

1 ТРАНСФОРМАТОРЫ

1.1 НАЗНАЧЕНИЕ, КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

Трансформаторы применяются в энергосистемах при передаче электроэнергии от электростанции к потребителям в энергоустановках различного вида, в вычислительной техники, в устройствах связи. Широко применяются трансформаторы в системах питания радиоустройств (сетевые приемники, телевизор блоки питания передатчиков и т. п.), причем в качестве трансформаторов питания электронной аппаратуры используются трансформаторы малой мощности (не превышающей 4кВА для однофазных и 5кВА — для трехфазных систем переменного тока), которые (по определению ГОС 20938-75) предназначены для преобразования напряжения электрических сетей в напряжения, необходимые для питания электронной аппаратуры.

Рассматриваемые трансформаторы питания можно классифицировать по следующим признакам:

в зависимости от числа фаз преобразуемого напряжения — на однофазные и трехфазные;

в зависимости от числа обмоток — на двухобмоточные и многообмоточные;

в зависимости от конфигурации магнитопровода — на стержневые, броневые и тороидальные.

Рассмотрим однофазный двухобмоточный трансформатор, принцип действия которого основан на явлении электромагнитной индукции. Данный трансформатор состоит из магнитопровода, называемого иногда сердечником, и двух обмоток. Одна из обмоток — первичная w_1 (рис. 1.1) подключается к источнику переменного напряжения U_1 . К другой обмотке подключен потребитель Z_n ; ее называют вторичной.

При подаче переменного напряжения U_1 на первичную обмотку w_1 в ней появляется переменный ток, который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток. Замыкаясь по магнитопроводу, магнитный поток Φ сцепляется с витками обмоток трансформатора w_1 и w_2 и наводит в них ЭДС:

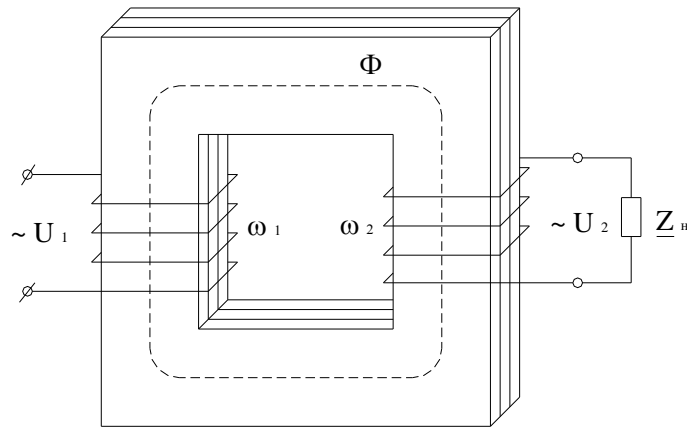


Рис. 1.1. Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (1.1)$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (1.2)$$

Таким образом, энергия из первичной обмотки во вторичную передается с помощью переменного магнитного поля, а гальваническая связь между обмотками отсутствует.

При практических расчетах трансформаторов используют выражения для действующего значения ЭДС обмоток трансформатора, а также принимается допущение, что магнитный поток трансформатора является синусоидальной функцией времени, т. е.

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1.3)$$

После подстановки (1.3) в (1.1) и (1.2) и дифференцирования получим

$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t;$$

$$e_2 = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t;$$

Так как $\cos \omega t = -\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$,

То

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= \omega w_1 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right); \\ e_2 &= \omega w_2 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

При сравнении (1.3) и (1.4) видно, что ЭДС e_1 и e_2 отстают по фазе от потока Φ на $\pi/2$, т. е. на четверть периода. Из (1.4) амплитудные значения ЭДС можно представить как

$$E_{1m} = \omega w_1 \Phi_m;$$

$$E_{2m} = \omega w_2 \Phi_m.$$

Разделив E_{1m} и E_{2m} на $\sqrt{2}$ и подставив $\omega = 2\pi f$, получим действующие значения ЭДС обмоток трансформатора:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m \quad (1.5)$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m \quad (1.6)$$

Разделив (1.5) на (1.6), получим

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k \quad (1.7)$$

Отношение k называется **коэффициентом трансформации**.

Обмотка трансформатора с большим числом витков (с большим напряжением) называется обмоткой высшего напряжения (ВН), обмотка с меньшим числом витков (с меньшим напряжением) — обмоткой низшего напряжения (НН).

В зависимости от способа включения один и тот же трансформатор может работать либо как повышающий, либо как понижающий.

1.2 КОНСТРУКЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Основными частями трансформатора являются магнитопровод и катушка с обмотками.

На рис. 1.2 показаны основные типы магнитопроводов трансформаторов.

В зависимости от способа изготовления магнитопроводы трансформаторов делят на два вида: пластинчатые (рис. 1.2, а-в) и ленточные (рис. 1.2, г-е).

По конфигурации магнитопроводы подразделяют на три основных вида: стержневые (рис. 1.2, а, г), броневые (рис. 1.2, б, д) и тороидальные (рис. 1.2, в, е).

Материалом для магнитопровода трансформаторов служит листовая электротехническая сталь различных марок и толщины, горячей прокатки и холоднокатаная; от содержания кремния, которое отражено в марке стали, а также от толщины листа зависят потери мощности в магнитопроводе от вихревых токов. Толщину листа применяемой стали выбирают в зависимости от частоты сети, питающей трансформатор: с увеличением частоты толщину листа надо уменьшать.

Пластины магнитопровода (рис. 1.2, а-в) получают путем штамповки листовой стали указанных марок. Для уменьшения вихревых токов пластины изолируются одна от другой слоем изоляционного лака или же поверхность пластин оксидируется.

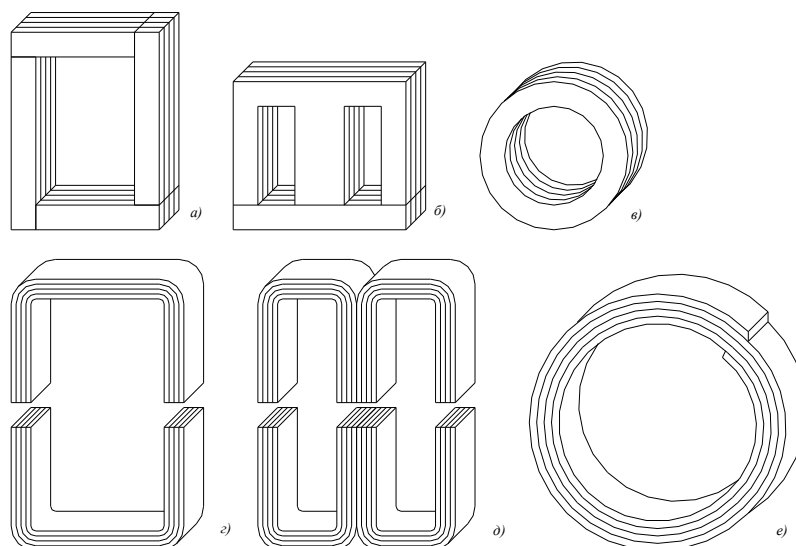


Рис. 1.2. Конструкция магнитопроводов трансформаторов

Ленточные (витые) магнитопроводы (рис. 1.2, г—е) изготавливают из лент рулонной стали; предварительно лента покрывается изолирующим и склеивающим составом.

