

## Вопросы к КР по трансформаторам с краткими ответами

### 1 Назначение, устройство трансформаторов и их применение

Трансформатор предназначен для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения при неизменной частоте и мощности. Различают трансформаторы силовые и специальные (измерительные, согласующие, сварочные, автотрансформаторы, импульсные и т. д.).

Трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника) и обмоток. В трансформаторах с масляным охлаждением они помещены в бак, наполненный трансформаторным маслом

На каждой электростанции устанавливают трансформаторы, осуществляющие повышение напряжения для передачи в высоковольтную линию. Во всех узлах распределительных сетей должны быть установлены понижающие трансформаторы.

### 2 Режим холостого хода трансформатора

При подключении к сети переменного тока первичной обмотки в ней возникает ток, который создает переменный магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий как первичную, так и вторичную обмотки. Малая часть потока замыкается по воздуху – поток рассеяния  $\Phi_s$ .

Основной поток  $\Phi$  индуцирует в обмотках переменные ЭДС –  $e_1$  и  $e_2$ , пропорциональные, согласно закону электромагнитной индукции, числу витков  $w_1$  и  $w_2$  соответствующей обмотки и скорости изменения потока  $d\Phi/dt$ . Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные в каждой обмотке,  $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$ ;  $e_2 = -w_2 d\Phi/dt$ , при  $k = e_1 / e_2 = w_1 / w_2$ .

При перемагничивании сердечника происходят потери энергии на гистерезис и вихревые токи. Эти потери не зависят от нагрузки.

### 3 Работа трансформатора под нагрузкой

Если к вторичной обмотке подключить нагрузку, то под воздействием ЭДС  $E_2$  в ней протекает ток  $I_2$ . Этот ток создает магнитный поток вторичной обмотки; он направлен навстречу потоку, создаваемому в сердечнике первичной обмоткой, пытаясь его уменьшить. Это приоткрывает путь току первичной обмотки, который увеличивается, создаваемый им дополнительный магнитный поток полностью компенсирует собой поток вторичной обмотки и результирующий поток в сердечнике трансформатора практически не изменится.

Таким образом, в трансформаторе автоматически изменяется величина тока, поступающего из сети в соответствии с изменением нагрузки. При этом  $U_1 \approx E_1$  и  $U_2 \approx E_2$ .

#### 4 Приведенный трансформатор. Т-образная схема замещения

Приведение параметров вторичной обмотки к напряжению первичной с помощью коэффициента  $k$  позволяет условно заменить магнитную связь между обмотками на электрическую, а на схеме замещения электрически соединить эти обмотки в форме буквы Т.

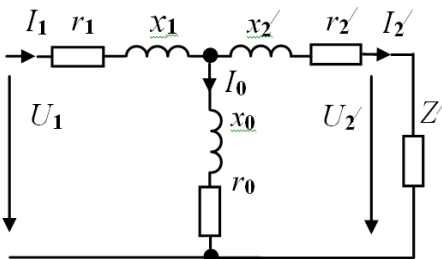
Приведенные параметры обозначаются со штрихом «'».

Т-образная схема замещения приведенного трансформатора содержит:

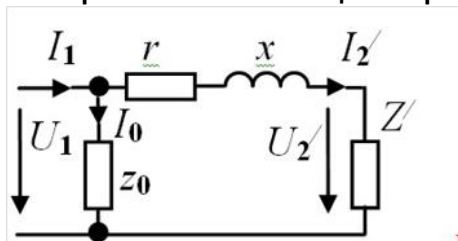
- сопротивления проводов обмоток, первичной  $r_1$  и вторичной  $r_2' = k^2 r_2$ ;

- индуктивные сопротивления первичной  $x_1 = \omega L_{S1}$  и вторичной  $x_2' = k^2 x_2 = k^2 \omega L_{S2}$  обмоток, учитывающие магнитные потоки рассеяния;

