

ТРАНСФОРМАТОРЫ

7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Трансформатором называется статическое, т. е. без движущихся частей, электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования одних значений параметров переменных напряжений и тока в другие значения той же частоты. Трансформатор имеет не менее двух электрически изолированных (за исключением автотрансформатора) обмоток с общим магнитным потоком.

Для усиления индуктивной связи и снижения влияния вихревых токов в большинстве трансформаторов обмотки размещаются на магнитопроводе, собранном из листов электротехнической стали (рис. 7.1).

Обмотка трансформатора, подключенная к источнику (приемнику) энергии, называется *первичной* (*вторичной*). Соответственно все величины, относящиеся к первичной (вторичной) обмотке, называются *первичными* (*вторичными*) и их буквенные обозначения имеют индекс 1 (2).

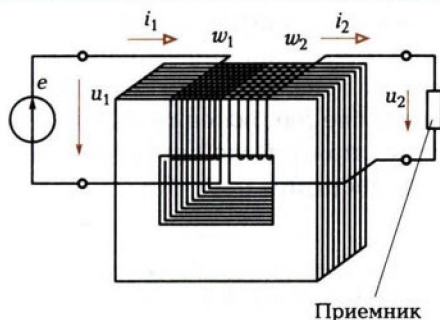


Рис. 7.1



Рис. 7.2

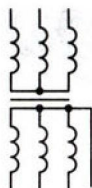


Рис. 7.3



Если первичное напряжение U_1 трансформатора меньше (больше) вторичного U_2 , то трансформатор называется *повышающим* (*понижающим*). По значению напряжения различают *обмотку высшего напряжения* (ВН) и *обмотку низшего напряжения* (НН).

Различают однофазные (для цепей однофазного тока) и трехфазные (для трехфазных цепей) трансформаторы. У трехфазного трансформатора *первичной* или *вторичной* обмоткой называют соответственно совокупности трех фазных обмоток одного напряжения. На рис. 7.2 показаны условные графические обозначения однофазного, а на рис. 7.3 — трехфазного трансформаторов.

На щитке трансформатора указаны номинальные значения полной мощности, напряжений — высшего и низшего, токов, частоты, а также число фаз и схема их соединения. Для трансформаторов большой мощности могут быть указаны дополнительные характеристики режима работы (длительный или кратковременный), способ охлаждения и др.

Трансформаторы мощностью до $1000 \text{ В} \cdot \text{А}$ используются в устройствах промышленной электроники для питания электрически изолированных частей цепи. Трансформаторы мощностью более $10 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ называются *силовыми*. Их применяют в электроэнергетике для экономичной передачи электрической энергии от трехфазных генераторов с линейным напряжением $6,3—38,5 \text{ кВ}$ по линиям электропередачи с линейным напряжением до 750 кВ и распределения между приемниками с линейным напряжением от 11 кВ и ниже. Чем выше напряжение линий передачи, тем меньше ток в ее проводах при той же полной мощности $S = UI$ и, следовательно, потери энергии.

Номинальными называются значения электрических величин, при которых электротехническое устройство (трансформатор, двигатель, генератор и т. п.) может работать неопределенное время без недопустимых последствий (перегрев, пробой изоляции и т. п.) с экономически эффективным КПД.

Рабочий процесс однофазного трансформатора практически такой же, как и одной фазы трехфазного трансформатора. Поэтому сначала рассмотрим работу однофазного двухобмоточного трансформатора, а затем отметим особенности трехфазных трансформаторов.

7.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

На рис. 7.4, а приведена схема включения однофазного трансформатора. Со стороны вторичной обмотки, содержащей w_2 витков, т.е. для приемника с сопротивлением нагрузки R_2 , трансформатор является источником энергии, а со стороны первичной обмотки, содержащей w_1 витков, — приемником энергии от источника питания.

Рассмотрим принцип действия однофазного трансформатора. Предположим, что цепь вторичной обмотки трансформатора разомкнута и при действии источника напряжения $u_1 = e$ ток в первичной обмотке равен i_1 . Магнитодвижущая сила $i_1 w_1$ возбужда-

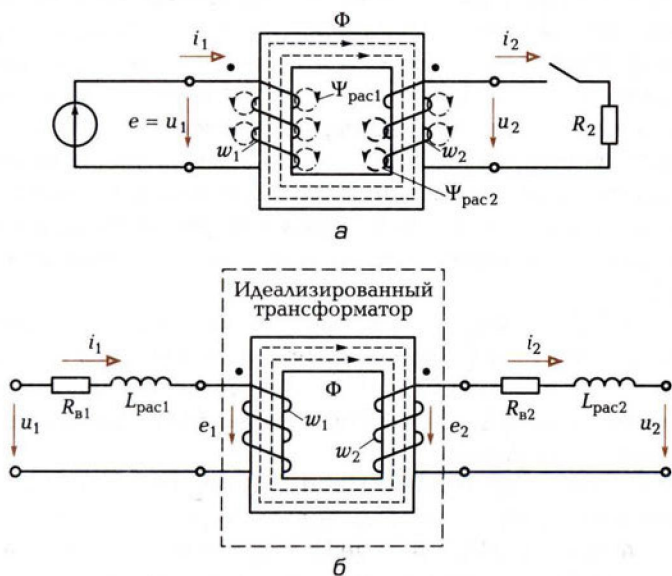


Рис. 7.4

ет в магнитопроводе магнитный поток, положительное направление которого определяется правилом буравчика (см. рис. 3.23, а). Этот магнитный поток индуцирует в первичной обмотке ЭДС самоиндукции e_{L1} (на рисунке не показана) и во вторичной обмотке — ЭДС взаимной индукции e_{M2} (на рисунке не показана).

После замыкания цепи вторичной обмотки под действием ЭДС взаимной индукции e_{M2} в приемнике с сопротивлением нагрузки R_2 возникнет ток i_2 .

Для указанных на рис. 7.4 направлений намотки первичной и вторичной обмоток и выбранных положительных направлений токов i_1 и i_2 МДС, равная $i_2 w_2$, возбуждает в магнитопроводе поток, направленный навстречу магнитному потоку от действия МДС, равной $i_1 w_1$.

Следовательно, первичная и вторичная обмотки рассматриваемого трансформатора включены встречно, что условно обозначается разметкой выводов обмоток (см. рис. 3.25, в). Суммарная МДС первичной и вторичной обмоток равна $i_1 w_1 - i_2 w_2$. Эта МДС возбуждает в магнитопроводе общий магнитный поток Φ . Кроме того, при анализе работы трансформатора нужно учесть потоко-сцепления рассеяния первичной Ψ_{pac1} и вторичной Ψ_{pac2} обмоток, которые пропорциональны соответственно токам i_1 и i_2 .

На рис. 7.4, б показана схема замещения трансформатора с активными сопротивлениями первичной $R_{в1}$ и вторичной $R_{в2}$ обмоток и их индуктивностями рассеяния $L_{\text{pac1}} = \Psi_{\text{pac1}}/i_1$ и $L_{\text{pac2}} = \Psi_{\text{pac2}}/i_2$.

Трансформатор, первичная и вторичная обмотки которого не имеют активных сопротивлений и потоко-сцеплений рассеяния, называется *идеализированным трансформатором*. На рис. 7.4, б идеализированный трансформатор выделен штриховой линией.

Положительные направления ЭДС e_1 и тока i_1 в его первичной обмотке совпадают, как и у катушки (см. рис. 3.23, а), в которую превращается трансформатор при разомкнутой цепи вторичной обмотки.

Так как ЭДС в первичной $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$ и вторичной $e_2 = -w_2 d\Phi/dt$ обмотках трансформатора индуцируются одним и тем же магнитным потоком Φ в магнитопроводе, то положительные направления этих ЭДС относительно одноименных выводов обеих обмоток одинаковые.

Если в цепи первичной обмотки ЭДС e_1 и ток i_1 совпадают по направлению (правило правоходового буравчика (см. рис. 3.23) для тока, потока и ЭДС), то в цепи вторичной обмотки направление тока i_2 выбрано противоположным направлению ЭДС e_2 . Это соответствует физическому представлению о различной роли

ЭДС: в первом случае ЭДС препятствует изменению тока, а во втором — возбуждает ток.

