

# 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

## 1.1. Краткая классификация и область применения трансформаторов

*Трансформатор* представляет собой статистическое электромагнитное устройство, преобразующее на основе закона электромагнитной индукции напряжение питающей сети (первичное напряжение) в другое по значению напряжение (вторичное напряжение), как правило, при неизменной частоте.

### *Краткая классификация*

Трансформаторы классифицируют:

#### 1. *По назначению:*

- Силовые – для питания синусоидальным напряжением силовой нагрузки: двигателей, преобразователей, печей, освещения и т. п.
- Специальные – для питания измерительных цепей (измерительные трансформаторы напряжения и тока); производства сварочных работ (сварочные трансформаторы); питания слаботочных цепей электронных схем, цепей автоматизации и сигнализации и т. п.; питания однофазных цепей с регулированием напряжения (автотрансформаторы).

*Примечание.* В электрических цепях промышленного назначения широко применяют трехфазные автотрансформаторы, которые также относят к силовым трансформаторам.

#### 2. *По числу фаз преобразуемого напряжения:*

- Однофазные (рис. 1.1, а).
- Трехфазные (рис. 1.1, б).
- Многофазные (шестифазные и т. п.).

#### 3. *По числу обмоток вторичного напряжения:*

- С одной нерасщепленной обмоткой (рис. 1.1, в).
- С одной расщепленной обмоткой (рис. 1.1, г).
- С двумя обмотками (рис. 1.1, д).

#### 4. *По уровню вторичного напряжения:*

- Понижающие – вторичное напряжение меньше первичного напряжения трансформатора.

- Повышающие – вторичное напряжение больше первичного напряжения трансформатора.
- Разделительные – вторичное напряжение равно первичному напряжению трансформатора.

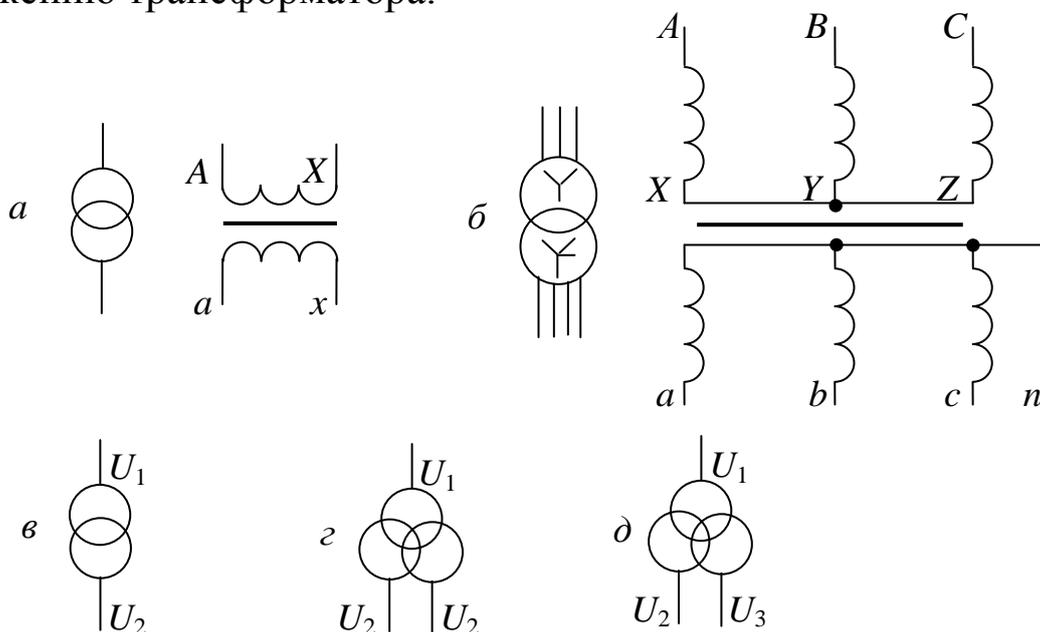


Рис. 1.1. Стандартные условные обозначения трансформаторов:  
 $U_1$  – первичное напряжение;  $U_2, U_3$  – вторичное напряжение

5. По конструкции магнитопровода:

- С тороидальным магнитопроводом (рис. 1.2, а).
- Со стержневым магнитопроводом (рис. 1.2, б).
- С броневым магнитопроводом (рис. 1.2, в).

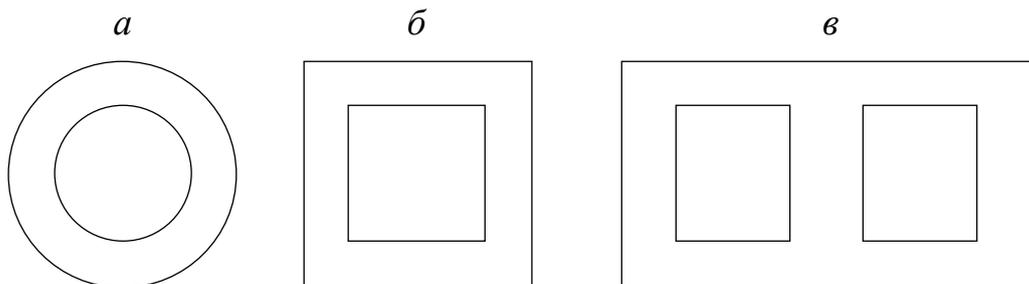


Рис. 1.2. Конструкция магнитопровода однофазного трансформатора

6. По конструкции обмоток:

- С концентрическими (катушечными) обмотками (рис 1.3, а).
- С дисковыми (слоевыми) обмотками (рис. 1.3, б).

7. По способу регулирования вторичного напряжения:

- С регулированием под нагрузкой.
- С регулированием при отключенном питающем напряжении.

8. По способу охлаждения обмоток и магнитопровода:

- Охлаждение трансформаторным маслом (масляные трансформаторы).
- Охлаждение атмосферным воздухом или специальными газами (сухие трансформаторы).
- Охлаждение кварцевым песком (кварцenaполненные трансформаторы).

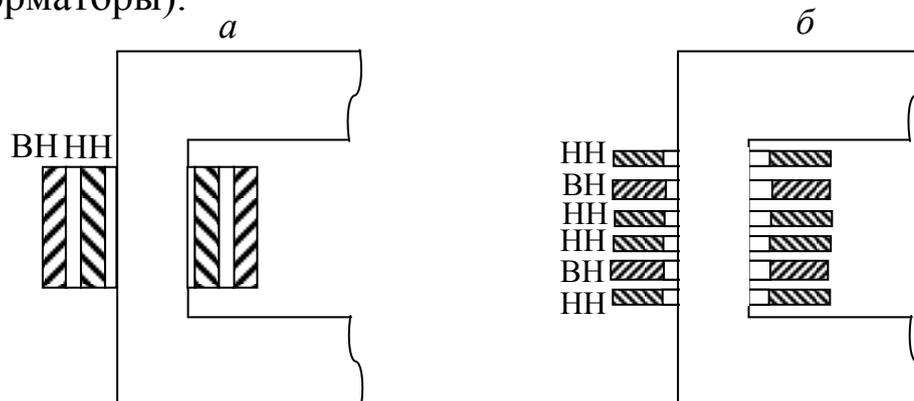


Рис. 1.3. Конструкция обмоток высшего (ВН) и низшего (НН) напряжения трансформатора

9. По месту установки трансформаторов:

- Для наружной установки.
- Для установки в помещениях.

10. По исполнению:

- В нормальном исполнении – трансформаторы общепромышленного применения.
- В рудничном взрывобезопасном исполнении (РВ) – трансформаторы, применяющиеся в шахтах, опасных по взрыву газов и пыли, и в помещениях с агрессивной окружающей средой.

## 1.2. Паспортные данные трансформаторов

В паспорте трансформатора приводятся следующие данные:

- тип трансформатора;
- номинальное значение мощности,  $S_n$ , В·А или кВ·А;
- номинальные значения напряжения на зажимах первичной ( $U_{1н}$ ) и вторичной ( $U_{2н}$ ) обмоток с учетом диапазона регулирования, В или кВ;
- номинальные значения тока в первичной ( $I_{1н}$ ) и вторичной ( $I_{2н}$ ) обмотках, А;
- значение тока холостого хода трансформатора,  $I_0$ , %;

**Примечание.** В паспорте трехфазного трансформатора приводят значения линейных напряжений и токов соответственно первичной и вторичной обмоток.

- номинальное значение напряжения короткого замыкания,  $u_k$ , %;
- номинальное значение потерь активной мощности в магнитопроводе (потери холостого хода),  $P_0$ , Вт или кВт;
- номинальное значение потерь активной мощности в обмотках (потери короткого замыкания),  $P_k$ , Вт или кВт;
- схемы и группы обмоток;
- частота напряжения питающей сети,  $f_1$ , Гц.

### Пример 1

Трансформатор сухой, шахтный, во взрывобезопасном исполнении, трехфазный, тип ТСШВ -200/6:

$$\begin{aligned} S_H &= 200 \text{ кВ} \cdot \text{А}; & i_0 &= 2,5 \text{ \%}; \\ U_{1H} &= 6,0 \text{ кВт}; & u_k &= 2,8 \text{ \%}; \\ I_{1H} &= 19,3 \text{ А}; & P_0 &= 0,875 \text{ кВт}; \\ U_{2H} &= 0,4 \text{ кВ}; & P_k &= 2,535 \text{ кВт}, \\ I_{2H} &= 289 \text{ А}; \end{aligned}$$

схемы и группа соединения обмоток:  $Y/Y-0$ , т. е. первичная и вторичная обмотки соединены звездой без выведенной нейтрали, а группа соединения – нулевая;

$$f_1 = 50 \text{ Гц.}$$

**Примечание.** Регулирование напряжения в шахтных трансформаторах осуществляют переключением отпаек первичной обмотки в пределах « $\leftarrow$ » 5; 0; « $\rightarrow$ » 5 %, а диапазон регулирования напряжения обозначают соответственно: 6,3; 6,0; 5,7 кВ.

## 1.3. Устройство трансформаторов

Основными конструктивными элементами трансформаторов являются *магнитопровод* и *обмотки*.

Магнитопровод выполняют из штампованных листов электротехнической (трансформаторной) стали толщиной 0,3; 0,35; 0,5 мм с электроизоляционным нагревостойким покрытием.

Участки магнитопровода, на которых расположены обмотки, называют *стержнями*. Участки магнитопровода, примыкающие к стержням, называют *ярмами*.

Обмотки силовых трансформаторов имеют цилиндрическую форму. Поэтому сечение стержней магнитопровода стремятся приблизить к окружности.

Практически сечение стержней получается ступенчатой формы (рис. 1.4). Число ступеней возрастает с увеличением внутреннего диаметра катушек обмотки. Например, в мощных трансформаторах число ступеней достигает 15 и более.

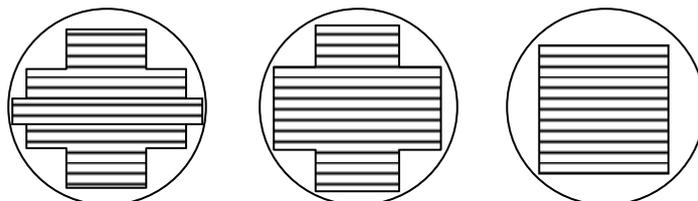


Рис. 1.4. Форма сечения стержней магнитопровода трансформатора

Обмотки трансформаторов выполняют из медных или алюминиевых изолированных проводов прямоугольного или круглого сечения.

В современных трансформаторах первичную и вторичную обмотки располагают пофазно на одном стержне магнитопровода. Такое расположение обмоток обеспечивает лучшую магнитную связь между ними и повышает КПД трансформатора.

В силовых трансформаторах широко применяют концентрические обмотки. Ближе к стержням располагают обмотку низшего напряжения, изоляция которой относительно токоведущих частей и магнитопровода трансформатора меньшей толщины, по сравнению с обмоткой высшего напряжения. Это даёт возможность уменьшить габаритные размеры обмоток, не снижая мощности трансформатора.

Шахтные трансформаторы и трансформаторы малой мощности (до десятков кВ·А) общепромышленного исполнения изготавливают сухими, а остальные трансформаторы – масляными. Исключение составляют силовые трансформаторы, токоведущие части которых охлаждают по специальной технологии негорючим жидким диэлектриком или инертным сжиженным газом. В отечественной практике такие трансформаторы не имеют широкого применения из-за сложности обеспечения их эксплуатационной надежности.

У трансформаторов с воздушным охлаждением тепло, выделяемое в магнитопроводе и обмотках, передаётся непосредственно в окружающую среду.

У трансформаторов с масляным охлаждением магнитопровод с обмотками располагается в баке с трансформаторным маслом, способным интенсивно циркулировать и передавать тепло в окружающую среду через стенки бака и радиатора.

Для лучшего отвода тепла от масла в мощных трансформаторах снаружи бака размещают радиаторы. Иногда применяют искусственную циркуляцию масла.

Трансформаторное масло расширяется при нагревании и переходит в специальный бак (расширитель), соединенный с внутренней полостью трансформатора. Кроме того, на мощных трансформаторах устанавливают стальную выхлопную трубу, также соединенную с основным баком трансформатора. Сверху выхлопная труба закрыта стеклянной мембраной толщиной 2–3 мм. При внутренних повреждениях обмоток трансформатора в трансформаторном масле образуются газы, которые выдавливают мембрану и выходят наружу, предохраняя тем самым основной бак от деформаций.

#### **1.4. Однофазные двухобмоточные трансформаторы**

Как уже отмечалось ранее, двухобмоточный трансформатор имеет первичную и вторичную обмотки.

*Первичная обмотка* подключается к питающей сети переменного тока и является для неё нагрузкой активно-индуктивного характера.

*Вторичная обмотка* выполняет функции источника переменного тока для потребителей, подключаемых к зажимам этой обмотки.

**Примечание.** Всем электрическим величинам первичной обмотки присваивают индекс «1», а вторичной обмотки – индекс «2».

##### **1.4.1. Принцип действия трансформатора**

*Изложить принцип действия* трансформатора – это значит, рассказать, как возникает ЭДС на зажимах вторичной обмотки при подаче напряжения питающей сети на первичную обмотку трансформатора.

Электромагнитная схема трансформатора приведена на рис. 1.5.

Поскольку обмотки трансформатора представляют собой реальные катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником, то можно записать

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1; \quad \underline{Z}_2 = R_2 + jX_2, \quad (1.1)$$

где  $\underline{Z}_1, R_1, X_1$  – соответственно комплекс полного сопротивления, активное и индуктивное сопротивления первичной обмотки, Ом;  $\underline{Z}_2, R_2, X_2$  – то же, – вторичной обмотки, Ом.