Стержневые магнитопроводы (рис. 1.2, а) собирают из прямоугольных пластин одинаковой ширины. Части магнитопровода, на которых находятся обмотки, называются стержнями. Часть магнитопровода, соединяющая стержни между собой, называется ярмом.

Сборка частей магнитопровода может производиться встык (рис. 1.3, а) и внахлест (рис. 1.3, б), причем в последнем случае увеличивается механическая прочность и уменьшается магнитное сопротивление магнитопровода. При сборке встык пластины собирают в единый пакет и предусматривают изоляционную прокладку между пакетами для предохранения от замыкания между отдельными листами магнитопровода. Сборка встык упрощает монтаж и демонтаж трансформатора.

Пластины магнитопровода скрепляют в пакет либо с помощью изолированных от магнитопровода шпилек, либо с помощью специальных бандажей из капроновых ниток.

Обозначается стержневой сердечник как

П20×45,

где П – тип сердечника,

20 – ширина стержня, мм,

45 – толщина пакета, мм.

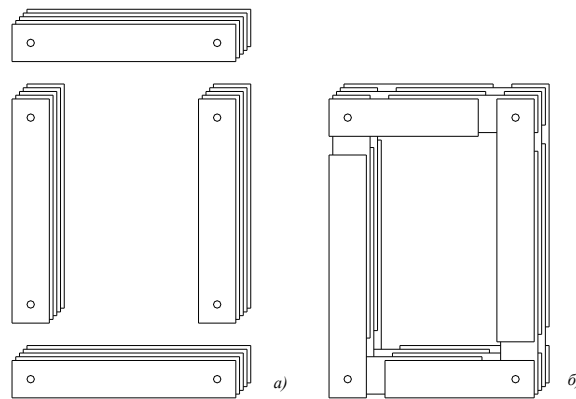


Рис. 1.3. Сборка магнитопровода встык (а) и внахлест (б)

Броневые магнитопроводы (рис. 1.2,б) собирают из пластин Ш-образной формы и прямоугольных пластин, замыкающих Ш-образную пластину. Эти магнитопроводы имеют один стержень, на котором располагают все обмотки трансформатора. Сборка броневого магнитопровода производится так же, как и магнитопровода стержневого типа, описанного выше.

Поскольку в броневом магнитопроводе обмотка размещается на среднем стержне, магнитный поток разветвляется на правую и левую части и, таким образом, в крайних стержнях его значение будет в 2 раза меньше, чем в центральном; это позволяет уменьшить сечение крайних стержней в 2 раза по сравнению с центральным.

Обозначается броневой сердечник как

Ш20×45,

где Ш – тип сердечника,

20 – ширина стержня, мм,

45 – толщина пакета, мм.

Тороидальные магнитопроводы (рис. 1.2, в) собирают из отдельных штампованных колец, покрытых изолирующим лаком; сборка производится с помощью намотки на пакет пластин ленточной лакоткани. Этот магнитопровод обладает наилучшими магнитными свойствами: наименьшее магнитное сопротивление, минимальные индуктивность рассеивания и чувствительность к внешним магнитным полям, однако изготовление обмоток в данном случае может производиться только на специальных

станках челночного типа или вручную.

Обозначается сердечник этого типа как
 $O60 \times 40 \times 10$,

где О – тип сердечника (тороидальный),

60 – внешний диаметр тора, мм,

40 – внутренний диаметр тора, мм,

10 – высота тора, мм.

Ленточные магнитопроводы стержневого и броневое типа (рис. 1.2, г, д) собираются из отдельных, соединяемых встык, магнитопроводов подковообразной формы, а затем стягиваются специальными накладками (хомутами). Такая конструкция магнитопровода значительно упрощает сборку трансформатора. Ленточные магнитопроводы по сравнению с пластинчатыми допускают магнитную индукцию на 20–30 % выше, потерь в них меньше, заполнение объема магнитопровода и КПД трансформатора выше. По этим причинам ленточные магнитопроводы находят все более широкое применение.

Тороидальные ленточные магнитопроводы (рис. 1.2, е) изготавливают путем навивки ленты на оправку заданного размера. Обмотки трансформатора производятся на намоточных станках челночного типа.

В обозначении добавляется буква «Л», например:

ПЛ, ШЛ, ЛО

Обмотки трансформатора выполняют из медного или алюминиевого изолированного провода.

В трансформаторах средней мощности ближе к стержню располагают обмотку низшего напряжения. Это позволяет уменьшить слой изоляции между обмоткой и стержнем а также создает лучшие условия охлаждения обмотки низшего напряжения, по которой протекает больший ток.

В низковольтных трансформаторах (до 100 В) малой мощности ближе к стержню помещают обмотку высшего напряжения. Эта мера позволяет уменьшить стоимость трансформатора, так как средняя длина витка обмотки высшего напряжения, выполняемой из дорогостоящего провода малого сечения, получается в этом случае меньше.

В высоковольтных трансформаторах (свыше 1000В) (рис. 1.4, а) применяется раздельное расположение обмоток на стержнях магнитопровода.

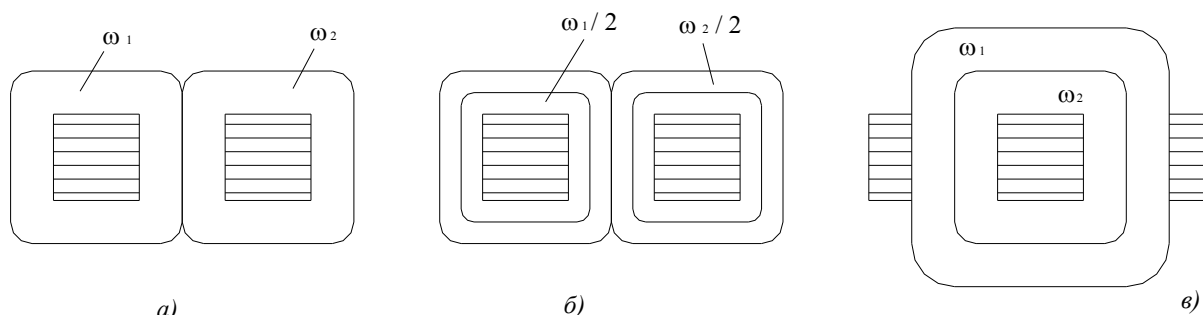


Рис. 1.4- Расположение обмоток на каркасе:

а - в высоковольтном трансформаторе; б — в низковольтном; в — в броневом

В низковольтных трансформаторах обмотки располагаются в соответствии с рис. 1.4, б. Достоинство такого расположения обмоток — небольшое значение магнитного потока рассеяния из-за меньшей толщины намотки и небольшой расход обмоточных проводов, так как снижение толщины намотки ведет к уменьшению средней длины витка обмотки.

