

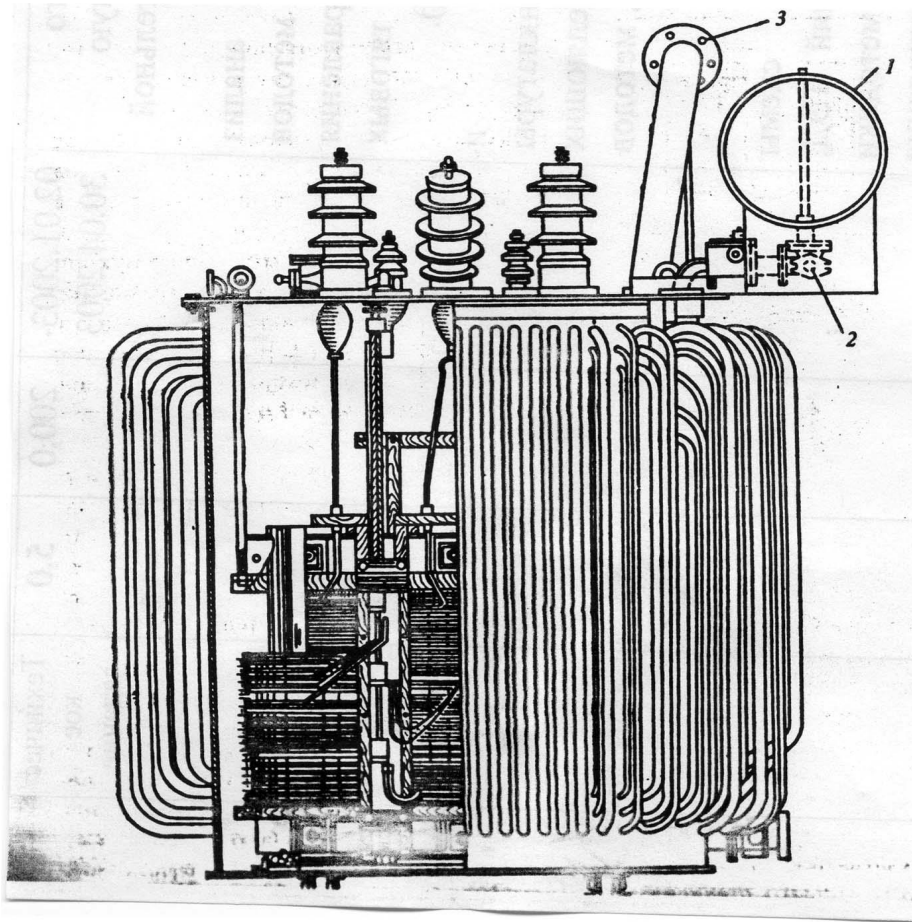
Электрические машины

- Цикл лекций в курсе «Электрические машины»
- *Электрическая машина* представляет собой электромеханическое устройство, осуществляющее взаимное преобразование механической и электрической энергий.

Содержание

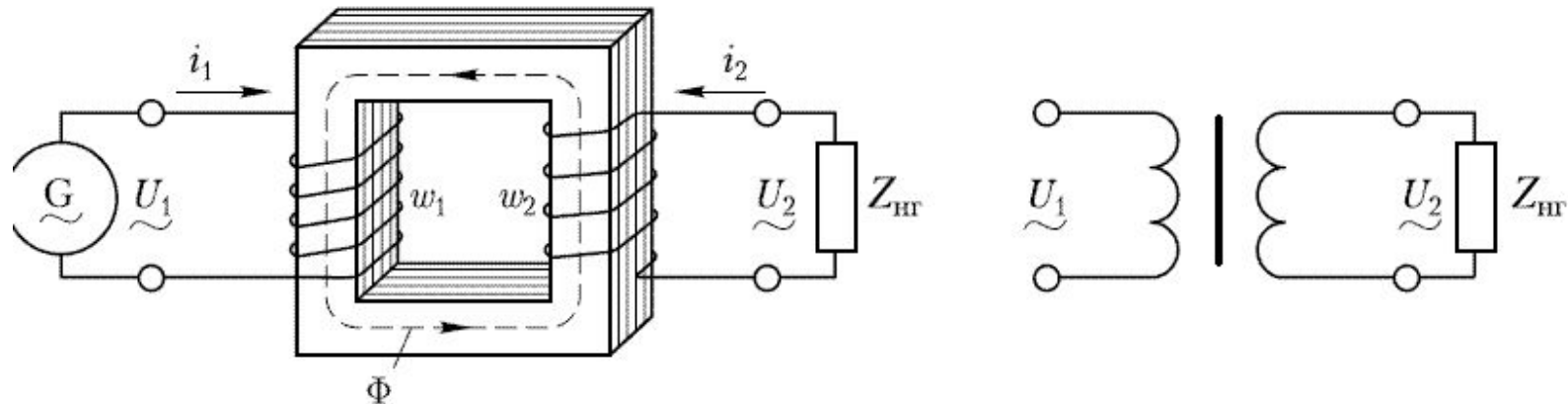
- Принцип действия трансформатора
- Устройство трансформаторов
- Схема замещения и основные уравнения
- Опыт холостого хода
- Опыт короткого замыкания

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две (или более) индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования посредством явления электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.



Трансформатор – это
статический
электромагнитный
преобразователь напряжения
переменного тока.

Принцип действия трансформатора



Простейший силовой трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника), выполненного из ферромагнитного материала (обычно листовая электротехническая сталь), и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода. Одна из обмоток, которую называют *первичной*, присоединена к источнику переменного тока (генератору) на напряжение U_1 . К другой обмотке, называемой *вторичной*, подключен потребитель $Z_{\text{нп}}$. Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток, который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток. Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток сцепляется с обеими обмотками (первичной и вторичной) и индуцирует в них ЭДС:

в первичной обмотке — ЭДС *самоиндукции*, e_1

а во вторичной обмотке — ЭДС *взаимоиндукции* e_2

При подключении нагрузки $Z_{\text{нп}}$ к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием ЭДС e_2 в цепи этой обмотки создается ток i_2 , а на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение U_2 .

Принцип действия трансформатора

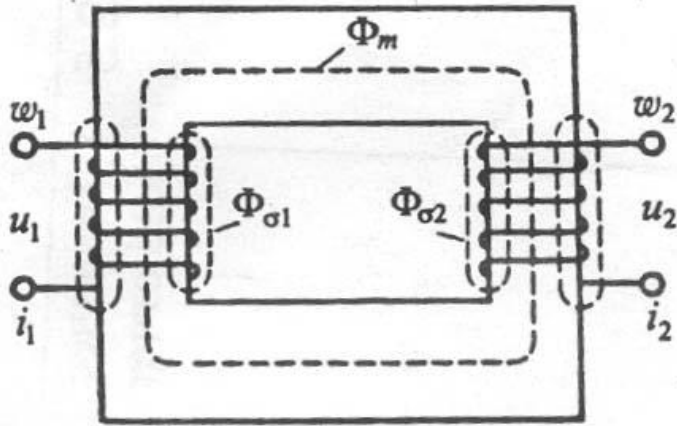


Схема однофазного трансформатора

$$\Phi = \Phi_m * \sin \omega t$$

$$u_1 = -e_1 = -\frac{d\Psi}{dt} = -w_1 * \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = w_1 \omega \Phi_m \cos \omega t$$

$$u_2 = -e_2 = -\frac{d\Psi}{dt} = -w_2 * \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = w_2 \omega \Phi_m \cos \omega t$$

$$E_1 = \frac{w_1 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi w_1 \Phi_m f = 4,44 f w_1 \Phi_m$$

