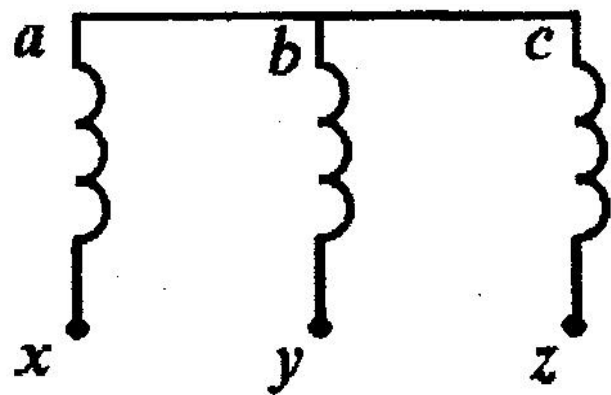
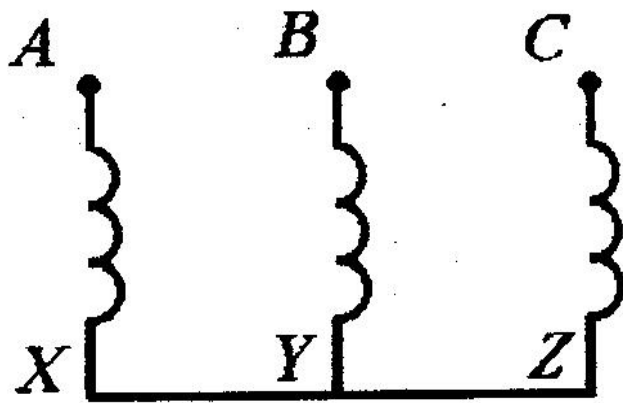
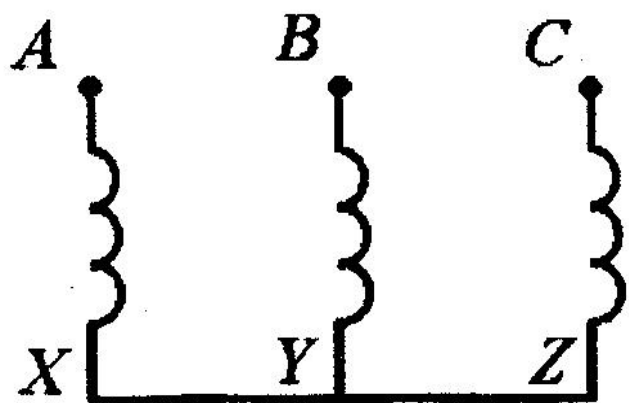


# **Трехфазные трансформаторы**

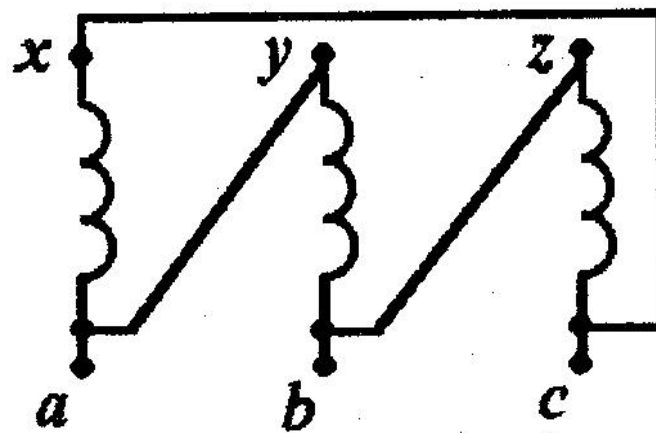
## **1. Назначение и области применения трансформаторов**

**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.**



*a)*



*б)*

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 обмотку (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 (ННТ) 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 А, В и С, 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  $S_{НОМ}$ . 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  $180^\circ$ . Таким образом, в трехфазных трансформаторах может быть образовано 12 групп со сдвигом фаз ЭДС от 0 до  $330^\circ$  через  $30^\circ$ , 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 является 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 напряжением может отрицательно сказаться на их работе.