В трансформаторах с броневыми магнитопроводами (рис. 1.7, в) обмотки располагаются на одном стержне.

В трехфазном трансформаторе на каждом из стержней располагаются первичная и вторичная обмотки данной фазы.

В тороидальных трансформаторах обмотки располагаются по всей длине магнитопровода.

В конструкции трансформатора должна быть предусмотрена панель, к которой припаивают выводы обмоток. Корпус трансформатора электрически соединяется с магнитопроводом и заземляется. Эта мера необходима из соображений техники безопасности на случай пробоя одной из обмоток.

1.3 ХОЛОСТОЙ ХОД ТРАНСФОРМАТОРА

Режимом холостого хода трансформатора называется такой режим его работы, при котором первичная обмотка включена в сеть переменного тока с напряжением U_1 и частотой f , а вторичная обмотка разомкнута, т. е. ток вторичной обмотки равен нулю (рис. 1.5).

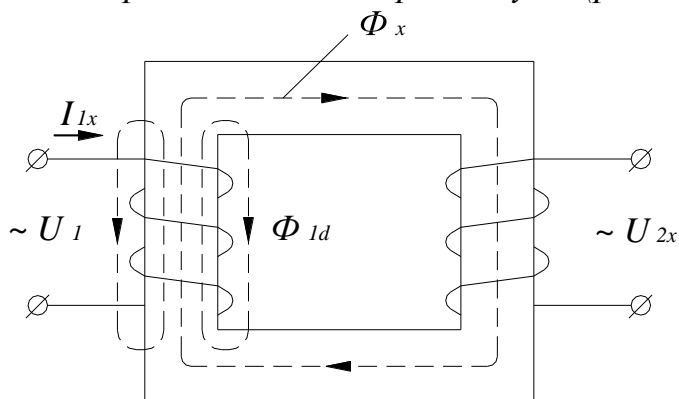


Рис.1.5 Схема однофазного трансформатора в режиме холостого хода

Под действием напряжения U_1 по первичной обмотке протекает ток холостого хода, который создает магнитодвижущую силу (МДС), равную $I_{1x}w_1$, где w_1 — число последовательно соединенных витков первичной обмотки. Эта МДС создает в трансформаторе магнитный поток, преобладающая часть которого Φ_x замыкается по магнитопроводу, а другая часть потока, обычно гораздо меньшая, замыкается главным образом вне магнитопровода — это так называемый поток рассеяния Φ_{1d} .

Основной магнитный поток Φ_x будучи сцеплен с обоими обмотками, наводит в них ЭДС, которые определяются в соответствии с (1.5) и (1.6).

Поток рассеяния Φ_{1d} сцеплен главным образом с первичной обмоткой и наводит в ней ЭДС рассеяния, связь которой с параметрами трансформатора можно определить следующим образом. При синусоидальном изменении тока мгновенное значение ЭДС рассеяния первичной обмотки

$$\begin{aligned} e_{1d} &= -L_{1d} di/dt = -L_{1d} d(I_{1m} \sin \omega t)/dt = \\ &= -L_{1d} \omega I_{1m} \cos \omega t = -I_{1m} x_1 \cos \omega t; \end{aligned} \quad (1.8)$$

в этих выражениях L_{1d} — индуктивность рассеяния первичной обмотки, а x_1 — индуктивное сопротивление рассеяния этой обмотки.

Таким образом, ЭДС рассеяния e_{1d} отстает по фазе от создающего ее тока i_1 на $\pi/2$; действующее значение этой ЭДС, выраженное в комплексной форме, с учетом, что в данном случае $I_1 = I_{1x}$, определяется следующим соотношением

$$\dot{E}_{1d} = -j I_{1x} x_1, \quad (1.9)$$

где $j = \sqrt{-1}$.

При протекании тока холостого хода I_{1x} в первичной обмотке возникает падение напряжения $I_{1x} r_1$, определяемое активным сопротивлением обмотки r_1 .

Учитывая указанные положения, в соответствии со вторым законом Кирхгофа уравнение ЭДС первичной обмотки трансформатора записывается следующим образом:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{1d} = \dot{I}_{1x} r_1 \quad (1.10)$$

откуда

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1d} + \dot{I}_{1x} r_1, \quad (1.11)$$

или с учетом (1.9) можно записать

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{1x} (r_1 + j x_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{1x} \underline{Z}_1. \quad (1.12)$$

где \underline{Z}_1 — полное внутреннее сопротивление первичной обмотки.

При холостом ходе трансформатора ток I_{1x} весьма мал и можно считать, что

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1, \quad (1.13)$$

т.е. напряжение на зажимах первичной обмотке U_1 уравнивается ЭДС E_1 .

Векторная диаграмма приведена на рис. 1.6. Ток холостого хода трансформатора представляют в виде активной и реактивной составляющих.

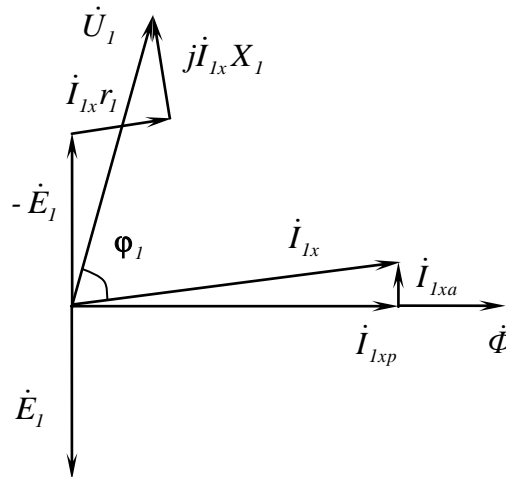


Рис. 1.6 Векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе

Если \dot{I}_{1x_p} - реактивная составляющая (намагничивающий ток), \dot{I}_{1x_a} - активная составляющая (ток потерь), то

$$I_{1x} = \sqrt{I_{1x_p}^2 + I_{1x_a}^2}.$$

1.4 РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НАГРУЗКЕ

При подключении нагрузки Z_H к зажимам вторичной обмотки трансформатора появляется ток \dot{I}_2 (рис. 1.8). Одновременно ток в первичной обмотке достигает значения \dot{I}_1 , а магнитный поток в магнитопроводе — значения $\dot{\Phi}_1$. Ток \dot{I}_2 , протекая по вторичной обмотке, создает магнитный поток вторичной обмотки ($\dot{\Phi}_2$). Основная часть этого потока замыкается по магнитопроводу трансформатора, сцепляясь со вторичной и первичной обмотками. Меньшая часть потока вторичной обмотки — поток рассеивания $\dot{\Phi}_{2d}$ сцепляется только со вторичной обмоткой и наводит во вторичной обмотке ЭДС рассеяния \dot{E}_{2d} . Аналогично выражению для ЭДС рассеяния первичной обмотки (1.9) можно записать:

$$\dot{E}_{2d} = -jI_2x_2, \quad (1.14)$$

где x_2 — индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки.