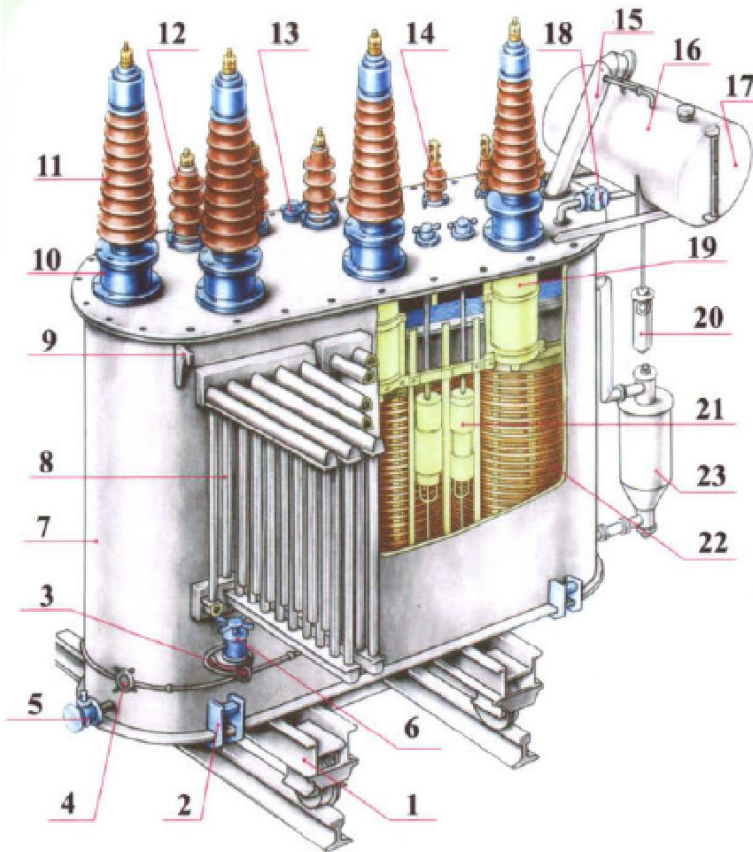
$$E_2 = \frac{w_2 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi w_2 \Phi_m f = 4,44 f w_2 \Phi_m$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

Устройство трансформатора

Трехфазный трехобмоточный трансформатор ТДТГ - 16000/110



- Современный трансформатор состоит из различных конструктивных элементов: магнитопровода, обмоток, вводов, бака и др. Магнитопровод с расположенными на его стержнях обмотками составляет *активную часть* трансформатора. Остальные элементы трансформатора называют *неактивными* (вспомогательными) частями.

Магнитопровод

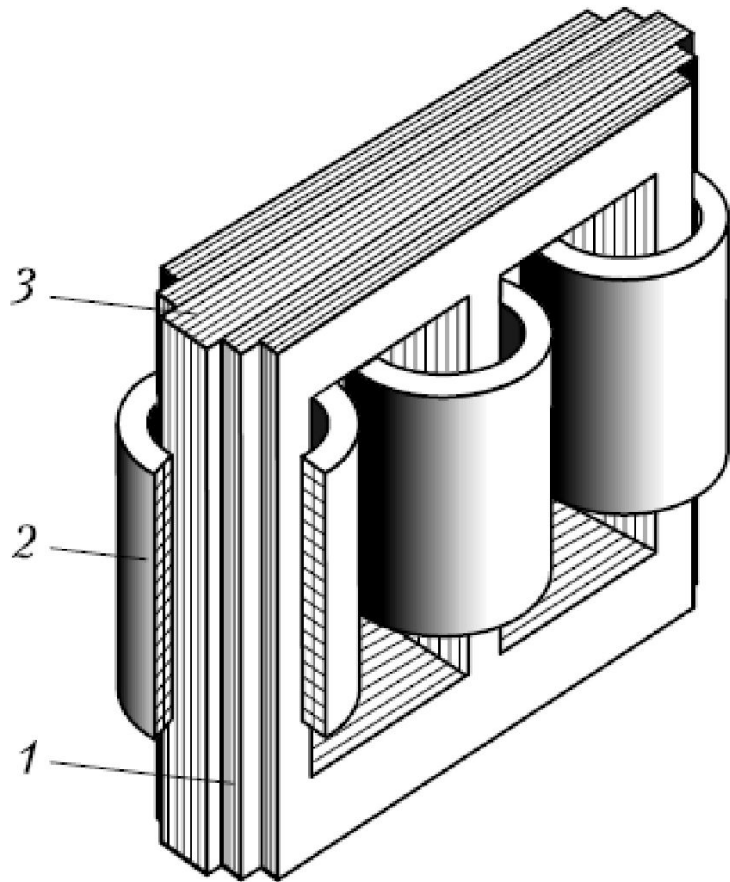
Функции: магнитопровода

- составляет магнитную цепь, по которой замыкается основной магнитный поток трансформатора,
- предназначен для установки и крепления обмоток, отводов, переключателей.

Магнитопровод имеет шихтованную конструкцию, т. е. он состоит из тонких (обычно толщиной , 0,5 мм) пластин электротехнической стали, по крытых с двух сторон изолирующей пленкой (например, лаком). Такая конструкция магнитопровода обусловлена стремлением ослабить вихревые токи, наводимые в нем переменным магнитным потоком, а следовательно, уменьшить величину потерь энергии в трансформаторе.

- Силовые трансформаторы выполняют с магнитопроводами трех типов:
- Стержневого
- броневого
- бронестержневого

Магнитопровод стержневого типа

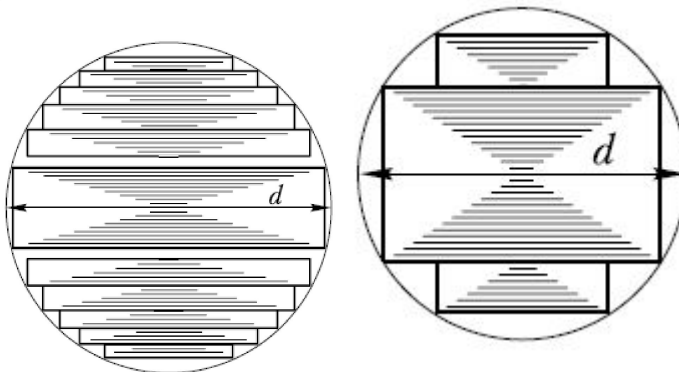


1- вертикальные стержни 1,

2- обмотки

3- ярмо,

. На каждом стержне расположены обмотки соответствующей фазы и проходит магнитный поток этой фазы. Стержни имеют ступенчатое сечение, вписываемое в круг диаметром d . Стержни трансформаторов большой мощности имеют много ступеней, что обеспечивает лучшее заполнение сталью площади внутри обмотки. Для лучшей теплоотдачи иногда между отдельными пакетами стержня ставят воздушные зазоры шириной 5—6 мм, служащие вентиляционными каналами.