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

Нагрузку определяет коэффициент нагрузки  $\beta$ , определяемый соотношением

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

**При известном изменении вторичного напряжения  $\Delta U\%$  при фиксированной нагрузке вторичное напряжение определяется как**

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

**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**

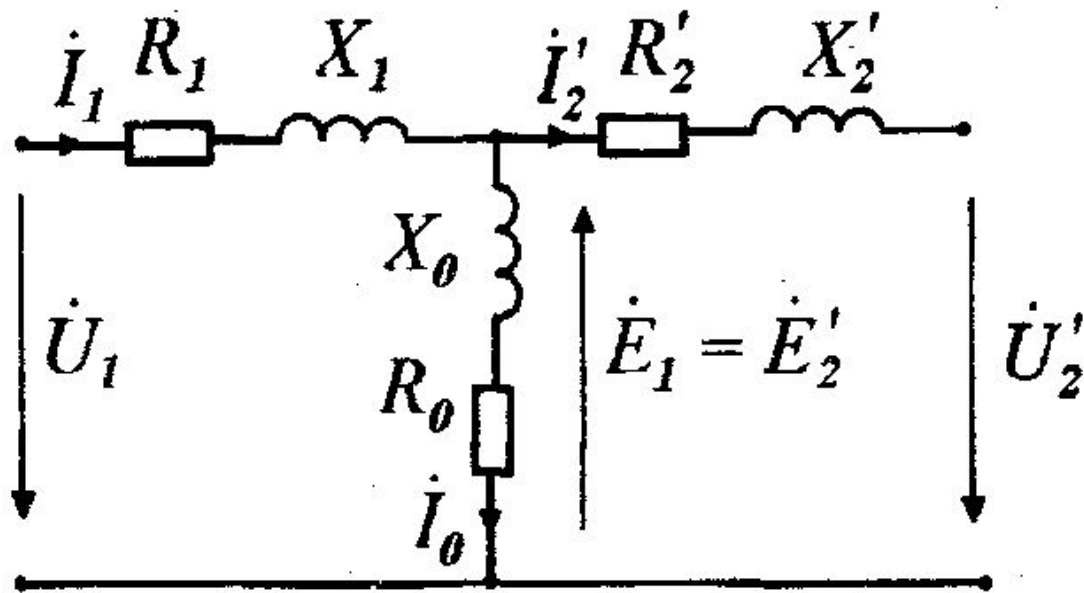
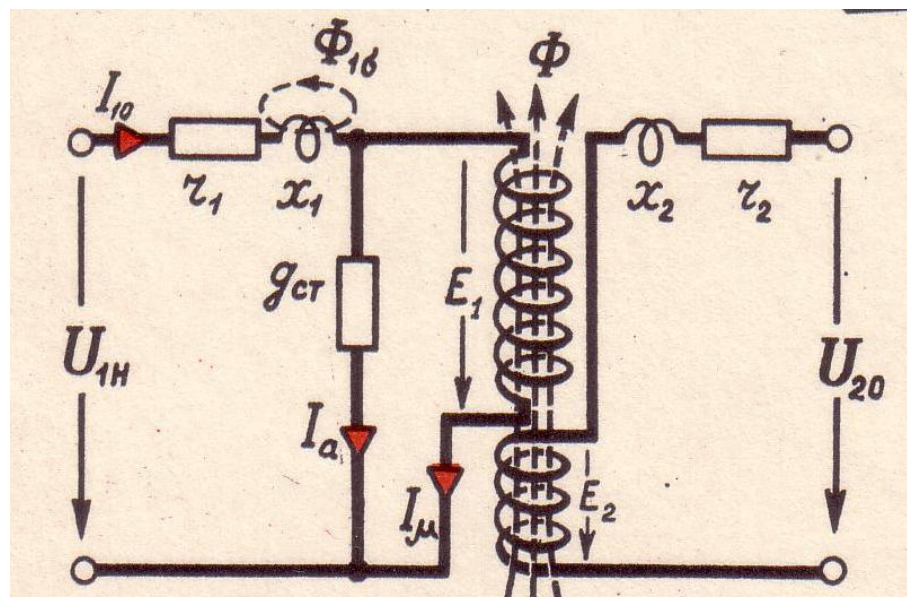


Рис. 2. Полная схема замещения фазы трехфазного трансформатора

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 цепи. Равенство будет выполнено, если новое число витков вторичной обмотки  $w'_2$  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 трансформаторе величины вторичной цепи имеют тот же порядок, что и величины первичной. В частности, процентное изменение вторичного напряжения можно выразить через параметры обмоток следующим образом**

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

где  $R_k$  и  $X_k$  - 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.