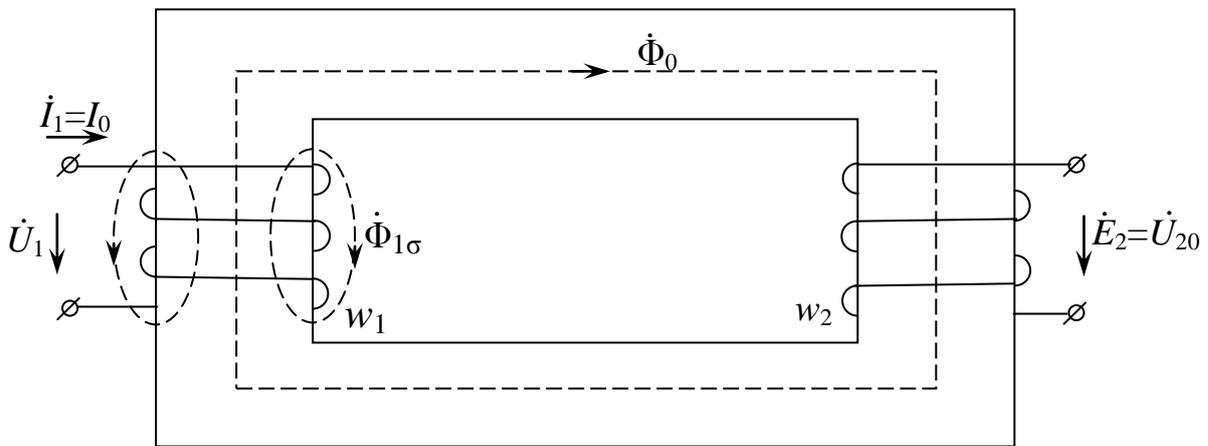


Рис. 1.5. Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора

Если при разомкнутой вторичной обмотке трансформатора с числом витков  $w_2$  подвести к первичной обмотке с числом витков  $w_1$  напряжение питающей сети, изменяется по синусоидальному закону (рис. 1.6):

$$u_1 = U_{m1} \cdot \sin \omega t, \quad \psi_{ui} = 0, \quad (1.2)$$

где  $U_{m1}$  – максимальное значение напряжения сети;  $\psi_{ui}$  – начальная фаза этого напряжения, то в первичной обмотке возникает синусоидальный ток, мгновенное значение которого находится из равенства

$$i_1 = I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi_0), \quad (1.3)$$

где  $\varphi_0$  – угол сдвига фаз между напряжением и током первичной обмотки трансформатора (рис. 1.7).

Так как вторичная обмотка трансформатора разомкнута, то ток, протекающий по первичной обмотке, называют *током холостого хода трансформатора* ( $I_0$ ), а, следовательно, можно записать в комплексной форме равенство

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0. \quad (1.4)$$

Причём 
$$\dot{I} = I_{0a} - jI_\mu, \quad (1.5)$$

где  $I_{0a}, I_\mu$  – модули соответственно активной и индуктивной составляющих комплекса действующего значения тока холостого хода трансформатора, А.

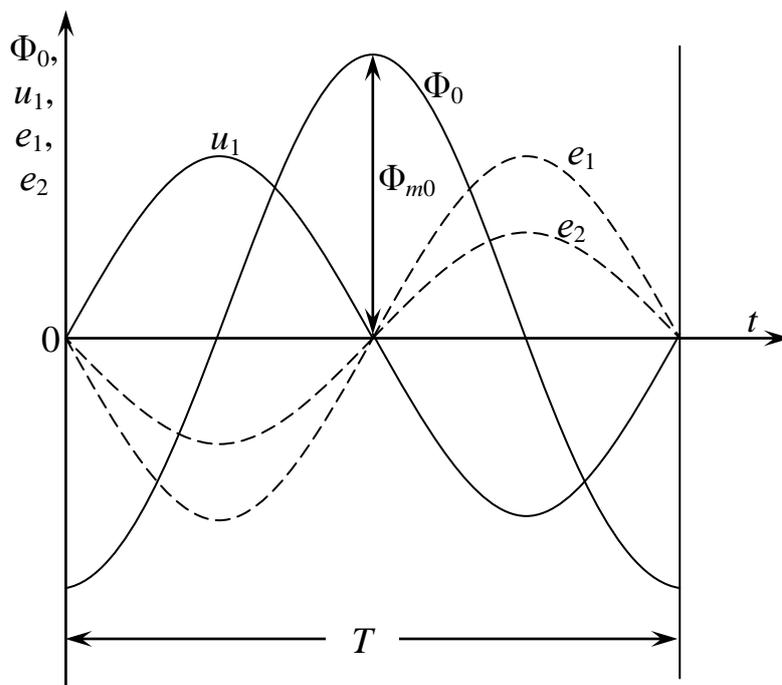


Рис. 1.6. Временные диаграммы  $\Phi_0, u_1, e_1, e_2$

Ток  $I_{0a}$  обеспечивает поступление из сети активной энергии, расходуемой на формирование в трансформаторе магнитных процессов. Его значение определяется качеством трансформаторной стали, конструкцией магнитопровода и для выпускаемых отечественной промышленностью трансформаторов не превышает 10 % от значения тока  $I_0$ .

Ток  $I_\mu$  называют *намагничивающим током*. В реальных трансформаторах  $I_\mu \gg I_{0a}$ .

Изложенные ранее и дальнейшие рассуждения будем иллюстрировать структурной формулой:

$$\dot{U}_1 \rightarrow \dot{I}_1 = \dot{I}_0 = \dot{I} = \dot{I}_{0a} - jI_\mu \rightarrow \dot{F}_\mu = \dot{I}_\mu w_1 \approx \dot{I}_0 w_1 \rightarrow \dot{I}_0 w_1 \rightarrow \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_{\sigma 1}.$$

$\begin{matrix} \swarrow & \searrow & \downarrow \\ \dot{E}_2 & \dot{E}_1 & \dot{E}_{\sigma 1} \end{matrix}$

Протекая по первичной обмотке, ток  $I_\mu$  создаёт магнитодвижущую силу  $\dot{F}_\mu = \dot{I}_\mu w_1$ , формирующую, в свою очередь, магнитный поток,  $\Phi_1$ , направление силовых линий которого определяется *по правилу правоходового буравчика*: если ввинчивать правоходовой буравчик в проводник с током по направлению движения тока, то направление вращения рукоятки буравчика покажет направление силовых линий магнитного потока, создаваемого вокруг этого проводника.

Практически можно считать, что  $\dot{F}_\mu \approx \dot{F}_0 = \dot{I}_0 w_1$ .

Магнитный поток  $\Phi_1$  состоит из основного потока ( $\Phi_0$ ) и так называемого потока рассеяния ( $\Phi_{\sigma 1}$ ):

$$\dot{\Phi}_1 = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_{\sigma 1}. \quad (1.6)$$

Для большинства трансформаторов основной магнитный поток составляет  $\Phi_0 = (0,9 - 0,98)\Phi_1$ .

Его силовые линии замыкаются по магнитопроводу трансформатора, пересекают первичную и вторичную обмотки и наводят в них ЭДС соответственно самоиндукции и взаимной индукции, мгновенные значения которых вычисляются согласно закону электромагнитной индукции по формулам:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt}; \quad (1.7)$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt}. \quad (1.8)$$

Известно, что магнитный поток  $\Phi_0$  отстаёт от напряжения  $u_1$ , приложенного к первичной обмотке трансформатора, на угол  $\frac{\pi}{2}$ , изменяясь при этом по синусоидальному закону (см. рис. 1.6). Следовательно, можно записать:

$$\Phi_0 = \Phi_{m_0} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad \psi_{\Phi_0} = -\frac{\pi}{2}, \quad (1.9)$$

где  $\Phi_{m_0}$ ,  $\psi_{\Phi_0}$  – соответственно максимальное значение и начальная фаза потока  $\Phi_0$ .

Подставив значение потока  $\Phi_0$  в формулу (1.7), взяв производную и выполнив соответствующие преобразования, будем иметь

$$e_1 = E_{m_1} \sin(\omega t - \pi), \quad \psi_{e_1} = -\pi, \quad (1.10)$$

где  $E_{m_1} = 2\pi f_1 w_1 \Phi_{m_0}$  – максимальное значение ЭДС самоиндукции первичной обмотки трансформатора, формируемое магнитным потоком  $\Phi_0$  при частоте  $f_1$  напряжения питающей сети.

Сравнивая формулы (1.2) и (1.10), нетрудно увидеть, что напряжение  $u_1$  и ЭДС самоиндукции  $e_1$  находятся в противофазе (см. рис. 1.6).

В расчётах режимов функционирования трансформаторов пользуются действующими значениями ЭДС, которые связаны с максимальными значениями соотношением  $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$ .

После соответствующих преобразований равенства (1.10) получим формулу для вычисления действующего значения ЭДС самоиндукции первичной обмотки трансформатора

$$E_1 = 4,44w_1f_1\Phi_0, \quad (1.11)$$

допустив при этом, что  $\Phi_{m_0} = \Phi_0$ .

Поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  невелик. Его силовые линии замыкаются по воздуху и через корпус трансформатора пересекают первичную обмотку и наводят в ней ЭДС, действующее значение которой равно  $E_{\sigma 1}$ .

Из теории электрических машин известно, что комплекс действующего значения ЭДС рассеяния первичной обмотки находится из равенства

$$E_{\sigma 1} = -jI_1X_1, \quad (1.12)$$

которое показывает, что ЭДС рассеяния первичной обмотки трансформатора создает падение напряжения в этой обмотке и тем самым формирует её индуктивное сопротивление.

Поскольку поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  значительно меньше основного магнитного потока  $\Phi_0$ , можно с известным допущением считать, что

$$U_m \approx E_{m1}, \text{ или } U_1 \approx E_1. \quad (1.13)$$

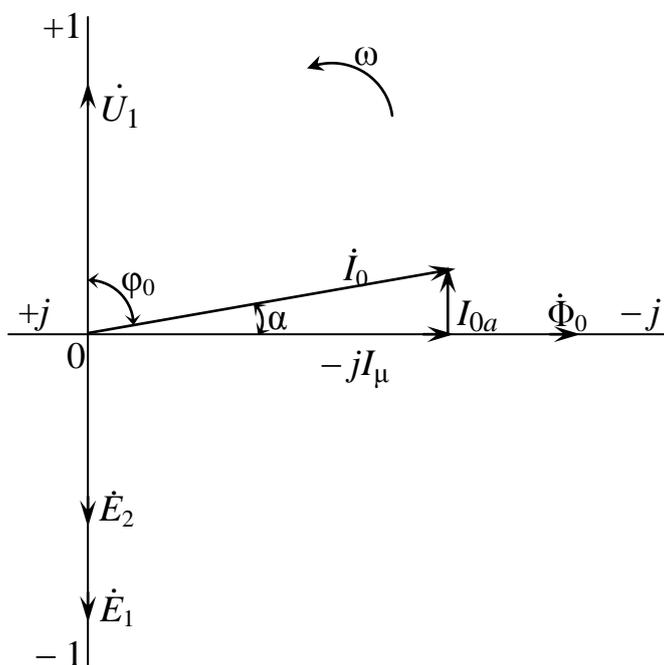


Рис. 1.7. Векторные диаграммы электрических величин, поясняющие принцип действия трансформатора

ЭДС, создаваемая потоком  $\Phi$  во вторичной обмотке трансформатора, так же, как и ЭДС первичной обмотки, отстаёт от

потока  $\Phi_0$  на угол  $\frac{\pi}{2}$ , т. е., по аналогии с изложенным ранее, можно записать следующие равенства:

$$e_2 = E_{m_2} \sin(\omega t - \pi), \quad \psi_{e_2} = -\pi, \quad (1.14)$$

$$E_2 = 4,44w_2 f_1 \Phi_0. \quad (1.15)$$

Временная диаграмма ЭДС  $e_2$  приведена на рис. 1.6, а векторные диаграммы ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  и магнитного потока  $\Phi_0$  показаны на рис. 1.7, на котором можно увидеть, что вектор  $\Phi_0$  отстаёт от вектора  $\dot{I}_0$ , на угол  $\alpha$ , называемый углом магнитного запаздывания (для большинства трансформаторов  $\alpha = (3-10^\circ)$ ).

**Примечание.** На рис. 1.6 и 1.7 приведены временные и векторные диаграммы ЭДС понижающего трансформатора, для которого выполняется условие  $E_{m_1} > E_{m_2}$ ;  $E_1 > E_2$ . Аналогичные диаграммы можно построить и для повышающего трансформатора ( $E_{m_1} < E_{m_2}$ ;  $E_1 < E_2$ ).

### **Выводы**

При подведении к первичной обмотке трансформатора напряжения питающей сети, изменяющегося по синусоидальному закону с частотой  $f_1$ , во вторичной его обмотке возникает ЭДС взаимной индукции, значение которой прямо пропорционально значению магнитного потока, пересекающего обмотку, числу её витков и частоте перемагничивания магнитопровода трансформатора.

#### **1.4.2. Режим холостого хода трансформатора**

Режим холостого хода трансформатора возникает при размыкании его вторичной обмотки и подключении первичной обмотки к питающей сети. Такой режим рассмотрен ранее. Поэтому ограничимся тем, что подчеркнём следующие моменты:

1. Ток, протекающий по первичной обмотке, равен току холостого хода трансформатора и составляет несколько процентов от его номинального значения, т. е.

$$I_1 = I_0 \approx (1-3) \% \text{ от } I_{1н}. \quad (1.16)$$

Небольшое значение тока  $I_0$  обеспечивается замыканием основного магнитного потока  $\Phi_0$  по магнитопроводу, выполненному из высококачественной трансформаторной стали, и размещением

первичной и вторичной обмоток трансформатора на одном стержне магнитопровода в слоевом или чередующемся исполнении.

