Трехфазные трансформаторы

1. Назначение и области применения трансформаторов Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного (синусоидального) тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

По особенностям конструкции и применению трансформаторы можно разделить на силовые, сварочные, измерительные и специальные. Наибольшее распространение получили силовые трансформаторы, которые являются необходимым элементом промышленной электрической сети. На электрических станциях устанавливают силовые трансформаторы, повышающие напряжение до ПО, 220, 500, 750 и 1150 кВ.

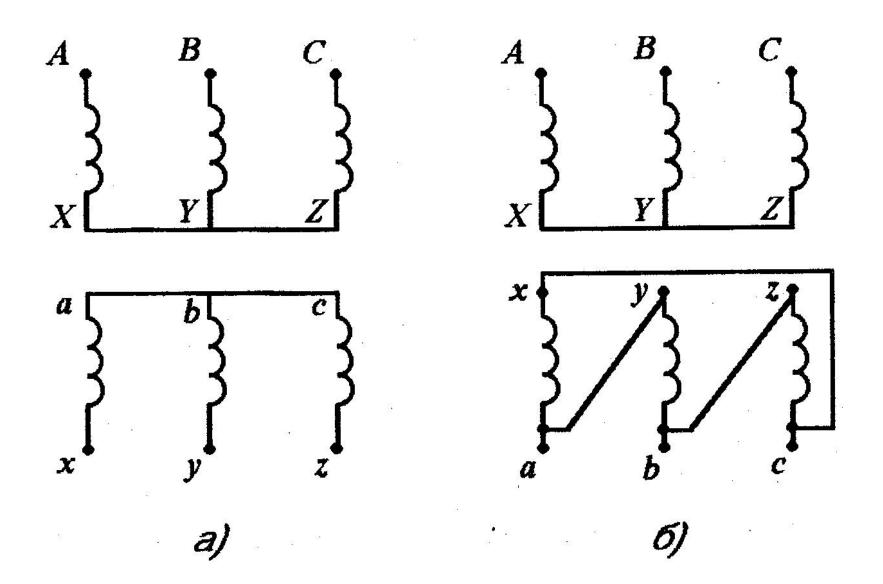


Рис. 1. Схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов: а) по схеме Y/Y; б) по схеме Y/Δ.

У потребителей напряжение понижается несколькими ступенями: на районных подстанциях до 35 (10) кВ, на подстанциях предприятий до 10 (6) кВ и, наконец, на подстанциях цехов и жилых районов — до 380/220 В. По числу фаз трансформаторы подразделяются на однофазные и

трехфазные. Последние наиболее эффективны для трансформации тока в трехфазной сети. Каждая фаза трансформатора имеет первичную обмотку (к ней энергия подводится от источника) и вторичную обмогку (с нее энергия поступает к потребителю). Вторичных обмоток у трансформатора может быть несколько. В этом случае трансформатор называется многообмоточным. Таким образом, однофазные трансформаторы имеют как минимум две обмотки, трехфазные — шесть.

Обмотки фаз высшего (ВН) или низшего (НІТ) напряжений могут соединяться звездой (Y) или треугольником (A). Если обе обмотки соединены звездой, то такое соединение обозначается (Y/Y). В числителе указывается способ соединения обмоток фаз высшего напряжения, а в знаменателе — низшего напряжения. Начала фаз высшего напряжения обозначаются буквами A, B и C, а концы

2. 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_{H0M} . Ею является полная мощность, которая для трехфазного трансформатора определяется как

$$\mathbf{S}_{\mathsf{HOM}} = \sqrt{3} \mathbf{U}_{1\mathsf{ЛHOM}} \cdot \mathbf{I}_{1\mathsf{ЛHOM}}$$

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 $S1 = S2 = S_{HOM}$.

2. Под номинальными напряжениями $U_{1л, \text{ном}}$ и $U_{2л, \text{ном}}$ 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 ($I_{2...}=0$).

По значениям номинальных напряжений может быть определен коэффи циент трансформации, определяемый как отношение номинального высшего напряжения к номинальному низшему напряжению $n=U_{\rm BH}$ / $U_{\rm HH}$. 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 $n_{_{\rm II}}=n_{_{f \varphi}}$, а при соединении "звезда - треугольник" отличаются в $\sqrt{3}$ раз ($n_{_{\rm II}}=\sqrt{3}$ • $n_{_{f \varphi}}$)

3. Номинальными токами трансформатора — первичным $I_{1л, {
m Hom}}$ и вторичным $I_{2л, {
m Hom}}$ — 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 кроткого замыкания, выраженное в процентах по отношению к номинальному напряжению первичной обмотки

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

6. Схема и группа соединения. Группа трансформатора определяется относительным сдвигом фаз между электродвижущими силами первич-ной и вторичной обмоток. В зависимости от схемы соединения обмоток (Y или A) и порядка соединения их начал и концов получаются различ-ные 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 AB 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 кВЛ, а высшее линейное напряжение 35 кВ.