Различают несколько режимов работы трансформатора, имеющего номинальную полную мощность $S_{\text{ном}} = S_{1\text{ном}} = U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}}$:

- *номинальный режим*, т. е. режим при номинальных значениях напряжения $U_1 = U_{1\text{ном}}$ и тока $I_1 = I_{1\text{ном}}$ первичной обмотки трансформатора;
- *рабочий режим*, при котором напряжение первичной обмотки близко к номинальному значению или равно ему: $U_1 = U_{1\text{ном}}$, а ток I_1 меньше своего номинального значения $I_{1\text{ном}}$ или равен ему и определяется нагрузкой трансформатора, т. е. током I_2 ;
- *режим холостого хода*, т. е. режим ненагруженного трансформатора, при котором цепь вторичной обмотки разомкнута ($I_2 = 0$) или подключена к приемнику с очень большим сопротивлением нагрузки (например, к вольтметру);
- *режим короткого замыкания* трансформатора, при котором его вторичная обмотка коротко замкнута ($U_2 = 0$) или подключена к приемнику с очень малым сопротивлением нагрузки (например, к амперметру).

Режимы холостого хода и короткого замыкания специально создаются при испытании трансформатора.

7.3. РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

В режиме холостого хода (рис. 7.5) трансформатор превращается в катушку с магнитопроводом, к обмотке которой с числом витков w_1 подключен источник синусоидального напряжения.

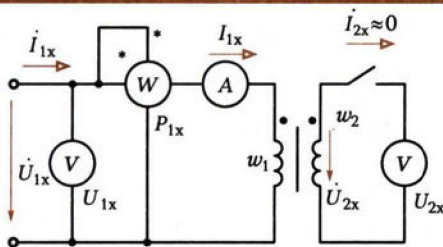


Рис. 7.5

Опыт холостого хода называется испытание трансформатора при разомкнутой цепи вторичной обмотки и номинальном первичном напряжении $U_{1x} = U_{1ном}$. На основании этого опыта по показаниям измерительных приборов определяют коэффициент трансформации и мощность потерь в магнитопроводе трансформатора. Опыт холостого хода является обязательным при заводском испытании трансформатора.

При номинальном первичном напряжении $U_{1x} = U_{1ном}$ ток холостого хода I_{1x} составляет 2—8 % номинального первичного тока $I_{1ном}$ (тем меньше, чем больше номинальная полная мощность трансформатора), т. е. $U_{1x} = E_{1x}$. Кроме того, при разомкнутой цепи вторичной обмотки $U_{2x} = E_{2x}$. Поэтому, измерив вольтметром первичное U_{1x} и вторичное U_{2x} напряжения в режиме холостого хода, определяют коэффициент трансформации повышающего или понижающего трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} n_{21} &= \frac{w_2}{w_1} = \frac{E_{2x}}{E_{1x}} = \frac{U_{2x}}{U_{1x}} > 1; \\ n_{12} &= \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_{1x}}{E_{2x}} = \frac{U_{1x}}{U_{2x}} > 1. \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

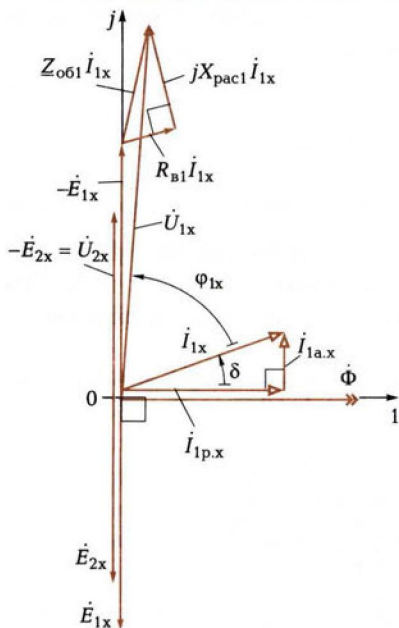


Рис. 7.6

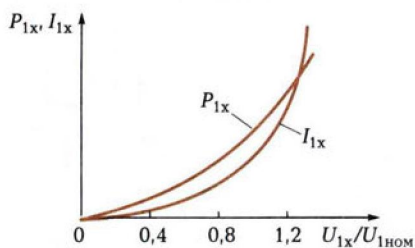


Рис. 7.7

Коэффициент трансформации указывается на щитке трансформатора в виде отношения напряжений высшего к низшему при его холостом ходе, например «6 000/230 В».

Мощность потерь в трансформаторах при холостом ходе складывается из мощности потерь в магнитопроводе (на вихревые токи и магнитный гистерезис), мощности потерь в проводах первичной обмотки ($R_{в1} I_{1x}^2$), а также мощности добавочных потерь (потери из-за вибрации листов стали в местах их стыков, в конструктивных деталях вследствие потока рассеяния и т.д.). При холостом ходе ток $I_{1x} \ll I_{ном}$ и мощность потерь в проводах ничтожны по сравнению с мощностью потерь в магнитопроводе (исключение составляют трансформаторы, номинальная полная мощность которых менее 1000 В · А). То же относится и к мощности добавочных потерь. Поэтому опыт холостого хода служит для определения *мощности потерь в магнитопроводе трансформатора*. Мощность потерь в трансформаторе при холостом ходе мала и составляет 0,3—1,4 % его номинальной полной мощности (тем меньше, чем больше номинальная полная мощность трансформатора). Тем не менее мощность потерь в магнитопроводе имеет важное практическое значение, так как силовые трансформаторы редко отключаются от первичной сети.

Ток холостого хода I_{1x} состоит из реактивной $I_{1р.х}$ и активной $I_{1а.х}$ составляющих. Последняя определяется потерями в магнитопроводе и добавочными потерями. В большинстве случаев активная составляющая $I_{1а.х}$ меньше 10 % реактивной составляющей $I_{1р.х}$, и можно считать, что ток холостого хода отстает по фазе от первичного напряжения практически на четверть периода, т.е. $\rho_{1x} \approx \pi/2$ (рис. 7.6).

При ограниченных возможностях охлаждения важно знать, как изменится режим холостого хода трансформатора при изменении первичного напряжения.

Зависимости $P_{1x} = f(U_{1x})$ и $I_{1x} = f(U_{1x})$ называются *характеристиками холостого хода* трансформатора (рис. 7.7).

Сначала при повышении первичного напряжения U_{1x} от нулевого значения магнитопровод не насыщен и ток I_{1x} увеличивается пропорционально напряжению; затем начинает сказываться насыщение магнитопровода, например при $U_{1x} > 0,8U_{ном}$, и ток холостого хода I_{1x} быстро нарастает.

Для большинства силовых трансформаторов допустимый верхний предел длительного повышения первичного напряжения в режиме холостого хода равен $1,1U_{ном}$.

7.4. РЕЖИМ КОРТОКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Различают режим короткого замыкания в эксплуатационных условиях и опыт короткого замыкания. Первый представляет собой аварийный режим трансформатора, при котором трансформатор сильно нагревается, что может вызвать его разрушение.

Опыт короткого замыкания называется испытание трансформатора при короткозамкнутой цепи вторичной обмотки и номинальном первичном токе $I_{1к} = I_{ном}$ (рис. 7.8). На основании этого опыта определяют мощность потерь в проводах обмоток и треугольник внутреннего падения напряжений. Опыт короткого замыкания, как и опыт холостого хода, обязателен при заводских испытаниях.

Напряжение первичной обмотки в опыте короткого замыкания $U_{1к}$ при токе $I_{1к} = I_{ном}$ составляет 5—10 % его номинального значения $U_{ном}$, а действующее значение ЭДС $E_{2к}$ — 2—5 % его значения в рабочем режиме. Пропорционально значению ЭДС уменьшается магнитный поток в магнитопроводе (7.11), а вместе с ним намагничивающий ток и мощность потерь в магнитопроводе. Поэтому опыт короткого замыкания служит для определения мощности потерь в проводах первичной и вторичной обмоток:

$$P_{1к} = R_{в1} I_{1к}^2 + R_{в2} I_{2к}^2. \quad (7.2)$$

Мощность потерь в трансформаторе в опыте короткого замыкания составляет 1—4 % его номинальной полной мощности (тем меньше, чем больше номинальная полная мощность трансформатора).