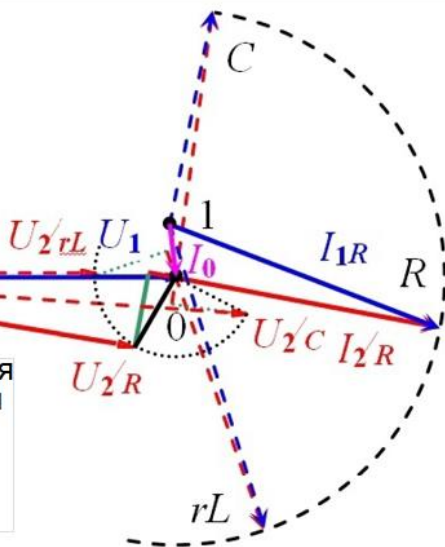
- ветвь перемагничивания сердечника  $x_0, r_0$ ,



#### 5 Г-образная схема замещения трансформатора. Круговая диаграмма.



Г-образная схема замещения трансформатора и векторная круговая диаграмма токов и напряжений для активной  $r$ , активно-индуктивной  $rL$  и ёмкостной  $C$  нагрузки



На схеме активное сопротивление  $r = r_1 + r_2'$ , а рассеяние магнитного потока – в виде индуктивного сопротивления  $x = x_1 + x_2'$ .

На диаграмме  $I_0 + I_2'R = I_1R$ , (по первому закону Кирхгофа).

$U_2'R = U_1 - rI_2' - jxI_2'$  (по второму закону Кирхгофа).

Вектор  $I_2'$  вращается вокруг т.О, по часовой стрелке от  $C$  через  $R$  до  $rL$ . Одновременно по часовой стрелке поворачивается треугольник потерь.

## 6 Опыты холостого хода и короткого замыкания

**Опыт холостого хода** проводится для определения коэффициента трансформации и параметров поперечной намагничивающей ветви T-образной схемы замещения. Экспериментально коэффициент трансформации можно определить только по результатам измерения напряжений в режиме ХХ. Это объясняется тем, что только при холостом ходе, когда ток  $I_2$  вторичной обмотки отсутствует, напряжение на выходе трансформатора равно ЭДС во вторичной обмотке  $E_2$ .

$$k = E_1 / E_2 \approx U_{1H} / U_{20}. r_0 = P_0 / I_0^2. z_0 = U_{1H} / I_0. x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

Для новых и отремонтированных трансформаторов проводят **опыт короткого замыкания** для определения параметров последовательной ветви Г-образной схемы замещения. В этом опыте, при замкнутых выводах вторичной обмотки, на первичную подают такое пониженное напряжение  $U_K$ , при котором по первичной обмотке трансформатора начинает протекать номинальный ток  $I_{1H}$ .

$$r_K = P_K / I_{1H}^2; z_K = U_K / I_{1H}; x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}.$$

## 7 Изменение вторичного напряжения и внешние характеристики трансформатора

Изменение напряжения равно:

$$\Delta u\% = \left( \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \right) \cdot 100 \%$$

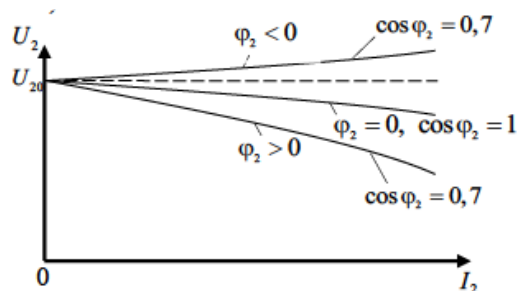
Экспериментальное определение потери напряжения неудобно, поэтому

$\Delta u\%$  определяют на основании анализа векторной диаграммы, соответствующей упрощенной схеме замещения по формуле

$$\Delta u\% = \beta (u_{\text{кз}}\% \cos \varphi_2 + u_{\text{кп}}\% \sin \varphi_2),$$

где  $\beta$  – коэффициент нагрузки трансформатора равный отношению реального тока вторичной обмотки к номинальному значению тока в ней

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}} \approx \frac{I_1}{I_{1H}}; u_{\text{кз}}\% = \frac{I_{1H} r_K}{U_{1H}} \cdot 100 \%; u_{\text{кп}}\% = \frac{I_{1H} x_K}{U_{1H}} \cdot 100 \%.$$



Под внешней характеристикой подразумевается зависимость напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $U_2$  от тока нагрузки  $I_2$ , снятая при неизменном напряжении сети и постоянном коэффициенте мощности  $\cos \varphi_2$ .

