

РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ТРАНСФОРМАТОРА

§ 15. РАВНОВЕСИЕ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ СИЛ  
ОБОТКОВ ТРАНСФОРМАТОРА

При работе трансформатора на какой-либо приемник электрической энергии по его первичной обмотке протекает ток  $I_1$ , а по вторичной обмотке — ток  $I_2$  (рис. 19). Уравнение равновесия э. д. с. для первичной обмотки запишется в виде  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{s1} + I_1 r_1 = -\dot{E}_1 + I_1 z_1$ . Практически падение напряжения в полном сопротивлении первичной обмотки  $I_1 z_1$  очень мало по сравнению с приложенным напряжением. Поэтому можно считать, что приложенное напряжение практически уравнивается э. д. с. первичной обмотки, т. е.  $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ .

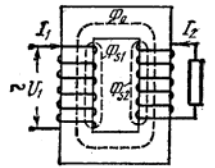


Рис. 19. Схема работы трансформатора под нагрузкой

Следовательно, при неизменном напряжении сети практически неизменна как э. д. с.  $E_1$ , так и амплитуда магнитного потока при любой нагрузке  $r$  ( $\Phi_m$  — постоянная величина).

Намагничивающая сила (н. с.) при холостом ходе  $I_0 \omega_1$  создает основной магнитный поток трансформатора  $\Phi_m$ , который индуктирует в первичной и во вторичной обмотках э. д. с.  $E_1 = E_2$ . Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть на какой-либо приемник энергии, то по ней будет протекать ток  $I_2$ . Намагничивающая сила вторичной обмотки  $I_2 \omega_2$  направлена встречно потоку, ее создающему, т. е. н. с. вторичной обмотки стремится уменьшить магнитный поток  $\Phi_m$ . Но при уменьшении потока  $\Phi_m$  уменьшится э. д. с.  $E_1$ , что приведет к увеличению тока первичной обмотки  $I_1$ .

Ток  $I_1$  увеличивается до такой величины, при которой н. с. первичной обмотки  $I_1 \omega_1$  компенсирует размагничивающее действие н. с. вторичной обмотки. Таким образом, н. с. первичной обмотки создает неизменный, практически не зависящий от нагрузки, магнитный поток в магнитопроводе трансформатора  $\Phi_m$  и компенсирует размагничивающее действие н. с. вторичной обмотки, что изображено на векторной диаграмме (рис. 20). По горизонтальной оси этой диаграммы отложен вектор амплитуды основного магнитного потока  $\Phi_m$ . Индуцируемая этим магнитным потоком э. д. с. вторичной обмотки  $E_2$  показана вектором, повернутым от-

носительно вектора  $\Phi_m$  на  $90^\circ$  в сторону отставания (по часовой стрелке).

При активно-индуктивной нагрузке ток вторичной обмотки  $I_2$  отстает по фазе от э. д. с. на некоторый угол  $\psi_2$ , зависящий от соотношения активного и реактивного сопротивлений нагрузки. Вектор намагничивающей силы вторичной обмотки  $I_2 \omega_2$ , совпадающий по направлению с вектором  $I_2$ , изображен повернутым на угол  $\psi_2$  относительно вектора  $E_2$  в сторону отставания. Вектор намагничивающей силы холостого хода  $I_0 \omega_1$  изображен, повернутым в сторону опережения относительно вектора  $\Phi_m$  на угол гистерезисного опережения  $\alpha$ . Намагничивающая сила первичной обмотки  $I_1 \omega_1$  при нагрузке равна геометрической сумме векторов  $I_0 \omega_1$  и  $I_2 \omega_2$  (последний должен быть взят с обратным знаком).

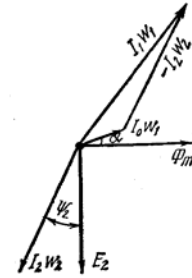


Рис. 20. Векторная диаграмма намагничивающих сил обмоток трансформатора

Диаграмма намагничивающих сил показывает, что любое изменение тока вторичной обмотки (нагрузки) вызывает соответствующее изменение тока в первичной обмотке. Если (при увеличении нагрузки) увеличится ток вторичной обмотки, то примерно в той же мере увеличится ток в первичной обмотке. Уменьшение тока вторичной обмотки вызывает уменьшение тока первичной обмотки.