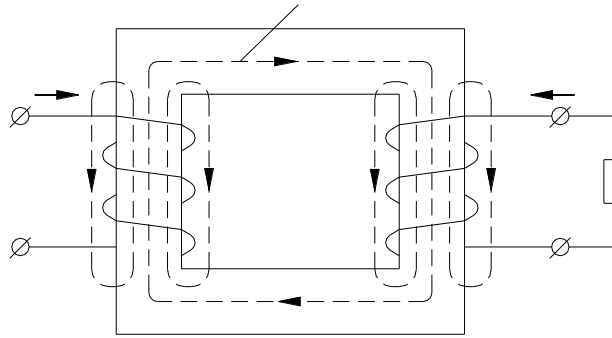


Рис.1.8. Схема однофазного трансформатора в режиме нагрузки

Магнитный поток $\dot{\Phi}_2$ вторичной обмотки в соответствии с законом Ленца направлен навстречу потоку первичной обмотки $\dot{\Phi}_1$, а общий поток в магнитопроводе трансформатора $\dot{\Phi}$ может быть выражен суммой

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 \quad (1.15)$$

Работу трансформатора под нагрузкой (при появлении тока \dot{I}_2) можно пояснить следующим образом: ток вторичной обмотки \dot{I}_2 стремится уменьшить магнитный поток трансформатора $\dot{\Phi}$. Напряжение сети, к которой подключена первичная обмотка, стремится восстановить значение магнитного потока, посылая в трансформатор дополнительный ток $\Delta \dot{I}_1$. Таким образом, при нагрузке трансформатора ток первичной обмотки \dot{I}_1 можно выразить

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1x} + \Delta \dot{I}_1, \quad (1.16)$$

где \dot{I}_{1x} — ток холостого хода, а $\Delta \dot{I}_1$ — ток, идущий на поддержание неизменным магнитного потока при подключении нагрузки (появление тока \dot{I}_2).

Мощность, отдаваемая трансформатором нагрузке, равна $\dot{I}_2 \dot{U}_2$, а потребляемая трансформатором мощность от сети $\dot{I}_1 \dot{U}_1 = \dot{U}_1 (\dot{I}_{1x} + \Delta \dot{I}_1)$.

Умножив обе части уравнения (1.16) на число витков w_1 первичной

обмотки, получим уравнение

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_{1x} w_1 + \Delta \dot{I}_1 w_1. \quad (1.17)$$

Поскольку увеличение МДС первичной обмотки при нагрузке $\Delta \dot{I}_1 w_1$ равно и противоположно по направлению МДС вторичной обмотки, т.е.

$$\Delta \dot{I}_1 w_1 = -\dot{I}_2 w_2 \quad (1.18)$$

то подставив уравнение (1.18) в уравнение (1.17) и разделив обе части уравнения на w_1 , получим уравнение токов трансформатора

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1x} - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}. \quad (1.19)$$

Если обозначить $\dot{I}_2' = \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}$, где \dot{I}_2' - ток вторичной обмотки, приведенный к числу витков первичной обмотки, то уравнение (1.19) примет вид

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1x} + (-\dot{I}_2') \quad (1.20)$$

Ток во вторичной обмотке \dot{I}_2 определяется ЭДС \dot{E}_2 , которая в значительной части идет на создание напряжения на выводах вторичной обмотки $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \underline{Z}_n$, а оставшаяся часть идет на компенсацию ЭДС рассеяния \dot{E}_{2d} и активного падения напряжения во вторичной обмотке. Таким образом, уравнение напряжения вторичной обмотки трансформатора можно записать в следующем виде:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2. \quad (1.21)$$

Итак, нагруженный трансформатор описывается следующими уравнениями:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1x} + (-\dot{I}_2');$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1$$

В режиме нагрузки вторичное напряжение U_2 незначительно зависит от тока нагрузки. Зависимость $U_2 = f(I_2)$, приведенная на рис. 1.12, называется **внешней характеристикой**. Она снимается при $U_1 = \text{const}$, $\cos \varphi_2 = \text{const}$.

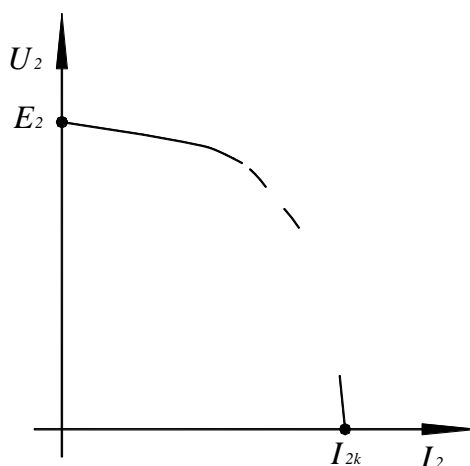


Рис.1.12 Внешняя характеристика трансформатора

Для построения векторной диаграммы нагруженного трансформатора (рис.1.13) необходимо использовать основные уравнения трансформатора.

Порядок построения диаграммы:

1. Строится вектор магнитного потока $\dot{\Phi}$.

2. Вектор тока холостого хода \dot{I}_{1x} опережает вектор потока на угол магнитного запаздывания и распадается на активную и реактивную составляющие (рис.1.6):

$$I_{1x} = \sqrt{I_{1x_p}^2 + I_{1x_a}^2}$$

3. Строятся векторы \dot{E}_1 и \dot{E}_2 , которые отстают от потока на 90° .

4. Определяется сдвиг фаз между током \dot{I}_2 и \dot{E}_2

$$\psi_2 = \frac{x_2 + x_n}{r_2 + r_n}$$

и строится вектор тока \dot{I}_2 .

5. По соотношению токов $\dot{I}_1 = \dot{I}_{1x} + (-\dot{I}_2)$ строится вектор тока \dot{I}_1 .

6. По уравнению вторичной цепи $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2$ строится вектор вторичного напряжения \dot{U}_2 .

7. По уравнению первичной цепи $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1$ строится вектор напряжения первичной цепи \dot{U}_1 .

8. Определяются сдвиги фаз φ_1 и φ_2 между токами и напряжениями.

