

ПРИМЕР РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРА ПО НОМИНАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Н.Б. Пирматов, Ф.Р. Хурсанов

Ниже приводится расчет эксплуатационных характеристик силового трехфазного двухобмоточного трансформатора типа - ТДЦН - 4000 /35.

Номинальная мощность	$S_H = 4000 \text{ кВА}$
Номинальное напряжение первичной обмотки	$U_{1H} = 35 \text{ кВ}$
Номинальное напряжение вторичной обмотки	$U_{2H} = 6,3 \text{ кВ}$
Мощность холостого хода	$P_O = 5300 \text{ кВт}$
Мощность короткого замыкания	$P_K = 33500 \text{ кВт}$
Напряжение короткого замыкания	$u_K = 10,5 \%$
Ток холостого хода	$i_O\% = 0,45 \%$
Схема соединения обмоток	Y/Δ
Группа соединения обмоток	11

Характеристика трансформатора по условному обозначению.

Из условного обозначения следует, что это трехфазный трансформатор силовой общего назначения (Т), имеющий охлаждение с дутьем (Д) и принудительной циркуляцией масла (Ц), а также с устройством переключения регулировочных отводов под нагрузкой (с устройством РПН) (Н). Номинальная мощность трансформатора 4000 КВА, номинальное напряжение первичной обмотки 35 кВ.

Расчет параметров трансформатора по номинальным данным.

Коэффициент трансформации трансформатора определяется в режиме холостого хода при номинальном напряжении первичной обмотки:

$$k \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{35}{6,3} = 5,56.$$

Фазные напряжения первичной и вторичной обмоток при холостом ходе. В паспортных данных указываются линейные напряжения. С учетом того, что схема соединения обмоток трансформатора Y/Y, то фазные напряжения меньше линейных в $\sqrt{3}$. Соответственно, при соединении «треугольник», Δ фазные и линейные напряжения по величине равны.

Следовательно, в соответствии с заданием, фазное напряжение первичной обмотки:

$$U_{\phi 1} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}} = \frac{35}{\sqrt{3}} = 20,2 \text{ кВ},$$

фазное напряжение вторичной обмотки:

$$U_{\phi 2} = U_{2H} = 6,3 \text{ кВ}.$$

Номинальные линейные и фазные токи в обмотках трансформатора. С учетом того, что для трехфазного трансформатора независимо от схемы соединения обмоток

$$S_H = \sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot I_{1H} = \sqrt{3} \cdot U_{2H} \cdot I_{2H},$$

то номинальный линейный ток в первичной обмотке равен:

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H}} = \frac{4000000}{\sqrt{3} \cdot 35000} = 66 \text{ А} = 0,066 \text{ кА},$$

а номинальный линейный ток во вторичной обмотке:

$$I_{2H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{2H}} = \frac{4000000}{\sqrt{3} \cdot 6300} = 367 \text{ А} = 0,367 \text{ кА}.$$

Так как, по заданию, схема соединения обмоток Y/Y, то линейные токи равны фазным токам. Соответственно, при соединении «треугольник», Δ фазные токи меньше линейных токов в $\sqrt{3}$.

$$I_{2H} = \frac{I_H}{\sqrt{3}} = \frac{367}{\sqrt{3}} = 212 \text{ А} = 0,212 \text{ кА}.$$

Ток первичной обмотки в режиме холостого хода, выраженный в амперах:

$$I_{10} = i_0 \% \cdot \frac{I_{1H}}{100} = 0,9 \cdot \frac{66}{100} = 0,6A,$$

так как

$$i_0 \% \cdot \frac{I_{10}}{I_{1H}} = 100\% = 0,9.$$

Напряжение короткого замыкания, выраженное в вольтах:

$$U_{1K} = u_K \% \cdot \frac{U_{1H}}{100} = 7,5 \cdot \frac{35}{100} = 2,63kV,$$

так как

$$u_K \% \cdot \frac{U_{1K}}{U_{1H}} = 100\% = 7,5\%.$$

Коэффициент мощности трансформатора при холостом ходе

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot I_{10}} = \frac{5300}{\sqrt{3} \cdot 35000 \cdot 0,6} = 0,146.$$

Параметры однофазной схемы замещения трансформатора при холостом ходе.

Для трехфазных трансформаторов в номинальных данных указывается мощность потерь холостого хода P_0 и короткого замыкания P_K на три фазы. При расчете параметров однофазной схемы замещения эти мощности будут в три раза меньше. Полное, активное и индуктивное сопротивления холостого хода для одной фазы рассчитаем по формулам:

$$Z_0 = Z_1 + Z_m = \frac{U_{1\Phi}}{I_{10}} = \frac{20200}{0,6} = 33666,7 \text{ Ом} = 33,7 \text{ кОм};$$

$$r_0 = r_1 + r_m = \frac{P_0}{3 \cdot I_{10}^2} = \frac{5300}{3 \cdot 0,6^2} = 4907,4 \text{ Ом} = 4,9 \text{ кОм};$$

$$X_0 = X_1 + X_m = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{33,7^2 - 4,9^2} = 33,3 \text{ кОм},$$