Конструкция стержневых магнитопроводов

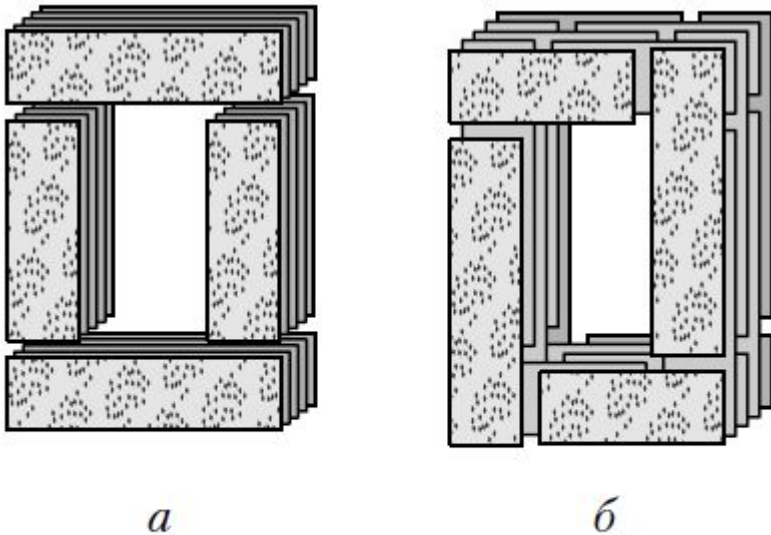
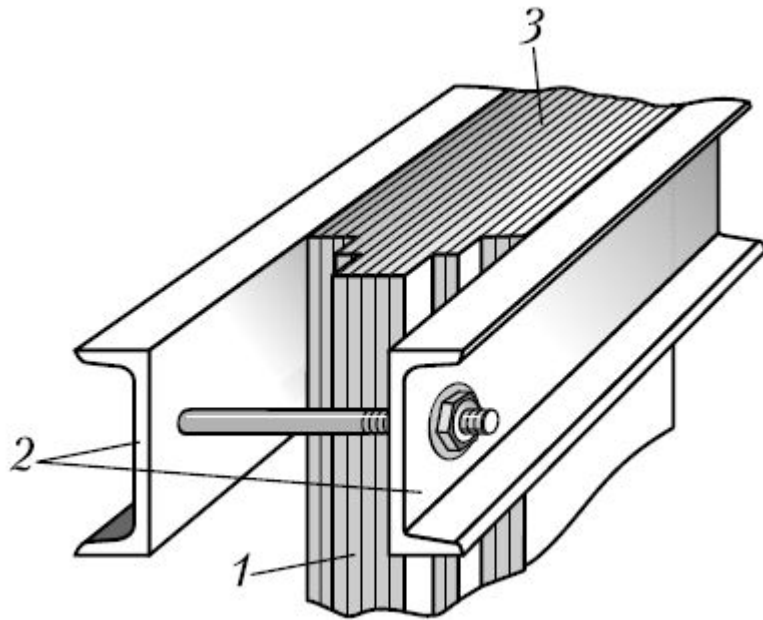


Рис. Стыковая (а) и шихтованная (б) конструкции магнитопроводов

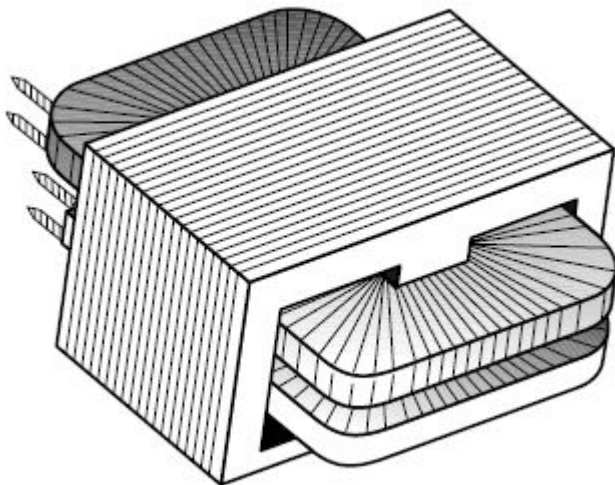
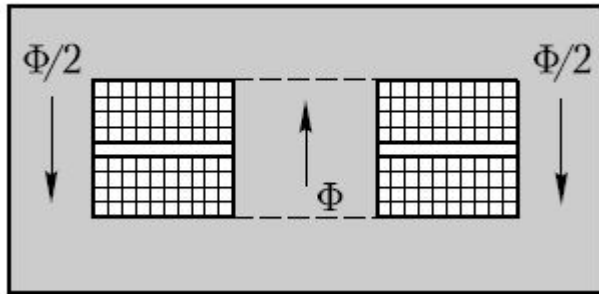
- По способу сочленения стержней с ярмами различают стыковую и шихтованную конструкции стержневого магнитопровода
- Стыковая конструкция хотя и облегчает сборку магнитопровода, но не получила распространения в силовых трансформаторах из-за громоздкости стяжных устройств и необходимости механической обработки стыкующихся поверхностей для уменьшения магнитного сопротивления в месте стыка.
- Недостатком магнитопроводов шихтованной конструкции является некоторая сложность сборки, так как для насадки обмоток на стержни приходится расшихтовывать верхнее ярмо, а затем после насадки обмоток вновь его зашихтовывать.

Опрессовка ярма



Стержни магнитопроводов во избежание распухания опрессовывают (скрепляют). Делают это наложением на стержень бандаж из стеклоленты или стальной проволоки. Стальной бандаж выполняют с изолирующей пряжкой, что исключает создание замкнутых стальных витков на стержнях. Бандаж накладывают равномерно, с определенным натягом. Для опрессовки ярм 3 и мест их сочленения со стержнями 1 используют ярмовые балки 2, которые в местах, выходящих за крайние стержни, стягивают шпильками.

Магнитопровод броневое типа



представляет собой разветвленную конструкцию со стержнем и ярмами, частично прикрывающими («бронирующими») обмотки. Магнитный поток в стержне магнитопровода броневого типа в два раза больше, чем в ярмах, каждое из которых имеет сечение, вдвое меньшее сечения стержня.

Магнитопроводы бронестержневого типа

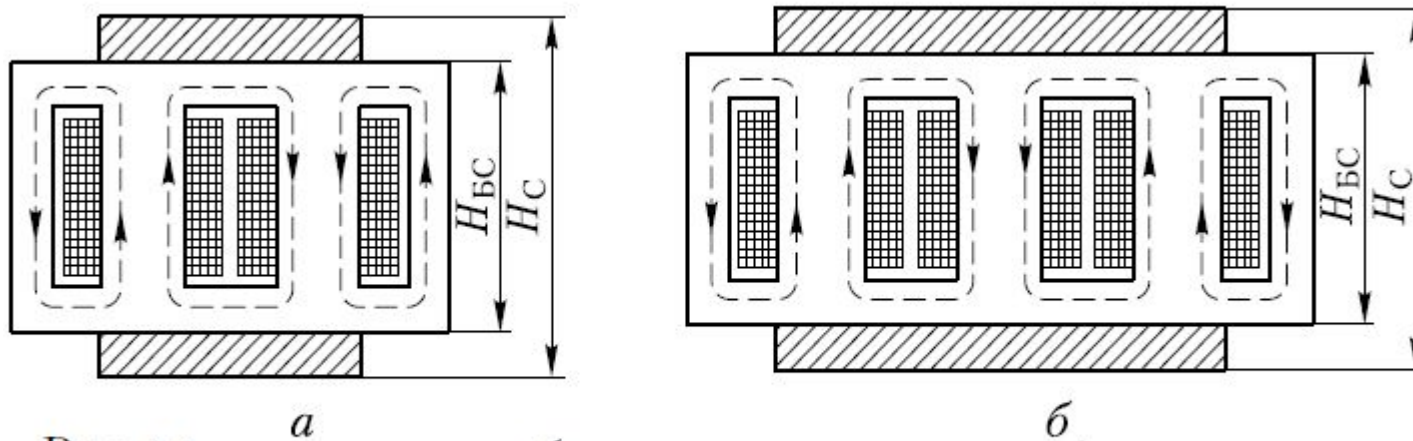


Рис. Магнитопроводы бронестержневых трансформаторов:
а — однофазного; *б* — трехфазного

