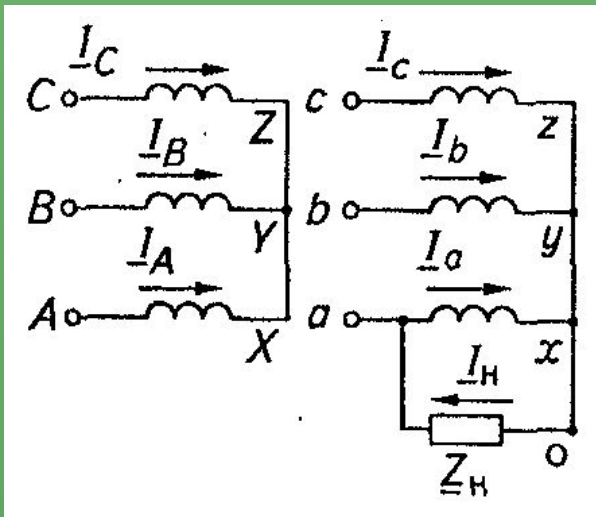
8.4.2. НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ПРИ НАЛИЧИИ ТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

В трансформаторах Y_N/Y_N и Y_N/D токи нулевой последовательности протекают в обеих обмотках, поэтому МДС уравниваются в каждой фазе и искажение напряжений как и в предыдущем случае мало.

В трансформаторах Y/Y_N и Y/Z_N вторичные токи нулевой последовательности не трансформируются в первичную обмотку, поэтому становятся полностью намагничивающими и создают потоки нулевой последовательности, которые в свою очередь вызывают появление ЭДС нулевой последовательности в обеих обмотках, искажающие симметрию фазных напряжений.

Анализ работы трансформатора со схемой y/y_H .

Примем: $K = w_2/w_1 = 1$, ток намагничивания = 0,
нагрузка несимметричная ($I_a \neq 0, I_b = I_c = 0$).



По 1-му закону Кирхгофа:

для первичной цепи — $I_A + I_B + I_C = 0$;

для вторичной цепи — $I_a + I_b + I_c - I_H = 0$.

Тогда их сумма $\Rightarrow 3(I_A + I_a) = I_H$.

По 2-му закону Кирхгофа
для замкнутой магнитной цепи:

по контуру AabB $\Rightarrow I_A + I_a - I_b - I_B = 0$;

по контуру AacC $\Rightarrow I_A + I_a - I_c - I_C = 0$.

$$I_A + I_a = I_B + I_b = I_C + I_c.$$

$$I_A = -I_a + \frac{I_H}{3}.$$

$$I_B = -I_b + \frac{I_H}{3};$$

$$I_C = -I_c + \frac{I_H}{3}.$$

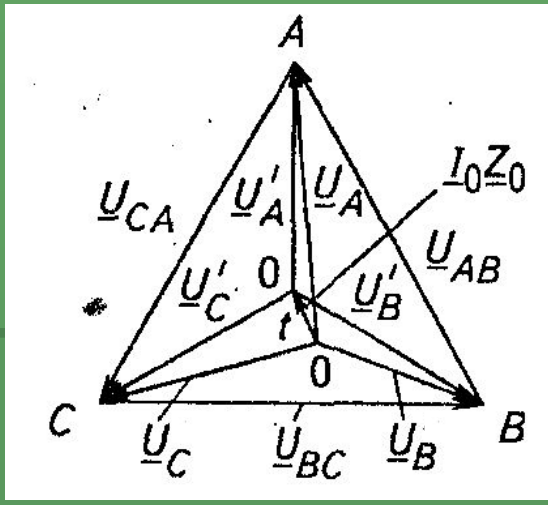
Полученные уравнения показывают, что вторичные токи полностью не уравновешиваются первичными токами. Их доля $\frac{I_H}{3}$, являющаяся током нулевой последовательности I_0 , замыкается через нулевой провод. Ток в нулевом проводе $I_H = 3I_0$. В рассматриваемом случае, когда $I_b = I_c = 0$, с учётом коэффициента трансформации $K = W_2/W_1$ первичные токи

$$I_A = -\frac{2}{3}I_a K; \quad I_B = I_C = \frac{1}{3}I_a K.$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= -\underline{E}_A - \underline{E}_0 + \underline{I}_A \underline{Z}_1; \\ \underline{U}_B &= -\underline{E}_B - \underline{E}_0 + \underline{I}_B \underline{Z}_1; \\ \underline{U}_C &= -\underline{E}_C - \underline{E}_0 + \underline{I}_C \underline{Z}_1; \end{aligned}$$

$$\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0;$$

$$\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = -3\underline{E}_0 = 3\underline{I}_0 \underline{Z}_0,$$



$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{E}_a + \underline{E}_0 - \underline{I}_a \underline{Z}_2; \\ \underline{U}_b &= \underline{E}_b + \underline{E}_0 - \underline{I}_b \underline{Z}_2; \\ \underline{U}_c &= \underline{E}_c + \underline{E}_0 - \underline{I}_c \underline{Z}_2. \end{aligned}$$

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0$$

В схеме Y/Z_H потоки нулевой последовательности в каждом стержне компенсируются, поэтому искажение напряжений по сравнению со схемой Y/Y_H на порядок меньше.