Из опыта короткого замыкания определяют:

- *полное сопротивление короткого замыкания* трансформатора

$$Z_k = U_{1к} / I_{1к}; \quad (7.3)$$

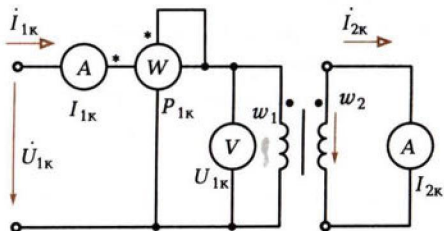


Рис. 7.8

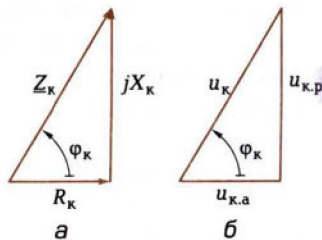


Рис. 7.9

- активное сопротивление короткого замыкания трансформатора

$$R_k = P_{1к} / I_{1к}^2; \quad (7.4)$$

- индуктивное сопротивление короткого замыкания трансформатора

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}. \quad (7.5)$$

На рис. 7.9, а и б построены треугольник сопротивлений и подобный ему *треугольник внутреннего падения напряжений*, стороны которого представляют в процентах номинального напряжения $U_{1ном}$ первичное напряжение в опыте короткого замыкания $I_{1к}$ и его активную и индуктивную составляющие:

$$u_{к.а} = \frac{R_k I_{1ном}}{U_{1ном}} 100\%;$$

$$u_{к.р} = \frac{X_k I_{1ном}}{U_{1ном}} 100\%; \quad (7.6)$$

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

Напряжение короткого замыкания u_k является важным параметром трансформатора и указывается на его щитке. Оно определяет изменение вторичного напряжения нагруженного трансформатора.

Напряжение короткого замыкания составляет 5—10 % номинального первичного напряжения и тем больше, чем выше номинальные напряжения обмоток трансформатора. Это объясняется тем, что с увеличением толщины изоляции проводов возрастают токосцепления рассеяния, а следовательно, и индуктивные сопротивления рассеяния $X_{рас1}$ и $X_{рас2}$.

Опыт короткого замыкания может служить также контролем опытом для определения коэффициента трансформации повышающего и понижающего трансформаторов

$$\left. \begin{aligned} n_{21} &= \frac{w_2}{w_1} \approx \frac{I_{1к}}{I_{2к}} > 1; \\ n_{12} &= \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{I_{2к}}{I_{1к}} > 1. \end{aligned} \right\} \quad (7.7)$$

7.5. РАБОЧИЙ РЕЖИМ ТРАНСФОРМАТОРА

В рабочем режиме вторичная обмотка трансформатора подключается к приемнику энергии с сопротивлением нагрузки $Z_2 = Z_2 \angle \varphi_2$ по схеме, представленной на рис. 7.10, а, которой соответствует схема замещения на рис. 7.10, б, где $R_{в1}$, $R_{в2}$ и $X_{рас1}$, $X_{рас2}$ — активные сопротивления и индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток.

Магнитный поток в магнитопроводе трансформатора в рабочем режиме и в режиме холостого хода (см. подразд. 7.3) изменяется мало. Поэтому можно считать, что уравнение баланса МДС в рабочем режиме будет иметь вид

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_2 w_2 + \dot{I}_{1x} w_1, \quad (7.8)$$

где $\dot{I}_{1x} w_1$ — МДС тока в первичной обмотке в режиме холостого хода.

Разделив обе части уравнения (7.8) на число витков первичной обмотки w_1 , получим

$$\dot{I}_1 = \dot{I}'_2 + \dot{I}_{1x}, \quad (7.9)$$

где $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 w_2 / w_1$ — *приведенный ток* вторичной цепи к первичной цепи.

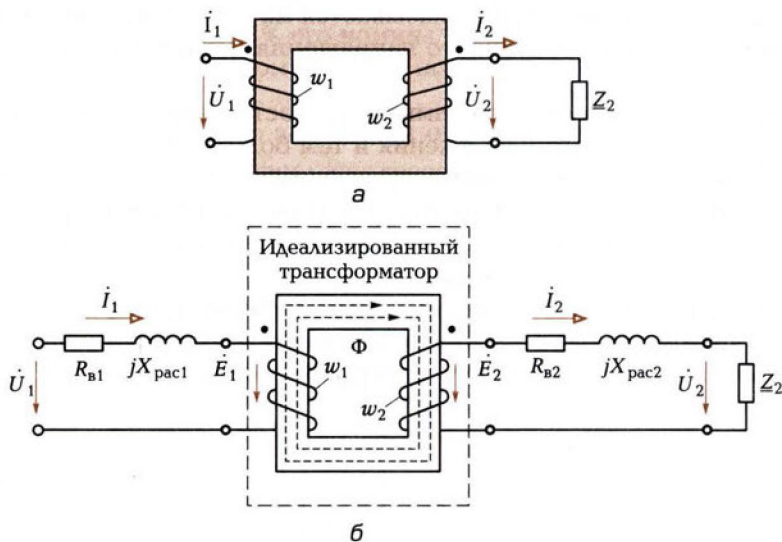


Рис. 7.10

Схеме замещения трансформатора соответствуют уравнения, составленные по второму закону Кирхгофа:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + R_{в1}\dot{I}_1 + jX_{рас1}\dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + Z_{о61}\dot{I}_1; \\ \dot{U}_2 &= -\dot{E}_2 - R_{в2}\dot{I}_2 - jX_{рас2}\dot{I}_2 = -\dot{E}_2 - Z_{о62}\dot{I}_2, \end{aligned} \right\} \quad (7.10)$$

где $Z_{о61} = R_{в1} + jX_{рас1}$ и $Z_{о62} = R_{в2} + jX_{рас2}$ — комплексные сопротивления, учитывающие активные сопротивления обмоток и их индуктивности рассеяния. При этом действующие значения ЭДС, индуцированных в первичной и вторичной обмотках трансформатора с числами витков w_1 и w_2 , и амплитудное значение синусоидального магнитного потока $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ в магнитопроводе связаны по (3.18) соотношениями

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{\omega}{\sqrt{2}} w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m; \\ E_2 &= \frac{\omega}{\sqrt{2}} w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 \Phi_m. \end{aligned} \right\} \quad (7.11)$$

На рис. 7.11 приведена векторная диаграмма трансформатора, построенная по (7.9) и (7.10) при $\varphi_2 > 0$, т.е. при индуктивном характере нагрузки.

Из уравнений трансформатора и его векторной диаграммы следует, что отношение действующих значений напряжений между выводами вторичной обмотки и между выводами первичной обмотки не совпадает с отношением действующих значений ЭДС, индуцируемых в этих обмотках магнитным потоком Φ в магнитопроводе. Действующие значения напряжений $Z_{о61}I_1$ и $Z_{о62}I_2$ называются *полными внутренними падениями напряжений* (а первичной и вторичной обмотках трансформатора). Заметим, что приведенная векторная диаграмма показывает лишь качественные соотношения между величинами. В большинстве случаев треугольники внутренних падений напряжений малы и можно считать, что

$$U_2/U_1 \approx E_2/E_1 = \frac{w_2}{w_1}. \quad (7.12)$$

Следует также отметить, что намагничивающий ток в трансформаторе зависит от его нагрузки, т.е. от тока I_2 . Это объясняется тем, что при изменении нагрузки изменяются ток в первичной обмотке и ее полное внутреннее падение напряжения $Z_{о61}I_1$.