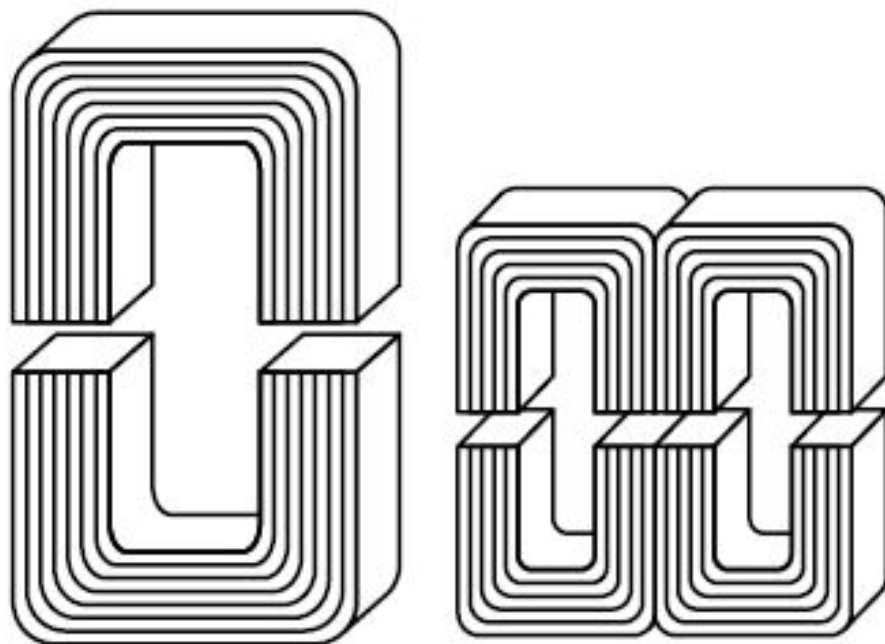
- В трансформаторах большой мощности применяют **бронестержневую** конструкцию магнитопровода, которая хотя и требует несколько повышенного расхода электротехнической стали, но позволяет уменьшить высоту магнитопровода, а следовательно, и высоту трансформатора. Это имеет важное значение при транспортировке трансформаторов.

Заземление магнитопроводов

- магнитопровод и детали его крепления ***обязательно заземляют.***

Заземление осуществляют медными лентами, вставляемыми между стальными пластинами магнитопровода одними концами и прикрепляемыми к ярмовым балкам другими концами.

Разрезные магнитопроводы

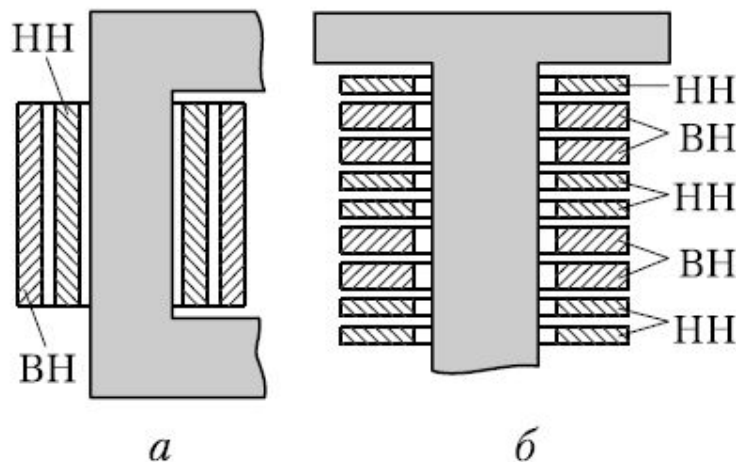


Магнитопроводы трансформаторов малой мощности (обычно мощностью не более 1 кВ·А) чаще всего изготавливают из узкой ленты электротехнической холоднокатаной стали путем навивки. Такие магнитопроводы делают разрезными, а после насадки обмоток собирают встык и стягивают специальными хомутами

Рис. Ленточные разрезные магнитопроводы

Обмотки трансформаторов

- **Обмотки** трансформаторов средней и большой мощности выполняют из обмоточных проводов круглого или прямоугольного сечения, изолированных хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой. Основой обмотки в большинстве случаев является бумажнобакелитовый цилиндр, на котором крепятся элементы (рейки, угловые шайбы и т. п.), обеспечивающие обмотке механическую и электрическую прочность.
- По взаимному расположению на стержне обмотки разделяют на:
- **Концентрические обмотки** выполняют в виде цилиндров, размещаемых на стержне концентрически: ближе к стержню обычно располагают обмотку НН (требующую меньшей изоляции от стержня), а снаружи — обмотку ВН
- **Чередующиеся (дисковые) обмотки** выполняют в виде отдельных секций (дисков) НН и ВН и располагают на стержне в чередующемся порядке . Их применяют крайне редко, лишь в некоторых трансформаторах специального назначения.