Таким образом, мы можем записать уравнение равновесия намагничивающих сил в следующем виде:

$$I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2 = I_0 \omega_1 \text{ или } I_1 = I_0 + (-I_2),$$

где

$$I_2' = I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} = I_2 \frac{1}{k}.$$

§ 16. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА И ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НАГРУЗКЕ

При построении векторных диаграмм и эквивалентных схем приходится сравнивать величины, относящиеся к первичной и вторичной обмоткам, которые при коэффициенте трансформации, не равном единице, могут существенно отличаться.

Для удобства построения векторных диаграмм и возможности построения эквивалентных схем вторичную обмотку трансформатора приводят к виткам первичной, т. е. условно полагают, что вместо вторичной обмотки с числом витков  $\omega_2$  имеется обмотка с числом витков  $\omega_1$ , равным числу витков первичной обмотки. При этом мощности, потери энергии и фазовые углы между электрическими величинами должны оставаться после приведения вторичной обмотки неизменными. Э. д. с. вторичной обмотки трансформатора пропорциональна числу витков, следовательно, при изменении чис-

ла витков обмотки изменится и ее э. д. с. Э. д. с. приведенной обмотки

$$E_2' = E_2 \frac{\omega_1}{\omega_2} = E_2 k = E_1.$$

Напряжение приведенной обмотки

$$U_2' = kU_2.$$

Приведенное значение вторичного тока найдем из условия постоянства полной мощности, т. е. полная мощность приведенной вторичной обмотки должна оставаться равной полной мощности действительной вторичной обмотки.

$$U_2' I_2' = U_2 I_2, \text{ откуда } I_2' = I_2 \frac{U_2}{U_2'} = I_2 \frac{1}{k}.$$

Активное сопротивление приведенной вторичной обмотки трансформатора найдем из условия постоянства потерь в меди при приведении вторичной обмотки, т. е.

$$I_2'^2 r_2' = (I_2)^2 r_2,$$

откуда

$$r_2' = \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2 r_2 = k^2 r_2.$$

Индуктивное сопротивление, так же как и индуктивность, пропорционально квадрату числа витков, следовательно, индуктивное сопротивление приведенной вторичной обмотки

$$x_2' = k^2 x_2.$$

После приведения вторичной обмотки трансформатора к виткам первичной перейдем к построению векторной диаграммы. На рис. 21 показаны векторные диаграммы для активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузки. В положительном направлении горизонтальной оси изображен вектор амплитуды основного потока трансформатора  $\Phi_m$ . В сторону опережения относительно вектора  $\Phi_m$  на угол  $\alpha$  построен вектор тока холостого хода  $I_0$  и в сторону отставания относительно вектора  $\Phi_m$  на  $\frac{\pi}{2}$  построены векторы э. д. с. первичной и приведенной вторичной обмоток  $E_1 = E_2'$ . В сторону отставания при индуктивном характере нагрузки (рис. 21, а) и в сторону опережения при емкостном характере нагрузки (рис. 21, б) на угол  $\psi_2$  построен вектор приведенного вторичного тока  $I_2'$ .

Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора при нагрузке равно сумме электродвижущих сил вторичной обмотки минус падение напряжения в активном сопротивлении этой обмотки, т. е. уравнение равновесия э. д. с. для вторичной обмотки трансформатора имеет следующий вид:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{s2} - \dot{I}_2' r_2,$$

где  $E_2$  — э. д. с., индуцированная во вторичной обмотке основным магнитным потоком трансформатора;  $E_{s2}$  — э. д. с. от потока рассеяния вторичной обмотки. (При нагрузке трансформатора ток вторичной обмотки создает поток рассеяния, магнитные линии которого замыкаются через воздух и пронизывают витки только вторичной обмотке.)