2. Степень преобразования первичного напряжения характеризуется *коэффициентом трансформации*, определяемым как отношение ЭДС обмотки высшего напряжения ( $E_{ВН}$ ) к ЭДС обмотки низшего напряжения ( $E_{НН}$ ), т. е.

$$K = \frac{E_{ВН}}{E_{НН}}. \quad (1.17)$$

Для понижающего трансформатора можно записать

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44w_1f_1\Phi_0}{4,44w_2f_1\Phi_0} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (1.18)$$

а если учесть, что  $E_1 \approx U_{10}$ ,  $E_2 \approx U_{20}$ , где  $U_{10}$  и  $U_{20}$  – действующие значения напряжения на зажимах соответственно первичной и вторичной обмоток трансформатора в режиме холостого хода, то окончательно будем иметь:

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}}. \quad (1.19)$$

Для повышающего трансформатора формула (1.19) принимает вид

$$K = \frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1} \approx \frac{U_{20}}{U_{10}}.$$

3. Угол сдвига фаз между напряжением, приложенным к первичной обмотке, и током, протекающим по обмотке ( $\varphi_0$ ), близок по значению к углу  $90^\circ$ , так как  $\varphi_0 = 90^\circ - \alpha$ , а угол  $\alpha$  не превышает практически  $10^\circ$  (см. рис. 1.7). Следовательно, для большинства силовых трансформаторов выполняется условие:  $\cos \varphi_0 \leq 0,1 - 0,2$ .

### ***1.4.3. Режим нагрузки трансформатора***

Ток нагрузки в трансформаторе появляется при подключении к зажимам его вторичной обмотки потребителей электрической энергии и подаче на первичную обмотку напряжения питающей сети.

Комплекс полного сопротивления потребителя электрической энергии, подключенного к вторичной обмотке трансформатора, можно записать равенством

$$\underline{Z}_Н = R_Н \pm jX_Н, \quad (1.20)$$

где знак перед множителем « $j$ » указывает на характер реактивной нагрузки трансформатора: « $+$ » – индивидуальный, « $-$ » – ёмкостной характер нагрузки.

Ниже приведена структурная формула для режима нагрузки трансформатора, отличающаяся от аналогичной формулы для режима холостого хода тем, что во вторичной обмотке возникает ток нагрузки, который создаёт магнитодвижущую силу  $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 w_2$ , где  $\dot{I}_2$  – комплекс действующего значения тока, протекающего во вторичной обмотке трансформатора. Магнитодвижущая сила  $\dot{F}_2$ , во-первых, взаимодействует с магнитодвижущей силой  $\dot{F}_1 = \dot{I}_1 w_1$ , в результате чего формируется МДС  $\dot{F}_0$ , создающая магнитный поток  $\Phi_1$ , во-вторых, создаёт поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 2}$ , магнитные силовые линии которого замыкаются по воздуху и через корпус трансформатора (рис. 1.8).

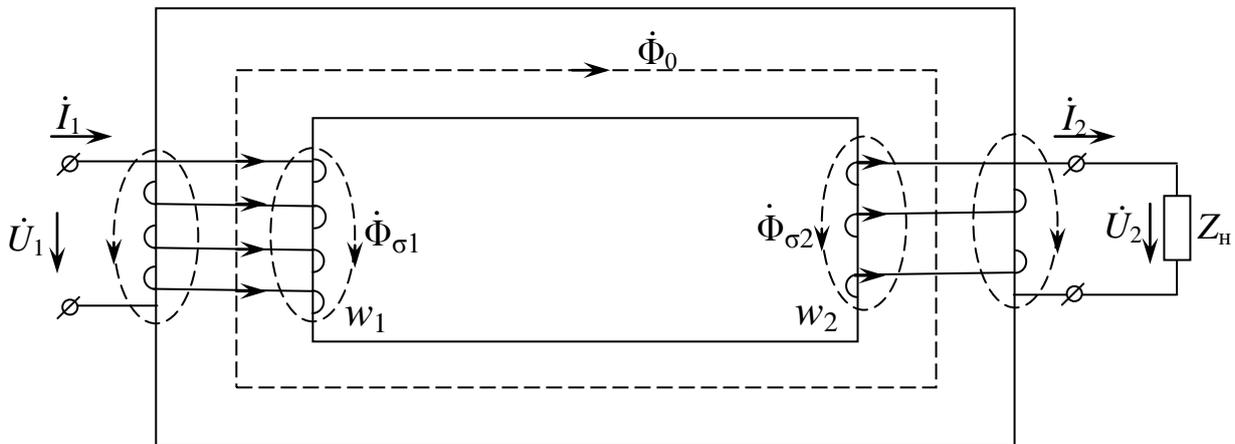


Рис. 1.8. Электромагнитная схема однофазного трансформатора, работающего под нагрузкой

$$\begin{array}{c} \dot{U}_1 \rightarrow \dot{I}_1 \rightarrow \dot{F}_1 \rightarrow \dot{F}_0 \rightarrow \dot{\Phi}_1 = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_{\sigma 1} \\ \left[ \begin{array}{c} \dot{E}_2 \rightarrow \dot{I}_2 \rightarrow \dot{F}_2 \rightarrow \dot{F}_{\sigma 2} \rightarrow \dot{E}_{\sigma 2} \\ \dot{E}_1 \quad \dot{E}_{\sigma 1} \end{array} \right. \end{array}$$

По аналогии с потоком  $\Phi_{\sigma 1}$  магнитный поток  $\Phi_{\sigma 2}$  наводит во вторичной обмотке ЭДС рассеяния, комплекс действующего значения которой вычисляется по формуле

$$\dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 X_2, \quad (1.21)$$

показывающей, что ЭДС рассеяния  $E_{\sigma 2}$  обуславливает возникновение индуктивного сопротивления  $X_2$  во вторичной обмотке трансформатора.

Взаимодействие магнитодвижущих сил  $\dot{F}_1$  и  $\dot{F}_2$  можно записать равенством

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0, \quad (1.22)$$

которое называют *уравнением магнитодвижущих сил* трансформатора.

В теории электрических машин при рассмотрении режимов работы трансформатора исходят из допущения

$$U_1 = \text{const} \quad (1.23)$$

при изменении тока нагрузки в пределах  $0 \leq I_2 \leq (1,1-1,2)I_{2н}$ . Следовательно, можно считать, что

$$\Phi_0 = \frac{E_1}{4,44w_1f_1} \approx \frac{U_1}{4,44w_1f_1}. \quad (1.24)$$

Это позволяет при анализе уравнения (1.22) сделать весьма *существенный вывод*: при изменении тока нагрузки силового трансформатора в пределах его номинальных значений и выполнении условия (1.23) степень взаимодействия магнитодвижущих сил  $\dot{F}_1$  и  $\dot{F}_2$  определяется условием

$$F_0 = \text{const}. \quad (1.25)$$

*Например*, если ток  $\dot{I}_2$  возрастает, то увеличивается магнитодвижущая сила  $\dot{F}_2$ , а это приводит к увеличению значения тока  $\dot{I}_1$  и магнитодвижущей силы  $\dot{F}_1$  в таких пределах, которые обеспечивают выполнение условия (1.25). При уменьшении тока  $\dot{I}_2$  имеет место обратный процесс, но условие (1.25) выполняется.

Далее будет показано, что индуктивный ток нагрузки размагничивает, а ёмкостной – подмагничивает магнитопровод трансформатора.

Подставив в формулу (1.22) значения магнитодвижущих сил и решив уравнение относительно магнитодвижущей силы  $\dot{F}_1$ , получим равенство

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1 - \dot{I}_2 w_2, \quad (1.26)$$

Обозначив  $I'_2 = I_2 \frac{1}{K}$ , как ток вторичной обмотки трансформатора, приведённый к числу витков первичной его обмотки, получаем в окончательном виде *уравнение токов* трансформатора

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2, \quad (1.27)$$

которое, по аналогии с уравнением магнитодвижущих сил, объясняет тенденцию изменения тока  $I_1$  при изменении тока  $I_2$  с учётом характера нагрузки трансформатора.

При работе под нагрузкой трансформатор выполняет весьма важную функцию: передаёт электромагнитную мощность первичной обмотки ( $P_{эм1} = E_1 I_1$ ) во вторичную обмотку ( $P_{эм2} = E_2 I_2$ ), обеспечивая тем самым выполнение функций источника питания для нагрузки  $Z_{н}$ .

Если пренебречь потерями активной мощности в магнитопроводе и обмотках трансформатора, то можно считать, что трансформатор принимает из питающей сети и передаёт своей нагрузке ту мощность, которая требуется для функционирования этой нагрузки. А значение электромагнитной мощности при выполнении условия (1.25) изменяется пропорционально току нагрузки  $I_2$ .

Анализируя режимы холостого хода и нагрузки трансформатора, можно сделать следующие выводы:

1) ток холостого хода трансформатора составляет 1–3 % от номинального тока, что существенно улучшает энергетические характеристики трансформатора;

2) коэффициент трансформации определяют при работе трансформатора в режиме холостого хода;

3) магнитодвижущая сила, создающая основной магнитный поток трансформатора, остаётся постоянной при неизменном напряжении питающей сети и варьировании тока нагрузки в пределах номинальных значений;

4) мощность, необходимая подключенному к вторичной обмотке трансформатора потребителю для выполнения своих функций, передаётся трансформатором из питающей сети через основной магнитный поток.

#### **1.4.4. Уравнение электрического состояния трансформатора**

Уравнения электрического состояния трансформатора описывают режимы его работы на основе первого и второго законов Кирхгофа. Их используют для расчётов и анализа режимов нагрузки и построения векторных диаграмм напряжений и токов трансформатора.

Электрическое состояние реального и приведённого трансформаторов формализуется одними и теми же уравнениями токов и напряжений. Поэтому ограничимся рассмотрением этих уравнений только для приведённого трансформатора.

На основе первого закона Кирхгофа составляют уравнение токов

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0; \quad \dot{I}_1 = \dot{I}'_2 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2. \quad (1.28)$$

Заметим, что уравнение (1.28) справедливо для любого узла электрической цепи трансформатора, объединяющей первичную и вторичную его обмотки.

На основе второго закона Кирхгофа составляют уравнения напряжений:

– для контура первичной обмотки:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = I_1 R_1. \quad (1.29)$$

Подставив в равенство (1.29) значение величины  $E_{\sigma 1}$  из формулы (1.12) и сделав соответствующие преобразования, получают уравнение

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_1 R + j I_1 X = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1. \quad (1.30)$$

Обозначив

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_1 &= I_1 \cdot \underline{Z}_1; \\ \Delta \dot{U}_{1a} &= I_1 \cdot R_1; \\ \Delta \dot{U}_{1L} &= +j I_1 \cdot X_1, \end{aligned} \right\} \quad (1.31)$$

где  $\Delta \dot{U}_1$ ,  $\Delta \dot{U}_{1a}$ ,  $\Delta \dot{U}_{1L}$  – комплексы действующих значений соответственно полного падения напряжения и его активной и индуктивной составляющих в первичной обмотке трансформатора, и подставив равенства (1.31) в формулу (1.30), получим уравнение

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \Delta \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \Delta \dot{U}_{1a} + \Delta \dot{U}_{1L}, \quad (1.32)$$

из которого можно увидеть, что напряжение, подводимое к первичной обмотке трансформатора, уравновешивают ЭДС самоиндукции и падение напряжения на сопротивлении обмотки;

– для контура вторичной обмотки:

$$\dot{E}'_2 + \dot{E}'_{\sigma 2} = \dot{U}'_2 + I'_2 R'_2, \quad (1.33)$$

где  $\dot{U}'_2$  – комплекс действующего значения напряжения, подводимого к потребителю электрической энергии (падение напряжения на полном сопротивлении нагрузки).

После аналогичных изложенных ранее преобразований с использованием формулы (1.21) получают уравнение

$$\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + \Delta \dot{U}'_2 = \dot{U}'_2 + \Delta \dot{U}'_{2a} + j \Delta \dot{U}'_{2L} \quad (1.34)$$

в котором:  $\Delta \dot{U}'_2 = I'_2 \underline{Z}'_2$  – комплекс полного падения напряжения во вторичной обмотке приведённого трансформатора;  $\Delta \dot{U}'_{2a} = \dot{I}'_2 \dot{R}'_2$  – комплекс падения напряжения на активном сопротивлении вторичной обмотки приведённого трансформатора;  $\Delta \dot{U}'_{2L} = j \dot{I}'_2 \dot{X}'_2$  – то же, на индуктивном сопротивлении обмотки.

При построении векторных диаграмм напряжений пользуются уравнением

$$\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2 R'_2 + j \dot{I}'_2 X'_2.$$

Если известна ЭДС  $E'_2$  то определяют напряжение  $U'_2$  с помощью уравнения

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 R'_2 + j \dot{I}'_2 X'_2 = \dot{E}'_2 - \Delta \dot{U}'_{2a} - j \Delta \dot{U}'_{2L}. \quad (1.35)$$

Как правило, в расчётах применяют формулу (1.44).

#### 1.4.5. Схемы замещения приведённого трансформатора

Схемы замещения приведённого трансформатора составляют на основе уравнений (1.28), (1.32) и (1.34).

*Режим холостого хода*

Уравнения электрического состояния принимают вид:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_0; \\ \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1; \\ \dot{E}'_2 &= E_1. \end{aligned}$$

Схема замещения, составленная на основе этих уравнений, приведена на рис. 1.9.

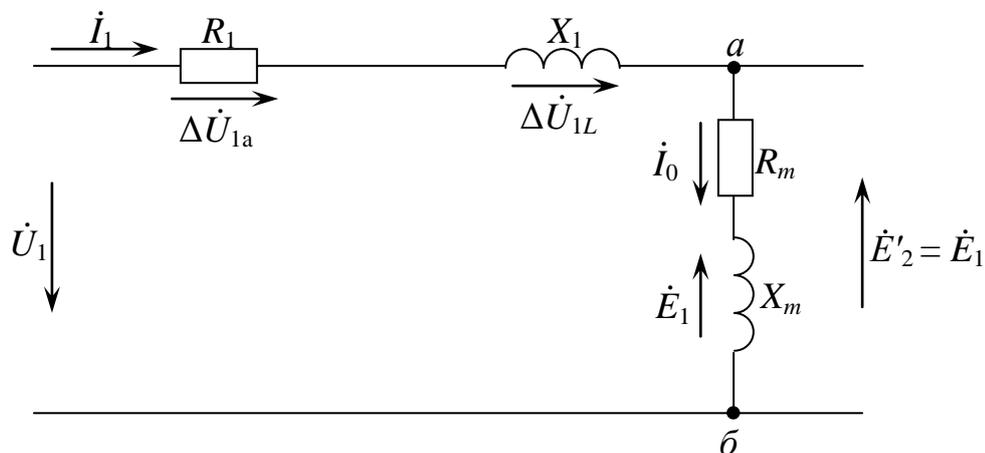


Рис. 1.9. Схема замещения приведенного трансформатора для режима холостого хода

На схеме:  $R_m$ ,  $X_m$  – активное и индуктивное сопротивления магнитного контура трансформатора.

*Режим нагрузки*

Уравнения электрического состояния (1.28), (1.32), (1.34) не претерпевают изменений, и поэтому схема замещения имеет вид, приведённый на рис. 1.10.