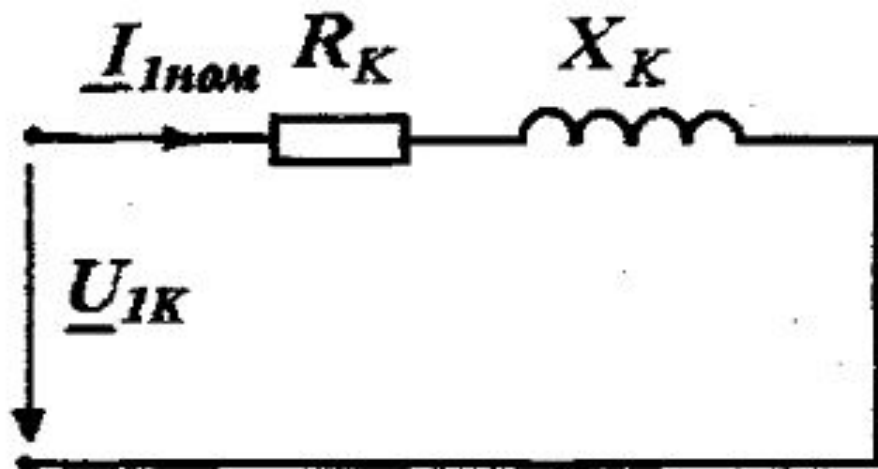


Рис. 3. Схема замещения трансформатора при проведении опыта короткого замыкания

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

$$R_k = R_1 + R_2' \quad X_k = X_1 + X_2'$$

а полное сопротивление  $Z_k$  можно определить как

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

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

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

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



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

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

а реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

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

Процентные значения напряжения  $u_k$ ,  $u_{ак}$ ,  $u_{рк}$  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 обмотки ( $U_2 = U_{2\text{НОМ}}$ ) при  $\beta = 0$ , а вторая соответствует напряжению, вычисленному с использованием изменения вторичного напряжения при заданном значении  $\beta$  (рис. 4).