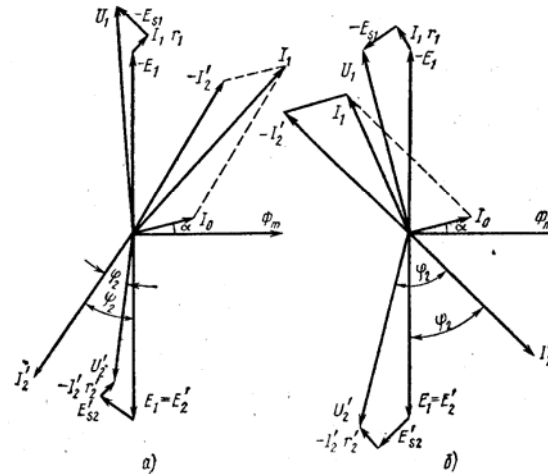


Рис. 21. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузке

После приведения вторичной обмотки к виткам первичной запишем это уравнение в следующем виде:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{s2} - \dot{I}_2' r_2.$$

Следовательно, для определения вектора напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора при нагрузке из конца вектора э. д. с.  $E_2'$  строим вектор  $E_{s2}'$ , отстающий от вектора тока  $I_2'$  на  $\frac{\pi}{2}$ , и затем вектор  $-I_2' r_2$ , параллельный и противоположно направленный вектору тока  $I_2'$ . Геометрическая сумма этих трех векторов определяет приведенное вторичное напряжение трансформатора  $\dot{U}_2'$ .

Для определения тока первичной обмотки нужно согласно уравнению равновесия намагничивающих сил построить геометрическую сумму векторов тока холостого хода  $I_0$  и приведенного тока вторичной обмотки с обратным знаком  $-I_2'$ .

Для определения первичного напряжения воспользуемся уравнением равновесия э. д. с. первичной обмотки:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{s1} + \dot{I}_1 r_1.$$

Строим вектор  $-\dot{E}_1$ , равный и противоположно направленный вектору  $\dot{E}_1$ . Из конца вектора  $-\dot{E}_1$  строим вектор  $\dot{I}_1 r_1$ , параллельный вектору тока  $\dot{I}_1$ . Затем из конца вектора  $\dot{I}_1 r_1$  строим вектор  $-\dot{E}_{s1}$ , повернутый относительно вектора тока  $\dot{I}_1$  на  $90^\circ$  в сторону опережения. Геометрическая сумма этих трех векторов является вектором приложенного напряжения  $\dot{U}_1$ .

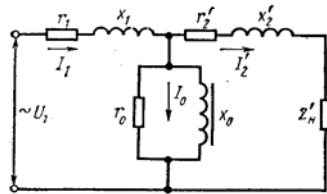


Рис. 22. Эквивалентная схема трансформатора при нагрузке

Из векторных диаграмм видно, что вторичное напряжение зависит от величины тока нагрузки трансформатора  $\dot{I}_2$  и характера нагрузки, т. е. от угла  $\psi_2$ . При индуктивном характере нагрузки вторичное напряжение по абсолютной величине меньше, чем э. д. с. ( $U_2' < E_2'$ ), т. е. при нагрузке напряжение понижается. При емкостном характере нагрузки вторичное напряжение по абсолютной величине больше, чем э. д. с. ( $U_2' > E_2'$ ), т. е. при нагрузке напряжение повышается.

Так же как и в случае холостого хода трансформатора, для рабочего режима можно построить эквивалентную схему, т. е. магнитную связь между обмотками представить эквивалентной электрической схемой (рис. 22).

Э. д. с. рассеяния первичной обмотки с обратным знаком  $-\dot{E}_{s1}$  выше мы представили в виде падения напряжения в индуктивном сопротивлении  $x_1$ , обусловленном потоком рассеяния  $\Phi_{s1}$ , т. е.  $-\dot{E}_{s1} = \dot{I}_1 x_1$ . Точно так же э. д. с. рассеяния вторичной обмотки  $\dot{E}_{s2}$  представим в виде падения напряжения на индуктивном сопротивлении  $x_2$ , обусловленном потоком рассеяния  $\Phi_{s2}$ , т. е.  $\dot{E}_{s2} = -\dot{I}_2 x_2$ .