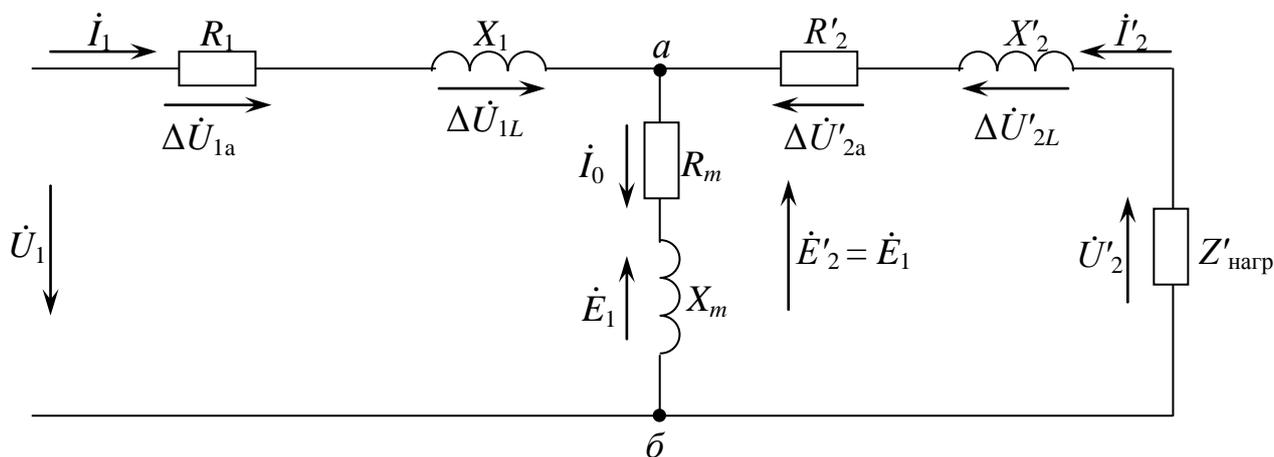


Рис. 1.10. Схема замещения приведенного трансформатора для режима нагрузки

**Примечание.** Благодаря выполнению условий  $K' = 1$ , появилась физическая возможность на схеме (см. рис. 1.10) в точках «а» и «б» осуществить электрическое (гальваническое) соединение первичной и вторичной обмоток приведенного трансформатора, так как в этих точках не возникает разности потенциалов, которая имела бы место при электрическом соединении обмоток реального трансформатора.

*Частный случай:* режим короткого замыкания трансформатора.

Уравнения электрического состояния принимают вид

$$\begin{aligned} I_{1к} &= I_0 - I'_{2к}; \\ U_{1к} &= -\dot{E}_{1к} + I_{1к}R_1 + jI_{1к}X_1; \\ \dot{E}'_{2к} &= I'_{2к}R'_2 + jI'_{2к}X'_2. \end{aligned} \quad (1.36)$$

В реальных условиях трансформатор питается напряжением  $U_1 \approx U_{1н}$ . Поэтому короткое замыкание вторичной обмотки приводит к возникновению токов, значительно превышающих номинальные свои значения. Эти токи, если своевременно не отключить напряжение питающей сети, разрушают обмотки и выводят трансформатор из строя. Такой режим короткого замыкания является *аварийным* и недопустим при эксплуатации трансформаторов. Но поскольку короткие замыкания в цепи вторичной обмотки могут иметь место, правилами устройств электроустановок предписывается осуществлять автоматическое быстрое (за десятые доли секунд) отключение питания трансформатора при возникновении токов короткого замыкания. Для этого применяют специальные устройства защиты.

Вместе с тем, если напряжение  $U_к$  не превышает значения, при котором токи короткого замыкания равны номинальным токам

обмоток трансформатора, то такой режим нагрузки не является аварийным и на практике широко применяется для испытания трансформатора косвенным методом и сушки его обмоток.

Так как при коротком замыкании зажимов вторичной обмотки трансформатора выполняется условие  $I'_{2к} \gg I_0$ , то током холостого хода можно пренебречь и схему приведённого трансформатора представить в упрощённом виде (рис. 1.11):

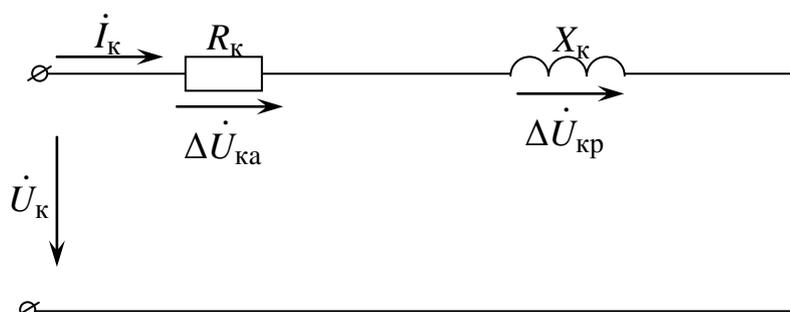


Рис. 1.11. Упрощенная схема замещения приведенного трансформатора для режима короткого замыкания

На схеме:  $\dot{U}_{ка}$ ,  $\dot{U}_{кр}$ ,  $\dot{U}_к$  – комплексы действующих значений соответственно активной, реактивной (индуктивной) составляющих и полного напряжения короткого замыкания трансформатора;  $\dot{I}_к$  – комплекс действующего значения тока короткого замыкания трансформатора;  $R_к$ ,  $X_к$  – соответственно активная и индуктивная составляющие полного сопротивления  $Z_к$  короткого замыкания трансформатора.

В паспорте приводят номинальное значение напряжения короткого замыкания трансформатора в процентах, вычисляемое по формуле

$$U_к = \frac{U_{кн}}{U_{1н}} 100, \quad (1.37)$$

где  $U_{кн}$  – номинальное напряжение короткого замыкания трансформатора, В.

Номинальным *напряжением короткого замыкания* трансформатора называют такое пониженное напряжение, подводимое к первичной обмотке, которое при замкнутой накоротко вторичной обмотке создаёт в обеих обмотках трансформатора номинальные токи.

Если известны значения напряжения  $U_{ка}$  и  $U_{кр}$ , то модуль комплекса действующего значения напряжения  $U_K$  можно вычислить по формуле

$$U_K = \sqrt{U_{ка}^2 + U_{кр}^2}. \quad (1.38)$$

По аналогии с равенством (1.47) получают формулу

$$u_K = \sqrt{u_{ка}^2 + u_{кр}^2}, \quad (1.39)$$

где  $u_{ка}$ ,  $u_{кр}$  – соответственно активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания трансформатора, %, и формулу

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}, \quad (1.40)$$

где

$$\left. \begin{aligned} R_K &= R_1 + R'_2 \approx 2R_1; \\ X_K &= X_1 + X'_2 \approx 2X_1. \end{aligned} \right\} \quad (1.41)$$

Приведённые в формулах (1.39–1.41) показатели короткого замыкания трансформатора определяют при его испытании косвенным методом.

#### **1.4.6. Изменение напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора. Внешние характеристики трансформатора**

Действующее значение потерь напряжения во вторичной обмотке трансформатора, возникающих при протекании по обмотке тока нагрузки  $I_2$ , вычисляют по формуле

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2, \quad (1.42)$$

где  $U_{20}$ ,  $U_2$  – действующие значения напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора, работающего соответственно в режиме холостого хода ( $U_{20} = E_2$ ) и под нагрузкой.

Если известны значения величин  $U_{20}$  и  $\Delta U_2$ , то можно определить напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора из равенства

$$U_2 = U_{20} - \Delta U_2. \quad (1.43)$$

В практических расчётах режимов напряжения цепей применяют величину  $\Delta u_2$ , выраженную в процентах и вычисляемую по формуле

$$\Delta u_2 = \beta_I (u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{кр} \sin \varphi_2), \quad (1.44)$$

где  $\beta_I$  – коэффициент нагрузки трансформатора по току, протекающему по вторичной его обмотке.

Коэффициент  $\beta_I$  определяют из равенства

$$\beta_I = \frac{I_2}{I_{2H}}, \quad (1.45)$$

а значения величин  $u_{ка}$  и  $u_{кр}$  определяют при испытаниях трансформатора косвенным методом.

Динамику изменения напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора при варьировании тока нагрузки принято рассматривать на так называемой внешней характеристике, являющейся зависимостью  $U_2 = f(\beta_I)$ , строящейся для заданных значений  $\cos\varphi_2$ . На рис. 1.12 приведены внешние характеристики трансформатора, построенные для активно-ёмкостной, активной и активно-индуктивной нагрузки.

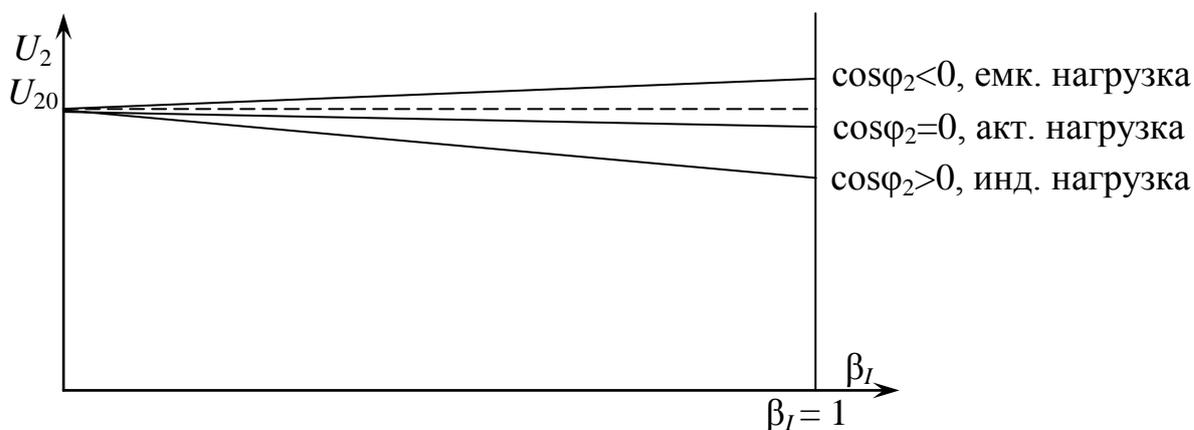


Рис. 1.12. Внешние характеристики трансформатора, построенные для различного характера нагрузки

Влияние характера нагрузки на значение величины  $\Delta U_2$  проще увидеть на зависимости  $\Delta U_2 = f(\varphi_2)$ , которая приведена на рис. 1.13

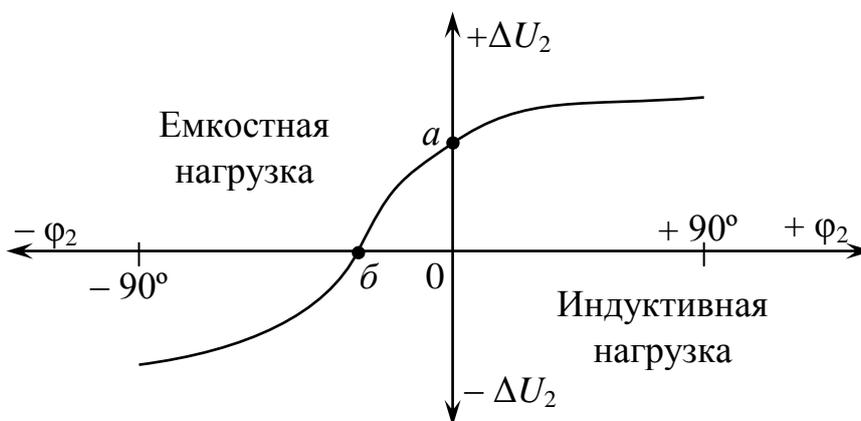


Рис. 1.13. Зависимость  $\Delta U_2 = f(\varphi_2)$

При активно-индуктивном характере нагрузки ( $+\varphi_2$ ) потери напряжения  $\Delta U_2$  имеют знак «+» и уменьшают значение напряжения  $U_2$  в формуле (1.43), так как обе составляющие потери напряжения в трансформаторе положительные.

Если уменьшить индуктивную составляющую  $I_{2L}$  тока нагрузки (угол «+»  $\varphi_2$  уменьшается), то снижаются потери напряжения  $\Delta U_2$  и увеличивается напряжение  $U_2$ . В т. «а» (см. рис. 1.13) имеет место только активный ток нагрузки ( $\varphi_2 = 0$ ) и равенство (1.44) принимает вид

$$\Delta u_2 = \beta_I \cdot u_{ка} \cos \varphi_2. \quad (1.46)$$

При появлении дополнительно к активной нагрузке ёмкостной нагрузки возникает ёмкостная составляющая  $I_{2C}$  тока  $I_2$  (угол «-»  $\varphi_2$ ), которая, подмагничивая магнитопровод, уменьшает потери напряжения во вторичной обмотке трансформатора. Если увеличивать ёмкостную составляющую тока нагрузки (угол «-»  $\varphi_2$  увеличивается), то значение величины  $\Delta U_2$  уменьшается, и при выполнении условия

$$u_{ка} \cos \varphi_2 - u_{кр} \sin \varphi_2 = 0$$

потери напряжения во вторичной обмотке трансформатора тоже равны нулю (т. «б» на рис. 1.13).

Дальнейшее увеличение ёмкостной составляющей тока нагрузки приводит к появлению *отрицательного* значения потерь напряжения  $\Delta U_2$ , а следовательно, начинает выполняться условие

$$U_2 > U_{20},$$

которое, заметим попутно, может быть нежелательным для потребителя электрической энергии, если напряжение на его зажимах превысит допустимые Правилами безопасные пределы.

**Примечание.** При работе трансформатора под нагрузкой необходимо учитывать температуру нагрева его обмоток, поскольку с повышением температуры увеличивается активное сопротивление и возрастают потери напряжения в обмотках.

Поправочный температурный коэффициент рассчитывают по формуле

$$K_t = \frac{t_{из.р}^{\circ} + 235}{t_{из.д}^{\circ} + 235},$$

в которой  $t_{из.р}^{\circ}$ ,  $t_{из.д}^{\circ}$  – соответственно расчётная (допустимая) и действительная температуры нагрева обмоток трансформатора, град.

Применяют коэффициент  $K_t$  при вычислении напряжения  $U_{ка}$  и мощности  $P_k$ .

### 1.4.7. Энергетическая диаграмма и КПД трансформатора

Энергетическая диаграмма трансформатора приведена на рис. 1.14.