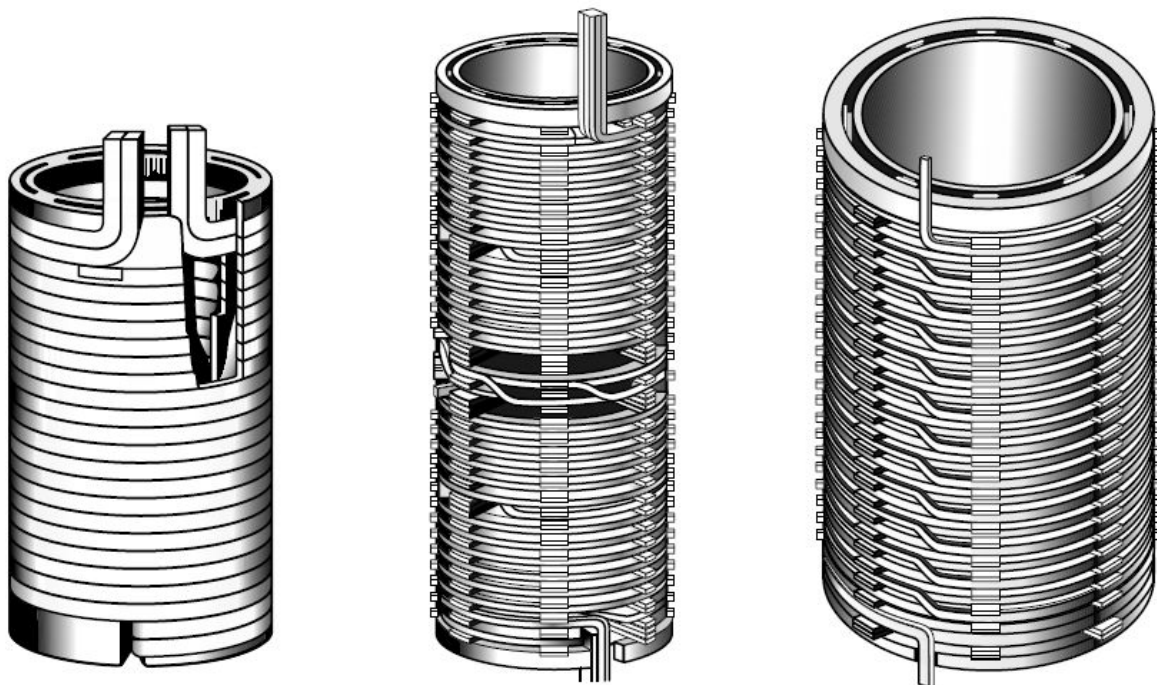


Типы концентрических обмоток

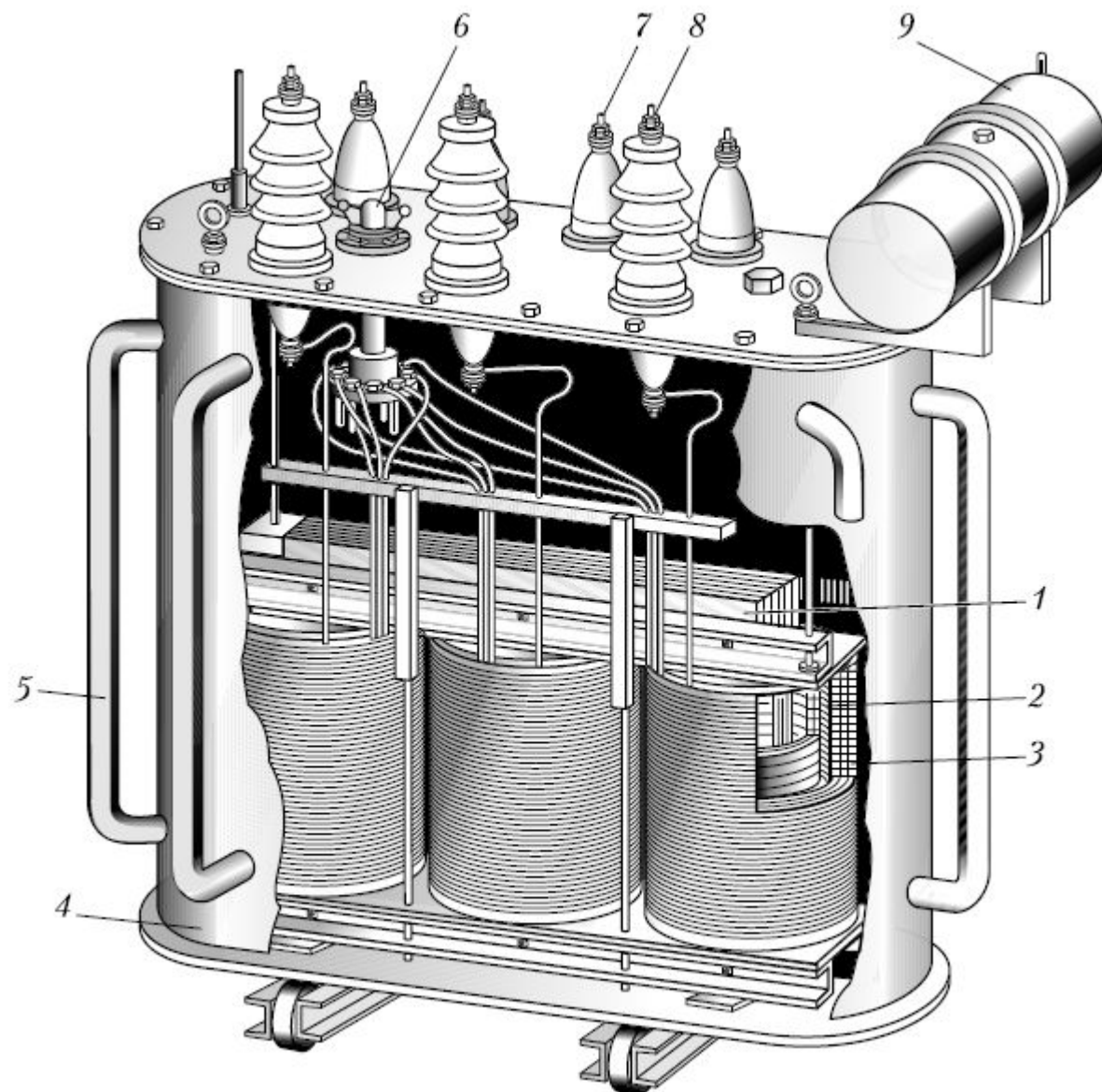
Цилиндрические однослойные или двухслойные обмотки из провода прямоугольного сечения.

Винтовые одно и многоходовые обмотки выполняют из нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения. При этом витки укладывают по винтовой линии, имеющей один или несколько ходов.

Непрерывные обмотки состоят из отдельных дисковых обмоток (секций), намотанных по спирали и соединенных между собой без пайки, т. е. выполненных «непрерывно»..



Трансформатор с масляным охлаждением



1-магнитопрвод

2,3- обмотки

4-бак

5-трубы радиатора

6-рукоятка переключателя
напряжения

7,8 -вводы

9- расширительный бак

Конструкция трансформатора

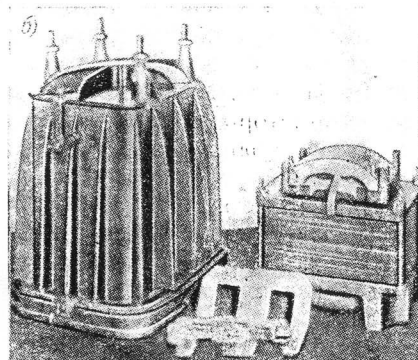
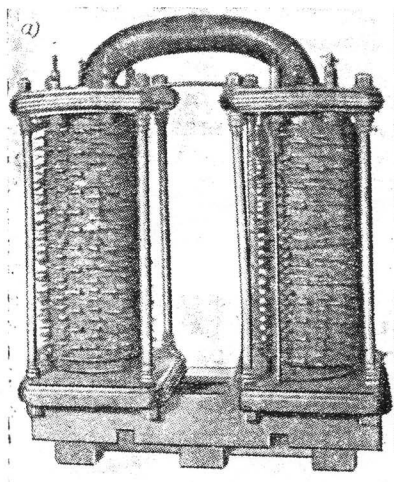
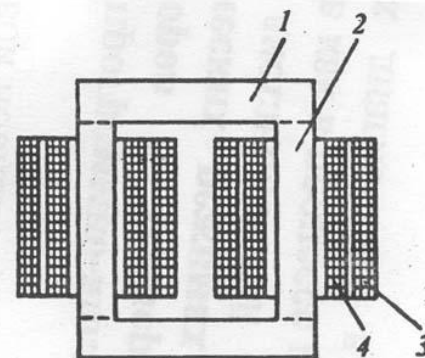
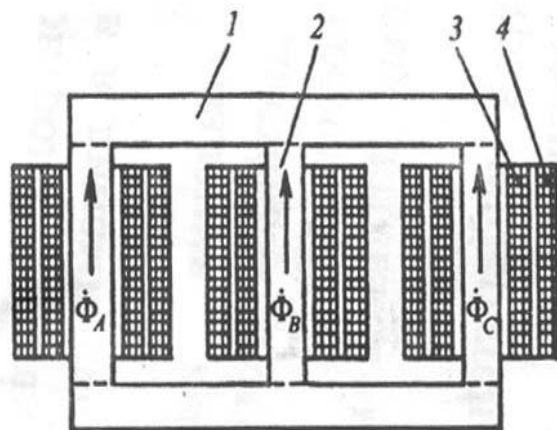


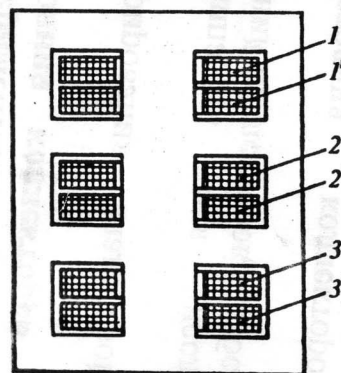
Рис. В-12. Первый технический трансформатор с замкнутой магнитной цепью:
а — стержневого типа; б — броневое типа.