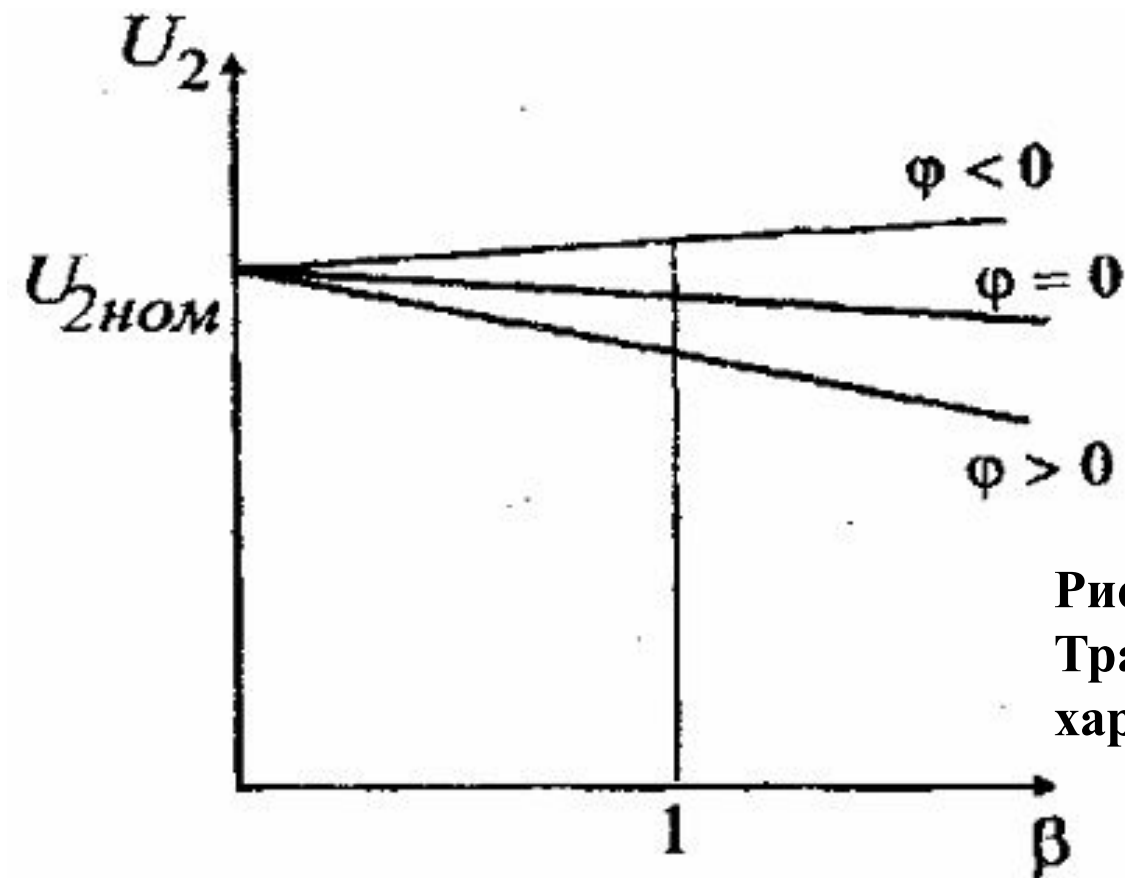
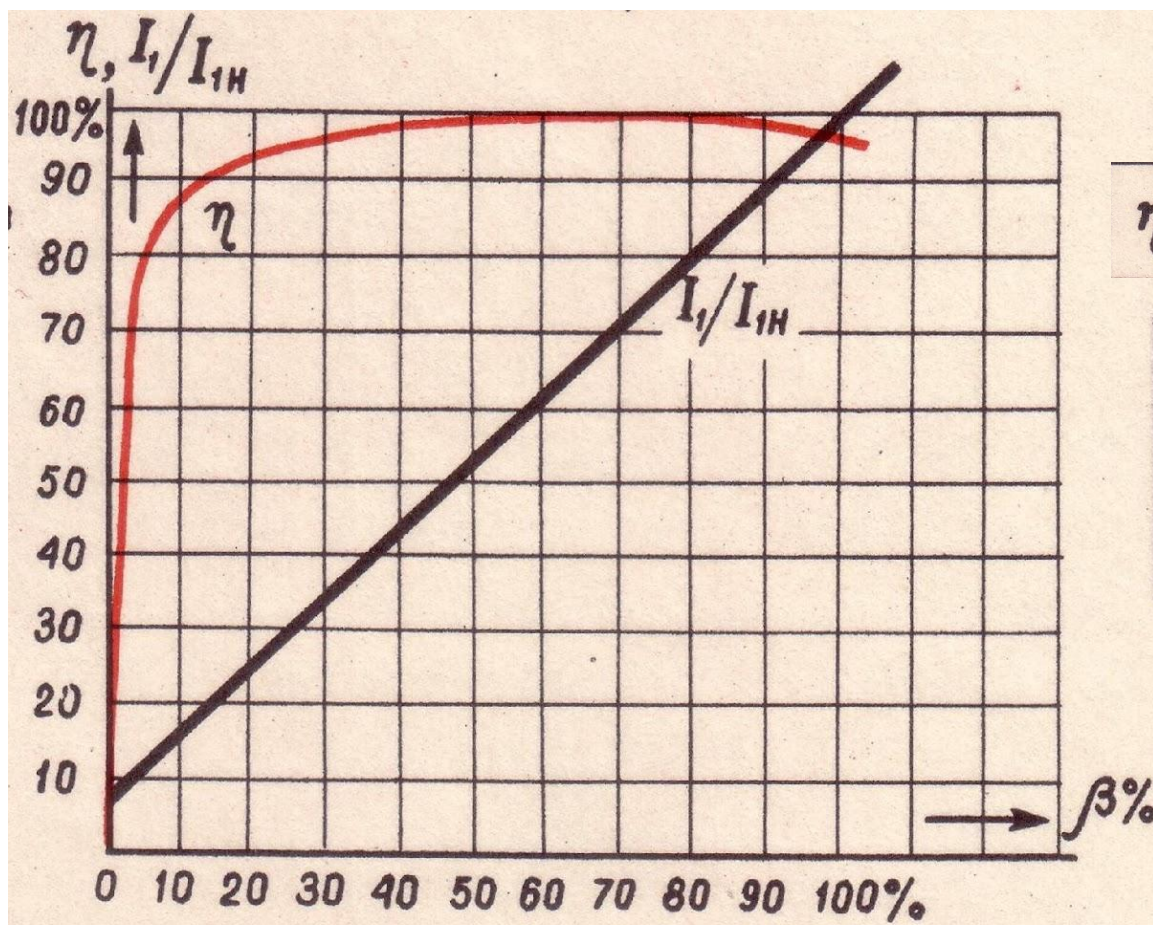