3. Характеристики трансформаторов

Важнейшей эксплуатационной характеристикой любого трансформатора яв-ляется внешняя — зависимость напряжения на вторичной обмотке от нагрузки при заданном напряжении на входе трансформатора. Так как именно к вторичной обмотке подключаются потребители, пониженное или повышенное по сравнению с номинальным напряжение может отрицательно сказаться на их работе.

Для построения внешней характеристики трансформатора требуется ис пользование некоторых дополнительных параметров, характеризующих режим работы трансформатора и физические процессы, происходящие в нем.

Нагрузку определяет коэффициент нагрузки $oldsymbol{eta}$, определяемый соотношением

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1HOM}} \approx \frac{I_2}{I_{2HOM}}$$

При известном изменении вторичного напряжения ∆U% при фиксированной нагрузке вторичное напряжение определяется как

$$U_2 = U_{2HOM} \left(1 - \frac{\Delta u\%}{100} \right) = U_{2x} \left(1 - \frac{\Delta u\%}{100} \right)$$

Найти процентное изменение вторичного напряжения можно в каталоге или рассчитать с использованием параметров обмоток и сердечника трансформатора. Схема замещения трехфазного трансформатора составляется на одну фазу в силу симметрии электромагнитной системы. Она моделирует процессы, происходящие в трансформаторе при различной нагрузке

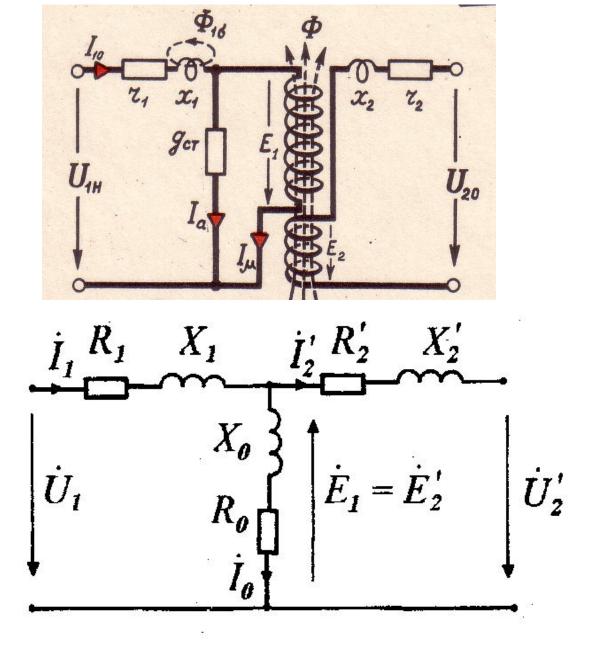


Рис. 2. Полная ехема замещения фазы трехфазного трансформатора

На представленной схеме $R_{_{1}}$ и $X_{_{1}}$ - активное сопротивление и сопротивление рассеяния (реактивное) первичной обмотки; R'_2 и X'_2 - приведенные активное и реактивное сопротивление вторичной обмотки; R_0 и X_0 - активное и реактивное сопротивления ветви холостого хода, определяющие нагревание сердечника из-за вихревых токов и гистерезиса и рассеяние магнитного потока в сердечнике. Объединение обеих обмоток трансформатора при равенстве ЭДС этих обмоток ($E_1 = E'_2$) ведет к необходимости приведения параметров вторичной цепи к числу витков первичной цени. Равенство будет выполнено, если новое число витков вторичной обмотки м', сделать равным числу витков первичной обмотки w_1 . Очевидно, что при таком преобразовании изменятся все величины, характеризующие вторичную цепь. Эти параметры обозначаются штрихами, называются приведенными.

Приведение вторичной обмотки к первичной упрощает расчет рабочих характеристик трансформатора, так как в приведенном транс-форматоре величины вторичной цепи имеют тот же порядок, что и величины первичной. В частности, процентное изменение вторичного напряжения можно выразить через параметры обмоток следующим образом

$$\Delta u_2\% = \beta \frac{R_k I_{1\text{HOM}}}{U_{1\text{HOM}}} 100 \cos \varphi_2 + \beta \frac{X_k I_{1\text{HOM}}}{U_{1\text{HOM}}} 100 \sin \varphi_2$$

где $R_{_{\rm K}}$ и $X_{_{\rm K}}$ - активная и реактивная составляющие сопротивления обмотки трансформатора, измеренные в опыте короткого замыкания.