где Z_1 , r_1 X_1 - полное, активное и индуктивное сопротивления первичной обмотки;

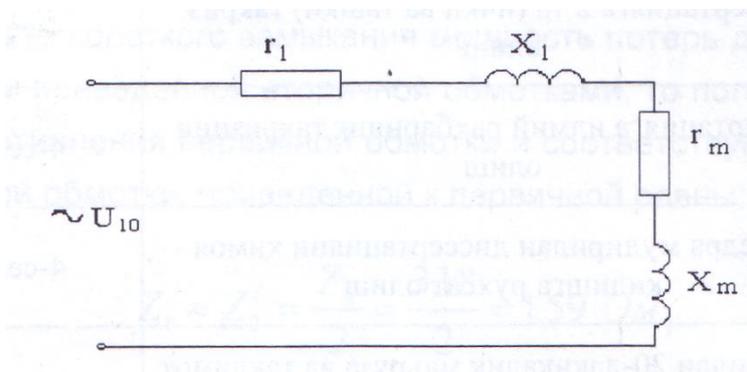
Z_m , r_m , X_m - полное, активное и индуктивное сопротивления намагничивающего контура.

В силовых трансформаторах сопротивления первичной обмотки в десятки и сотни раз меньше сопротивления намагничивающего контура, поэтому с достаточной точностью можно считать, что сопротивления намагничивающего контура равны сопротивлениям холостого хода:

$$Z_m \approx Z_0 = 33,7 \text{ кОм};$$

$$r_m \approx r_0 = 4,9 \text{ кОм};$$

$$X_m \approx X_0 = 33,3 \text{ кОм}.$$



Потери в стали трансформатора.

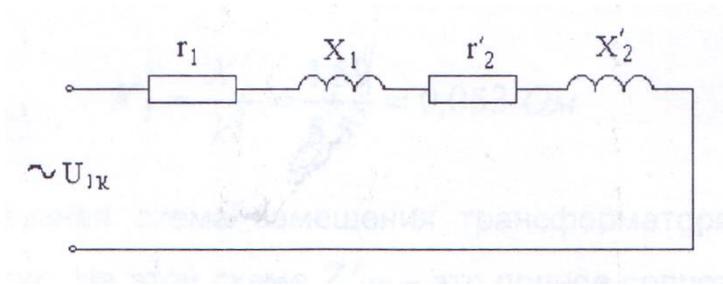
Так как ток холостого хода мал по сравнению с номинальным током, то электрическими потерями в первичной обмотке пренебрегают и считают, что вся мощность, потребляемая трансформатором из сети, расходуется на компенсацию потерь в стали, т.е.

$$P_{cm} = P_0 = 5,3 \text{ кВт}$$

Коэффициент мощности трансформатора при коротком замыкании:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3} \cdot U_{1K} \cdot I_{1H}} = \frac{33500}{\sqrt{3} \cdot 2630 \cdot 66} = 0,11.$$

Параметры однофазной схемы замещения трансформатора при коротком замыкании.



Полное, активное и индуктивное сопротивления короткого замыкания трансформатора можно определить по формулам:

$$Z_0 = Z_1 + Z'_2 = \frac{U_{1к}}{\sqrt{3} \cdot I_{1н}} = \frac{2630}{\sqrt{3} \cdot 66} = 23 \text{ Ом};$$

$$r_k = r_1 + r'_2 = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot I_{1н}^2} = \frac{33500}{\sqrt{3} \cdot 66^2} = 4,4 \text{ Ом};$$

$$X_k = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{23^2 - 4,4^2} = 22,6 \text{ Ом}.$$

Так как в опыте короткого замыкания мощность потерь делится поровну между первичной и приведенной вторичной обмотками, то полное, активное и индуктивное сопротивления первичной обмотки и соответствующие им сопротивления вторичной обмотки, приведенной к первичной равны:

$$Z_1 \approx Z'_2 = \frac{Z_k}{2} = \frac{23}{2} = 11,5 \text{ Ом};$$

$$r_1 \approx r'_2 = \frac{r_k}{2} = \frac{4,4}{2} = 2,2 \text{ Ом};$$

$$X_1 \approx X'_2 = \frac{X_k}{2} = \frac{22,6}{2} = 11,3 \text{ Ом}.$$

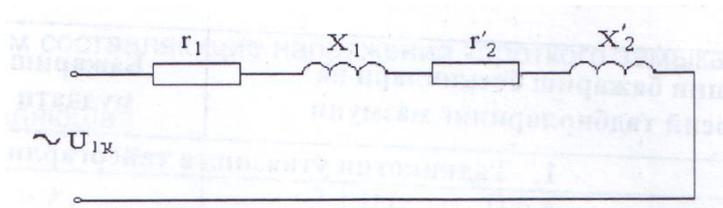
Истинные сопротивления вторичной обмотки

$$Z_2 = \frac{Z'_2}{k^2} = \frac{11,5}{5,56^2} = 0,372 \text{ Ом};$$

$$r_2 = \frac{r_2'}{k^2} = \frac{2,2}{5,56^2} = 0,0710 \text{ Ом};$$

$$X_2 = \frac{X_2'}{k^2} = \frac{11,3}{5,56^2} = 0,3660 \text{ Ом}.$$

Однофазная схема замещения трансформатора под нагрузкой представлена на рис. На этой схеме $Z'_{нГ}$ - это полное сопротивление нагрузки, приведенное к первичной обмотке.