После приведения вторичной обмотки к первичной получим:

$$\dot{E}'_{s2} = -\dot{I}_2 x'_2.$$

Тогда уравнениям равновесия э. д. с. для первичной и вторичной обмоток трансформатора можно придать следующий вид:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1 \quad \text{и} \quad \dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' z_2',$$

где  $z_1$  и  $z_2'$  — полные сопротивления первичной и приведенной вторичной обмоток трансформатора ( $z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}$  и  $z_2' = \sqrt{(r_2')^2 + (x_2')^2}$ ).

Введем обозначение:

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2' = -\dot{I}_0 z_0,$$

где  $\dot{I}_0$  — вектор тока холостого хода;  $z_0$  — полное сопротивление трансформатора при холостом ходе.

Напряжение вторичной обмотки трансформатора при нагрузке

$$\dot{U}_2' = \dot{I}_2' z'_N,$$

где  $z'_N$  — полное приведенное сопротивление внешней нагрузки. Из уравнения равновесия намагничивающих сил имеем:

$$\dot{I}_2' = \dot{I}_0 - \dot{I}_1.$$

Уравнение равновесия э. д. с. для вторичной обмотки трансформатора можно записать в измененном виде:

$$(\dot{I}_0 - \dot{I}_1) z'_N = -\dot{I}_0 z_0 + (\dot{I}_1 - \dot{I}_0) z_2'.$$

Отсюда определим ток холостого хода:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 \frac{z_2' + z'_N}{z_0 + z_2' + z'_N}.$$

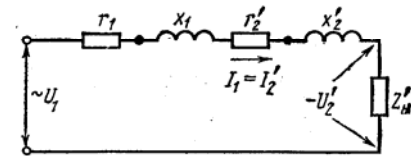
Найденное значение тока холостого хода подставим в уравнение равновесия э. д. с. для первичной обмотки и получим следующее выражение:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 z_0 + \dot{I}_1 z_1 = \dot{I}_1 \left[ \frac{z_0 (z_2' + z'_N)}{z_0 + z_2' + z'_N} + z_1 \right],$$

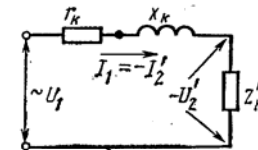
т. е. эквивалентное сопротивление трансформатора

$$z_3 = z_1 + \frac{z_0 (z_2' + z'_N)}{z_0 + z_2' + z'_N}$$

представляет собой два последовательно включенных сопротивления, из которых первым является полное сопротивление первичной обмотки трансформатора, а вторым — параллельное соединение двух сопротивлений. При этом в одной ветви включено полное сопротивление холостого хода трансформатора, а в другой ветви последовательно соединены приведенные полные сопротивления вторичной обмотки трансформатора и нагрузки.



а)



б)

Рис. 23. Упрощенная (а) и видоизмененная (б) эквивалентные схемы трансформатора

Как было отмечено выше, ток холостого хода представляет собой малую величину по сравнению с номиналь-

ным током первичной обмотки трансформатора. Кроме того, ток холостого хода  $I_0$  и ток нагрузки  $I_2'$  не совпадают по фазе. Так, при активной нагрузке ток в нагрузке  $I_2'$  будет активным и окажется близким к совпадению с э. д. с., тогда как ток холостого хода будет почти чисто реактивным и близким к совпадению с основным магнитным потоком по фазе. Поэтому ток первичной обмотки численно незначительно отличается от приведенного тока вторичной обмотки и можно ввести следующее приближенное равенство:

$$I_1 \approx -I_2'$$

Если пренебречь током холостого хода, эквивалентная схема трансформатора при нагрузке будет более простой (рис. 23, а).

На рис. 23, б показана видоизмененная эквивалентная схема трансформатора при нагрузке. Для этих схем можно ввести следующие обозначения:

$$r_1 + r_2 = r_k; \quad x_1 + x_2 = x_k;$$

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2},$$

где  $z_k$ ,  $r_k$  и  $x_k$  — соответственно полное, активное и реактивное сопротивление короткого замыкания трансформатора (см. гл. 5).