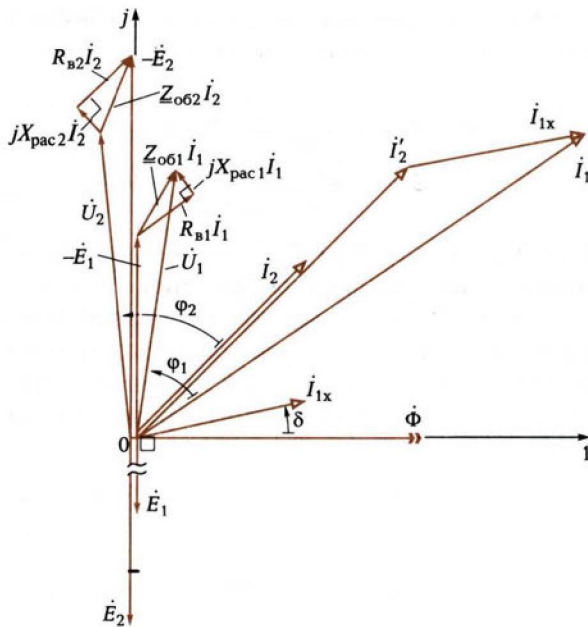


Рис. 7.11

Однако в большинстве случаев падение напряжения $Z_{061}I_1$ много меньше напряжения питающей сети U_1 и можно считать, что намагничивающий ток равен току холостого хода трансформатора I_{1x} при токе $I_2 = 0$.

7.6. ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КПД ТРАНСФОРМАТОРА

Если напряжение между выводами первичной обмотки трансформатора постоянно и равно номинальному значению $U_1 = U_{ном}$, то при изменении сопротивления нагрузки изменяются токи в обмотках трансформатора I_1 и I_2 и вторичное напряжение U_2 .

Внешняя характеристика трансформатора определяет зависимость изменения вторичного напряжения U_2 от тока нагрузки I_2 при постоянном коэффициенте мощности приемника ($\cos \varphi_2 = \text{const}$) и номинальном первичном напряжении $U_1 = U_{ном}$ (рис. 7.12).

На рис. 7.13 показана энергетическая диаграмма трансформатора, где P_1 — мощность первичной обмотки; $P_{\text{пр1}}$ — мощность потерь на нагрев проводов первичной обмотки; P_c — мощность потерь в магнитопроводе (в стали) на гистерезис и вихревые токи; $P_{12} = P_1 - P_{\text{пр1}} - P_c$ — мощность вторичной обмотки; $P_{\text{пр2}}$ — мощность потерь на нагрев проводов вторичной обмотки; $P_2 = P_{12} - P_{\text{пр2}} = P_1 - P_{\text{пр1}} - P_c - P_{\text{пр2}}$ — мощность цепи, которая питается от трансформатора.

Отношение активной мощности P_2 на выходе трансформатора к активной мощности P_1 на входе, выраженное в процентах,

$$\eta = (P_2/P_1)100\%$$

называется *коэффициентом полезного действия* (КПД) трансформатора, который зависит от режима его работы.

Для определения КПД удобен метод косвенного измерения, основанный на прямом измерении мощности потерь в трансформаторе, $\Delta P = P_1 - P_2$ из опытов холостого хода (см. подразд. 7.3) и короткого замыкания (см. подразд. 7.4).

$$\eta = \left(\frac{P_1 - \Delta P}{P_1} \right) 100\% = \left(1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P} \right) 100\%.$$

При номинальных значениях напряжения $U_1 = U_{1\text{ном}}$ и тока $I_1 = I_{1\text{ном}}$ первичной обмотки трансформатора и коэффициенте мощности приемника $\cos \varphi_2 > 0,8$ КПД силовых трансформаторов большой мощности превышает 99 %.

Для трансформаторов малой мощности КПД может быть ниже 90 %.

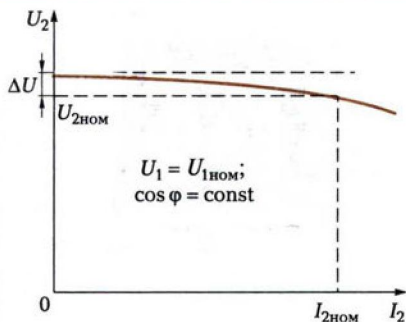


Рис. 7.12

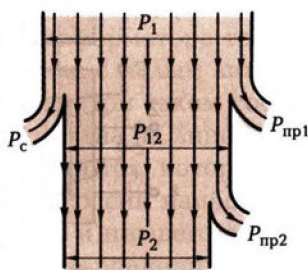


Рис. 7.13

7.7. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Преобразование значений напряжения и тока в трехфазных цепях (см. гл. 6) возможно с помощью трех одинаковых однофазных трансформаторов на рис. 7.14, а, где прописными буквами A, B, C (X, Y, Z) обозначены начала (концы) обмоток высшего напряжения, а одноименными строчными буквами — на начала (концы) обмоток низшего напряжения. При симметричном режиме работы трехфазной цепи в любой момент времени суммы токов трех первичных и трех вторичных обмоток равны нулю (см. рис. 6.4, рис. 6.7). Поэтому возбуждаемая их совместным действием сумма магнитных потоков в трех магнитопроводах в любой момент времени также равна нулю. Следовательно, если часть магнитопроводов, отмеченных штриховой линией, исключить, а оставшиеся части объединить в один магнитопровод по одноименным торцам 1 и 2 (см. рис. 7.14, а), то функция исходных трансформаторов сохранится. Это используется в конструкции *магнитопровода трехфазного трансформатора* (рис. 7.14, б). На каждом из трех одинаковых стержней

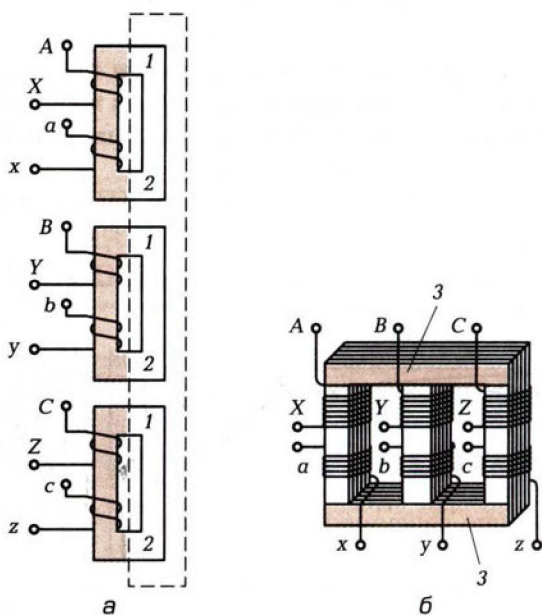


Рис. 7.14

обранных из листов электротехнической стали и объединенных сверху и снизу ярмом 3, располагаются первичная и вторичная обмотки одной фазы трехфазного трансформатора. Сумма магнитных потоков в стержнях в любой момент времени близка к нулю. Последнее не имеет практического значения и объясняется небольшим различием магнитных сопротивлений среднего и двух крайних неразветвленных участков магнитопровода из-за наличия ярма.

Все рассмотренное для однофазных трансформаторов можно распространить на каждую фазу трехфазного трансформатора в случае симметричной нагрузки.

Масса, размеры и стоимость трехфазного трансформатора меньше суммарных значений одноименных параметров группы из трех однофазных трансформаторов той же суммарной мощности. Однако для надежной эксплуатации трансформаторной группы достаточно иметь один резервный однофазный трансформатор, который легче монтировать и транспортировать, в то время как при одном трехфазном трансформаторе для резерва необходим такой же трехфазный трансформатор. По указанным причинам мощность трехфазных трансформаторов не превышает млн кВт · А. Как первичные, так и вторичные обмотки трехфазного трансформатора могут объединяться звездой (символ \star или \star_n при выводе нейтральной точки) или треугольником (символ Δ). Напомним, что первичная обмотка повышающего (понижающего) трансформатора одновременно является обмоткой низшего — НН (высшего — ВН) напряжения.

Соединение обмоток трехфазного трансформатора звездой конструктивно проще, изоляция обмоток при заземленной нейтральной точке должна рассчитываться на фазное напряжение, а сечение проводов обмоток — на линейный ток. Поэтому соединение обмоток звездой предпочтительно в трехфазных цепях с большим линейным напряжением, которое в $\sqrt{3}$ раз больше фазного, и малым линейным током.

Соединение обмоток трехфазного трансформатора треугольником предпочтительно в трехфазных цепях с малым линейным напряжением и большим линейным током. При таком соединении изоляция обмоток должна быть рассчитана на линейное напряжение, а сечение проводов — на фазный ток, который в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного. В энергосистемах России наиболее распространены соединения обмоток высшего и низшего напряжений \star/\star_n , \star_n/Δ , \star/Δ . Например, в повышающих силовых трехфазных трансформаторах большой мощности применяют

соединения обмоток Δ/Δ , если со стороны низшего напряжения не требуется вывод нейтралей.