В качестве характеристики нагрузки используется коэффициент мощности $\cos \varphi_2$. Нагрузка может быть активной ($\varphi_2 = 0$), индуктивной ($\varphi_2 > 0$) или емкостной ($\varphi_2 < 0$).

Схема замещения однофазного трансформатора при проведении опыта короткого замыкания приведена на рис. 3.

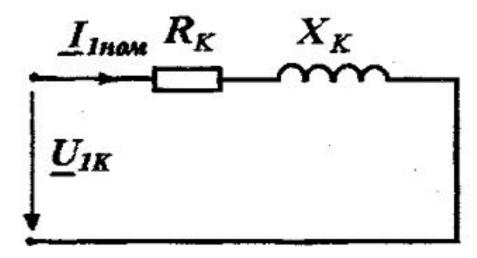


Рис. 3. Схема замещения трансформатора при проведении опыта короткого замыкания

Эта схема замещения является упрощенной, т. к. параметры сердечника трансформатора в рассмотрение не принимаются. При этом принято считать, что R_k - суммарное активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора, X_k - суммарное реактивное сопротивление первичной и вторичной обмоток и выполняются соотношения

$$R_{k} = R_{1} + R_{2}' \qquad X_{k} = X_{1} + X_{2}'$$

а полное сопротивление $Z_{\,_{\mathbf{k}}}$ можно определить как

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \qquad Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1HOM}}$$

В силу того что вторичная обмотка пересчитана на число витков первичной обмотки, то обычно сопротивление приведенной вторичной обмотки принимают равным сопротивлению первичной обмотки,

$$R_1 = R'_2 = R_k / 2$$

 $X_1 = X'_2 = X_k / 2$

а тогда

$$u_k\% = \frac{Z_k I_{1\text{HOM}}}{U_{1\text{HOM}}} 100$$

Обычно U_{1k} составляет 5-8% от U_{1HOM} :

Значение указано на щитке трансформатора. Активная составляющая напряжения короткого замыкания определяется выражением

$$u_{a,k}\% = \frac{R_k I_{1HOM}}{U_{1HOM}} 100 = \frac{P_{k,HOM}}{S_{HOM}} 100$$

а реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

$$\boldsymbol{u_{p,k}}\% = \frac{\boldsymbol{X_k I_{1HOM}}}{\boldsymbol{U_{1HOM}}} 100$$

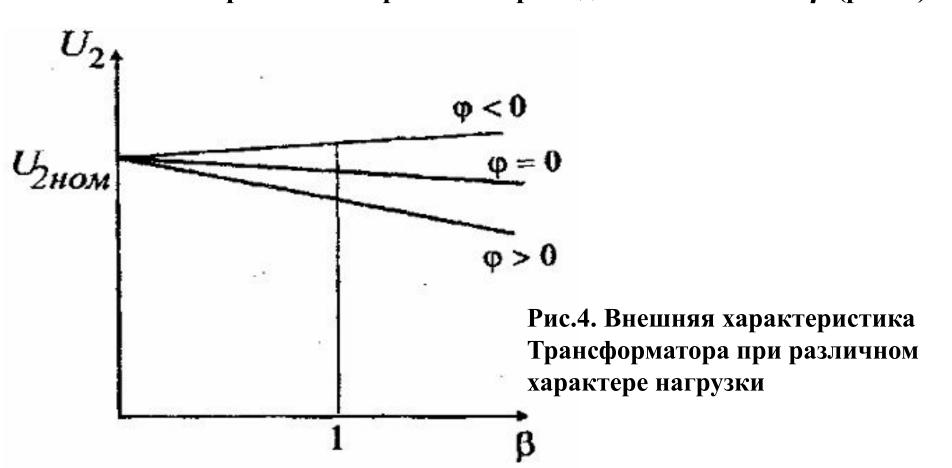
Процентные значения напряжения $u_{\rm k},\,u_{\rm ak},\,u_{\rm pk}$ связаны соотношением

$$U_k = \sqrt{U_{a,k}^2 + U_{p,k}^2}$$

Тогда процентное изменение вторичного напряжения можно выразить через активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания

$$\Delta u\% = \beta \cdot (u_{a,k} \cdot \cos\varphi_2 + u_{p,k} \cdot \sin\varphi_2)$$