#### § 17. ИЗМЕНЕНИЕ НАПЯЖЕНИЯ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА

При нагрузке трансформатора напряжение его вторичной обмотки не остается постоянным по величине. Изменение вторичного напряжения, вызываемое нагрузкой трансформатора, характеризуется его процентным понижением

$$\Delta u \% = \frac{U_{2-0} - U_2}{U_{2-0}} \cdot 100,$$

где  $U_{2-0}$  — вторичное напряжение трансформатора при холостом ходе;  $U_2$  — вторичное напряжение трансформатора при нагрузке.

Процентное понижение вторичного напряжения показывает меру его уменьшения при увеличении нагрузки трансформатора. После приведения вторичной обмотки к виткам первичной процентное понижение вторичного напряжения определится следующим выражением:

$$\Delta u \% = \frac{U'_{2-0} - U'_2}{U'_{2-0}} \cdot 100.$$

Так как  $U'_{2-0} = U_1$ , то

$$\Delta u \% = \frac{U_1 - U'_2}{U_1} \cdot 100.$$

При полной нагрузке трансформатора в его первичной и вторичной обмотках протекают номинальные токи. Падение напряже-

ния в полном сопротивлении короткого замыкания при номинальном токе называется *напряжением короткого замыкания* ( $I_{нзк} = U_k$ ), падение напряжения в активном сопротивлении короткого замыкания — активной составляющей напряжения короткого замыкания ( $I_{нзк} r_k = U_a$ ), падение напряжения в реактивном сопротивлении короткого замыкания — реактивной составляющей напряжения короткого замыкания ( $I_{нзк} x_k = U_x$ ) (см. § 21).

Из эквивалентной схемы трансформатора, изображенной на рис. 23, б, видно, что напряжение первичной обмотки  $U_1$  может быть представлено геометрической суммой приведенного напряжения вторичной обмотки с обратным знаком  $-U'_2$  и падения напряжения на полном сопротивлении короткого замыкания трансформатора, которое при номинальном токе равно напряжению короткого замыкания, т. е.  $I_{нзк} z_k = U_k$ .

Таким образом, можно записать следующее равенство:

$$\dot{U}_1 = -\dot{U}'_2 + \dot{U}_k = -\dot{U}'_2 + \dot{U}_a + \dot{U}_x,$$

причем  $U_k = \sqrt{U_a^2 + U_x^2}$ .

Процентное изменение вторичного напряжения определится формулой

$$\Delta u \% = -u_a \cos \varphi_2 + u_x \sin \varphi_2,$$

где  $u_a$  и  $u_x$  — активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, выраженные в процентах к номинальному.

Из полученного выражения видно, что процентное изменение вторичного напряжения зависит от величины и характера нагрузки. Напряжение короткого замыкания  $U_k$  и его составляющие  $U_a$  и  $U_x$  определены для номинального тока, т. е.  $U_a = I_{нзк} r_k$  и  $U_x = I_{нзк} x_k$ .

Для определения  $\Delta u$  при любом значении тока введем коэффициент нагрузки трансформатора  $\beta$ , равный отношению тока выбранной нагрузки к номинальному, т. е.

$$\beta = \frac{I_1}{I_{нзк}}$$

Следовательно, при любом значении тока  $I_1$  процентное изменение вторичного напряжения определится выражением

$$\Delta u \% = \beta (u_a \cos \varphi_2 + u_x \sin \varphi_2),$$

т. е.  $\Delta u$  пропорционально току  $I_1$ .

Процентное понижение вторичного напряжения в значительной мере зависит от характера нагрузки. Наибольшее значение  $\Delta u$  будет при таком характере нагрузки, при котором вектор  $U_k$  будет совпадать по направлению с вектором  $U_1$ , т. е. при  $\varphi_2 = \varphi_k$ . При чисто активной нагрузке  $\varphi_2 = 0$  и  $\Delta u = u_a$ ; при чисто индуктивной нагрузке  $\varphi_2 = +\frac{\pi}{2}$  и  $\Delta u = u_x$ ; при чисто емкостной нагрузке

$$\varphi_2 = -\frac{\pi}{2} \text{ и } \Delta u = -u_x.$$

На рис. 24 показана зависимость процентного понижения вторичного напряжения от характера нагрузки. Из этой зависимости видно, что в случае емкостной нагрузки при значительных углах  $\varphi_2$  процентное понижение вторичного напряжения окажется отрицательным, т. е. при увеличении нагрузки вторичное напряжение