При одинаковом соединении обмоток Δ/Δ или Δ/Δ отношение линейных напряжений (высшего к низшему) равно коэффициенту трансформации одной фазы трехфазного трансформатора (7.1). При соединении обмоток высшего и низшего напряжений по схеме Δ/Δ (Δ/Δ) отношение соответствующих линейных напряжений будет больше (меньше) коэффициента трансформации в $\sqrt{3}$ раз. Это позволяет изменять вторичное напряжение трансформатора изменением схемы соединения его обмоток.

7.8. ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ

От способа соединения обмоток высшего и низшего напряжений в трехфазном трансформаторе зависит угол сдвига фаз между его одноименными линейными высшим и низшим напряжениями, например между линейными напряжениями \dot{U}_{ab} и \dot{U}_{ab} . По этому признаку трехфазные трансформаторы разделяют на группы. Обозначение группы соединения обмоток основано на сравнении векторной диаграммы линейных напряжений с положением минутной и часовой стрелок часов. Минутная стрелка (установлена на цифре 12) совмещается с вектором линейного высшего напряжения, например \dot{U}_{AB} , а часовая стрелка — с вектором одноименного линейного низшего напряжения, например \dot{U}_{ab} .

В России для трехфазных трансформаторов выбраны две стандартные группы: 0 и 11. Группе 11 соответствуют два способа соединений обмоток высшего и низшего напряжений Δ/Δ -11 и Δ/Δ -11, группе 0 — один способ соединения обмоток Δ/Δ -0.

На рис. 7.15, а и б представлены схема соединения обмоток трехфазного трансформатора Δ/Δ -11 и соответствующая ей векторная диаграмма.

Вектор линейного низшего напряжения \dot{U}_{ab} образует с вектором линейного высшего напряжения \dot{U}_{AB} угол $(2\pi - \pi/6 = \frac{11}{6}\pi)$, равный углу между минутной и часовой стрелками в 11 часов.

На рис. 7.16, а и б представлена схема соединения обмоток трехфазного трансформатора Δ/Δ -0 и соответствующая ей век-

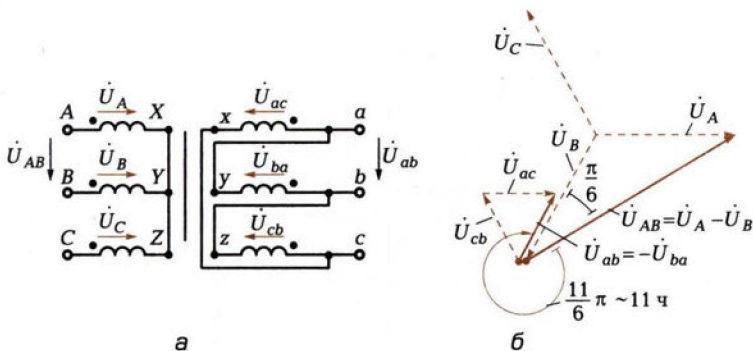


Рис. 7.15

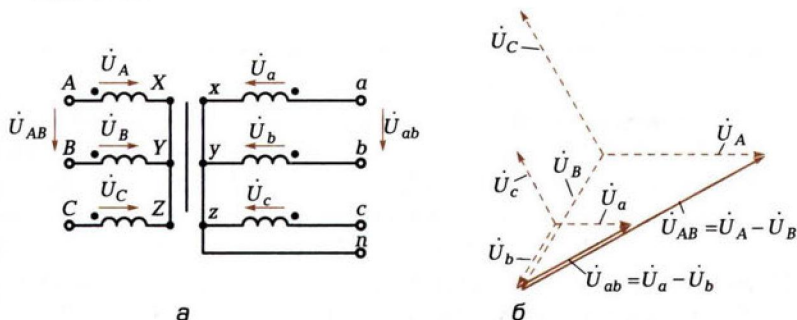


Рис. 7.16

орная диаграмма. Векторы линейных низшего и высшего напряжений совпадают, что соответствует расположению минутной и асовой стрелок в 0 часов. Группу и схему соединения обмоток рехфазного трансформатора указывают на его щитке. Знание тех данных необходимо при включении трехфазных трансформаторов на параллельную работу.

Для однофазных трансформаторов установлена одна группа единения — 0.

7.9. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

При увеличении (уменьшении) полной мощности приемников елесообразно увеличивать (уменьшать) номинальную полную ощность трансформатора для получения максимального КПД.

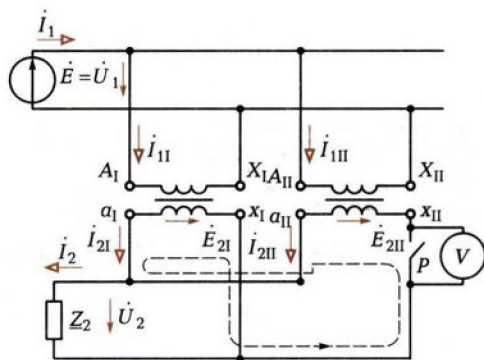


Рис. 7.17

Удобно соединять несколько трансформаторов параллельно с возможностью включения и отключения каждого из них. При этом также повышается надежность эксплуатации трансформаторов, так как достаточно иметь один резервный трансформатор.

Параметры трансформаторов, включаемых на параллельную работу, должны удовлетворять трем условиям:

1) одинаковая группа соединений обмоток 0 для однофазных и 0 или 11 для трехфазных трансформаторов;

2) одинаковые номинальные значения первичных и вторичных напряжений при допустимой разнице значений коэффициентов трансформации не более $\pm 0,5\%$;

3) одинаковые действующие значения напряжений короткого замыкания U_k при допустимой разнице не более $\pm 10\%$ (см. (7.6)).

На рис. 7.17 приведена принципиальная схема включения на параллельную работу двух однофазных трансформаторов.

При несоблюдении первого или второго условия в контуре, показанном на рис. 7.17 штриховой линией, будет действовать ЭДС $\dot{E}_{21} - \dot{E}_{22} = \Delta \dot{E}_2 \neq 0$ и создавать ток, опасный для обмоток трансформатора. Наличие ЭДС $\Delta \dot{E}_2$ можно проверить вольтметром при разомкнутом рубильнике P .

Выполнение третьего условия позволяет распределять нагрузку между параллельно работающими трансформаторами пропорционально их номинальным полным мощностям.

Приведенные три условия должны выполняться для всех одноименных фаз трехфазных трансформаторов, включаемых на параллельную работу.

7.10. ОДНОФАЗНЫЕ И ТРЕХФАЗНЫЕ АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Для компенсации падения напряжения в проводах линий передачи высокого напряжения и большой протяженности, объединения в единую энергосистему линий передачи с номинальным напряжением 110 и 220 кВ или 330 и 400 кВ, ступенчатого регулирования напряжения на нагревательных элементах электрических печей и других целей требуются силовые трансформаторы большой мощности с коэффициентом трансформации $n \leq 2$.

В подобных случаях экономически целесообразно вместо обычного трансформатора применять автотрансформатор, так как при той же номинальной полной мощности его КПД выше, а масса и размеры меньше.

Автотрансформатор отличается от обычного трансформатора наличием одной обмотки высшего напряжения, часть которой является обмоткой низшего напряжения. Обмотка высшего напряжения автотрансформатора может быть первичной (рис. 7.18, а) или вторичной (рис. 7.18, б).