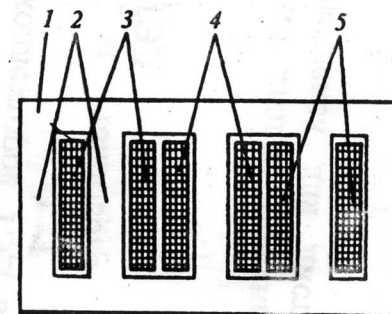
Однофазный трансформатор стержневой конструкции



Трехфазный трансформатор стержневой конструкции



Броневой трехфазный трансформатор:
1, 2, 3 — обмотки низшего напряжения фаз А, В, С; 1', 2', 3' — обмотки высшего напряжения фаз А, В, С



Трехфазный бронестержневой трансформатор.
1 — ярма; 2 — стержни; 3, 4, 5 — обмотки фаз низшего и высшего напряжений А, В, С

Конструкция трансформатора

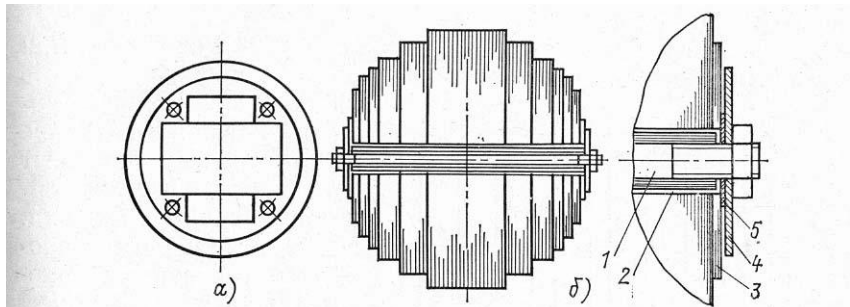


Рис. 1-10. Стяжка стержней.

а — с помощью деревянных планок; *б* — с помощью стальных шпилек (1 — стальная шпилька; 2 — трубка изоляционная; 3 и 5 — шайбы из электроизоляционного картона; 4 — стальная шайба).

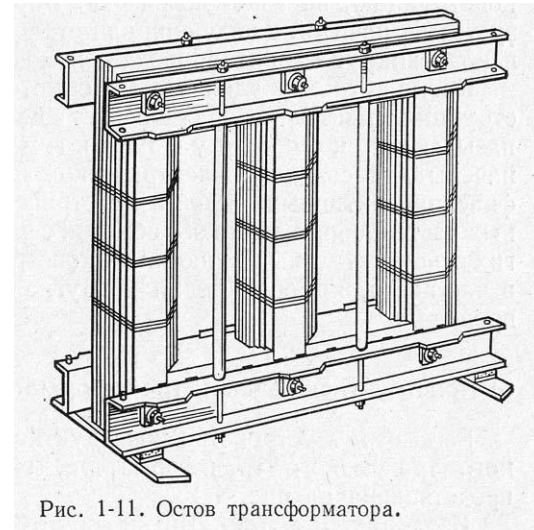
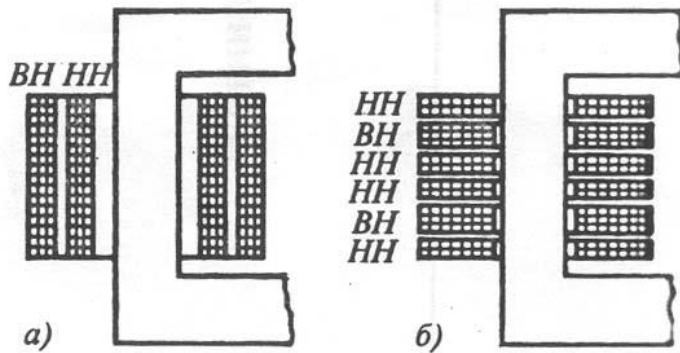


Рис. 1-11. Остов трансформатора.



Типы обмоток:

а) концентрические; *б*) дисковые или чередующиеся
НН — обмотки низкого напряжения; **ВН** — обмотки высокого напряжения

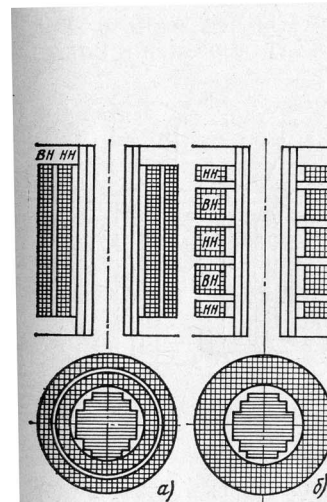


Рис. 1-4. Концентрические (*а*) и дисковые чередующиеся (*б*) обмотки.

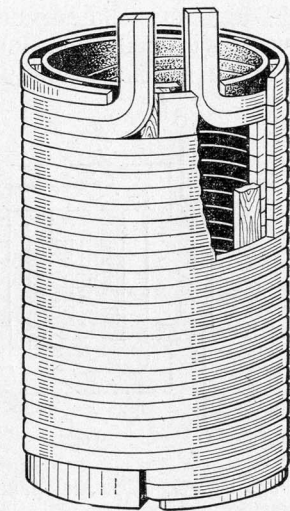


Рис. 1-5. Цилиндрическая двухслойная обмотка из прямоугольного провода.

Классификация трансформаторов

- .;
- **по виду охлаждения** — с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением;
- **по числу трансформируемых фаз** — однофазные и трехфазные;
- **по форме магнитопровода** — стержневые, броневые, бронестержневые, тороидальные;
- **по числу обмоток на фазу** — двухобмоточные, многообмоточные.
- **по назначению**

Силовые трансформаторы

Повышающие (на станциях) – 110, 150, 220, 330, 500, 750 и 1150 кВ.

Понижающие (у потребителя) – 35, 10, 6, 3, 0,66, 0,38, 0,22 кВ.

На силовые трансформаторы имеют заводскую гарантию 25 лет

Классификация трансформаторов по назначению

1. Силовые
2. Автотрансформаторы
3. Выпрямительные
4. Испытательные
5. Спецназначения (печные, сварочные)
6. Измерительные (тока и напряжения)
7. Радиотрансформаторы

Паспортная табличка силового трансформатора содержит сведения:

Номинальная полная мощность S_n , кВА,

Номинальное первичное линейное напряжение $U_{л1н}$, В
или кВ,

Номинальное вторичное линейное напряжение $U_{л2н}$, В
или кВ,

Номинальные линейные токи $I_{л1н}$ и $I_{л2н}$, А или кА,

Номинальная частота f , Гц,

Число фаз,

Схема и группа соединения обмоток,

Ток холостого хода $I_{хх}$ %,

Напряжение короткого замыкания $U_{кз}$ %,

Режим работы,

Способ охлаждения

Номинальная полная мощность трансформатора

номинальная полная мощность $S_{\text{ном}}$, кВ·А (для однофазного трансформатора $S_{\text{ном}} = U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}}$, для трехфазного — $S_{\text{ном}} = \sqrt{3} U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}}$). В связи с тем, что потери мощности в трансформаторах невелики, то принято считать номинальную полную мощность в цепи первичной обмотки приблизительно равной номинальной полной мощности в цепи вторичной обмотки:

$$S_{\text{ном}} = U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}} \approx U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}}.$$

Номинальные линейные токи вычисляют по номинальной мощности трансформатора: для трехфазного трансформатора

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{1\text{ном}}}; \quad I_{2\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{2\text{ном}}},$$

где $S_{\text{ном}}$ — номинальная мощность трехфазного трансформатора, кВ·А.

Схема замещения трансформатора и его основные уравнения

Мощность, подводимая к первичной обмотке трансформатора:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

Мощность, отдаваемая в нагрузку:

$$P_2 = U'_2 I'_2 \cos \varphi_2$$

При этом $P_2 < P_1$, т.к. часть мощности расходуется на потери.