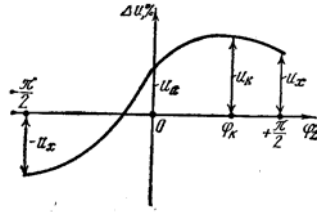


Рис. 24. Зависимость процентного понижения вторичного напряжения трансформатора от характера нагрузки

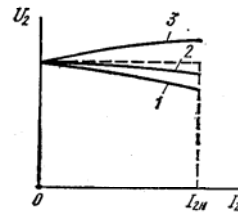


Рис. 25. Внешняя характеристика трансформатора при различных характерах нагрузки:  
1 — активно-индуктивная,  
2 — активная, 3 — активно-емкостная

трансформатора повышается. Напряжение вторичной обмотки трансформатора при нагрузке  $U_2 = U_{2-0} \left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right)$ . Внешняя характеристика трансформатора, т. е. зависимость вторичного напряжения от тока, при различных характерах нагрузки изображена на рис. 25.

### § 18. К. П. Д. ТРАНСФОРМАТОРА

В соответствии с законом сохранения энергии потребляемая трансформатором мощность  $P_1$  больше мощности  $P_2$ , отданной им в нагрузку, так как при работе трансформатора, так же как и любого преобразователя энергии, неизбежно происходит потеря преобразуемой им электрической энергии. При работе трансформатора на какую-либо нагрузку из питающей сети помимо полезной мощности  $P_2$  потребляется мощность, идущая на покрытие потерь в стали магнитопровода  $P_{ст}$  и проводах обмоток (потери в меди)  $P_k$ .

Потери в стали магнитопровода на гистерезис и вихревые токи зависят от частоты тока питающей сети и магнитной индукции. Так как при работе трансформатора частота тока сети и амплитуда магнитной индукции неизменны (при условии постоянства приложенного напряжения), то потери в стали постоянны, не зависят от нагрузки трансформатора и равны потерям холостого хода  $P_0$ . Эти потери определяются из опыта холостого хода трансформатора.

К. п. д. трансформатора представляет собой отношение полезной мощности, отдаваемой трансформатором в нагрузку, к мощности, потребляемой им из первичной сети, т. е.

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

Практически к. п. д. трансформаторов очень высок. Так, для трансформаторов малых мощностей (до 1000 *ва*)  $\eta=85-95\%$ , для трансформаторов больших мощностей  $\eta=95-99,5\%$ .

При любой величине и характере нагрузки трансформатора его полезная мощность может быть определена выражением

$$P_2 = \beta P_{2н} \cos \varphi_2,$$

где  $\beta = \frac{I_1}{I_{1н}}$  — коэффициент нагрузки трансформатора ( $I_1$  — ток первичной обмотки при выбранной нагрузке,  $I_{1н}$  — номинальный ток первичной обмотки);  $P_{2н}$  — номинальная мощность трансформатора.

Подведенная мощность определяется как сумма полезной мощности трансформатора и мощности потерь, т. е.

$$P_1 = P_2 + \sum P = P_2 + P_0 + P_k.$$

Потери в меди  $P_k$  зависят от тока (нагрузки) и являются потерями переменными. Эти потери пропорциональны квадрату тока, т. е.  $P_k = \beta^2 P_{кн}$ , где  $P_{кн}$  — потери в меди при номинальном токе.

К. п. д. трансформатора определяется в зависимости от коэффициента нагрузки  $\beta$  выражением вида

$$\eta = \frac{P_1}{P_2 + P_0 + P_k} = \frac{\beta P_{2н} \cos \varphi_2}{\beta P_{2н} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{кн}}.$$

Однако при определении к. п. д. более удобно пользоваться несколько видоизмененной формулой

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + P_k}{P_2 + P_0 + P_k} = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{кн}}{\beta P_{2н} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{кн}}.$$

На рис. 26 построены зависимости  $\eta$ ,  $P_0$  и  $P_k$  от коэффициента нагрузки, откуда видно, что зависимость  $\eta = f(\beta)$  имеет максимум. Наибольший к. п. д. будет при такой нагрузке, когда постоянные потери равны потерям переменным. Постоянные потери — это потери в стали, зависящие от квадрата магнитной индукции  $B$ , переменные потери — это потери в меди обмоток трансформатора, зависящие от квадрата плотности тока  $j$ .