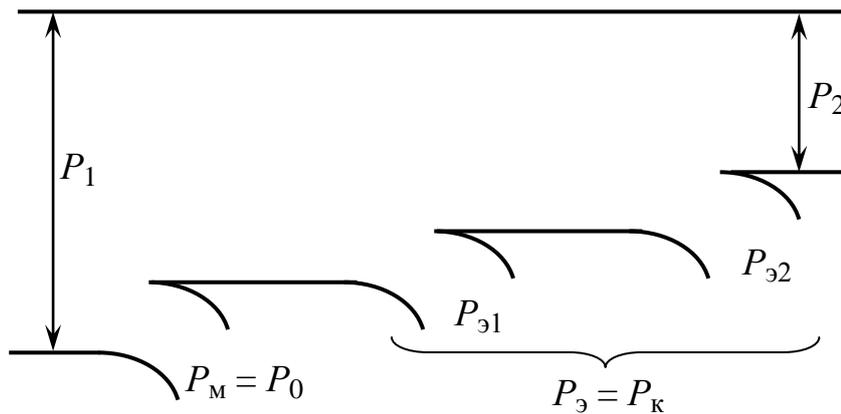


Рис. 1.14. Энергетическая диаграмма трансформатора

При работе под нагрузкой на замах первичной обмотки трансформатора формируется активная мощность

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad (1.47)$$

а на зажимах вторичной обмотки, – активная мощность

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2, \quad (1.48)$$

значение которой меньше мощности  $P_1$  в связи с потерями активной мощности в стали ( $P_0$ ) и обмотках ( $P_k$ ) трансформатора.

КПД трансформатора вычисляют по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1},$$

которую для выполнения электротехнических расчётов преобразуют в равенство

$$\eta = \frac{\beta I S_H \cos \varphi_2}{\beta I S_H \cos \varphi_2 + P_0 \beta I^2 P_k}, \quad (1.49)$$

где  $S_H$  – номинальная полная мощность трансформатора;  $\cos \varphi_2$  – коэффициент мощности потребителей трансформатора.

Потери активной мощности в стали трансформатора пропорциональны квадрату напряжения источника питания, приложенного к первичной обмотке

$$P_0 = K_{пр} U_1^2, \quad (1.50)$$

где  $K_{пр}$  – коэффициент пропорциональности.

Потери в обмотках (потери короткого замыкания) трансформатора вычисляют по формуле

$$P_k = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2. \quad (1.51)$$

Зависимость  $\eta = f(\beta_I)$  при заданных значениях  $\cos\varphi_2$  приведена на рис.1.15.

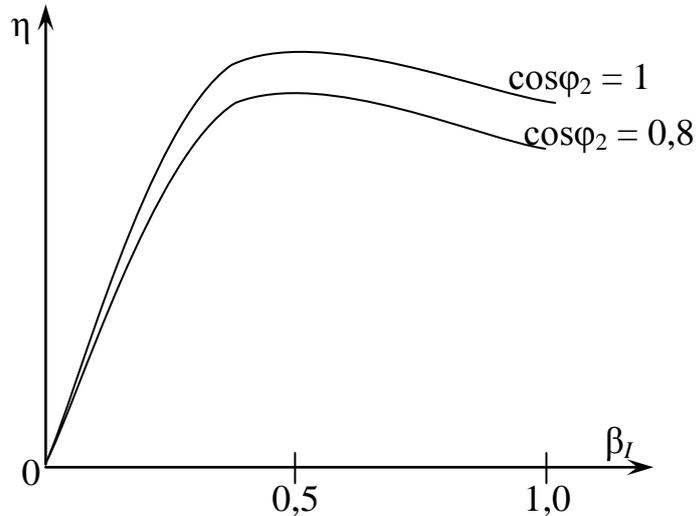


Рис. 1.15. Зависимость КПД трансформатора от его коэффициента нагрузки по току для различных значений  $\cos\varphi_2$

#### **1.4.8. Испытание трансформатора косвенным методом**

Испытание трансформатора косвенным методом проводится с целью определения по экспериментальным данным основных его показателей.

Косвенный метод базируется на двух экспериментах: опыте холостого хода и опыте короткого замыкания трансформатора.

**Примечание.** Рассматриваемый метод называют косвенным в том смысле, что реальные режимы работы трансформатора не воспроизводят, а только имитируют. Так, в опыте холостого хода характеристики трансформатора определяют при номинальном напряжении на первичной обмотке, что на практике не всегда имеет место, а опыт короткого замыкания проводят при пониженном напряжении питания и замкнутой накоротко вторичной обмотке трансформатора.

Далее, в качестве примера рассмотрим испытание косвенным методом двухобмоточного понижающего трансформатора.

#### **Опыт холостого хода трансформатора**

*Цель опыта:*

1) определить значения коэффициента трансформации  $K$ , потерь мощности в магнитопроводе  $P_0$ , коэффициента  $\cos\varphi_0$ , параметров магнитного контура  $Z_m, R_m, X_m$ ;

2) построить зависимости величин  $P_0$ ,  $I_0$ ,  $Z_m$ ,  $R_m$  от напряжения  $U_1$ .

Схема опыта:

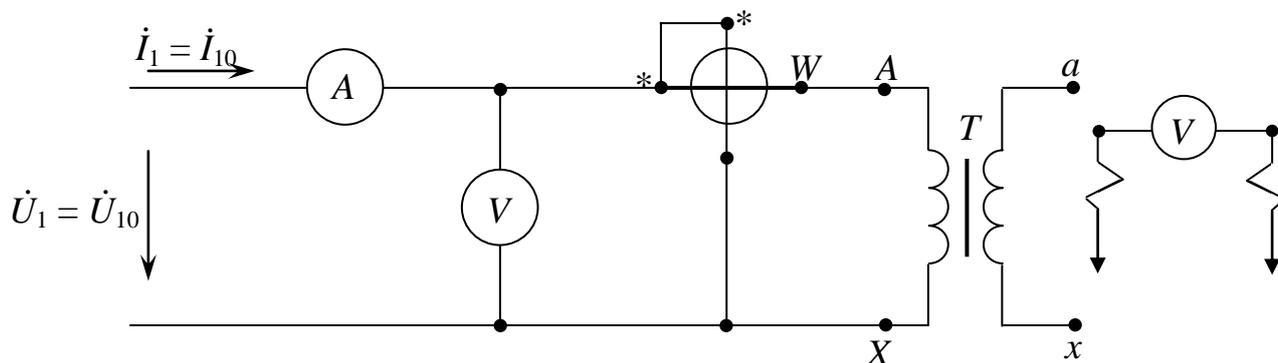


Рис. 1.16. Схема опыта холостого хода трансформатора

*Суть опыта:* при разомкнутой вторичной обмотке на первичную обмотку трансформатора подают напряжение сети  $U_1$ , увеличивая его плавно до значения  $U_{1н}$ .

При этом *измеряют:*

- 1) напряжение  $U_1 = U_{10}$  на зажимах «А–Х» первичной обмотки трансформатора;
- 2) напряжение  $U_2 = U_{20}$  на зажимах «а–х» вторичной обмотки трансформатора;
- 3) ток  $I_1 = I_0$  в цепи первичной обмотки трансформатора;
- 4) активную мощность  $P_W$  на зажимах «А–Х» первичной обмотки трансформатора.

*Вычисляют:*

1. Коэффициент трансформации трансформатора

$$K = \frac{U_{10}}{U_{20}},$$

где  $U_{20}$  – напряжение на вторичной обмотке трансформатора, измеренное при напряжении на первичной обмотке, равном  $U_{10}$ ;

2. Потери активной мощности в магнитопроводе трансформатора  $P_0$ .

Ваттметром в опыте холостого хода измеряют мощность, состоящую из потерь мощности в стали ( $P_0$ ) и в первичной обмотке ( $P_{\text{э1}}$ ) трансформатора, т. е.

$$P_W = P_0 + P_{\text{э1}}, \quad (1.52)$$

но поскольку потери мощности в стали пропорциональны квадрату напряжения  $U_{10}$ , а потери мощности в первичной обмотке пропорциональны квадрату тока  $I_0$ , то практически потерями мощности  $P_{\Sigma 1}$  можно пренебречь (ток  $I_0 = (0,01 - 0,03)I_{1H}$ ) и считать, что

$$P_0 \approx P_W. \quad (1.53)$$

3. Значение  $\cos \varphi_0$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10} \cdot I_0}. \quad (1.54)$$

4. Параметры магнитного контура трансформатора

$$Z_m = \frac{U_{10}}{I_0}; R_m = \frac{P_0}{I_0^2}; X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (1.55)$$

Строят зависимости  $P_0 = f(U_1)$ ;  $I_0 = f(U_1)$ ;  $Z_m = f(U_1)$ ;  $R_m = f(U_1)$ .

Характер этих зависимостей показан на рис. 1.17, и объяснить его можно следующим.

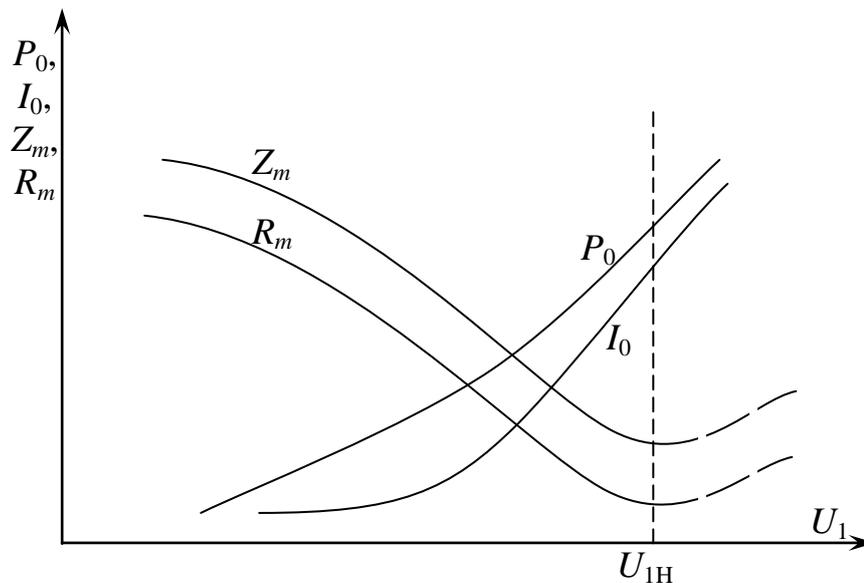


Рис. 1.17. Зависимости величин  $P_0$ ,  $I_0$ ,  $Z_m$  и  $R_m$  от напряжения  $U_1$

Известно, что активное магнитное сопротивление магнитопровода трансформатора вычисляют по формуле

$$R_m = \frac{l_m}{S_m \mu \cdot \mu_0}, \quad (1.56)$$

где  $l_m$ ,  $S_m$  — соответственно средняя длина магнитных силовых линий потока  $\Phi_0$  и площадь поперечного сечения магнитопровода трансформатора;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость

трансформаторной стали магнитопровода;  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$  – магнитная постоянная вакуума, Гн/м.

А также известны зависимости  $\Phi_0 = f(H)$ ,  $\mu = f(H)$ , где  $H$  – напряженность магнитного поля, создаваемого магнитодвижущей силой первичной обмотки трансформатора ( $H \approx K_{пр}U_1$ ), рис. 1.18.

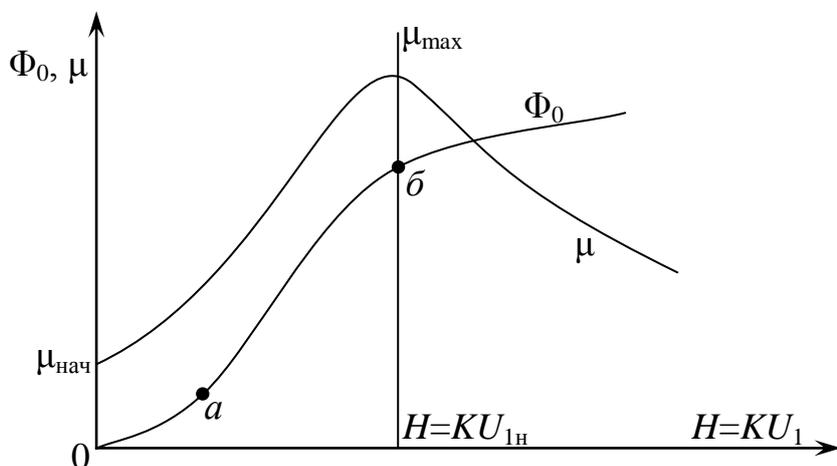


Рис. 1.18. Зависимости величин  $\Phi_0$  и  $\mu$  от напряженности  $H$  магнитного поля трансформатора

Анализ кривых, приведенных на рис. 1.17, показывает, что в момент включения напряжения  $U_1$  значение магнитной проницаемости невелико и равно  $\mu_{нач}$ . Поэтому сопротивление  $R_m$  имеет большое значение. С возрастанием напряжения  $U_1$  магнитопровод намагничивается, магнитная проницаемость увеличивается, а сопротивление  $R_m$  уменьшается и достигает минимального значения при  $\mu = \mu_{max}$  (точка перегиба «б» кривой намагничивания на рис. 1.18). Этот режим создается при  $U_{10} = U_{1н}$ . При дальнейшем увеличении напряжения  $U_1$  магнитопровод становится насыщенным, а это приводит к уменьшению его магнитной проницаемости и повторному возрастанию активного сопротивления  $R_m$  магнитного контура трансформатора. Однако следует заметить, что из-за насыщения магнитопровода темпы повторного увеличения сопротивления  $R_m$  существенно ниже, чем это имело место при возрастании величины  $\mu$ .

### Опыт короткого замыкания трансформатора

*Цель опыта:*

1) Определить значения потерь активной мощности в обмотках трансформатора  $P_k$  (потери короткого замыкания трансформатора); активной ( $\Delta u_{ка}$ ), реактивной ( $\Delta u_{кр}$ ) составляющих и полного

напряжения короткого замыкания ( $\Delta u_k$ ), трансформатора; коэффициента мощности  $\cos\varphi_k$ ; активного ( $R_k$ ), индуктивного ( $X_k$ ) и полного ( $Z_k$ ) сопротивлений короткого замыкания трансформатора;

2) Построить зависимости величин  $P_k$ ,  $I_k$ ,  $\cos\varphi_k$  и  $Z_k$  от напряжения  $U_1=U_k$ .