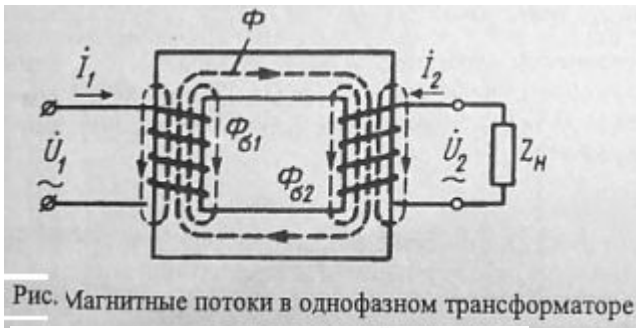
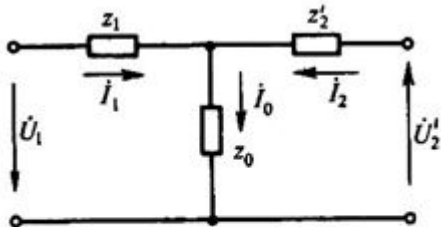


Рис. Магнитные потоки в однофазном трансформаторе



Т-образная схема замещения трансформатора

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1,$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 z'_2;$$

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

где $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 w_2 / w_1$ — ток нагрузки (вторичный ток), приведенный к числу витков первичной обмотки.

ВД трансформатора

Запишем основные уравнения ЭДС и токов.

$$1) \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1$$

$$2) \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2')$$

$$\Phi_0 \rightarrow \dot{E}_2'$$

$$\dot{E}_{2s}' = -j\dot{I}_2' x_2'$$

$$\dot{E}_{2a}' = -\dot{I}_2' r_2'$$

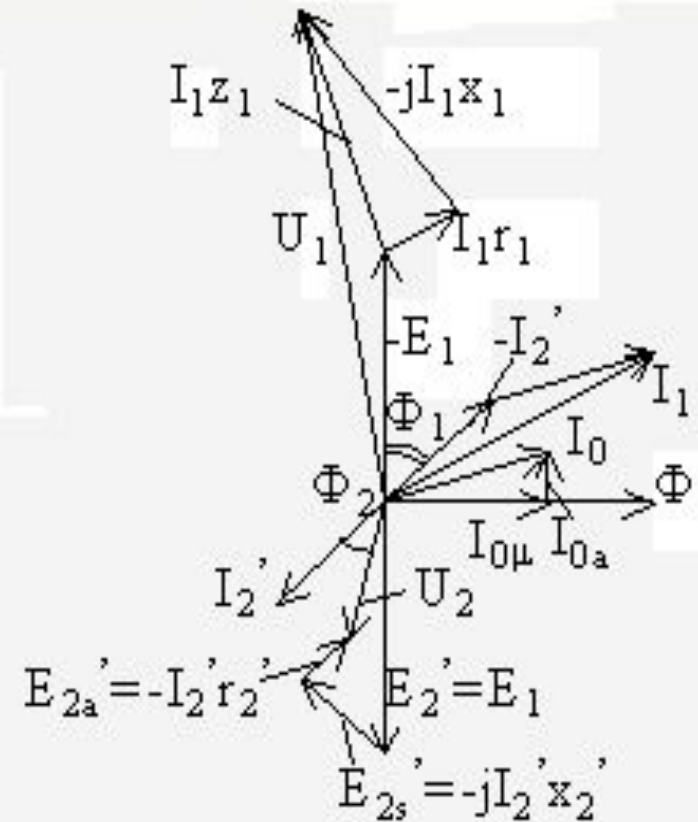
$$3) \dot{U}_2' = \dot{E}_2' + \dot{E}_{2s}' + \dot{E}_{2a}' = \dot{E}_2' - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' r_2'$$

$$\dot{E}_2' = \dot{U}_2' + \dot{I}_2' z_2'$$

$$\dot{U}_2' = \dot{I}_2' z_{\text{HT}}'$$

$$\dot{E}_2' = \dot{I}_2' (z_2' + z_{\text{HT}}')$$

На основе этих уравнений строится векторная диаграмма.



Опыт холостого хода

Опыт холостого хода называют испытание трансформатора при разомкнутой цепи вторичной обмотки и номинальном напряжении на первичной обмотке.

P_{xx} - это потери в стали магнитопровода.

Ток холостого хода составляет 0,4...10%

Параметры схемы замещения: $P_{xx} = m l_x^2 r_0$, $z_0 = U_x / I_x$, $r_0 = P_{xx} / (m l_x^2)$, $x_0 = \sqrt{(z_x^2 - r_x^2)}$

r_0 и x_0 много больше r_1 и x_1 и определяются намагничивающим контуром

Из опыта xx определяется коэффициент трансформации $K = U_1 / U_2$

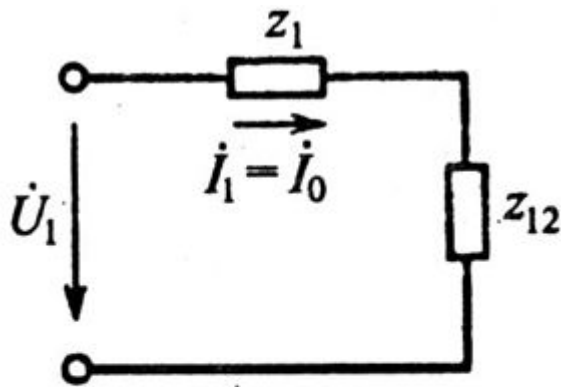
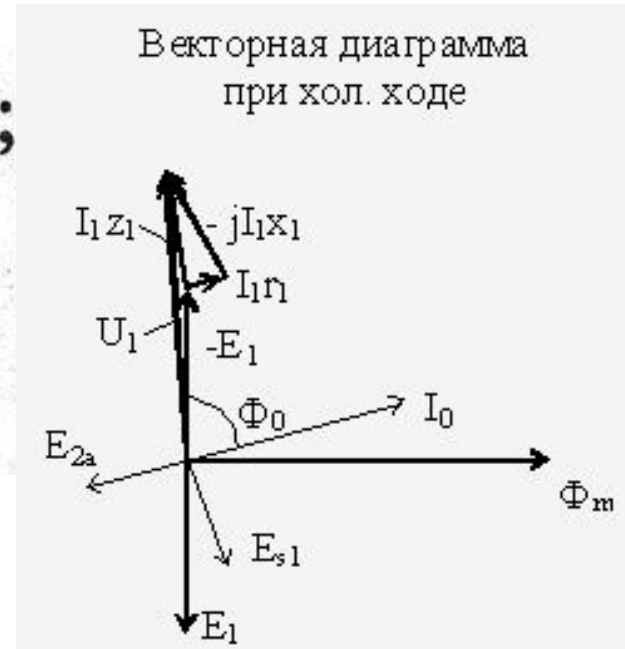
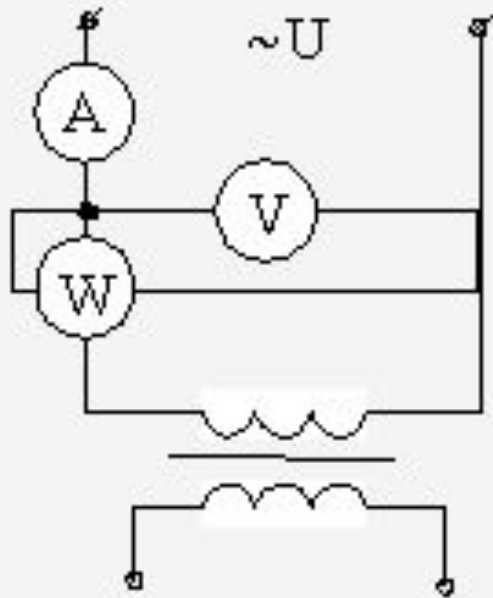


Схема замещения трансформатора при холостом ходе

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1; \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2; \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_1.\end{aligned}$$



Определение параметров в опыте ХХ



Для определения параметров измеряются:
 P_0 , U , I_0 тогда

$$Z_0 = \frac{U}{I_0}; \quad r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}$$

т. к. $r_1 \ll r_m$ $X_1 \ll X_m$, то

$$Z_m \approx Z_0 = \frac{U}{I_0}; \quad r_m \approx r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad X_m \approx X_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}$$

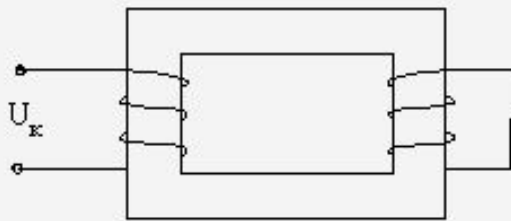
Из опыта холостого хода определяем:

1. параметры цепи намагничивания;
2. потери в стали;
3. определяем коэффициент трансформации.