## 8 Потери и КПД трансформатора

При работе трансформатора в нём имеют место магнитные потери  $P_0$ , которые складываются из потерь на *перемагничивание* магнитопровода (гистерезис) и потерь на *вихревые токи*. Также имеют место *электрические потери*  $P_{\text{кн}}$  на нагрев обмоток трансформатора.

КПД трансформатора

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + (P_0 + \beta^2 P_{\text{кн}})}$$

где  $\beta$  – коэффициент нагрузки трансформатора  
 $\cos \varphi_2$  – коэффициент мощности.

КПД имеет максимум при  $P_0 = P_{\text{кн}}$

Для большинства трансформаторов

$\beta_{\text{опт}} = 0,5 \dots 0,7$ .  $\eta_{\text{max}} = 0,98-0,99$  для мощных трансформаторов снижается до 0,6 при  $S_{\text{н}}$  до 10 ВА.

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{кн}}}}$$

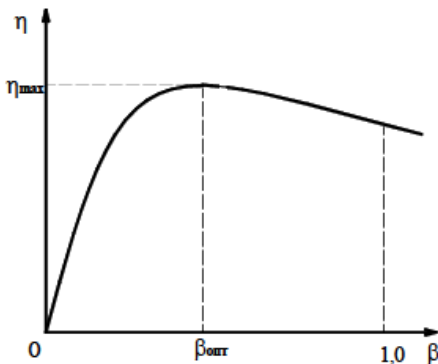


Рисунок 1.15 – Зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки при  $\cos \varphi_2 = \text{const}$

## 9 Трёхфазные трансформаторы, группы соединения обмоток.

### Параллельная работа трансформаторов

Сердечник трёхфазного трансформатора состоит из трёх стержней, с двух сторон соединённых ярмом. На каждом стержне уложена секция первичной и вторичной обмоток. Секции первичных обмоток обозначаются  $A-X, B-Y, C-Z$ , секции вторичных – соответственно  $a-x, b-y, c-z$ .

Первичные обмотки соединяются звездой либо треугольником и подключаются к симметричной цепи питающих напряжений. По ним протекают первичные токи  $I_{1A}, I_{1B}$  и  $I_{1C}$ , создающие магнитные потоки в стержнях  $\Phi_A, \Phi_B$  и  $\Phi_C$ , изменяющиеся по синусоидальному закону.

Ко вторичным обмоткам по схемам звездой либо треугольником подключаются нагрузка. Наиболее употребительны схемы :  $Y/Y, Y/\Delta, \Delta/Y$ .

Для включения трансформаторов на параллельную работу необходимо:

- равенство коэффициентов трансформации ,  $k_1 = k_2$ ;
- равенство напряжений короткого замыкания,  $u_{\text{к1}} = u_{\text{к2}}$ ;
- равенство групп соединения трансформаторов.

Рекомендуется, чтобы отношение номинальных мощностей трансформаторов, включаемых на параллельную работу, не превышало 3:1.

## 10 Специальные типы трансформаторов

У *автотрансформатора* вторичная обмотка является частью первичной; служит он для плавного регулирования вторичного напряжения. Конструктивно он выполняется в виде полого цилиндрического сердечника, навитого из ленты электротехнической стали. На изолированную поверхность цилиндра наматывается первичная обмотка АХ. Движок ЛАТРа выполняется в виде ролика, перемещающегося по виткам обмотки. Так как электромагнитным путём во вторичную обмотку передается только часть всей мощности, можно уменьшить сечение магнитопровода. Это же сокращает среднюю длину витка и количество меди, расходуемой на обмотку.

*Измерительные трансформаторы* используют главным образом для подключения электроизмерительных приборов в цепи переменного тока высокого напряжения. При этом они оказываются изолированными от цепей высокого напряжения, что обеспечивает безопасность работы обслуживающего персонала. Измерительные трансформаторы дают возможность измерять большие токи и напряжения с помощью приборов, рассчитанных для измерения малых токов и напряжений. Они рассчитаны для совместной работы со стандартными приборами (амперметрами на 1; 2; 2,5 и 5 А, вольтметрами на 100 и 173 В).

Один из выводов вторичной обмотки измерительного трансформатора должен быть заземлён.

При отключении измерительных приборов от вторичной обмотки трансформатора тока её следует замыкать накоротко.