Выбирая значения электромагнитных нагрузок трансформатора ( $B$  и  $j$ ), можно изменить соотношение постоянных и переменных потерь. При этом будет меняться коэффициент нагрузки  $\beta_m$ , соответствующий наибольшему значению к. п. д.



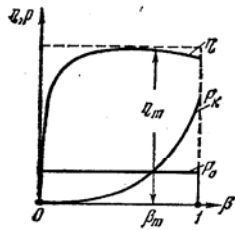


Рис. 26. Зависимости к. п. д. и потерь трансформатора от коэффициента нагрузки

Если трансформатор имеет номинальную нагрузку в течение всего времени его работы, желательно получить наибольший к. п. д. при номинальном токе, т. е.  $\beta_m=1$ , что является обычным в трансформаторах малой мощности. Если же трансформатор работает в режимах частых и значительных недогрузок, желательно получить наибольший к. п. д. при нагрузках трансформатора меньше номинальных ( $\beta_m < 1$ ). В этом случае желательно иметь наибольший к. п. д. при такой нагрузке, на которую большую часть времени работает трансформатор.

Например, силовые трансформаторы имеют наибольший к. п. д. при  $\beta=0,5 \div 0,6$ , по-

этому при номинальной нагрузке они согласно стандарту имеют соотношение потерь

$$\frac{P_k}{P_0} = \frac{1}{(0,5 \div 0,6)^2} \approx 3 \div 4.$$

### § 19. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Выше было установлено, что при неизменном первичном напряжении  $U_1$  колебания нагрузки трансформатора вызывают сравнительно малое изменение вторичного напряжения  $U_2$ . Однако в условиях эксплуатации электроустановок часто возникает необходимость поддерживать постоянным вторичное напряжение или изменять его в определенных пределах. Для решения этой задачи изменяют э. д. с. вторичной обмотки, действующее значение которой

$$E_2 = 4,44\omega_2 f \Phi_m 10^{-8}.$$

Э. д. с. обмотки можно изменить путем изменения числа ее витков или магнитного потока. Наибольшее распространение получило регулирование напряжения посредством изменения числа витков. Для этого обмотки выполняют с несколькими ответвлениями, каждое из которых соответствует определенному числу витков. При переключении обмоток напряжение изменяется ступенями. Обмотки ВН трансформаторов без РПН обычно имеют пять ответвлений, которые позволяют изменять вторичное напряжение на  $\pm 2,5\%$  и  $\pm 5\%$  от номинального. При изменении числа витков первичной обмотки магнитный поток в магнитопроводе будет изменяться.

Регулировочные ответвления могут быть сделаны как на первичной, так и на вторичной обмотках. Если трансформатор работает в условиях постоянства первичного напряжения, регулировочные ответвления целесообразно делать на вторичной обмотке. Если же первичное напряжение изменяется, регулировочные ответвления целесообразно делать на первичной обмотке, чтобы при

изменениях первичного напряжения отношение  $\frac{U_1}{\omega_1}$  оставалось неизменным. В этом случае магнитный поток в магнитопроводе трансформатора будет оставаться неизменным, не увеличивая потерь в стали и намагничивающего тока. При этом соотношение потерь в стали и меди остается неизменным и обеспечивается наиболее выгодный к. п. д. трансформатора. Однако часто напряжение меняется на стороне нерегулируемой обмотки. В этом случае меняется возбуждение трансформатора и поэтому его к. п. д. изменяется в больших пределах.