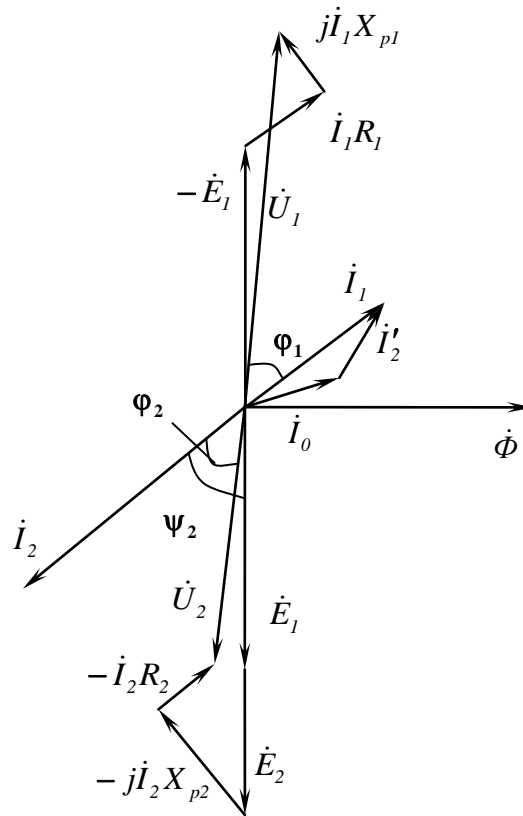


Рис. 1.13 Векторная диаграмма трансформатора при нагрузке

1.5 РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Следует отличать режим короткого замыкания от опыта короткого замыкания. Опыт короткого замыкания проводят **при сниженном первичном напряжении**. Режим короткого замыкания — это аварийный режим работы трансформатора. В режиме короткого замыкания напряжение первичной обмотки равно номинальному, а сопротивление нагрузки равно нулю.

В аварийном режиме короткого замыкания устанавливаются большие токи короткого замыкания в обмотках \dot{I}_{1k} и \dot{I}_{2k} . Эти значения столь велики, что приводят к выходу из строя обмотки трансформатора.

Внешняя характеристика имеет падающий вид. Относительная величина падения напряжения при номинальном токе ($I_2 = I_{2н}$) нормируется и указывается в паспорте трансформатора (e_k). Обычно эта величина показывает падение напряжения в процентах. С помощью e_k определяют токи короткого замыкания:

$$I_{1k} = \frac{100}{e_k} I_{1н},$$

$$I_{2k} = \frac{100}{e_k} I_{2н}.$$

1.6 ПОТЕРИ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

Мощность, потребляемая трансформатором равна:

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

а мощность, которая передается на нагрузку

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2.$$

КПД трансформатора определяется соотношением:

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

Уравнение баланса активных мощностей имеет вид

$$P_1 = P_2 + P_m + P_{\text{э}},$$

где P_m — магнитные потери (потери в стали),

$P_{\text{э}}$ — электрические потери (потери в меди), т. е.

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_m + P_{\text{э}}}$$

9.5.2. Магнитные потери (потери в стали) — это:

- потери от гистерезиса,
- потери от вихревых токов.

Магнитные потери зависят только от магнитного потока и не зависят от силы тока в обмотках. Поскольку основной магнитный поток является постоянным (он пропорционален первичному напряжению), потери в стали также считаются постоянными. Следовательно, магнитные потери не зависят от коэффициента загрузки трансформатора

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2н}}$$

Магнитные потери определяются экспериментально или вычисляются по эмпирическим зависимостям, например

$$P_m = P_{1,0/400} \left(\frac{B_m}{1,0} \right)^2 \left(\frac{f}{400} \right)^{1,5} G_m,$$

где $P_{1,0/400}$ - потери в 1 кг стали при индукции $B_m = 1$ Тл и частоте $f=400$

Гц;

G_m – масса сердечника

Электрические потери — это потери, идущие на нагрев обмоток трансформатора протекающими по ним токами, т. е.

$$P_э = R_{1(t^0)} I_1^2 + R_{2(t^0)} I_2^2.$$

При определении потерь учитываются изменения активного сопротивления обмоток от нагрева. Поэтому электрические потери называют потерями переменными.

На рис. 1.14 приведена зависимость КПД от мощности P_2 . Трансформатор проектируется таким образом, что КПД достигает максимума при наиболее вероятной загрузке. При этом коэффициент загрузки несколько меньше единицы. Можно доказать, что максимальным КПД трансформатора при максимальной его загрузке будет, если $P_э = P_m$.

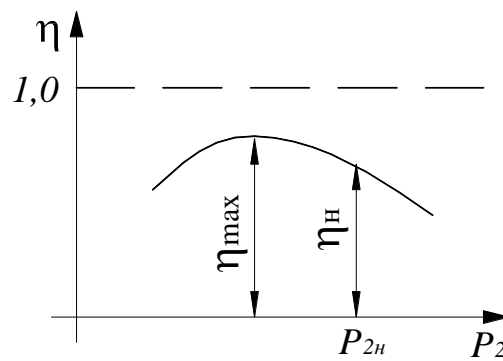


Рис. 1.14 Зависимость КПД трансформатора от мощности P_2

КПД трансформатора в значительной мере зависит от мощности и достигает значений:

0,7...0,75 — в трансформаторах малой мощности (несколько ватт),

0,9...0,95 — в трансформаторах средней мощности,

0,95...0,995 — в трансформаторах большой мощности.

1.7 ОПЫТЫ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Экспериментально трансформаторы испытываются в граничных режимах ($\underline{Z}_н = 0, \underline{Z}_н = \infty$).

Проводят два опыта:

- холостого хода,
- короткого замыкания.

Эти исследования дают возможность определить исходные данные для расчета трансформатора. Опыт холостого хода используют как элемент технического контроля. Проверяют мощность магнитных потерь, коэффициент трансформации, ток холостого хода. Опыт короткого замыкания дает возможность определить электрические потери, а также вычислить ток короткого замыкания в условиях эксперимента.

Опыт холостого хода проводят при отключенной нагрузке (рис. 1.15).

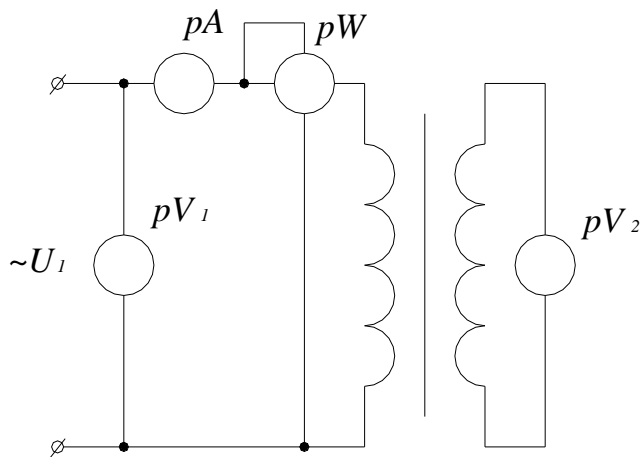


Рис. 1.15 Схема включения трансформатора при опыте холостого хода

Вольтметр pV_2 имеет очень большое сопротивление, т. е. считают, что $Z_H \rightarrow \infty$. Приборами pV_1 , pA , pW , pV_2 измеряют соответственно напряжение, подведенное к первичной обмотке; ток холостого хода; мощность, потребляемую трансформатором в режиме холостого хода; напряжение на вторичной обмотке.

В режиме холостого хода $U_1 \approx E_1$ и $U_{2x} \approx E_2$, поэтому с достаточной точностью, используя показания приборов pV_1 и pV_2 можно определить коэффициент трансформации $k = U_1/U_{2x}$.

Баланс активных мощностей определяется соотношением

$$P_1 = P_2 + P_m + P_\gamma$$

где мощность P_1 измеряется прибором pW .