Пренебрегая малым током намагничивания \dot{I}_{1x} , можно считать, что в рабочем режиме трансформатора токи его первичной \dot{I}_1 и вторичной \dot{I}_2 обмоток имеют одинаковые фазы (см. рис. 7.10), а действующее значение тока в общей части первичной и вторичной обмоток равно $|\dot{I}_1 - \dot{I}_2|$. Если коэффициент трансформации понижающего (повышающего) автотрансформатора $n_{12} = \frac{w_1}{w_2} =$

$\frac{I_2}{I_1} \left(n_{21} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{I_1}{I_2} \right)$ мало отличается от единицы, то действующие значения токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 близки, а их разность мала по сравнению

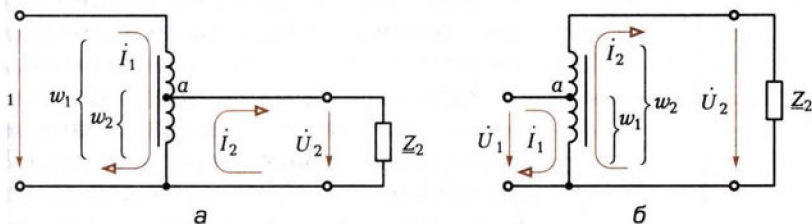


рис. 7.18

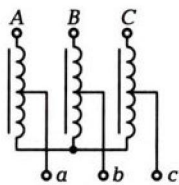


Рис. 7.19

с каждым из них. Это позволяет уменьшить площадь сечения проводов общей части первичной и вторичной обмоток. Соответственно уменьшаются масса и размер обмоток, площадь окна магнитопровода для ее размещения, а следовательно масса и размер самого магнитопровода.

Недостатком автотрансформатора является электрическое соединение цепей высшего и низшего напряжения. По этой причине электроизоляция цепи низшего напряжения должна соответствовать высшему напряжению. При большем значении коэффициента трансформации этот фактор приводит к увеличению стоимости электрооборудования цепи низшего напряжения и снижению безопасности работы обслуживающего персонала.

Изменение положения точки *a* на обмотке автотрансформатора (см. рис. 7.18) позволяет плавно регулировать вторичное напряжение, например, в лабораторных автотрансформаторах (ЛАТР) у которых одним из выводов вторичной цепи служит подвижный контакт.

Обмотки трехфазных автотрансформаторов обычно соединяются звездой с выведенной нейтральной точкой или без нее (рис. 7.19).

7.11. МНОГООБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Многообмоточный трансформатор имеет одну первичную и несколько вторичных обмоток, расположенных на общем магнитопроводе. Такие трансформаторы имеют полную мощность до

1 000 В · А и применяются в устройствах промышленной электроники для питания от одного источника нескольких изолированных друг от друга цепей. Принцип действия многообмоточного и двухобмоточного трансформаторов аналогичны.

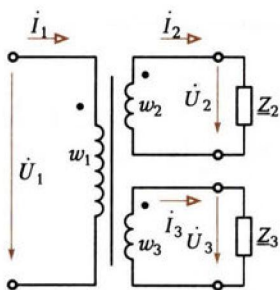


Рис. 7.20

Рассмотрим работу трехобмоточного однофазного трансформатора, включенного по схеме, приведенной на рис. 7.20. Намагничивающий ток первичной обмотки I_{1x} возбуждает в магнитопроводе магнитный поток, который индуцирует во все

обмотках ЭДС, пропорциональные их числам витков. Если вторичные обмотки нагружены токами \dot{I}_2 и \dot{I}_3 , то МДС первичной обмотки должна уравновешивать размагничивающее действие МДС этих токов. Поэтому баланс МДС в многообмоточном трансформаторе аналогично (7.8) равен

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_2 w_2 + \dot{I}_3 w_3 + \dot{I}_{1x} w_1,$$

а напряжения между выводами вторичных обмоток аналогично (7.1) равны

$$U_2 = U_1 w_2 / w_1; \quad U_3 = U_1 w_3 / w_1.$$

Трехфазные трансформаторы также могут иметь две или более вторичных обмоток.

Вероятность одновременной номинальной нагрузки всех вторичных обмоток, при которой токи нагрузки совпадают по фазе, мала. Поэтому первичная обмотка многообмоточного трансформатора обычно рассчитывается на мощность меньшую, чем сумма номинальных полных мощностей вторичных обмоток.

7.12. КОНСТРУКЦИИ МАГНИТОПРОВОДОВ И ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Магнитопровод трансформатора изготавливают из холоднокатаных и горячекатаных листов электротехнической стали. Магнитопровод из горячекатаной электротехнической стали, содержащей для уменьшения потерь от вихревых токов до 4 % кремния, изготавливается из штампованных листов толщиной 0,35 или 0,5 мм. Применяется сталь 1511 (см. табл. 3.2), 1512, 3411, 3412. Листы перед сборкой магнитопровода покрывают изоляционным лаком, а затем стягивают в пачки стальными шпильками. В зависимости от положения магнитопровода по отношению к обмоткам различают *стержневые* и *броневые* трансформаторы. В первом случае обмотки ВН и НН охватывают стержни магнитопровода (рис. 7.21), во втором — магнитопровод частично охватывает обмотки ВН и НН (рис. 7.22).

Конструкция стержневого трансформатора проще, чем броневая, облегчает получение необходимой изоляции обмотки и применяется в большинстве силовых трансформаторов. Некоторым преимуществом броневых магнитопроводов, собранного из Ш-об-

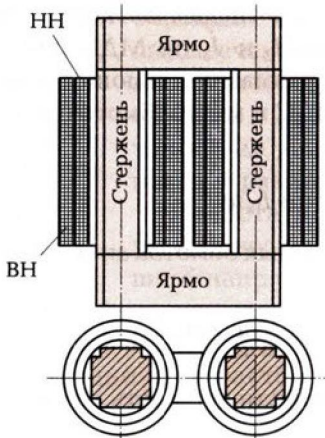


Рис. 7.21

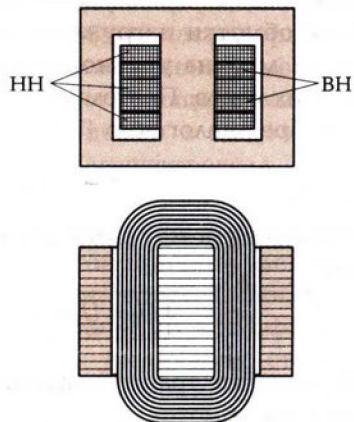


Рис. 7.22

разных штампованных листов, можно считать частичную защиту обмоток от механических повреждений.

Для уменьшения магнитного сопротивления стыков отдельных листов магнитопровода они шихтуются в стыках, т.е. укладываются в переплет (рис. 7.23).

Магнитопровод трансформатора может изготавливаться также из холоднокатаной электротехнической стали, для которой характерна после отжига без доступа воздуха высокая магнитная проницаемость в направлении прокатки. Ленты из этой стали, нарезанной вдоль проката, свивают в магнитопровод требуемых размеров, отжигают и затем разрезают на части, удобные для сборки трансформатора (рис. 7.24). Такой магнитопровод в сборке не имеет воздушных зазоров, что значительно уменьшает ток холостого хода.

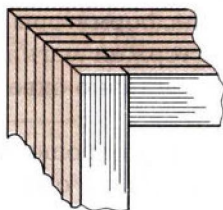


Рис. 7.23

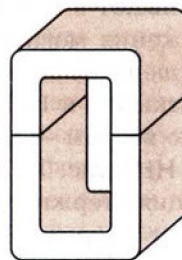


Рис. 7.24

Таблица 7.1. Параметры некоторых типов сухих трехфазных трансформаторов компании «Шнейдер электрик» (Франция)

Мощность, кВт · А	Первичное напряжение, В	Вторичное напряжение, В	Мощность потерь в режиме холостого хода, Вт	Мощность потерь при номинальной нагрузке и $v = 75^\circ\text{C}$, Вт	Масса, кг	Габариты*, м
100	10 000	400	440	1 700	650	1,05×0,65×1,2
400	10 000	400	1 000	4 500	1 210	1,375×0,795×1,33
1 600	10 000	400	2 800	12 300	3 210	1,665×0,945×2,035
3 150	10 000	400	5 500	21 800	6 000	2,06×1,195×2,33

* Без кожуха.

Различают концентрическое (см. рис. 7.21) и чередующееся (см. рис. 7.22) взаимные расположения обмоток ВН и НН. Концентрическое расположение обмоток применяется в большинстве силовых трансформаторов и представляет собой размещение катушек обмоток ВН и НН в виде двух коаксиальных цилиндров. Обмотка НН располагается ближе к стержню, так как ее легче изолировать от магнитопровода.

