

Трехфазные трансформаторы

1. Паспортные данные трехфазных трансформаторов

Эксплуатационные параметры трансформатора, соответствующие режиму работы, для которого он предназначен заводом-изготовителем, указываются в каталогах и на табличке, прикрепленной к корпусу.

Таковыми являются:

1. Номинальная мощность $S_{НОМ}$. Ею является полная мощность, которая для трехфазного трансформатора определяется как

$$S_{НОМ} = \sqrt{3}U_{1лном} \cdot I_{1лном}$$

Так как коэффициент полезного действия трансформатора весьма велик и в номинальном режиме, как правило, составляет 95-98%, то принято считать, что мощности первичной и вторичной обмоток равны $S_1 = S_2 = S_{НОМ}$.

2. Под номинальными напряжениями $U_{1л,ном}$ и $U_{2л,ном}$ понимают линейные напряжения каждой из обмоток. При неизменном линейном напряжении первичной обмотки напряжение вторичной обмотки будет зависеть от характера нагрузки (активный, индуктивный, емкостной).

Поэтому, чтобы избежать неопределенности, за номинальное напряжение вторичной обмотки принимается напряжение при холостом ходе, когда ток вторичной обмотки равен нулю ($I_{2,л} = 0$).

По значениям номинальных напряжений может быть определен коэффициент трансформации, определяемый как отношение номинального высшего напряжения к номинальному низшему напряжению $n = U_{ВН} / U_{НН}$. Для трехфазных трансформаторов в зависимости от способа соединения обмоток определяются линейный и фазный коэффициенты трансформации.

При соединении обмоток по схеме "звезда - звезда" эти коэффициенты равны $n_{л} = n_{ф}$, а при соединении "звезда - треугольник" отличаются в $\sqrt{3}$ раз ($n_{л} = \sqrt{3} \cdot n_{ф}$)

3. Номинальными токами трансформатора — первичным $I_{1л,ном}$ и вторичным $I_{2л,ном}$ — называются линейные токи, указанные на щитке и вычисленные по номинальным значениям мощности и напряжения.

4. Частота питающего напряжения f , выраженная в Гц. Принятый стандарт промышленной частоты в России — 50 Гц.

5. Напряжение короткого замыкания, выраженное в процентах по отношению к номинальному напряжению первичной обмотки

$$U_k \% = \frac{U_k}{U_{1ном}} 100\%$$

6. Схема и группа соединения. Группа трансформатора определяется относительным сдвигом фаз между электродвижущими силами первичной и вторичной обмоток. В зависимости от схемы соединения обмоток (Y или A) и порядка соединения их начал и концов получаются различные углы сдвига фаз между линейными напряжениями.

Принято сдвиг фаз между ЭДС характеризовать положением стрелок на циферблате часов, при этом вектор ЭДС обмотки высшего напряжения мысленно совмещают с минутной стрелкой часов и постоянно устанавливают на цифре 12, а вектор ЭДС обмотки низшего напряжения с часовой стрелкой. Цифра, на которую будет ориентирована часовая стрелка, показывает группу соединения обмоток.

Например, маркировка $Y/Y - 6$ означает, что векторы линейных ЭДС АВ и ав сдвинуты на 180° . Таким образом, в трехфазных трансформаторах может быть образовано 12 групп со сдвигом фаз ЭДС от 0 до 330° через 30° , что соответствует 12 цифрам часового циферблата.

7. Режим работы (продолжительный или кратковременный).

8. Полная масса.

Марка трансформатора содержит информацию о его номинальной мощности и высшем линейном напряжении.

Например, марка ТСМ 60/35 указывает на то, что полная номинальная мощность составляет 60 кВА, а высшее линейное напряжение 35 кВ.

Пример № 1.

Трехфазный трансформатор ТМ-63/10 имеет следующие данные: низшее напряжение $U_2 \sim 400$ В, потери при холостом ходе $P_x = 265$ Вт, потери при коротком замыкании $P_k = 1280$ Вт, напряжение короткого замыкания U_K составляет 5,5% от номинального значения, ток холостого хода I_X составляет 2,8% от номинального значения.