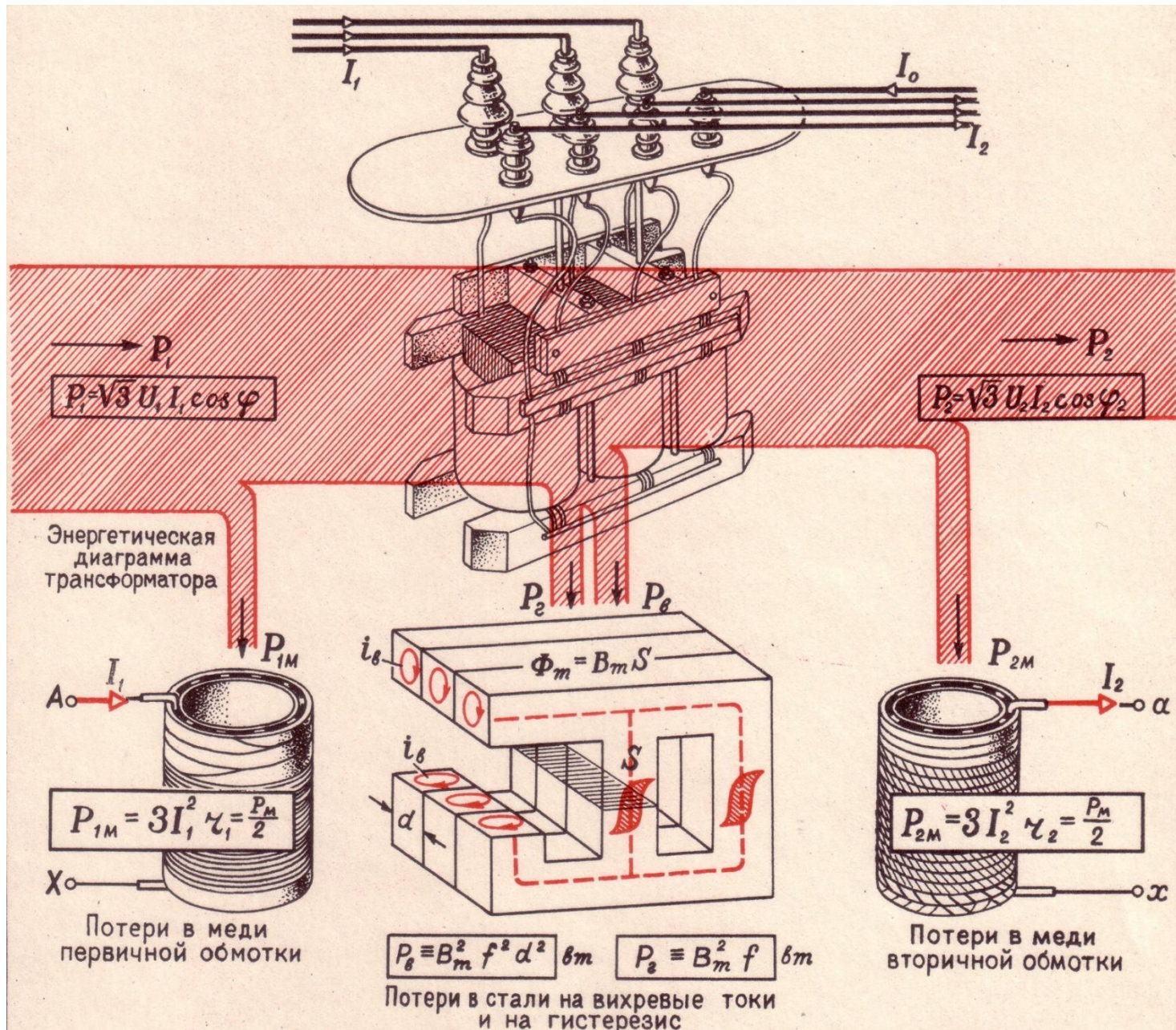
Рис.4. Внешняя характеристика Трансформатора при различном характере нагрузки