Мощность $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ равна нулю, так как $I_2 = 0$.

Ток холостого хода обычно невелик и составляет $(3... 10)\% I_H$. Поэтому считают, что

$$P_\gamma = I_{1x}^2 r_1 \rightarrow 0$$

В этом случае из уравнения баланса мощностей вытекает

$$P_1 = P_m$$

Ваттметр в опыте холостого хода показывает мощность потерь в стали. Таким образом, **в опыте холостого хода определяются магнитные потери.**

Опыт короткого замыкания проводят при замкнутой вторичной цепи (рис. 1.16). Амперметр pA_2 имеет внутреннее сопротивление, близкое к нулю. Приборами pA_1 , pV , pW , pA_2 измеряют соответственно I_1 , U_1 , P_1 , I_2 .

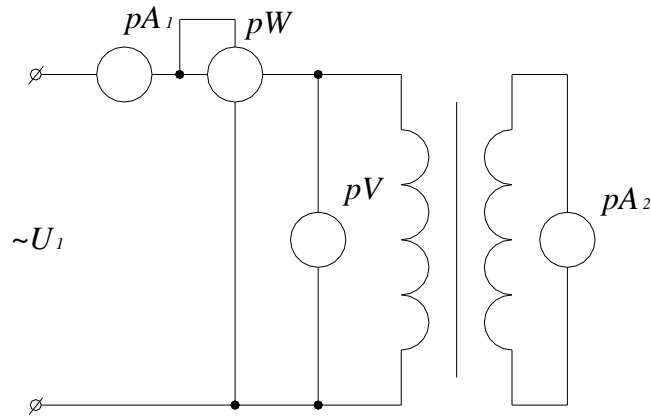


Рис. 1.16 Схема включения трансформатора при опыте короткого замыкания

Ток короткого замыкания обычно в 20...30 раз больше номинального. Поэтому **опыт проводят при сниженном напряжении U_1** . Напряжение U_1 снижают настолько, чтобы во вторичной цепи протекал ток, равный номинальному. Коэффициент трансформации определяют по измеренным токам $k = I_2/I_1$.

В уравнении баланса мощностей

$$P_1 = P_2 + P_m + P_{\Sigma},$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = 0,$$

так как $U_2 = 0$ ($Z_H = 0$).

Магнитные потери пропорциональны квадрату потока, который также пропорционален U_1 т. е.

$$P_m \sim k\Phi^2$$

$$E_1 = 4,44\Phi_m f w_1;$$

$$E_1 \approx U_1;$$

$$\Phi \sim U_1.$$

Проводя опыт при сниженном напряжении, магнитными потерями пренебрегают

$$P_m \rightarrow 0$$

Тогда из баланса мощностей следует

$$P_1 = P_{\Sigma}$$

В опыте короткого замыкания W_1 показывает мощность потерь в меди. Таким образом, **при исследовании короткого замыкания измеряются электрические потери.**

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

1.8 РЕАЛЬНЫЙ, ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЙ И ПРИВЕДЕННЫЙ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Реальный трансформатор имеет обмотки, расположенные на сердечнике. Обмотки имеют как активное сопротивление, так и сопротивление рассеяния, т. е., кроме основного магнитного потока, пронизывающего обе обмотки, существуют потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток.

При теоретическом анализе работы трансформатора часто употребляют термин «идеализированный трансформатор».

Идеализированный трансформатор — это трансформатор, в котором отсутствуют магнитные потоки рассеяния, а активные сопротивления обмоток равны нулю. Это понятие используют для упрощенных исследований процессов.

В теоретических исследованиях и при построении схем замещения трансформатора пользуются также понятием приведенного трансформатора.

Приведенный трансформатор — эквивалентный реальному трансформатору, у которого коэффициент трансформации равен единице (количество витков вторичной обмотки равно количеству витков первичной обмотки). Для замещения реального трансформатора приведенным нужно выдержать принципы эквивалентности энергетического состояния. Приведенные электрические величины обозначаются штрихами.

Можно записать уравнение баланса энергии для приведенного и реального трансформатора:

$$\dot{E}_2 \dot{I}_2 = \dot{E}_2' \dot{I}_2'$$

т. е., приведенная ЭДС вторичной обмотки

$$\dot{E}_2' = \frac{\dot{E}_2 \dot{I}_2}{\dot{I}_2'}$$

а поскольку $\dot{I}_2' = -\dot{I}_2 \frac{1}{k}$,

то

$$\dot{E}_2' = -\dot{E}_2 k.$$

Таким же способом можно записать уравнение баланса мощностей

$$\dot{U}_2 \dot{I}_2 = \dot{U}_2' \dot{I}_2'$$

и получить выражение для приведенного напряжения вторичной обмотки

$$\dot{U}_2' = -\dot{U}_2 k.$$

В общем случае приведенные величины просто получить умножением уравнения вторичной цепи трансформатора

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2$$

на коэффициент приведения (коэффициент трансформации k)

$$\dot{U}_2 k = \dot{E}_2 k - j \dot{I}_2 x_2 k - \dot{I}_2 r_2 k$$

Это уравнение можно записать соответственно для приведенного трансформатора:

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - j \dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' r_2'$$

и найти приведенные величины:

$$\dot{U}_2' = -\dot{U}_2 k;$$

$$\dot{E}_2' = -\dot{E}_2 k;$$

$$r_2' = r_2 k^2;$$

$$x_2' = x_2 k^2;$$

$$Z_2' = Z_2 k^2.$$

Таким же способом можно определить и приведенные параметры нагрузки (общий случай):

$$Z_n' = Z_n k^2;$$

$$r_n' = r_n k^2;$$

$$L_n' = L_n k^2.$$

Таким образом, приведенный трансформатор описывается тремя уравнениями:

а) соотношением токов

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1x} + (-\dot{I}_2');$$

б) уравнением первичной цепи

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j \dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1$$

в) уравнением вторичной приведенной цепи

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - j \dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' r_2'$$

Необходимо учитывать, что приведенная ЭДС вторичной обмотки равна ЭДС первичной обмотки ($\dot{E}_2' = \dot{E}_1$).

1.9 СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Уравнения приведенного трансформатора — это уравнения электрической цепи с двумя смежными контурами, составленными по законам Кирхгофа. Действительно,

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1x} + (-\dot{I}_2');$$

— это уравнение по первому закону Кирхгофа (для узла электрической цепи).

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j \dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1;$$

— это уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа, для замкнутого контура с идеальными элементами, которые имеют параметры r_1 и x_1 и обеспечивают величины \dot{U}_1, \dot{E}_1 .

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - j \dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' r_2'$$

—это также уравнение по второму закону Кирхгофа для замкнутого контура с идеальными элементами.

Общий для смежных контуров элемент, индуцирующий ЭДС ($\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$), должен иметь некоторое внутреннее сопротивление

$$\underline{Z}_0 = r_0 + jx_0,$$

обеспечивающее протекание в нем тока холостого хода. На рис. 1.17 приведена **схема замещения трансформатора**, отвечающая уравнениям приведенного трансформатора.