Режим кз однофазного трансформатора

Необходимо различать два режима короткого замыкания:

1. Аварийный режим – тогда, когда замкнута вторичная обмотка при номинальном первичном напряжении. При таком замыкании токи возрастают в 15÷20 раз. Обмотка при этом деформируется, а изоляция обугливается. Железо так же подгорает. Это тяжелый режим. Максимальная и газовая защита отключает трансформатор от сети при аварийном коротком замыкании.
2. Опытный режим короткого замыкания – это режим, когда вторичная обмотка накоротко замкнута, а к первичной обмотке подводится такое пониженное напряжение, когда по обмоткам протекает номинальный ток – это U_k – напряжение короткого замыкания.



U_k выражается в %

$$U_{k\%} = \frac{U_k}{U_N} 100\%$$

$U_{k\%} = 5.5$ для трансформаторов малой мощности;

$U_{k\%} = 10.5$ для трансформаторов средней и большой мощности.

При номинальном напряжении ток холостого хода $I_0 = (2 \div 5)\% I_N$.

При коротком замыкании напряжение в 15÷20 раз меньше номинального, поэтому ток холостого хода ничтожно мал и им можно пренебречь

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_0 = 0, \quad \dot{I}_1 = -\dot{I}_2' \quad \dot{F}_1 = -\dot{F}_2'$$

т.е. намагничивающая сила первичной обмотки полностью уравновешена намагничивающей силой вторичной обмотки.

Опыт короткого замыкания

Проводится при пониженном напряжении на первичной обмотке

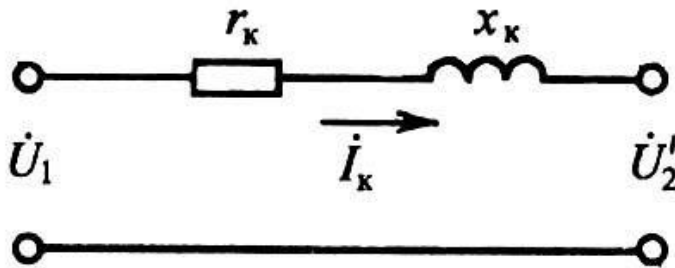
Потери при кз P_k – это потери в меди.

Параметры схемы замещения из опыта кз:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{m U_k I_k};$$

$$z_k = \frac{U_k}{I_k}; \quad r_k = z_k \cos \varphi_k; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Напряжение кз u_k – это напряжение при котором в опыте кз в обмотках трансформатора протекают номинальные токи. Чем больше u_k , тем меньше габариты трансформатора, выше потери в меди и ниже КПД. На параллельную работу включаются тр-ры с одинаковыми u_k .



Упрощенная схема замещения трансформатора

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1;$$

$$0 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 z'_2;$$

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

ВД и схема замещения при КЗ

Основные уравнения:

- 1) $\dot{U}_{\text{К}} = -\dot{E}_{\text{К}} + \dot{I}_1 z_1$
- 2) $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2'$
- 3) $\dot{E}_{2\text{К}} = \dot{I}_2' z_2'$
- 4) $\dot{E}_{2\text{К}} + \dot{E}_{2\text{С}} + \dot{E}_{2\text{а}} = 0$
 $\dot{E}_{2\text{К}} - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' r_2'$
- 5) $\dot{E}_{2\text{К}} = \dot{E}_{\text{К}}$

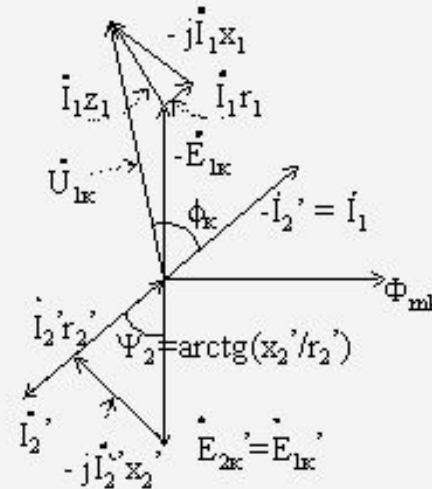


Схема замещения трансформатора при коротком замыкании

$\dot{E}_{\text{К}} = \dot{E}_{2\text{К}} = \dot{I}_2' z_2'$, подставив в уравнение (1),

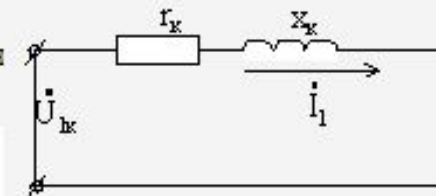
Тогда $\dot{U}_{\text{К}} = -\dot{I}_2' z_2' + \dot{I}_1 z_1 = \dot{I}_1 (z_1 + z_2') = I_1 z_{\text{К}}$ (6)

где: $Z_1 + Z_2' = Z_{\text{К}}$ - полное сопротивление короткого замыкания;

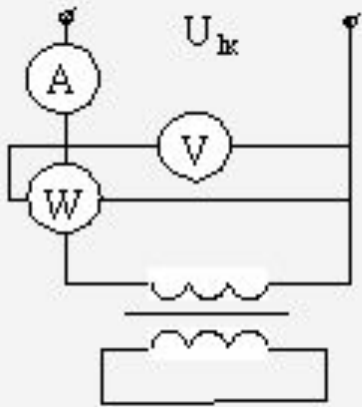
$r_1 + r_2' = r_{\text{К}}$ - активное сопротивление короткого замыкания;

$x_1 + x_2' = x_{\text{К}}$ - индуктивное сопротивление короткого замыкания.

из уравнения (6) ток $I_1 = \frac{\dot{U}_{\text{К}}}{z_1 + z_2'}$, откуда схема замыкания



Экспериментальное определение параметров короткого замыкания



Для определения параметров короткого замыкания измеряют P_K , I_K , U_K , тогда

$$z_K = \frac{U_K}{I_K}$$

$$r_K = \frac{P_K}{I_K^2}$$

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}$$

КПД трансформатора

Коэффициент полезного действия можно получить используя данные опыта холостого хода и короткого замыкания.

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} = \frac{P_1 - (P_{\text{мг}} + P_{\text{эл1,2}})}{P_1} = 1 - \frac{P_{\text{мг}} + P_{\text{эл1,2}}}{P_1}$$

при холостом ходе $P_0 = P_{\text{мг}}$

При коротком замыкании $P_{\text{к}} = P_{\text{эл1,2}} = I_{\text{к}}^2 r_{\text{к}}$, $\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{н}}}$ - коэффициент нагрузки

Тогда $p_{\text{к}} = \beta^2 I_{2\text{н}}^2 r_{\text{к}} = \beta^2 p_{\text{кн}}$; $P_{\text{кн}}$ - при номинальном токе $I_{\text{н}}$, $p_{\text{к}} = \beta^2 P_{\text{кн}} = P_{\text{эл1,2}}$,

$$\text{тогда } \eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{\text{кн}}}{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{кн}}}$$