Электрические потери в обмотках трансформатора в номинальном режиме.

Так как ЭДС, индуцируемая в первичной обмотке трансформатора E_1 составляет при коротком замыкании примерно $0,5U_1 \approx (3-7)\%$ от $U_{1н}$, то потери в стали трансформатора в опыте короткого замыкания имеют ничтожную величину. Таким образом, мощность, потребляемая трансформатором в режиме короткого замыкания, равна электрическим потерям в его обмотках:

$$P_K = P_{эл1} + P_{эл2} = 33,5 \text{ кВт}.$$

Построение внешних характеристик трансформатора.

Внешней характеристикой трансформатора называют зависимость напряжения на выводах вторичной обмотки U_2 от тока этой обмотки I_2 при условии, что $\cos \varphi_2 = const$ и $U_1 = const$.

Вторичное напряжение трансформатора при нагрузке

$$U_2 = U_{20} - U_{20} \cdot \frac{\Delta U \%}{100},$$

где U_{20} - напряжение на вторичной обмотке при номинальном напряжении на первичной обмотке в режиме холостого хода. В рассматриваемом примере $U_{20} = U_{2H} = 6,3 \text{ кВ}$.

$$\Delta U\% = \beta \cdot (u_{Ka} \cdot \cos \varphi_2 + u_{Kp} \cdot \sin \varphi_2),$$

где $\Delta U\%$ - процентное изменение напряжение трансформатора при нагрузке;

$\beta = I_2 / I_{2H}$ - коэффициент загрузки трансформатора;

I_2 - ток во вторичной обмотке (ток нагрузки);

I_{2H} - номинальный ток вторичной обмотки.

Определим составляющие напряжения короткого замыкания:

активная составляющая

$$u_{Ka} = \frac{I_{1H} \cdot r_K}{U_{1\Phi}} \cdot 100\% = \frac{66 \cdot 4,4}{20200} \cdot 100\% = 1,43\%.$$

реактивная составляющая

$$u_{Kp} = \frac{I_{1H} \cdot X_K}{U_{1\Phi}} \cdot 100\% = \frac{66 \cdot 22,6}{20200} \cdot 100\% = 7,38\%.$$

Необходимо рассчитать и построить внешние характеристики при $\cos \varphi_2 = 1$ и при $\cos \varphi_2 = 0,8$ для ($\beta = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25$). Данные расчета свести в табл.1.

Пример для $\cos \varphi_2 = 0,8$ и $\beta = 1$:

$$\Delta U\% = \beta \cdot (u_{Ka} \cdot \cos \varphi_2 + u_{Kp} \cdot \sin \varphi_2) = 1 \cdot (1,43 \cdot 0,8 + 7,38 \cdot 0,6) = 5,57\%$$

$$U_2 = U_{20} - U_{20} \cdot \frac{\Delta U\%}{100} = 6,3 - 6,3 \cdot \frac{5,57}{100} = 5,95 \text{ кВ}$$

Результаты расчета внешних характеристик трансформатора

$\cos \varphi_2 = 1$	β	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25
	$I_2, \text{кА}$	0	0,053	0,106	0,159	0,212	0,265
	$U_2, \text{кВ}$	6,3	6,27	6,25	6,24	6,23	6,22

$\cos \varphi_2 = 0,8$	$I_2, \text{кА}$	0	0,053	0,106	0,159	0,212	0,265
	$U_2, \text{кВ}$	6,3	6,18	6,1	5,98	5,95	5,62

Построение зависимости КПД трансформатора от его загрузки.

Коэффициент полезного действия трансформатора рассчитывается по соотношению

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_K}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_K}.$$

Необходимо рассчитать η при $\cos \varphi_2 = 1$ и при $\cos \varphi_2 = 0,8$ для $\beta = 0; 0,05; 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25$. Данные расчета свести в табл. 2 и построить зависимость зависимости $\eta = f(I_2)$.

Пример для $\cos \varphi_2 = 0,8$ и $\beta = 1$:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_K}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_K} = 1 - \frac{5,3 + 1^2 \cdot 33,5}{1 \cdot 4000 \cdot 0,8 + 5,3 + 1^2 \cdot 33,5} = 0,988$$

Результаты расчета зависимости КПД трансформатора от тока нагрузки

$\cos \varphi_2 = 1$	β	0	0,05	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,25
	$I_2, \text{кА}$	0	0,0106	0,0212	0,053	0,106	0,159	0,212	0,265
	η	0	0,992	0,992	0,993	0,991	0,990	0,989	0,988
$\cos \varphi_2 = 0,8$	$I_2, \text{кА}$	0	0,0106	0,0212	0,053	0,106	0,159	0,212	0,265
	η	0	0,992	0,992	0,991	0,990	0,989	0,988	0,987