Общий участок схемы, по которому проходит ток холостого хода I_{1x} , называется намагничивающей ветвью и замещает действие основного магнитного потока.

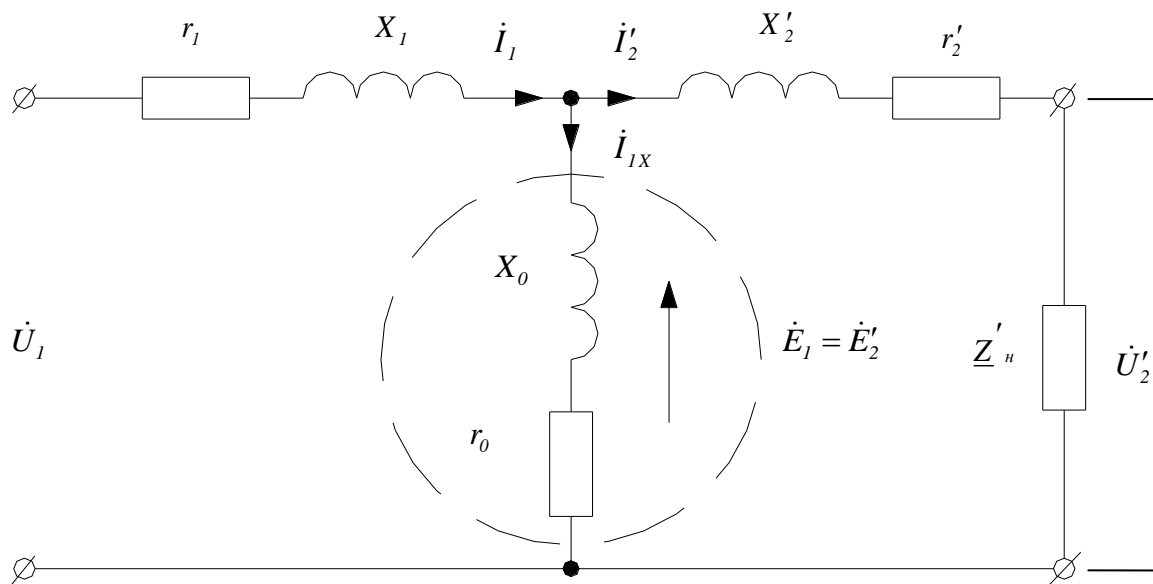


Рис.1.17 Схема замещения трансформатора

1.10 ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трехфазный ток можно преобразовывать тремя однофазными или одним трехфазным трансформатором. На рис. 1.18 приведено схематическое изображение трехфазных трансформаторов, соединенных Y/Y и Y/ Δ . Обычно первичная обмотка обозначается большими буквами, а вторичная — маленькими. Начала обмоток обозначаются A, B, C, a, b, c , концы — X, Y, Z, x, y, z .

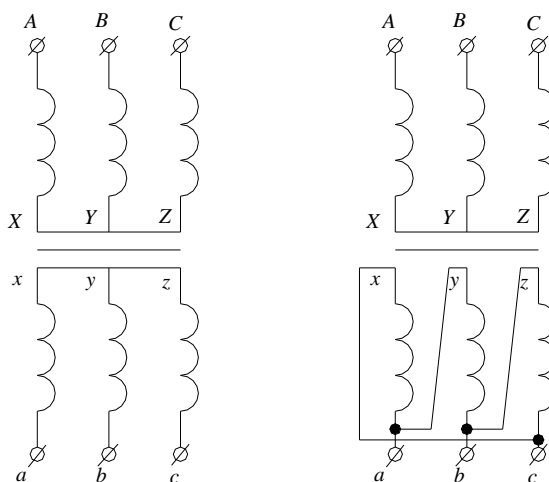


Рис. 1.18 Схематическое изображение трехфазных трансформаторов, соединенных Y/Y и Y/Δ

Обозначение выводов обмоток трансформаторов приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Тип трансформатора	Обмотка ВН			Обмотка НН		
	Начало	Конец	Нейтраль	Начало	Конец	Нейтраль
Однофазный	A	X	-	a	x	-
Трехфазный	A, B, C	X, Y, Z	0	a, b, c	x, y, z	0

Стандартом нормируется несколько схем соединения. Пример обозначения:

Y/Y — 12 — звезда — звезда,

Y/Δ — 11 — звезда — треугольник,

Y/Y₀ — 12 — звезда — звезда с нулем.

Числа 11 и 12 показывают группу соединения и характеризуют взаимное расположение векторов высшего и низшего линейного напряжения. Угол между векторами первичного и вторичного линейного напряжения равен углу между часовой и минутной стрелками в определенное время. В группе 12 этот угол равен 360°, в группе 11 — 330°.

В трехфазных трансформаторах различают два коэффициента трансформации — фазный и линейный.

Для трехфазного трансформатора **фазным коэффициентом трансформации** называют отношение фазных напряжений первичной и вторичной обмоток в режиме холостого хода, т. е.

$$k_{\phi} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Линейный коэффициент трансформации трехфазного трансформатора — это отношение линейных напряжений в режиме холостого хода, т. е.

$$k_{\text{л}} = \frac{U_{1\text{л}}}{U_{2\text{л}}}.$$

В случае соединения по схемам Y/Y и Δ/Δ коэффициенты трансформации равны $k_{\text{л}} = k_{\phi}$. Если схема соединения обмоток Y/ Δ , то $k_{\text{л}} = \sqrt{3}k_{\phi}$, а при соединении Δ /Y - $k_{\text{л}} = \frac{k_{\phi}}{\sqrt{3}}$.

Векторная диаграмма трехфазного трансформатора (рис. 1.19) строится на векторах потоков, которые сдвинуты на 120° . Токи холостого хода опережают потоки на угол магнитного запаздывания. ЭДС обмоток отстают от векторов потоков на 90° .

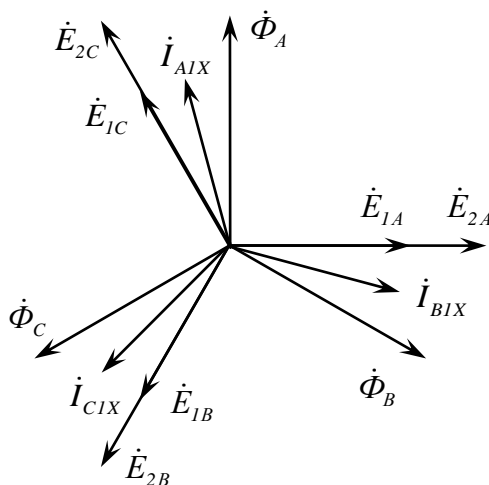


Рис. 1.19 Векторная диаграмма трехфазного трансформатора

1.11 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Основными задачами измерительных трансформаторов являются:

- изоляция измерительных приборов и аппаратов автоматической защиты от цепи высокого напряжения для безопасности измерения;
- расширение границ измерения измерительных приборов.