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

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$



$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta S_N \cos \varphi_2}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{K75}}$$



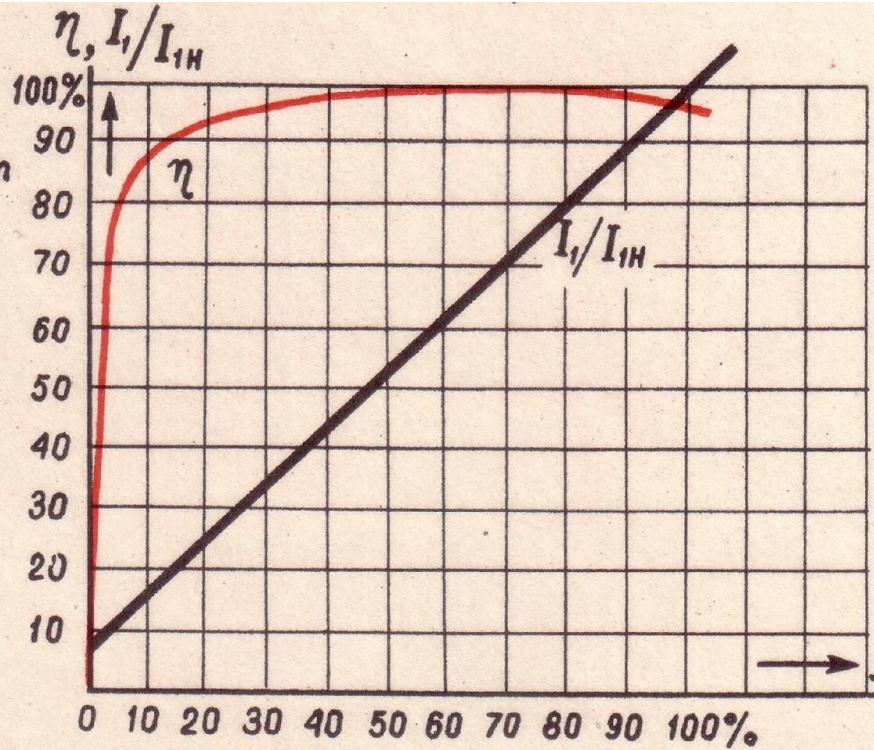
$$P_M = P_{1M} + P_{2M} = \beta^2 P_{K75}$$

Вт

Тепловые потери в меди равны произведению номинальной мощности короткого замыкания на квадрат коэффициента нагрузки

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$$

Коэффициент нагрузки



$$P_{ст} = P_2 + P_0 = P_0$$

Вт

Потери в стали на гистерезис и вихревые токи равны мощности холостого хода

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

ВА

Номинальная мощность

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{K75}}$$

Коэффициент полезного действия

При коэффициенте нагрузки  $\beta = 50 \div 70\%$  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  $\Delta P_{эл}$ , и потерь в сердечнике, определяемых как магнитные  $\Delta P_{магн}$ . 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

$$\Delta P_{эл,ном} = P_{к,ном} = R_1 I_{1ном}^2 + R_2 I_{2ном}^2$$

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

$$P_{к,ном} = I_{1ном}^2 R_k$$

Учитывая, что нагрузка характеризуется коэффициентом нагрузки  $\beta$ , ток нагрузки можно определить как  $I_2 = \beta * I_{1ном}$  при одновременном изменении тока в первичной обмотке  $I_1 = \beta * I_{2ном}$ . Тогда потери в обмотках трансформатора в зависимости от нагрузки можно представить как

$$\Delta P(\beta) = \beta^2 \cdot I_{1ном}^2 R_k = \beta \cdot P_{к,ном}$$

Магнитные потери, или потери в сердечнике трансформатора, относятся к постоянным 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 обеспечения 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.