Трансформаторы малой мощности выполняются обычно с естественным воздушным охлаждением и называются сухими (табл. 7.1), средней и большой мощности — с масляным охлаждением (рис. 7.25). Магнитопровод с обмотками помещают в стальной бак, заполненный тщательно очищенным минеральным маслом, которое одновременно является хорошим изолятором (см. табл. 1.1). Для отвода тепла от масла снаружи бака имеется трубчатый радиатор 1, охлаждаемый потоком воздуха. В процессе работы трансформатора масло нагревается и циркулирует по восходящему потоку внутри бака, затем, охлаждаясь, — циркулирует по нисходящему потоку в радиаторе. Объем масла в баке при нагревании и охлаждении значительно изменяется. Когда объем масла мал, внутрь бака

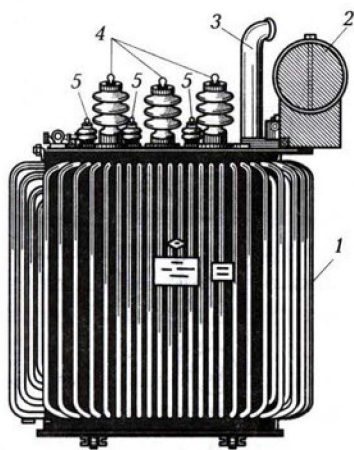


Рис. 7.25

проникает влажный воздух и отдает влагу гигроскопичному маслу, что снижает его электрическую прочность. Резервуаром для избытка нагретого масла служит расширитель 2 — стальной бачок вместимостью около 10 % общего объема масла.

Недостатком масляного охлаждения является горючесть минерального масла (температура возгорания — около 160 °С). Газы, образующиеся при возгорании масла, могут разрушить бак. Для предотвращения аварий на баке устанавливают выхлопную трубу 3 с тонкой предохранительной мембраной, которая при избыточном давлении обеспечивает свободный выход газов.

Концы обмоток трансформатора выводят из бака через фарфоровые проходные изоляторы 4 и 5 (для обмоток ВН и НН).

7.13. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Измерительные трансформаторы напряжения (ТВ) и тока (ТА) применяют для расширения пределов измерения приборов и изоляции их и аппаратов автоматической защиты от цепи высокого напряжения.

Трансформатор напряжения. На рис. 7.26 а и б показаны принципиальная схема включения ТВ и его условное обозначение. Трансформатор напряжения подобен понижающему сило-

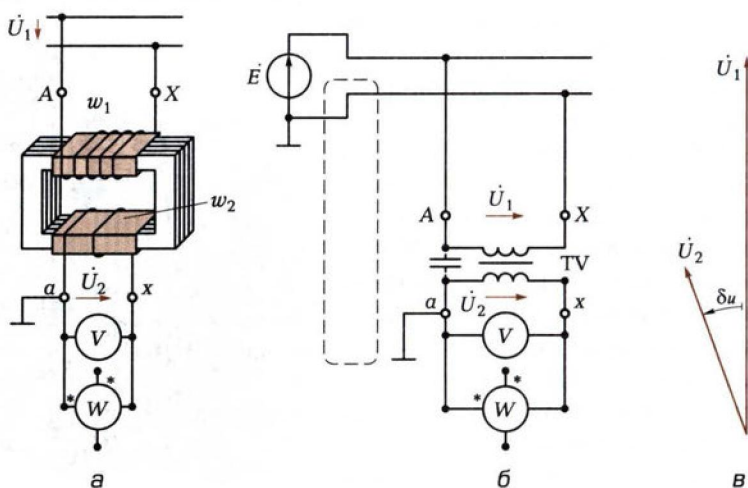


Рис. 7.26

вому трансформатору небольшой мощности. Его первичная обмотка — обмотка ВН с большим числом витков w_1 — включается в цепь, напряжение U_1 которой нужно измерить, а к вторичной обмотке со значительно меньшим числом витков w_2 — обмотке НН U_2 — присоединяются параллельно друг другу вольтметр и цепи напряжения других приборов. Один вывод вторичной обмотки и корпус трансформатора заземляются. Это делается на случай повреждения изоляции, а также для того, чтобы замкнуть на землю цепь тока, показанную на рис. 7.26, б штриховой линией, через емкость между первичной и вторичной обмотками трансформатора. Наличие этого тока в цепи приборов снижает точность измерения.

Сопротивление вольтметров и цепей напряжения измерительных приборов на основе электромеханических измерительных механизмов (см. подразд. 5.5) равно тысячам Ом, а соответствующих электронных приборов и цепей (см. подразд. 15.10) — десяткам мегаом, т. е. TV работает в условиях, близких к режиму холостого хода (см. подразд. 7.3). Поэтому падения напряжений на первичной $Z_{об1}I_1$ и вторичной $Z_{об2}I_2$ обмотках TV малы, что позволяет считать $U_1 \approx E_{1x}$; $U_2 \approx E_{2x}$, и так как по (7.1)

$$E_{1x}/E_{2x} = w_1/w_2 = n_{12},$$

то

$$U_1 = n_{12}U_2, \quad (7.13)$$

где $n_{12} \gg 1$ — коэффициент трансформации.

Следовательно, измерив низкое вторичное напряжение U_2 , можно определить высокое первичное напряжение U_1 .

Выводы обмоток TV имеют разметку А—Х, а—х. При выбранных положительных направлениях напряжений (см. рис. 7.26, а и б), одинаковых относительно одноименных выводов обмоток трансформатора, фазы вторичного и первичного напряжений совпадают (группа соединения 0, см. подразд. 7.8).

Равенство фаз напряжений TV и цепей измерительных приборов достигается соответствующим соединением выводов вторичной обмотки и приборов. Правильное согласование фаз важно не для вольтметра, а для ваттметра и счетчика. Номинальное значение вторичного напряжения большинства TV имеет стандартное значение — 100 В.

Равенство (7.13) не учитывает падения напряжений на обмотках TV. В действительности эти падения напряжений вызывают неточности в измерении напряжения (погрешность напряжения) и в передаче фазы (угловая погрешность).

Погрешность напряжения равна отношению разности между измеренным $U_{\text{изм}}$ и действительным U_1 значениями первичного напряжения к действительному значению этого напряжения:

$$f_u = \left(\frac{U_{\text{изм}} - U_1}{U_1} \right) 100\%.$$

Угловая погрешность определяет угол δ_u между векторами вторичного и первичного напряжений на векторной диаграмме (рис. 7.26, в), подобной диаграмме, приведенной на рис. 7.6. Она измеряется в минутах и считается положительной, если вектор вторичного напряжения опережает вектор первичного напряжения.

Для номинальных первичных напряжений $U_{\text{ном}} < 6$ кВ применяются сухие TV с естественным воздушным охлаждением (табл. 7.2), для напряжений $U_{\text{ном}} \geq 6$ кВ — масляные TV.

Изготавливаются однофазные и трехфазные TV.

Трансформатор тока. На рис. 7.27, а и б показаны принципиальная схема включения ТА в цепь и его условное обозначение.