Определить:

- а) фазные напряжения U_{ϕ} при группе соединения трансформатора Y/Δ ;**
- б) фазный n_{ϕ} и линейный n_{Δ} коэффициенты трансформации;**
- в) номинальные токи первичных и вторичных обмоток;**
- г) КПД при нагрузке 0.5 от номинального значения и коэффициенте мощности нагрузки равном 0,8;**
- д) активное и реактивное сопротивления фазы при коротком замыкании;**
- е) абсолютное значение напряжения короткого замыкания;**
- ж) процентное изменение напряжения на вторичной цепи при индуктивном и емкостном характере нагрузки и при номинальном токе;**
- з) напряжение во вторичной цепи, соответствующее этим нагрузкам.**

Расшифровка марки трансформатора ТМ-63/10 означает: Т — трехфазный, М—• масляный, 63 кВ " А — номинальная мощность трансформатора, 10 кВ — напряжение на первичной обмотке. Знак Y/Δ означает, что первичная обмотка соединена в "звезду", вторичная — в "треугольник".

Согласно условиям задачи имеем $u_l = 10000$ В. Так как первичная обмотка соединена "звездой", напряжение на фазе первичной обмотки

$$U_{1\phi} = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = \frac{10000}{1,73} = 5780 \text{ В}$$

Из условия соединения вторичной обмотки "треугольником" имеем

$$U_{2\phi} = U_{2л} = U_{2ном} = 400 \text{ В}$$

Коэффициент трансформации по фазе $n_{\phi} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{5780}{400} = 14,45$

Линейный коэффициент трансформации

$$n_l = \frac{U_{1л}}{U_{2л}} \approx \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}} = \frac{10000}{400} = 25$$

Номинальный ток в первичной обмотке $I_{ном}$ определяем из соотношения

$$S_{ном} = \sqrt{3}U_{1ном}I_{1ном}$$

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{1ном}} = \frac{63000}{1,73 \cdot 10000} = 3,64 A$$

Номинальный ток вторичной обмотки при условии $S_{2ном} \approx S_{1ном}$

$$I_{2ном} = \frac{S}{\sqrt{3}U_{2ном}} = \frac{63000}{1,73 \cdot 400} = 91 A$$

КПД при нагрузке $0,5 P_{ном}$

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_k} = \frac{0,5 \cdot 63000 \cdot 0,8}{0,5 \cdot 63000 \cdot 0,8 + 265 + 0,5^2 \cdot 1280} = 0,81$$

где $S_{ном}$ — номинальная мощность; P_x — потери холостого хода; P_k — потери короткого замыкания; β — коэффициент нагрузки.

Абсолютное значение напряжения при коротком замыкании $U_K = 5,5\% U_{ном} = 0,05510000 = 550$ В.

Активное сопротивление фазы при коротком замыкании

$$R_{\phi} = \frac{P_{\kappa}}{3I_{1\kappa}^2} = \frac{P_{\kappa}}{3I_{1ном}^2} = \frac{1280}{3 \cdot 3,64^2} = 32,20 \text{ Ом}$$

Полное сопротивление фазы

$$Z_{\phi} = \frac{U_{1\phi}}{3I_{1\phi}} = \frac{550}{3 \cdot 3,64} = 50,30 \text{ Ом}$$

реактивное сопротивление фазы

$$X_{\phi} = \sqrt{Z_{\phi}^2 - R_{\phi}^2} = \sqrt{50,3^2 - 32,2^2} = 38,60 \text{ Ом}$$

Для определения процентного падения напряжения воспользуемся формулой

$$U_2 = \beta (U_a \% \cos \varphi_2 + U_p \% \cos \varphi_2)$$

Напряжение короткого замыкания можно выразить через ее составляющие:

$$U_k = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}$$

Определим составляющие короткого замыкания:

а) активная

$$U_a = \frac{P_k}{S_{ном}} 100\% = \frac{1280}{63000} 100\% = 2\%$$

б) реактивная

$$U_p = \sqrt{U_k^2 - U_a^2} = \sqrt{5,5^2 - 2^2} = 5,12\%$$

Изменение напряжения на вторичной обмотке при индуктивной нагрузке

$$U_2 = \beta (U_a \% \cos \varphi_2 + U_p \% \sin \varphi_2) = 1 \cdot (2 \cdot 0,8 + 5,12 \cdot 0,6) = 4,6\%$$

$$\sin \varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6 \quad \cos \varphi_2 = 0,8 \text{ соответствует}$$