Схема опыта:

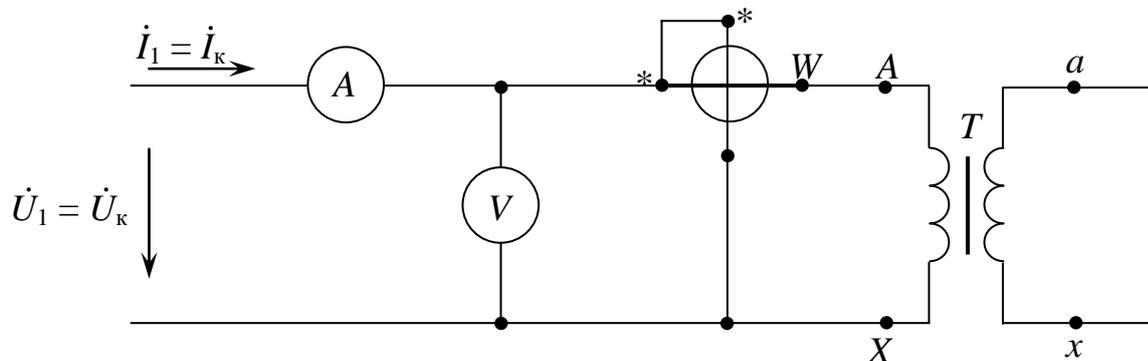


Рис. 1.19. Схема опыта короткого замыкания трансформатора

*Суть опыта:* при замкнутой накоротко вторичной обмотке трансформатора на первичную обмотку подают напряжение сети  $U_1$ , увеличивая его плавно от нуля до значения, при котором ток, протекающий по первичной обмотке трансформатора, возрастает до значения, равного  $I_{1н}$ .

При этом *измеряют:*

- 1) Напряжение  $U_1 = U_k$  на зажимах «А-Х» первичной обмотки трансформатора;
- 2) Ток  $I_1 = I_k$  в цепи первичной обмотки трансформатора;
- 3) Активную мощность  $P_W$  на зажимах «А-Х» первичной обмотки трансформатора.

*Вычисляют:*

- 1) Потери короткого замыкания трансформатора

$$P_k \approx P_W = P_0 + P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2}. \quad (1.57)$$

Пренебрегая потерями мощности  $P_0$ , так как напряжение короткого замыкания  $U_k$  составляет 3 – 10 % от напряжения  $U_{1н}$ ;

- 2) Коэффициент мощности:

$$\cos\varphi_k = \frac{P_k}{U_k I_k}. \quad (1.58)$$

- 3) Сопротивления короткого замыкания трансформатора:

*полное:*

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K}; \quad (1.59)$$

активную составляющую:

$$R_K = \frac{P_K}{I_K^2}; \quad (1.60)$$

реактивную составляющую:

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}. \quad (1.61)$$

4) Напряжения короткого замыкания в процентах:  
полное:

$$u_K = \frac{Z_K I_K}{U_{1H}} 100; \quad (1.62)$$

активную составляющую:

$$u_{Ka} = \frac{R_K I_K}{U_{1H}} 100; \quad (1.63)$$

реактивную составляющую:

$$u_{Kp} = \sqrt{u_K^2 - u_{Ka}^2}. \quad (1.64)$$

Строят зависимости:  $P_K = f(U_K)$ ;  $I_K = f(U_K)$ ;  $\cos \varphi_K = f(U_K)$ ;  $Z_K = f(U_K)$ , характер которых показан на рис. 1.20.

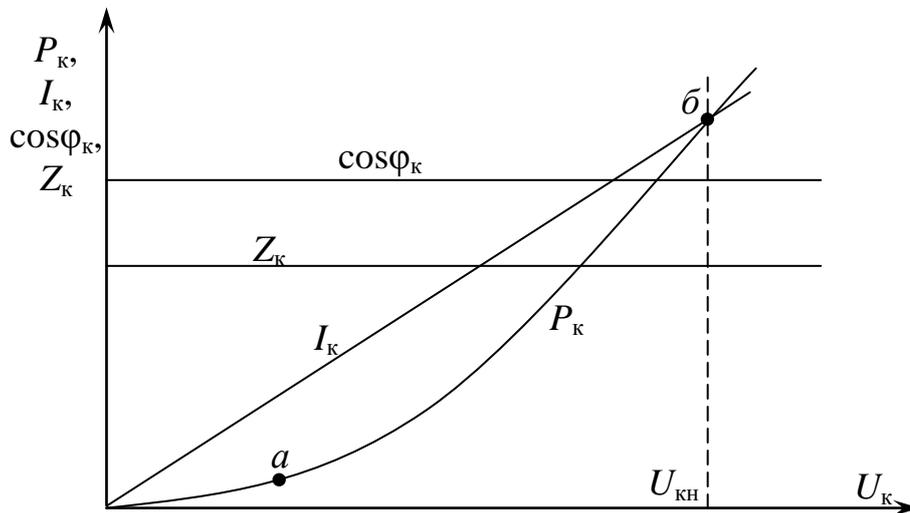


Рис. 1.20. Зависимости величин  $P_K$ ,  $I_K$ ,  $\cos \varphi_K$ ,  $Z_K$

**Примечание.** Температура нагрева обмоток трансформатора в опыте короткого замыкания, как правило, меньше расчетной (допустимой) температуры нагрева, соответствующей классу изоляции обмоток. Поэтому при расчете показателей  $u_K$ ,  $u_{Ka}$ ,  $Z_K$ ,  $R_K$ ,  $P_K$  учитывают температурный коэффициент  $K_T$ .

## 2. Лабораторная работа. «ИСПЫТАНИЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА»

### 2.1. Цель работы

Ознакомиться с конструктивными элементами трансформаторов.

Научиться определять основные эксплуатационные показатели, параметры, схемы замещения трансформатора и освоить построение внешних характеристик по данным опытов короткого замыкания и холостого хода.

### 2.2. Последовательность выполнения работы

1. Ознакомиться с конструктивными элементами однофазного и трехфазного трансформаторов.

Нарисовать сухой однофазный трансформатор. Показать сердечник, обмотки напряжения (ВН и НН) и выводы этих обмоток.

Нарисовать с натуры масляный трехфазный трансформатор. Показать бак, радиатор, маслорасширительный бак с указателем уровня масла в нем, проходные изоляторы ВН и НН. Изложить, как устроены обмотки и сердечник трансформатора. Объяснить назначение трансформаторного масла в трансформаторах.

2. Ознакомиться с паспортными данными однофазных трансформаторов и записать их в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Паспортные данные однофазного трансформатора**

| Тип | Номинальная мощность, $S_n$ , кВ·А | Номинальное напряжение, $U_n$ |                  | Номинальный ток, $I_n$ |                  | Напряжение короткого замыкания, $u_k$ , % | Примечание |
|-----|------------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------------|------------------|---|------------|
|     |                                    | на стороне ВН, В              | на стороне НН, В | на стороне ВН, А       | на стороне НН, А |   |            |
|     |                                    |                               |                  |                        |                  |   |            |

3. Провести опыт холостого хода со стороны обмотки НН.

Собрать схему (рис. 1.16). После проверки схемы преподавателем подключить к сети переменного тока и, пользуясь

регулятором напряжения, установить номинальное напряжение на зажимах обмотки НН трансформатора.

Вычислить коэффициент мощности, коэффициент трансформации и сопротивления намагничивающего контура по формулам (1.54), (1.19) и (1.55).

Результаты измерений и вычислений записать в табл. 2.2.

Таблица 2.2

**К опыту холостого хода**

| Измерено    |          |              |             | Вычислено       |           |           |           |     |
|-------------|----------|--------------|-------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----|
| $U_{10}, В$ | $I_0, А$ | $P_{0н}, Вт$ | $U_{20}, В$ | $\cos\varphi_0$ | $Z_m, Ом$ | $R_m, Ом$ | $X_m, Ом$ | $K$ |
|             |          |              |             |                 |           |           |           |     |

4. Провести опыт короткого замыкания со стороны обмотки ВН трансформатора.

Собрать схему (см. рис. 1.19). После проверки схемы преподавателем плавным повышением напряжения на выходе регулятора напряжения, начиная с нуля, установить номинальный ток в обмотке ВН трансформатора.

Вычислить коэффициент мощности, сопротивления и напряжения короткого замыкания трансформатора по формулам (1.58–1.64).

Результаты измерений и вычислений записать в табл. 2.3.

Таблица 2.3

**К опыту короткого замыкания**

| Измерено    |          |              | Вычислено       |           |           |           |           |              |              |
|-------------|----------|--------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|
| $I_{1н}, А$ | $U_k, В$ | $P_{кн}, Вт$ | $\cos\varphi_k$ | $Z_k, Ом$ | $R_k, Ом$ | $X_k, Ом$ | $u_k, \%$ | $u_{ка}, \%$ | $u_{кр}, \%$ |
|             |          |              |                 |           |           |           |           |              |              |

5. Рассчитать и построить в одной системе координат внешние характеристики трансформатора –  $U_2 = f(\beta)$  при:  $\cos\varphi_2=1$ ;  $\cos\varphi_2=0,7$  (индуктивный);  $\cos\varphi_2=0,7$  (емкостной).

Рассчитывать по формуле (1.44) и данным опыта короткого замыкания трансформатора (табл. 2.3), задавшись коэффициентом загрузки  $\beta = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$ .

Результаты вычислений записать в табл. 2.4.

Таблица 2.4

**К построению внешних характеристик трансформатора  $U_2 = f(\beta)$** 

| Характер нагрузки                       | $\beta$ | $u_{ка} \cos \varphi_2, \%$ | $u_{кр} \sin \varphi_2, \%$ | $\Delta u, \%$ | $\Delta U_2, В$ | $U_2, В$ |
|---|---------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|-----------------|----------|
| $\cos \varphi_2 = 1$ (активный)         | 0       |                             |                             |                |                 |          |
|   | 0,25    |                             |                             |                |                 |          |
|   | 0,5     |                             |                             |                |                 |          |
|   | 0,75    |                             |                             |                |                 |          |
|   | 1,0     |                             |                             |                |                 |          |
| $\cos \varphi_2 = 0,7$<br>(индуктивный) | 0       |                             |                             |                |                 |          |
|   | 0,25    |                             |                             |                |                 |          |
|   | 0,5     |                             |                             |                |                 |          |
|   | 0,75    |                             |                             |                |                 |          |
|   | 1,0     |                             |                             |                |                 |          |
| $\cos \varphi_2 = 0,7$<br>(емкостной)   | 0       |                             |                             |                |                 |          |
|   | 0,25    |                             |                             |                |                 |          |
|   | 0,5     |                             |                             |                |                 |          |
|   | 0,75    |                             |                             |                |                 |          |
|   | 1,0     |                             |                             |                |                 |          |

6. Рассчитать и построить в одной системе координат внешние характеристики трансформатора –  $\Delta U_2 = f(\varphi_2)$  и  $U_2 = f(\varphi_2)$  при  $\beta = 1$ . Рассчитывать по формуле (1.44), задавшись углом сдвига фаз  $\varphi_2 = -90^\circ; -60^\circ; -30^\circ; 0^\circ; +30^\circ; +60^\circ; +90^\circ$ .

Результаты вычислений записать в табл. 2.5.

Таблица 2.5

**К построению внешних характеристик трансформатора**

$$U_2 = f(\varphi_2), \Delta U_2 = f(\varphi_2)$$

| $\varphi_2$ | $\cos \varphi_2$ | $\sin \varphi_2$ | $u_{ка} \cos \varphi_2, \%$ | $u_{кр} \sin \varphi_2, \%$ | $\Delta u, \%$ | $\Delta U_2, В$ | $U_2, В$ |
|-------------|------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|-----------------|----------|
| $-90^\circ$ |                  |                  |                             |                             |                |                 |          |
| $-60^\circ$ |                  |                  |                             |                             |                |                 |          |
| $-30^\circ$ |                  |                  |                             |                             |                |                 |          |
| $0^\circ$   |                  |                  |                             |                             |                |                 |          |
| $+30^\circ$ |                  |                  |                             |                             |                |                 |          |
| $+60^\circ$ |                  |                  |                             |                             |                |                 |          |
| $+90^\circ$ |                  |                  |                             |                             |                |                 |          |

7. Рассчитать и построить в одной системе координат кривые коэффициента полезного действия трансформатора (КПД).

Используя результаты опытов холостого хода и короткого замыкания, рассчитать КПД трансформатора по формуле (1.49), задавшись коэффициентом  $\beta = 0; 0,25; 0,5; \beta_{\text{опт}}; 0,75; 1,0$  при  $\cos\varphi_2 = 1$  и  $\cos\varphi_2 = 0,8$ . Максимум КПД должен быть при  $\beta_{\text{опт}}$ .

$$\beta_{\text{опт}} \text{ рассчитать по формуле } \beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_{0\text{H}}}{P_{\text{кн}}}}.$$

Результаты вычислений записать в табл. 2.6.

Таблица 2.6

### К построению кривых КПД трансформатора $\eta = f(\beta)$

| $\beta$              | $\cos\varphi_2=1$                               |                        |                                      |              | $\cos\varphi_2=0,8$                             |                        |                                      |              |
|----------------------|---|------------------------|--------------------------------------|--------------|---|------------------------|--------------------------------------|--------------|
|                      | $\beta \cdot S_{\text{H}} \cos\varphi_2,$<br>Вт | $P_{0\text{H}},$<br>Вт | $\beta^2 \cdot P_{\text{кн}},$<br>Вт | $\eta,$<br>% | $\beta \cdot S_{\text{H}} \cos\varphi_2,$<br>Вт | $P_{0\text{H}},$<br>Вт | $\beta^2 \cdot P_{\text{кн}},$<br>Вт | $\eta,$<br>% |
| 0                    |   |                        |                                      |              |   |                        |                                      |              |
| 0,25                 |   |                        |                                      |              |   |                        |                                      |              |
| 0,5                  |   |                        |                                      |              |   |                        |                                      |              |
| $\beta_{\text{опт}}$ |   |                        |                                      |              |   |                        |                                      |              |
| 0,75                 |   |                        |                                      |              |   |                        |                                      |              |
| 1,0                  |   |                        |                                      |              |   |                        |                                      |              |

8. Сделать краткие выводы по проделанной работе, указав условия проведения опытов холостого хода и короткого замыкания трансформатора.

### Контрольные вопросы

1. Как проводят опыт холостого хода?
2. Что такое «коэффициент трансформации»?
3. Какие параметры определяют при опыте холостого хода?
4. Какие характеристики строят по данным опыта холостого хода?
5. Как проводят опыт короткого замыкания?
6. Какие параметры определяют при опыте короткого замыкания?
7. Какие характеристики строят по данным опыта короткого замыкания?
8. Как изменяется напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора с увеличением тока при активно-индуктивном характере нагрузки?
9. Как изменяется напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора с увеличением тока при активно-емкостном характере нагрузки?
10. Как изменяется напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора с изменением угла  $\varphi_2$ ?