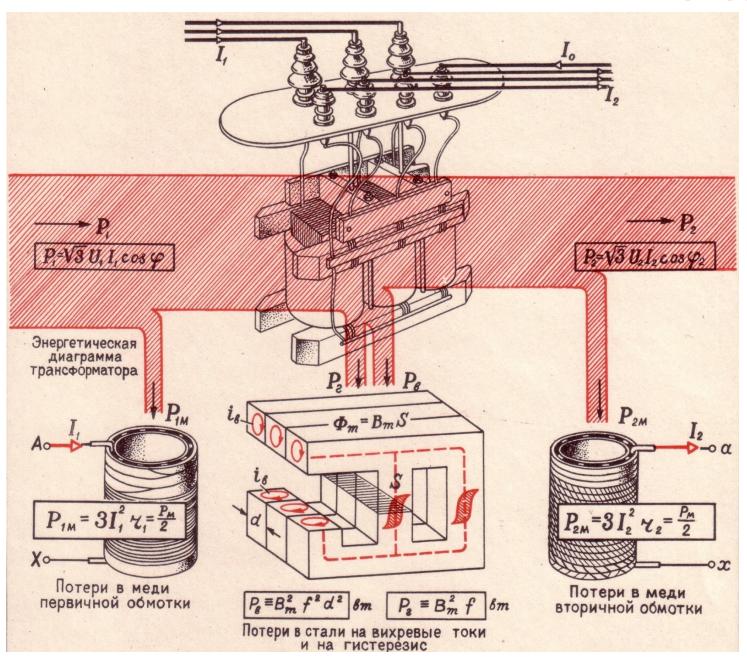
Внешняя характеристика трансформатора может быть построена по двум точкам. Первая точка соответствует номинальному напряжению вторичной об мотки ($U2 = U2_{HOM}$) при $\beta = 0$, а вторая соответствует напряжению, вычисленному с использованием изменения вторичного напряжения при заданном значе нии β (рис. 4).

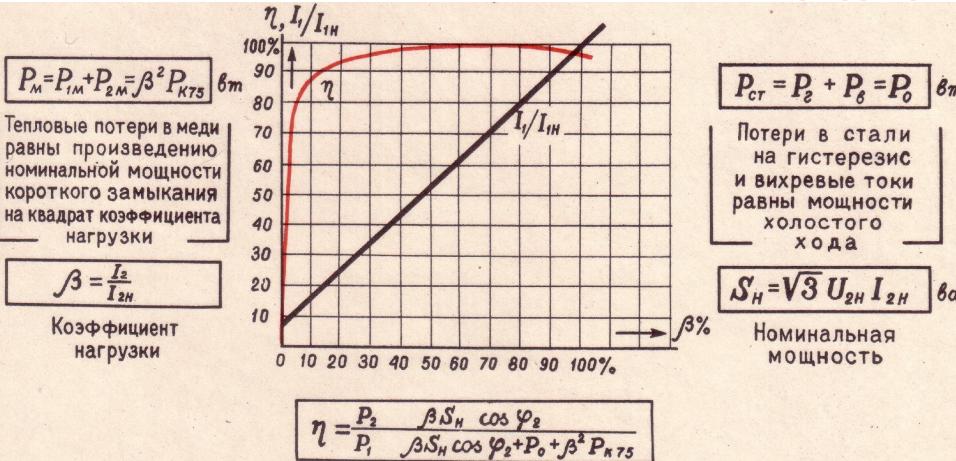


Другой важной характеристикой для трансформатора является зависимость коэффициента полезного действия от нагрузки $\eta(\beta)$. Как известно, КПД любого устройства определяется отношением

отдаваемой мощности к потребляемой $\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$ BSH COS 92+Po+B2PATS 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100%

Трансформаторы





Коэффициент полезного действия

При коэффициенте нагрузки 3=50÷70% коэффициент полезного действия максимален

Разницу между мощностями $\Delta P = P_2 - P_1$ называют полными потерями мощности. Эти потери складываются из потерь в обмотках трансформатора, определяемые как электрические $\Delta P_{9Л}$, и потерь в сердечнике, определяемых как магнитные $\Delta P_{\text{магн}}$. Электрические потери относятся к переменным потерям, так как они зависят от нагрузки. Для номинального режима эту мощность можно определить экспериментально при проведении опыта короткого замыкания, так как по условиям проведения опыта токи в обеих обмотках должны соответствовать своим номинальным значениям

$$\Delta P_{\rm ЭЛ, HOM} = P_{\kappa, HOM} = R_1 I_{1HOM} + R_2 I_{2HOM}$$

Исходя из упрощенной схемы замещения, составляемой для опыта короткого замыкания, можно принять

$$P_{\kappa, {\scriptscriptstyle HOM}} = I_{\scriptscriptstyle 1HOM}^{\, 2} R_{\kappa}$$