Измерительные трансформаторы бывают двух типов:

- трансформаторы напряжения;
- трансформаторы тока.

Первичная обмотка (обмотка высшего напряжения) **трансформатора напряжения** включается как вольтметр на измеряемое напряжение U_1 (рис. 1.20). На вторичную обмотку включаются вольтметр и цепи напряжения других приборов

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

или

$$U_1 = kU_2.$$

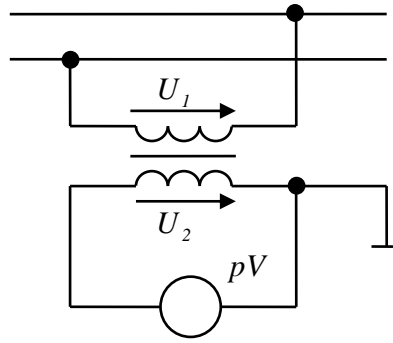


Рис. 1.20 Схема включения трансформатора напряжения

Первичной обмоткой **трансформатора тока** является сама линия (рис. 1.21). Вторичную обмотку замыкают на амперметр и цепи других измерительных приборов

$$k = \frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2},$$

$$I_1 = \frac{I_2}{k}.$$

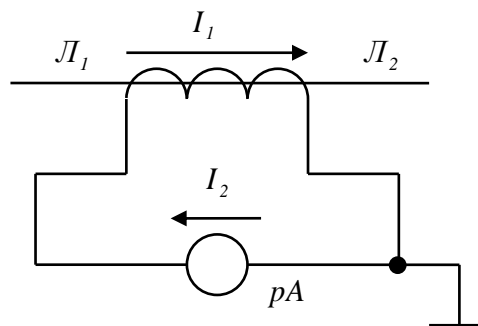


Рис. 1.21 Схема включения трансформатора тока

1.12 АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

В автотрансформаторах первичная и вторичная обмотки связаны электрически, т. е. **обмотка низкого напряжения является частью обмотки высокого напряжения.**

На рис. 1.22 приведена схема автотрансформатора, где Ax — первичная обмотка с числом витков w_1 , ax — вторичная обмотка с числом витков w_2 .

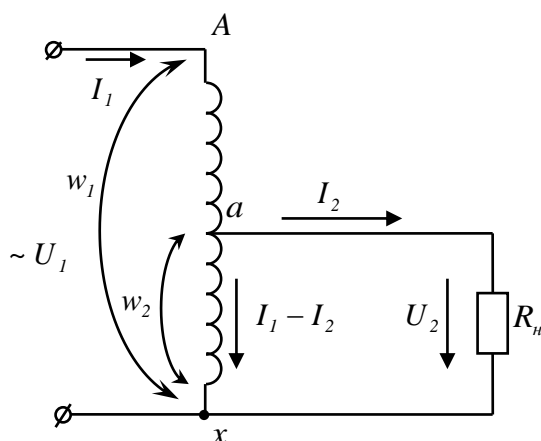


Рис. 1.22 Схема автотрансформатора

Общая часть обмотки ax изготавливается из провода меньшего сечения, поскольку по нему проходит ток $(I_1 - I_2)$.

$$k_{a.m.} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Поэтому в автотрансформаторах значительно экономится медь и снижаются потери (лишь одна обмотка). Преимущества автотрансформатора увеличиваются, когда общая часть обмотки велика, т. е. когда коэффициент трансформации близок к единице. Обычно в автотрансформаторах

$$k_{a.m.} = 1,1 \dots 2$$

и они имеют очень высокий КПД.

В лабораторных условиях для плавного регулирования напряжения от нуля до подводимого напряжения, и даже несколько выше, применяется лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), в котором регулирование напряжения осуществляется при перемещении скользящего контакта по виткам обмотки. Регуляторы напряжения этого типа выполняются однофазными и трехфазными.

Автотрансформаторы имеют следующие недостатки:

- электрическая связь цепей ограничивает использование автотрансформаторов для питания высокого напряжения.
- в случае пробоя изоляции на нагрузку подается полное напряжение источника питания.

1.13 ИЗОБРАЖЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

Стандартом предусмотрены три способа условных графических обозначений трансформаторов:

- упрощенный однолинейный;
- упрощенный многолинейный;
- развернутый.

Упрощенным однолинейным способом пользуются сравнительно редко. В упрощенных обозначениях обмотки изображаются в виде окружностей. При однолинейном способе выводы обозначают одной линией с указанием количества выводов.

При упрощенном многолинейном способе обмотки изображаются в виде окружностей, но выводы обозначаются полностью. Выводы можно изображать с любой стороны. В развернутых обозначениях обмотки представляются в виде цепочек полуокружностей. На рис.1.23, а,б приведены упрощенное многолинейное изображение трехфазного трансформатора и развернутое обозначение однофазного трансформатора с сердечником.

На упрощенных линейных обозначениях трехфазных трансформаторов обычно указывают способ соединения обмоток. На рис. 1.23,в приведены обозначения трансформаторов с различным соединением обмоток.

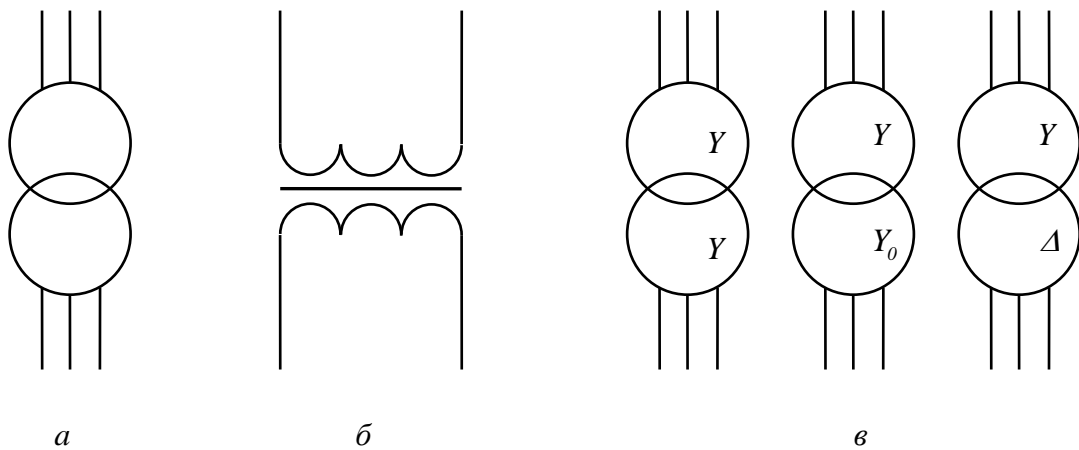


Рис. 1.23 Обозначение трансформаторов,

- а – упрощенное многолинейное обозначение трехфазного трансформатора;
- б – развернутое обозначение однофазного трансформатора с сердечником;
- в – примеры обозначения трансформаторов с различным соединением обмоток.