11. Как изменяется КПД трансформатора при изменении коэффициента загрузки  $0 < \beta < \beta_{\text{опт}}$ ?
12. Как изменяется КПД трансформатора при изменении коэффициента загрузки  $\beta_{\text{опт}} < \beta < 1$ ?

### Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет оформляется в тетради или на листах бумаги формата А4 в рукописном или печатном виде каждым студентом индивидуально. Если студент представляет отчет по лабораторной работе в печатном виде, то **обязательно** наличие и его электронного варианта.

Отчет должен содержать:

1. Цель работы.
2. Рисунок однофазного трансформатора с указанием основных конструктивных элементов.
3. Паспортные данные трансформатора (табл. 2.1).
4. Опыт холостого хода:
  - схема опыта (рис. 1.16);
  - результаты опыта (табл. 2.2);
  - расчетные формулы.
5. Опыт короткого замыкания:
  - схема опыта (рис. 1.19);
  - результаты опыта (табл. 2.3);
  - расчетные формулы.
6. Расчет внешних характеристик трансформатора (табл. 2.4), расчетные формулы.
7. Внешние характеристики трансформатора  $U_2 = f(\beta)$  (рис. 1.12).
8. Расчет внешних характеристик трансформатора (табл. 2.5), расчетные формулы.
9. Внешние характеристики трансформатора  $U_2 = f(\varphi_2)$ ,  $\Delta U_2 = f(\varphi_2)$  (рис. 1.13).
10. Расчет характеристик КПД (табл. 2.6), расчетные формулы.
11. Характеристики КПД трансформатора  $\eta = f(\beta)$  (рис. 1.15).

### 3. Расчетно-графическая работа «ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА»

Известны следующие технические данные трехфазного трансформатора (табл. 3.1).

1. Число фаз,  $m = 3$ .
2. Схема и группа соединения обмоток трансформатора.
3. Номинальная полная мощность,  $S_H$ .
4. Номинальное линейное напряжение обмотки ВН,  $U_{ЛН(ВН)}$ .
5. Номинальное линейное напряжение обмотки НН,  $U_{ЛН(НН)}$ .
6. Потери холостого хода,  $P_{0H}$ .
7. Потери короткого замыкания,  $P_{кH}$ .
8. Напряжение короткого замыкания,  $u_k$ .
9. Ток холостого хода,  $i_0$ .
10. Расчетная температура обмоток трансформатора,  $\Theta = 75$  °С.
11. Сопротивление нагрузки,  $Z_{нагр}$ .
12. Коэффициент нагрузки (индуктивный),  $\cos\phi$ .

**По известным паспортным данным необходимо сделать следующие расчеты и построения:**

1. Начертите схему соединения обмоток трансформатора заданной группы и постройте векторную диаграмму ЭДС для доказательства того, что начерченная Вами, схема соответствует данной группе.

2. На схеме соединения обмоток трансформатора покажите линейные и фазные напряжения и токи.

3. Определите номинальные фазные значения напряжений и токов обмоток ВН и НН:  $U_{1H}$ ,  $U_{2H}$ ,  $I_{1H}$ ,  $I_{2H}$ . Укажите, какие фазные напряжения и токи Вы приняли за первичные и какие – за вторичные.

4. Рассчитайте коэффициент трансформации  $K$ .

5. Определите параметры Т-образной электрической схемы замещения трансформатора:  $R_m$ ,  $X_m$ ,  $R_1$ ,  $R'_2$ ,  $X_1$ ,  $X'_2$  (при расчете полагать  $R_1 = R'_2$  и  $X_1 = X'_2$ ). Начертите Т-образную схему замещения с указанием численных значений всех параметров и электрических величин.

6. Рассчитайте параметры основного треугольника короткого замыкания  $u_k$  %,  $u_{ка}$  %,  $u_{кр}$  % и начертите основной треугольник короткого замыкания.

## Исходные данные к расчетно-графической работе

| Номер варианта | Схема ВН/НН            | $S_n$ , кВ·А | $U_{ЛН(ВН)}$ , кВ | $U_{ЛН(НН)}$ , кВ | $P_{0н}$ , Вт | $P_{кн}$ , Вт | $u_k$ , % | $i_0$ , % | $Z_{нагр}$ , Ом | $\cos\varphi_{нагр}$ |
|----------------|------------------------|--------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------------|----------------------|
| 0              | Y/Y <sub>n</sub> – 0   | 250          | 6                 | 0,23              | 660           | 3700          | 4,5       | 4,0       | 0,265           | 0,8                  |
| 1              | Δ/ Y <sub>n</sub> – 11 | 250          | 10                | 0,69              | 660           | 4200          | 4,7       | 4,0       | 2,4             | 0,85                 |
| 2              | Y/Δ – 11               | 400          | 10                | 0,23              | 920           | 5500          | 4,5       | 3,5       | 0,495           | 0,8                  |
| 3              | Δ/ Y <sub>n</sub> – 11 | 400          | 6                 | 0,69              | 920           | 5900          | 4,5       | 3,5       | 1,5             | 0,85                 |
| 4              | Y/Y <sub>n</sub> – 0   | 630          | 10                | 0,4               | 1310          | 7600          | 5,5       | 3,0       | 0,315           | 0,8                  |
| 5              | Δ/ Y <sub>n</sub> – 11 | 630          | 6                 | 0,69              | 1310          | 8500          | 5,5       | 3,0       | 0,95            | 0,85                 |
| 6              | Y/Δ – 11               | 200          | 6                 | 0,4               | 875           | 2535          | 2,8       | 2,5       | 3,0             | 0,8                  |
| 7              | Y/Y <sub>n</sub> – 0   | 200          | 6                 | 0,69              | 875           | 2535          | 2,8       | 2,5       | 3,0             | 0,85                 |
| 8              | Y/Δ – 11               | 250          | 6                 | 0,4               | 740           | 3350          | 3,4       | 2,3       | 2,4             | 0,8                  |
| 9              | Y/Y <sub>n</sub> – 0   | 250          | 6                 | 0,69              | 740           | 3350          | 3,4       | 2,3       | 2,4             | 0,75                 |
| 10             | Y/Δ – 11               | 400          | 6                 | 0,4               | 2180          | 3700          | 3,5       | 2,1       | 1,5             | 0,8                  |
| 11             | Y/Y <sub>n</sub> – 0   | 400          | 6                 | 0,69              | 2180          | 3700          | 3,5       | 2,1       | 1,5             | 0,75                 |
| 12             | Y/Δ – 11               | 630          | 6                 | 0,4               | 1560          | 8500          | 5,5       | 2,0       | 0,949           | 0,8                  |
| 13             | Y/Y <sub>n</sub> – 0   | 630          | 6                 | 0,69              | 1560          | 8500          | 5,5       | 2,0       | 0,95            | 0,75                 |
| 14             | Y/Δ – 11               | 320          | 6                 | 0,4               | 1675          | 2630          | 2,5       | 2,2       | 1,85            | 0,8                  |
| 15             | Y/Y <sub>n</sub> – 0   | 320          | 6                 | 0,69              | 1675          | 2630          | 2,5       | 2,2       | 1,875           | 0,7                  |
| 16             | Y/Y <sub>n</sub> – 0   | 630          | 35                | 0,69              | 1900          | 7600          | 6,5       | 2,0       | 0,95            | 0,7                  |
| 17             | Y/Δ – 11               | 630          | 35                | 0,4               | 1900          | 7600          | 6,5       | 2,0       | 0,948           | 0,65                 |
| 18             | Y/Y <sub>n</sub> – 0   | 400          | 35                | 0,69              | 1350          | 5500          | 6,5       | 2,1       | 1,5             | 0,7                  |
| 19             | Y/Δ – 11               | 400          | 35                | 0,4               | 1350          | 5500          | 6,5       | 2,1       | 1,866           | 0,65                 |
| 20             | Y/Y <sub>n</sub> – 0   | 250          | 35                | 0,69              | 1000          | 3700          | 6,5       | 2,3       | 2,4             | 0,7                  |
| 21             | Y/Δ – 11               | 250          | 35                | 0,4               | 1000          | 3700          | 6,5       | 2,3       | 2,385           | 0,65                 |
| 22             | Y/Y <sub>n</sub> – 0   | 160          | 35                | 0,69              | 700           | 2650          | 6,5       | 2,4       | 3,75            | 0,8                  |
| 23             | Y/Δ – 11               | 160          | 35                | 0,4               | 700           | 2650          | 6,5       | 2,4       | 4,16            | 0,7                  |
| 24             | Y/Y <sub>n</sub> – 0   | 100          | 35                | 0,69              | 465           | 1970          | 6,5       | 2,6       | 6,0             | 0,8                  |

7. Переведите все параметры Т-образной схемы замещения в относительные единицы (о. е.).

8. Определите истинные значения сопротивлений обмотки НН при температуре  $\theta = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $R_2$ ,  $X_2$  и истинные значения активных сопротивлений обмоток ВН и НН при температуре  $V = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $R_1$  и  $R_2$ . При расчете считать, что обмотки выполнены из медного провода. Указать, будут ли изменяться значения индуктивных сопротивлений при измерении температуры обмоток.

9. Составьте упрощенную электрическую схему замещения трансформатора и определите фазные значения тока  $I_2$  и напряжения  $U_2$  при включении во вторичную цепь обмотки НН нагрузки  $Z_{\text{нагр}}$  ( $\cos\varphi_{\text{нагр}}$  (инд)). При расчете определите в комплексной форме приведенные значения тока  $-I'_2$  и  $-U'_2$ , а затем их действующие значения  $I'_2$  и  $U'_2$ . От значений  $I'_2$  и  $U'_2$  перейдите к истинным значениям  $I_2$  и  $U_2$ . Повторите расчет при  $Z_{\text{нагр}}$  ( $\cos\varphi_{\text{нагр}}$  (емк)).

10. Определите значения коэффициента нагрузки  $\beta$  при включении во вторичную цепь обмотки НН сопротивления  $Z_{\text{нагр}}$  ( $\cos\varphi_{\text{нагр}}$  (инд)) и оптимальное значение коэффициента нагрузки трансформатора  $\beta_{\text{опт}}$ .

11. Ввиду того, что коэффициент мощности  $\cos\varphi_2$  предприятия, согласно действующему стандарту, должен находиться в пределах  $0,92 - 0,95$ , нужно рассчитать емкость батареи статических конденсаторов, которую необходимо подключить к вторичной обмотке НН трансформатора, чтобы достичь уровня коэффициента мощности  $0,95$  при нагрузке  $Z_{\text{нагр}}$  ( $\cos\varphi_{\text{нагр}}$  (инд)). Кратко поясните, почему стандарт устанавливает значения коэффициента мощности предприятия на уровне  $0,92 - 0,95$ , т. е. близким к единице, и почему экономически не выгодна эксплуатация электрооборудования с низким значением коэффициента мощности. Рассчитайте, во сколько раз уменьшается ток  $I_1$  и электрические потери  $\Delta p_3$  во всех звеньях линии электропередачи (ЛЭП) при включении батареи конденсаторов. Определите реактивную мощность конденсаторной батареи  $Q_C$  при  $U_2 = U_{2\text{н}}$ . Расчеты должны быть проиллюстрированы электрической схемой замещения и диаграммой проводимостей на комплексной плоскости.

12. Рассчитайте изменения вторичных напряжений и значения вторичных напряжений при включении во вторичную цепь обмотки  $Z_{\text{нагр}} (\cos\varphi_{\text{нагр}} (\text{инд}))$  и  $Z_{\text{нагр}} (\cos\varphi_{\text{нагр}} (\text{емк}))$ .

13. Определите КПД трансформатора:

13.1. при включении во вторичную цепь обмотки НН нагрузки  $Z_{\text{нагр}} (\cos\varphi_{\text{нагр}} (\text{емк}))$ ;

13.2. при оптимальном коэффициенте нагрузки  $\beta_{\text{опт}}$  и коэффициенте мощности  $\cos\varphi_2 = 0,95$  (инд).

Сравните полученные в пунктах 13.1. и 13.2. значения КПД и сделайте вывод о том, при каких коэффициентах нагрузки и коэффициенте мощности экономически более целесообразна эксплуатация трансформатора.

14. При заданных коэффициентах мощности нагрузки ( $\cos\varphi_{\text{нагр}} (\text{инд})$  и  $\cos\varphi_{\text{нагр}} (\text{емк})$ ) постройте следующие графики:

– внешние характеристики  $U_2 = f(\beta)$  при  $U_{1\text{H}} = \text{const}$  и при  $\varphi_2 > 0$  и  $\varphi_2 < 0$  (если ( $\cos\varphi_{\text{нагр}} (\text{инд})$ ), то  $\varphi_2 > 0$ , а если ( $\cos\varphi_{\text{нагр}} (\text{емк})$ ), то  $\varphi_2 < 0$ );

– зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки  $\eta = f(\beta)$  при  $U_{1\text{H}} = \text{const}$ ,  $\Delta U = 0$ , т. е.  $U_2 = U_{2\text{H}} = \text{const}$ .

Построить зависимость  $\eta = f(\beta)$  с достаточной точностью можно по следующим точкам: 0; 0,3  $\beta_{\text{опт}}$ ; 0,6  $\beta_{\text{опт}}$ ;  $\beta_{\text{опт}}$ ; 1,0; 1,2.

### **Методические указания для выполнения расчетно-графической работы**

1. Начертите схему соединения обмоток трансформатора заданной группы и постройте векторную диаграмму ЭДС для доказательства того, что начерченная Вами схема соответствует данной группе.

2. На схеме соединения обмоток трансформатора покажите линейные и фазные напряжения и токи.

3. Номинальные значения токов и напряжений обмоток ВН и НН.

– Номинальное напряжение обмотки ВН,  $U_{1\text{H}} = \frac{U_{\text{ЛН(ВН)}}}{\sqrt{3}}$ , В;

– Номинальное напряжение обмотки НН,  $U_{2\text{H}} = \frac{U_{\text{ЛН(НН)}}}{\sqrt{3}}$ , В;

- Номинальный ток обмотки ВН,  $I_{1Н} = \frac{S_H}{m \cdot U_{1Н}}$ , А;
- Номинальный ток обмотки НН,  $I_{2Н} = \frac{S_H}{m \cdot U_{2Н}}$ , А.

4. Коэффициент трансформации,  $K = \frac{U_{1Н}}{U_{2Н}}$ .