Падению напряжения 4,6% соответствует абсолютное значение

$$\Delta U = \frac{U_2 \% U_{2ном}}{100} = \frac{4,6 \cdot 400}{100} = 18,4 \text{ В}$$

Отсюда напряжение на вторичной обмотке при номинальной индуктивной нагрузке

$$U'_2 = U_2 - \Delta U = 400 - 18,4 = 381,6 \text{ В}$$

Изменение напряжения на вторичной обмотке при емкостной нагрузке составляет

$$U_2 = \beta(U\% \cos \varphi - U_p \% \sin \varphi) = 1 \cdot (2 \cdot 0,8 - 5,12 \cdot 0,6) = -1,472\%$$

Падению напряжения соответствует абсолютное значение

$$\Delta U = \frac{U_2 \% U_{2ном}}{100} = \frac{-1,472 \cdot 400}{100} = -5,888B$$

Отсюда напряжение на вторичной обмотке при номинальной емкостной нагрузке составляет

$$U_2'' = U_2 - \Delta U = 400 - (-5,888) = 405,888B$$

Активное сопротивление фазы при коротком замыкании

$$R_\phi = \frac{P_k}{3I_{1к}^2} = \frac{P_k}{3I_{1ном}^2} = \frac{1280}{3 \cdot 3,64^2} = 32,20M$$

Полное сопротивление фазы

$$Z_\phi = \frac{U_{1\phi}}{3I_{1\phi}} = \frac{550}{3 \cdot 3,64} = 50,30M$$

реактивное сопротивление фазы

$$X_{\phi} = \sqrt{Z_{\phi}^2 - R_{\phi}^2} = \sqrt{50,3^2 - 32,2^2} = 38,6 \text{ Ом}$$

Для определения процентного падения напряжения воспользуемся формулой

$$U_2 = \beta (U_a \% \cos \varphi_2 + U_p \% \cos \varphi_2)$$

Напряжение короткого замыкания можно выразить через ее составляющие:

$$U_k = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}$$

Определим составляющие короткого замыкания: а) активная

$$U_a = \frac{P_k}{S_{ном}} 100\% = \frac{1280}{63000} 100\% = 2\%$$

б) реактивная

$$U_p = \sqrt{U_k^2 - U_a^2} = \sqrt{5,5^2 - 2^2} = 5,12\%$$

Изменение напряжения на вторичной обмотке при индуктивной нагрузке

$$U_2 = \beta (U_a \% \cos \varphi_2 + U_p \% \cos \varphi_2) = 1 \cdot (2 \cdot 0,8 + 5,12 \cdot 0,6) = 4,6\%$$

$\cos \varphi_2 = 0,8$ соответствует

$$\sin \varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6$$

Падению напряжения 4.6% соответствует абсолютное значение

$$\Delta U = \frac{U_2 \% U_{2\text{ном}}}{100} = \frac{4,6 \cdot 400}{100} = 18,4 \text{ В}$$

Отсюда напряжение на вторичной обмотке при номинальной индуктивной нагрузке

$$U_2' = U_2 - \Delta U = 400 - 18,4 = 381,6 \text{ В}$$

Изменение напряжения на вторичной обмотке при емкостной нагрузке составляет

$$U_2 = \beta (U \% \cos \varphi - U_p \% \sin \varphi) = 1 \cdot (2 \cdot 0,8 - 5,12 \cdot 0,6) = -1,472\%$$

Падению напряжения соответствует абсолютное значение

$$\Delta U = \frac{U_2 \% U_{2\text{ном}}}{100} = \frac{-1,472 \cdot 400}{100} = -5,888 \text{ В}$$

Отсюда напряжение на вторичной обмотке при номинальной емкостной нагрузке составляет

$$U_2'' = U_2 - \Delta U = 400 - (-5,888) = 405,888 \text{ В}$$