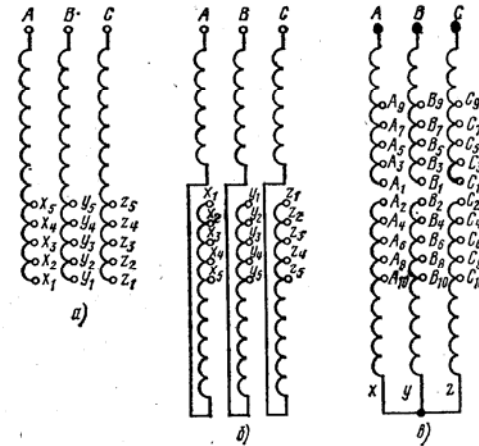


Рис. 27. Размещение отключаемых витков: а — у конца обмотки, б — в середине обмотки (оборотная схема), в — в середине обмотки (прямая схема)

Понижающие сетевые трансформаторы большей частью работают в условиях изменения первичного напряжения, и регулировочные ответвления делаются у обмотки ВН. По конструктивным соображениям регулировочные ответвления целесообразно делать у обмотки ВН, так как в этом случае переключатели должны быть рассчитаны на меньший ток. Так как при регулировании напряжения отключается часть витков только одной обмотки, то при этом нарушается симметричное расположение действующих витков одной обмотки относительно другой. Это приводит к дополнительному магнитному рассеянию (появляется поперечный поток рассеяния) и возникновению механических осевых усилий в обмотках. При аварийных режимах (короткое замыкание) механические усилия могут достигать опасной для обмоток величины. Поэтому необходимо обеспечить достаточную механическую прочность обмоток.

Контрольные вопросы

1. Почему при изменении нагрузки трансформатора изменяется ток в его первичной обмотке?
2. Изобразите эквивалентную схему трансформатора при нагрузке.
3. Что называется процентным понижением вторичного напряжения и от чего оно зависит?
4. Изобразите внешние характеристики трансформатора при различных характерах нагрузки.
5. При какой нагрузке трансформатора его к. п. д. будет наибольшим?
6. Как осуществляют регулировку напряжения трансформатора?

При отключении части витков в середине обмотки механическая прочность обмотки снижается в меньшей степени, чем при отключении части витков у конца обмотки. При многослойных цилиндрических обмотках у трансформаторов небольших мощностей отключаемые витки размещают у конца обмотки (рис. 27, а) и ответвления делают около нулевой точки. В обмотках других конструкций ответвления располагают в средней части обмотки. Обратная схема (рис. 27, б) позволяет разместить ответвления около нулевой точки и в то же время в середине обмотки. Прямую схему обмотки (рис. 27, в) с регулировочными ответвлениями в средней ее части применяют в непрерывных обмотках трансформаторов мощностью выше 1000 кВа при напряжении 35 кВ.

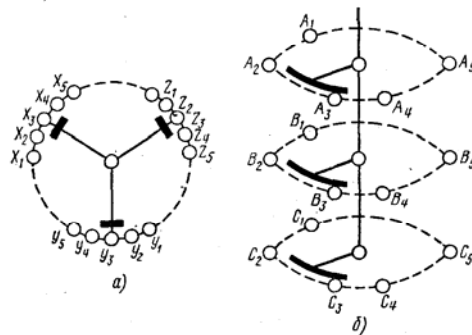


Рис. 28. Схемы переключателей ответвлений:  
а — при размещении ответвлений около нулевой точки,  
б — при размещении ответвлений в середине обмотки

В трансформаторах с обмотками, имеющими регулировочные ответвления около нулевой точки, применяют один переключатель, общий для всех трех фаз (рис. 28, а). При прямой схеме обмотки, когда отключаемые витки находятся в середине обмотки, используют три переключателя (по одному для каждой фазы), располагаемых один над другим на общей оси (рис. 28, б). Переключение с одного ответвления на другое производят только после отключения трансформатора от первичной и вторичной сетей, чтобы избежать возможных коротких замыканий регулировочных витков обмотки и разрыва цепи обмотки под нагрузкой. Переключение осуществляют поворотом рукоятки переключателя, расположенной на крышке бака трансформатора.

Существуют также схемы регулирования напряжения без отключения трансформатора от сети. В таких трансформаторах регулирование напряжения производится под нагрузкой (РПН). Для ограничения токов коротких замыканий в регулируемых витках в процессе переключения эти витки замыкаются на относительно большое индуктивное или активное сопротивление.