5. Расчет параметров Т-образной схемы замещения фазы трансформатора.

Т-образная схема замещения фазы трансформатора приведена на рис. 1.10.

- Ток холостого хода,  $I_0 = \frac{i_0 \cdot I_{1Н}}{100}$ , А;
- Активное сопротивление магнитопровода,  $r_m = \frac{P_{0Н}}{m \cdot I_0^2}$ , Ом;
- Полное сопротивление магнитопровода,  $z_m = \frac{U_{1Н}}{I_0}$ , Ом;
- Индуктивное сопротивление магнитопровода,  $X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}$ , Ом;
- Напряжение короткого замыкания,  $U_{кН} = \frac{u_k \cdot U_{1Н}}{100}$ , В;
- Полное сопротивление короткого замыкания,  $Z_k = \frac{U_{кН}}{I_{1Н}}$ , Ом;
- Активное сопротивление короткого замыкания,  $R_k = \frac{P_{кН}}{m \cdot I_{1Н}^2}$ , Ом;
- Индуктивное сопротивление короткого замыкания,  $X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$ , Ом;
- Активное сопротивление обмотки ВН и приведенное активное сопротивление обмотки НН,  $R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2}$ , Ом;
- Индуктивное сопротивление обмотки ВН и приведенное индуктивное сопротивление обмотки НН,  $X_1 = X'_2 = \frac{X_k}{2}$ , Ом;

– Активное сопротивление нагрузки,  $R_{\text{нагр}} = Z_{\text{нагр}} \cdot \cos \varphi_{\text{нагр}}$ , Ом;

– Реактивное сопротивление нагрузки,  $X_{\text{нагр}} = \sqrt{Z_{\text{нагр}}^2 - R_{\text{нагр}}^2}$ , Ом;

– Полное сопротивление нагрузки в комплексной форме,  $Z_{\text{нагр}} = R_{\text{нагр}} + jX_{\text{нагр}}$ , Ом;

– Полное приведенное сопротивление нагрузки в комплексной форме

$$Z'_{\text{нагр}} = Z_{\text{нагр}} \cdot K^2 = R'_{\text{нагр}} + jX'_{\text{нагр}} = R_{\text{нагр}} \cdot K^2 + jX_{\text{нагр}} \cdot K^2, \text{ Ом.}$$

6. Параметры основного треугольника короткого замыкания:

– Активное напряжение короткого замыкания,

$$u_{\text{ка}} = \frac{R_{\text{к}} \cdot I_{1\text{н}} \cdot 100}{U_{1\text{н}}}, \text{ \%};$$

– Реактивное напряжение короткого замыкания,

$$u_{\text{кр}} = \frac{X_{\text{к}} \cdot I_{1\text{н}} \cdot 100}{U_{1\text{н}}}, \text{ \%};$$

– Полное напряжение короткого замыкания,  $u_{\text{к}} = \frac{Z_{\text{к}} \cdot I_{1\text{н}} \cdot 100}{U_{1\text{н}}}, \text{ \%};$

$$\text{Проверка: } u_{\text{к}} = \sqrt{u_{\text{ка}}^2 + u_{\text{кр}}^2}, \text{ \%}.$$

По данным расчетов построить в масштабе основной треугольник напряжений короткого замыкания.

7. Расчет параметров T-образной схемы замещения фазы трансформатора в относительных единицах.

– Активное сопротивление магнитопровода в относительных единицах,  $R_{m^*} = \frac{R_m \cdot I_{1\text{н}}}{U_{1\text{н}}}$ , о. е.;

– Реактивное сопротивление магнитопровода в относительных единицах,  $X_{m^*} = \frac{X_m \cdot I_{1\text{н}}}{U_{1\text{н}}}$ , о. е.;

– Активное сопротивление первичной и приведенное активное сопротивление вторичной обмоток в относительных единицах,

$$R_{1*} = R'_{2*} = \frac{R_1 \cdot I_{1H}}{U_{1H}}, \text{ о. е.};$$

– Реактивное сопротивление первичной и приведенное реактивное сопротивление вторичной обмоток в относительных

$$\text{единицах, } X_{1*} = X'_{2*} = \frac{X_1 \cdot I_{1H}}{U_{1H}}, \text{ о. е.};$$

– Активное приведенное сопротивление нагрузки в относительных единицах,  $R'_{\text{нагр}*} = \frac{R'_{\text{нагр}} \cdot I_{1H}}{U_{1H}}, \text{ о. е.};$

– Реактивное приведенное сопротивление нагрузки в относительных единицах,  $X'_{\text{нагр}*} = \frac{X'_{\text{нагр}} \cdot I_{1H}}{U_{1H}}, \text{ о. е.};$

– Полное приведенное сопротивление нагрузки в относительных единицах,  $Z'_{\text{нагр}*} = R'_{\text{нагр}*} + jX'_{\text{нагр}*}, \text{ о. е.}$

## 8. Значения сопротивлений обмоток при температуре 20 °С.

От температуры зависят только активные составляющие сопротивлений, реактивные составляющие сопротивлений от температуры не зависят.

Температурная постоянная для меди  $T = 235 \text{ °С}$ .

Определяем сопротивления обмоток при  $\nu = 20 \text{ °С}$ ;

Заданная температура  $\theta = 75 \text{ °С}$ .

– Активное сопротивление первичной обмотки при  $\nu = 20 \text{ °С}$

$$R_{1(20)} = R_{1(75)} \frac{T + \nu}{T + \theta}, \text{ Ом.}$$

– Истинные значения сопротивлений обмотки НН

$$R_{2(75)} = R'_{2(75)} \frac{1}{K^2}, \text{ Ом};$$

$$X_{2(75)} = X'_{2(75)} \frac{1}{K^2}, \text{ Ом.}$$

– Активное сопротивление вторичной обмотки при  $\nu = 20 \text{ °С}$

$$R_{2(20)} = R_{2(75)} \frac{T + \upsilon}{T + \theta}, \text{ Ом.}$$

## 9. Параметры упрощенной схемы замещения фазы трансформатора.

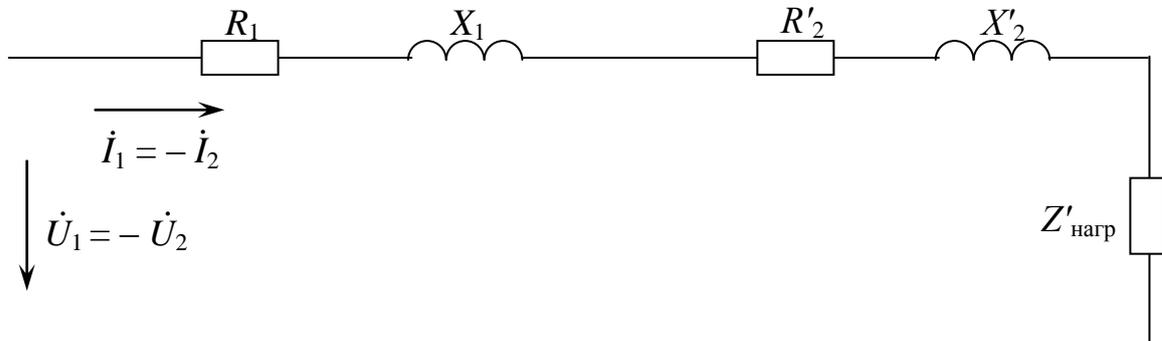


Рис. 3.1. Упрощенная схема замещения фазы трансформатора

### 9.1. Параметры упрощенной схемы замещения фазы трансформатора при индуктивном характере нагрузки.

Ток первичной обмотки в комплексной форме

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 = \frac{\dot{U}_{1Н}}{\underline{Z}_K + \underline{Z}'_{нагр}} = \frac{\dot{U}_{1Н}}{R_K + jX_K + R'_{нагр} + jX'_{нагр}}, \text{ А.}$$

Ток в первичной обмотке,  $I_1 = -I'_2 = \sqrt{I'^2_{2a} + I'^2_{2p}}$ , А.

Ток вторичной обмотке,  $I_2 = K \cdot I'_2$ , А.

Напряжение вторичной обмотки в комплексной форме, приведенное к первичной обмотке,  $-\dot{U}'_2 = \underline{Z}'_{нагр} \cdot \dot{I}_1$ , В.

Напряжение вторичной обмотки приведенное к первичной обмотке,  $U'_2 = \sqrt{U'^2_{2a} + U'^2_{2p}}$ , В.

Напряжение вторичной обмотки,  $U_2 = U'_2 \cdot \frac{1}{K}$ , В.

### 9.2. Параметры упрощенной схемы замещения фазы трансформатора при емкостном характере нагрузки.

Расчет упрощенной схемы замещения фазы трансформатора при емкостном характере нагрузки аналогичен расчету при индуктивном характере нагрузки. Необходимо учесть, что  $X'_{нагр}$  имеет отрицательное значение

$$I_1 = -I'_2 = \frac{\dot{U}_{1Н}}{\underline{Z}_к + \underline{Z}'_{нагр}} = \frac{\dot{U}_{1Н}}{R_к + jX_к + R'_{нагр} - jX'_{нагр}}, \text{А.}$$

10. Значения коэффициентов загрузки трансформатора.

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2Н}}.$$

Значение оптимального коэффициента загрузки трансформатора

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_{0Н}}{P_{кН}}}.$$

11. Расчет параметров батарей статических конденсаторов.

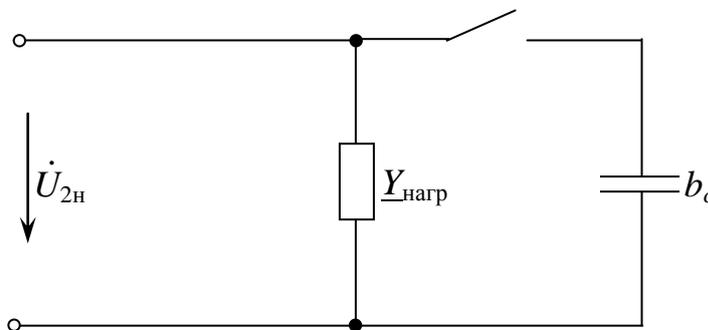


Рис. 3.2. Принципиальная электрическая схема включения батареи статических конденсаторов в цепь вторичной обмотки

Полная проводимость нагрузки,  $Y_{нагр} = \frac{1}{Z_{нагр}}$ , См;

Емкостная проводимость батарей статических конденсаторов для условия:  $\cos\varphi_{нагр} = 0,95$ :  $b_c = b_l - g_l \text{tg}(\arccos 0,95)$ , См.

Емкость батарей статических конденсаторов,  $C = \frac{b_c}{2\pi \cdot f}$ , мкФ.

Полная проводимость нагрузки с учетом батарей статических конденсаторов,  $Y_{нагр}^c = Y_{нагр} + jb_c$ , См.

Модули проводимостей нагрузки с учетом батарей статических конденсаторов и без них  $Y_{нагр} = \sqrt{g_l^2 + b_l^2}$ , См;  $Y_{нагр}^c = \sqrt{g_l^2 + (b_l^c)^2}$ , См.

Соотношение электрических потерь мощности после установки

$$\text{батарей статических конденсаторов } \frac{\Delta p_{\Sigma}^c}{\Delta p_{\Sigma}} = \left( \frac{Y_{\text{нагр}}^c}{Y_{\text{нагр}}} \right)^2.$$

Соотношение токов нагрузки после установки батарей

$$\text{статических конденсаторов } \frac{I_2^c}{I_2} = \frac{Y_{\text{нагр}}^c}{Y_{\text{нагр}}}.$$

Реактивная мощность батарей статических конденсаторов:

$$Q_c = m \cdot b_c \cdot U_{2H}^2, \text{ ВАр.}$$

По приведенным расчетам видно, что при оптимальном  $\cos \varphi = 0,95$ , уменьшается полная проводимость цепи, соответственно полный ток цепи, также потери в ЛЭП, что экономически целесообразно при конструировании ЛЭП. Поэтому стандарт регламентирует поддерживать  $\cos \varphi$  близким к единице.

Построить векторную диаграмму проводимостей нагрузки до и после установки батарей статических конденсаторов.

## 12. Изменение вторичного напряжения.

12.1. При включении во вторичную цепь нагрузки индуктивного характера:

$$\Delta U_2' = \beta(R_K \cdot I_{1H} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot I_{1H} \cdot \sin \varphi), \text{ В;}$$

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta U_2'}{K}, \text{ В;}$$

$$U_2 = U_{2H} - \Delta U_2, \text{ В.}$$

12.2. При включении во вторичную цепь нагрузки емкостного характера расчет аналогичен, но необходимо учесть, что  $\sin \varphi_{\text{нагр}}$  отрицательный:

$$\Delta U_2' = \beta(R_K \cdot I_{1H} \cdot \cos \varphi - X_K \cdot I_{1H} \cdot \sin \varphi), \text{ В.}$$

## 13. Значения КПД трансформатора.

13.1. При включении во вторичную цепь нагрузки

$$\eta = 1 - \frac{P_{0H} + \beta^2 \cdot P_{KH}}{\beta \cdot S_H \cos \varphi + P_{0H} + \beta^2 \cdot P_{KH}}, \text{ о. е.}$$

13.2. При оптимальном коэффициенте загрузки  $\beta_{\text{опт}}$  и коэффициенте мощности  $\cos \varphi = 0,95$  расчет аналогичен п. 13.1 при подстановке соответствующих  $\beta_{\text{опт}}$  и  $\cos \varphi$ .

Сделать вывод как изменяется КПД при изменении реальных условий нагрузки на оптимальные.

14. Построение внешних характеристик трансформатора и характеристик КПД для двух условий эксплуатации.

Для построений внешних характеристик (см. рис. 1.12) используем данные, полученные при расчете в п. 12.

Для построения характеристик КПД используем формулу

$$\eta = 1 - \frac{P_{0H} + \beta^2 \cdot P_{кН}}{\beta \cdot S_H \cos \varphi + P_{0H} + \beta^2 \cdot P_{кН}}$$
, подставляя в эту формулу определенные значения  $\cos \varphi$  и  $\beta$ , результаты сводим в табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Данные для построения характеристик КПД**

| $\beta$               | 0 | $0,3 \beta_{\text{опт}}$ | $0,6 \beta_{\text{опт}}$ | $\beta_{\text{опт}}$ | 1 | 1,2 |
|-----------------------|---|--------------------------|--------------------------|----------------------|---|-----|
| $\cos \varphi$        |   |                          |                          |                      |   |     |
| $\cos \varphi = 0,95$ |   |                          |                          |                      |   |     |