Учитывая, что нагрузка характеризуется коэффициентом нагрузки $\boldsymbol{\beta}$, ток нагрузки можно определить как $I_2 = \boldsymbol{\beta} * \boldsymbol{I}_{Ihom}$ при одновременном изменении тока в первичной обмотке $\boldsymbol{I}_1 = \boldsymbol{\beta} * \boldsymbol{I}_{2hom}$. Тогда потери в обмотках трансформатора в зависимости от нагрузки можно представить как

$$\Delta P(\beta) = \beta^2 \cdot I_{1_{HOM}}^2 R_k = \beta \cdot P_{\kappa, HOM}$$

Магнитные потери, или потери в сердечнике трансформатора, относятся к по стоянным потерям, так как они практически не зависят от нагрузки. Постоянство этих потерь обеспечивается с одной стороны выбором такой марки стали, у которой даже при малых токах сердечник находится в режиме насыщения ($\Phi_m = const$).

С другой стороны, сердечник набирают из тонких листов стали для обес печения минимальных потерь при образовании вихревых токов. Эти потери можно определить из опыта холостого хода. При проведении опыта холостого хода вторичная обмотка разомкнута, а к первичной подводится напряжение, равное номинальному. На рис. 5 представлена его схема замещения.

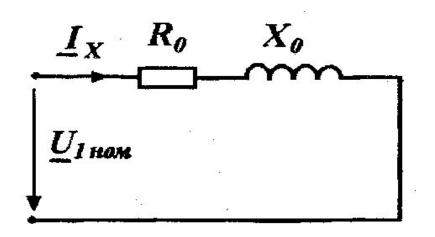


Рис. 5. Упрощенная схема замещения трансформатора при проведении опыта холостого хода

В этом случае нагрузка отсутствует $/_2 = 0$, а ток первичной обмотки, называемый током холостого хода 1_X , обычно составляет около 5% от номинального тока. Часто используется процентное значение тока холостого хода -

$$i_x \% = \frac{I_x}{I_{1HOM}}$$

Измеряемая активная мощность в этом опыте является мощностью потерь в сердечнике трансформатора, так как потери в обмотках в этом режиме пренебрежимо малы. Параметры схемы замещения в режиме холостого хода:

$$R_{x} = R_{1} + R_{0} = \frac{P_{x}}{I_{x}^{2}}$$

$$X_{x} = X_{1} + X_{0} = \sqrt{Z_{x}^{2} - R_{x}^{2}}$$

$$Z_{x} = \frac{U_{1\text{hom}}}{I_{x}}$$

Коэффициент мощности в опыте холостого хода определяется как

$$\cos \varphi_x = \frac{P_x}{U_{1\text{HOM}}I_x}$$

Опыты холостого хода и короткого замыкания позволяют не только определить параметры схемы замещения, но и вычислить коэффициент полезного действия трансформатора. В частности

$$\Delta P(\beta) = P_{x} + \beta^{2} \cdot P_{\kappa, HOM}$$

Учитывая, что мощность, потребляемая нагрузкой

$$P_2 = \beta \cdot S_{HOM} \cdot \cos \varphi_2$$

коэффициент полезного действия находится по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{HOM}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{HOM}} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_{\text{K,HOM}}}$$

Для серийных трансформаторов значение оптимального коэффициента нагрузки составляет $\beta_{onm} = 0.7$ - 0.5 то есть наибольший КПД достигается недогруженным трансформатором. КПД трансформаторов самый высокий из электротехнических устройств и может достигать 97-99%. Зависимость $\eta(\beta)$ приведена на рис. 6.

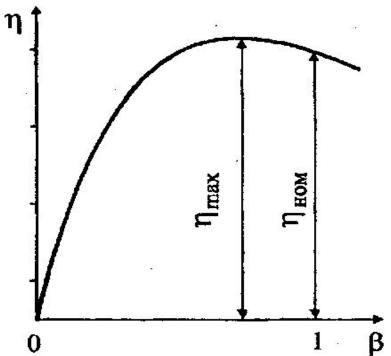


Рис. 6. Зависимость КПД трансформатора от нагрузки