Первичная обмотка ТА с малым числом витков w_1 включается последовательно в неразветвленный участок цепи измеряемого тока, а к выводам его вторичной обмотки с большим числом витков w_2 подключаются последовательно амперметр и цепи тока других измерительных приборов. Начало и конец первич-

Таблица 7.2. Параметры некоторых типов сухих измерительных трансформаторов компании «Шнейдер Электрик» (Франция)

Трансформаторы напряжения VRC1/S1F				Трансформаторы тока с тороидальным сердечником ARC2/S1			
Номинальное напряжение первичное, кВ	Номинальное напряжение вторичное, В	Номинальная мощность вторичной обмотки, В · А	Класс точности	Номинальный ток первичный, А	Номинальный ток вторичный, А	Сопротивление первичной обмотки, Ом	Класс точности
3,3	110	75	0,5	75	5	0,006	0,5
6,6	110	75	0,5	250	5	0,06	0,5
11	110	75	0,5	600	5	0,15	0,5
15	100	75	0,5	1 250	5	0,33	0,5

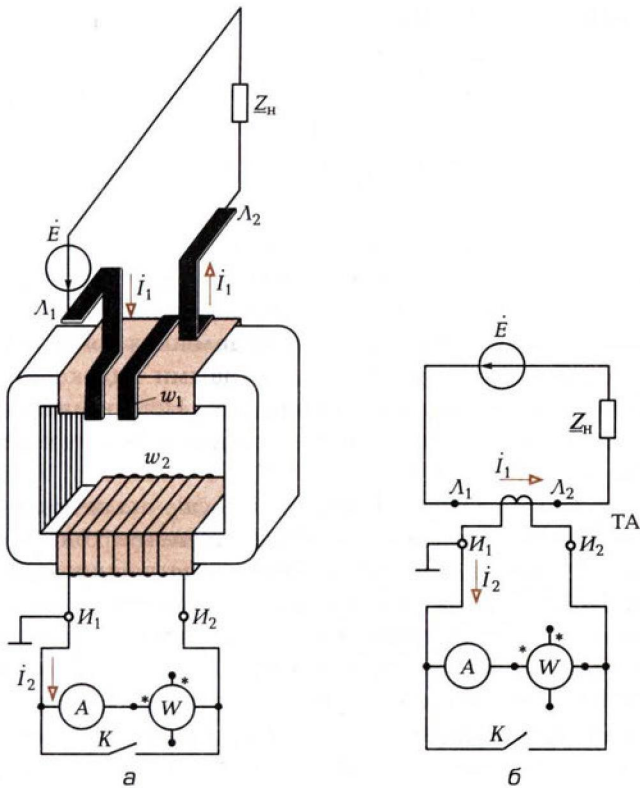


Рис. 7.27

ной обмотки ТА обозначаются соответственно Λ_1 и Λ_2 (линия), а начало и конец вторичной обмотки — I_1 и I_2 (измерительный прибор).

Суммарное сопротивление амперметра и цепей тока измерительных приборов мало (обычно меньше 2 Ом), т. е. ТА работает в условиях, приближенных к режиму короткого замыкания трансформатора (см. подразд. 7.4). Напряжение вторичной обмотки ТА определяется падением напряжения на относительно малом сопротивлении цепей измерительных приборов (обычно 1—12 В), которому соответствует малое значение ЭДС E_2 , а следовательно, и малое значение магнитного потока в магнитопроводе (7.11).

Для возбуждения малого магнитного потока нужна незначительная МДС $w_1 I_{1x}$, которой в уравнении баланса МДС (7.8)

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_2 w_2 + \dot{I}_{1x} w_1$$

можно пренебречь и считать

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_2 w_2,$$

или

$$I_1 = (w_2/w_1)I_2 = n_{21}I_2, \quad (7.14)$$

где $n_{21} \gg 1$ — коэффициент трансформации.

Следовательно, измерив малое значение вторичного тока, можно определить большое значение первичного тока.

При выбранных положительных направлениях токов, одинаковых относительно выводов ТА с одинаковыми индексами, фазы вторичного и первичного токов совпадают. Номинальное значение вторичного тока у всех ТА имеет стандартное значение — 5 А (в специальных случаях 1 А).

Равенство (7.14) не учитывает МДС $\dot{I}_{1x}w_1$, наличие которой приводит к неточностям в измерении значения тока (*погрешность тока* f_i) и в передаче фазы (*угловая погрешность* δ_i). Обе эти величины определяются подобно аналогичным погрешностям TV. Чем меньше магнитное сопротивление и мощность потерь магнитопровода, тем меньшая МДС $\dot{I}_{1x}w_1$ необходима для возбуждения в нем того же магнитного потока. Поэтому магнитопроводы ТА изготавливают в виде колец, навиваемых из тонких лент пермаллоя (см. табл. 7.2). Для минимизации влияния МДС $\dot{I}_{1x}w_1$ номинальная МДС первичной обмотки ($I_{1ном}w_1$) должна быть возможно большей (не менее 500 А). Поэтому при номинальных токах $I_{1ном} < 500$ А первичная обмотка должна иметь несколько витков. Для тока $I_{1ном} < 500$ А применяются одновитковые ТА.

Важно отметить, что режим холостого хода (цепь вторичной обмотки разомкнута и ее ток $\dot{I}_2 = 0$) для ТА является аварийным. В этом случае ТА превращается в катушку с магнитопроводом и малым числом витков w_1 , сопротивление которой в цепи синусоидального тока (см. рис. 7.27) мало и не влияет на режим ее работы. Большой ток первичной обмотки остается практически неизменным и по (7.13) равным току намагничивания магнитопровода $\dot{I}_1 = \dot{I}_{1x}$. Многократное увеличение намагничивающего тока приводит к соответствующему увеличению магнитного потока, ограниченному насыщением магнитопровода, и ЭДС E_2 вторичной обмотки (до 1,5 кВ у ТА на большие токи), что опасно для обслуживающего персонала. Кроме того, возрастает мощность потерь в магнитопроводе, его нагрев, расширение и возможное разруше-

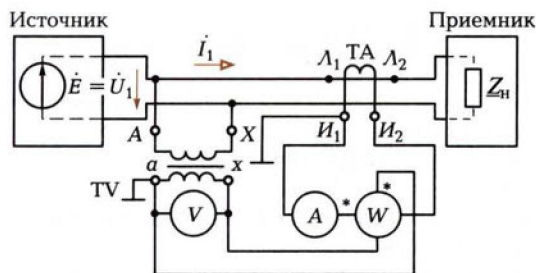


Рис. 7.28

ние изоляции. Перед отключением измерительных приборов от работающего ТА его вторичную обмотку необходимо замкнуть ключом K (см. рис. 7.27, б).

По значению наибольшей допустимой погрешности коэффициента трансформации ТА и TV разделяют на классы точности. Например, классу точности TV 0,5 соответствует допустимая погрешность измерения значения напряжения $\pm 0,5\%$, а допустимая угловая погрешность $\pm 20'$ при первичном напряжении 0,8—1,2 номинального значения, классы точности ТА 1 — допустимые погрешности измерения значения тока $\pm 1,0\%$ и угловая погрешность $\pm 90'$ при сопротивлении цепи нагрузки 0,25—1,0 и первичном токе 1,2—0,1 их номинальных значений.

На рис. 7.28 показана схема включения в однофазную цепь комплекта измерительных приборов через TV и ТА. Для измерений в трехфазных цепях необходимо несколько однофазных ТА и ТВ (см. подразд. 6.5).

Точность измерения тока и напряжения зависит только от погрешности коэффициента трансформации. На точность измерения активной $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi$ (реактивной $Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi$) мощности оказывают также влияние угловые погрешности, особенно при больших (малых) углах сдвига фаз между первичными напряжением и током (рис. 7.29).

Измеряемое значение активной (реактивной) мощности будет пропорционально не $\cos \varphi$ ($\sin \varphi$), а $\cos(\varphi + \delta_u - \delta_i)$ [$\sin(\varphi + \delta_u - \delta_i)$]. При этом угловые погрешности δ_u и δ_i могут складываться, если их знаки разные.

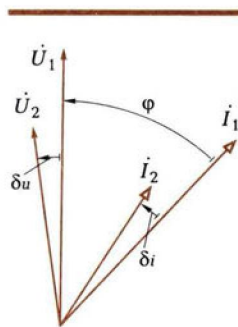


Рис. 7.29

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие параметры трансформатора называются первичными и какие — вторичными?
2. Какие основные параметры трансформатора указываются на его щитке?
3. Из каких составляющих складывается мощность потерь в трансформаторе?
4. Какие составляющие мощности потерь в трансформаторе определяются в опыте холостого хода и какие — в опыте короткого замыкания?
5. Какие правила необходимо соблюдать при включении трансформаторов на параллельную работу?
6. В чем конструктивное различие стержневых и броневых трансформаторов?
7. Почему режим холостого хода для измерительного трансформатора тока является аварийным?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Числа витков первичной и вторичной обмоток понижающего трансформатора равны $w_1 = 300$ и $w_2 = 50$. Чему равен коэффициент трансформации трансформатора?
Ответ: 6.
2. Числа витков первичной и вторичной обмоток повышающего трансформатора равны $w_1 = 40$ и $w_2 = 120$. Чему равен коэффициент трансформации трансформатора?
Ответ: 3.