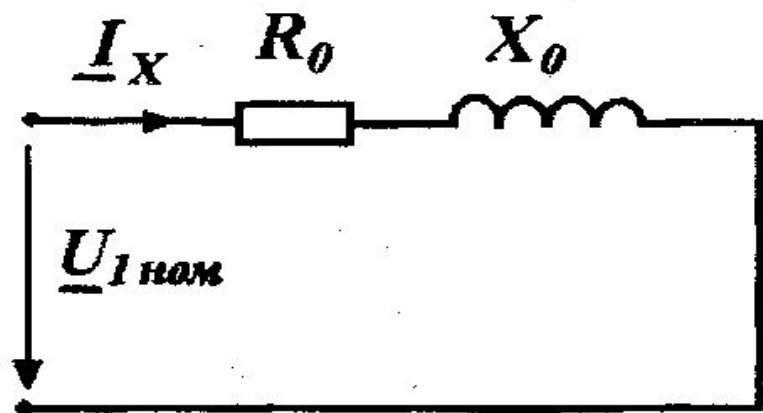


Рис. 5. Упрощенная схема замещения трансформатора при проведении опыта холостого хода

В этом случае нагрузка отсутствует  $i_2 = 0$ , а ток первичной обмотки, называемый током холостого хода  $I_x$ , обычно составляет около 5% от номинального тока. Часто используется процентное значение тока холостого хода -

$$i_x \% = \frac{I_x}{I_{1ном}}$$

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:

$$R_x = R_1 + R_0 = \frac{P_x}{I_x^2}$$

$$Z_x = \frac{U_{1ном}}{I_x}$$

$$X_x = X_1 + X_0 = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2}$$



**Коэффициент мощности в опыте холостого хода определяется как**

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

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

$$\Delta P(\beta) = P_x + \beta^2 \cdot P_{к,ном}$$

**Учитывая, что мощность, потребляемая нагрузкой**

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

**коэффициент полезного действия находится по формуле**

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_{к,ном}}$$

Для серийных трансформаторов значение оптимального коэффициента нагрузки составляет  $\beta_{opt} = 0,7 - 0,5$  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.

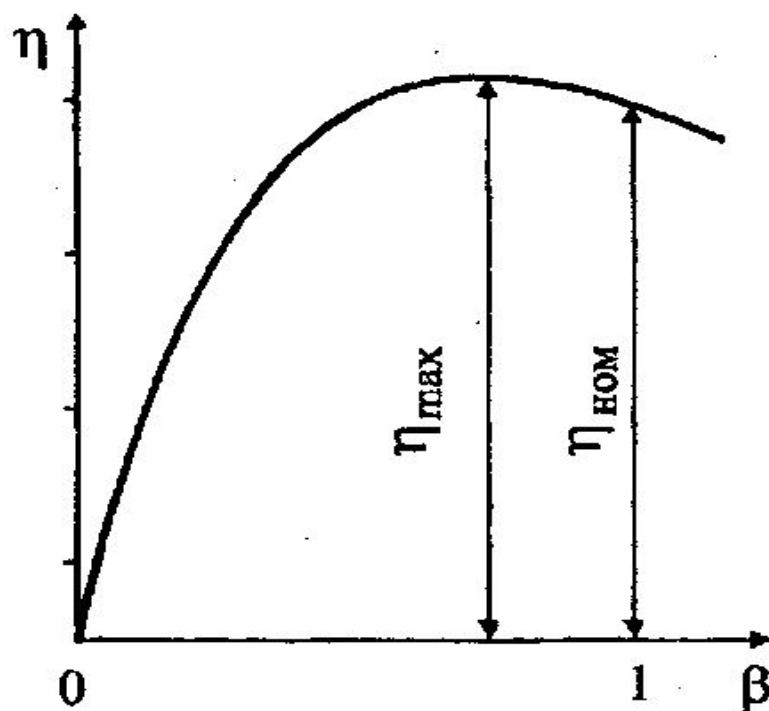


Рис. 6. Зависимость КПД трансформатора от нагрузки