

Лекция №15

Принцип действия трансформатора. Основные эксплуатационные режимы работы.

Вопросы лекции:

1. Назначение и принцип действия трансформатора.
2. Холостой ход трансформатора.
3. Работа трансформатора при нагрузке.
4. Приведение величин вторичной обмотки к числу витков первичной обмотки.

1. Назначение 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 (ГОСТ 16110 - 82).

Первые трансформаторы с разомкнутым магнитопроводом предложил в 1876 г. русский ученый П.Н.Яблочков, который применил их для питания электрической "свечи". В 1885 г. венгерские ученые М.Дебри, О.Блати, К.Циперковский разработали однофазные промышленные трансформаторы с замкнутым магнитопроводом. Трехфазные трансформаторы появились в 1889 1891 гг. (М.О.Доливо-Добровольский, Н.Тесла).

Трансформаторы широко применяются в разных областях электроники, радиотехники, электротехники, в устройствах измерения, автоматического управления и регулирования. По особенностям конструкции и применению трансформаторы можно разделить на силовые, сварочные, измерительные и специальные.

Наибольшее применение в народном хозяйстве и в военном деле получили силовые трансформаторы, которые являются необходимым эле-

ментом промышленной электрической сети. Генераторы на электростанциях вырабатывают электрическую энергию при напряжении не более 24 кВ, так как при более высоких напряжениях возникают трудности создания качественной изоляции в электрических машинах. Передача электрической энергии на большие расстояния при таких относительно низких напряжениях экономически невыгодна из-за больших потерь в линии. И поэтому на электрических станциях устанавливаются силовые трансформаторы, повышающие напряжение до 110, 220, 500, 750 и 1150 кВ. У потребителей напряжение при помощи трансформаторов понижается несколькими ступенями: на районных подстанциях до 35(10) кВ, на подстанциях предприятий до 10(6) кВ и, наконец, на подстанциях цехов и жилых районов - до 380/220 В. Трансформаторы можно классифицировать по следующим признакам:

- в зависимости от числа фаз преобразованного напряжения – на однофазные и трехфазные;
- в зависимости от числа обмоток - на двухобмоточные и многообмоточные;
- в зависимости от конфигурации магнитопровода - на стержневые(рис. 1,а,б),броневые(рис. 1,в,г),тороидальные(рис. 1,д).

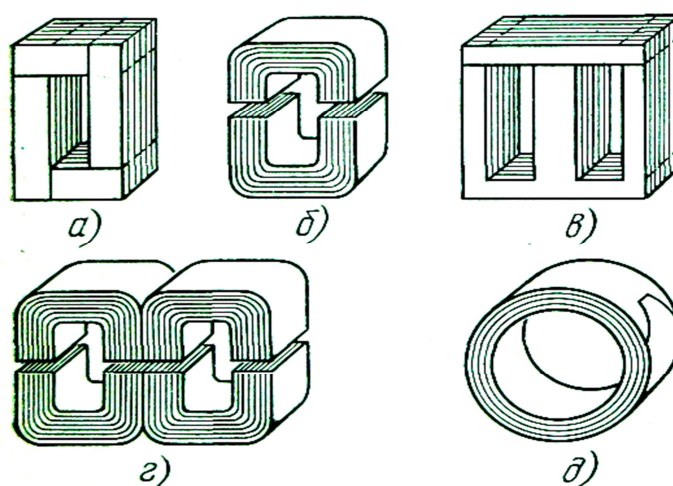


Рис. 1. Основные типы трансформаторов : а) стержневой шихтованный;
б) стержневой навитой; в) броневой шихтованный;
г) броневой навитой; д) кольцевой (тороидальный) навитой

Конструктивно любой трансформатор имеет две основные части: м а г н и т о п р о в о д и о б м о т к и . Трансформаторы большой мощности, кроме того, имеют систему охлаждения. Часть магнитопровода, на которой размещены обмотки, называется с т е р ж н е м , а остальная часть, замыкающая магнитопровод, - я р м о м .

Материалом магнитопровода трансформатора является горячекатанная или холоднокатанная электротехническая сталь. Для уменьшения вихревых токов магнитопровод выполняется не сплошным, а в виде пакета штампованных пластин или в виде рулона стальной ленты. В частности, при частоте тока до 150 Гц магнитопровод собирают из листовой стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. Ленточные магнитопроводы используют в маломощных трансформаторах. Для увеличения электрического сопротивления, препятствующего возрастанию вихревых токов, пластины магнитопровода (или полосу ленты) изолируют одна от другой диэлектрическими материалами (лаком, эмалью, окисной пленкой, бумагой). Чтобы магнитопровод при работе не "зуммерил", его стягивают болтами или охватывают металлической обоймой.

Обмотки выполняют в виде непрерывно намотанного в несколько слоев или в виде отдельных секций и катушек. На магнитопроводе стержневого типа каждая обмотка размещена на отдельном стержне (рис. 2,а) рядом или одна поверх другой. В броневом магнитопроводе все обмотки размещают на центральном стержне (рис. 2,б). В тороидальном трансформаторе обмотки размещаются по всей окружности кольца (тороида).

Схему размещения обмоток выбирают из соображений минимизации потерь основного магнитного потока трансформатора, улучшения условий охлаждения, повышения надежности работы и оптимизации расходных материалов.

Обмотка трансформатора, к которой подводится электроэнергия, называется п е р в и ч н о й , а обмотка, к которой подключены электроприемники (нагрузка) и от которой отбирается электроэнергия, называется в т о р и ч н о й . Первичных и вторичных обмоток может быть несколько. Обмотка, имеющая наибольшее напряжение, называется обмоткой высшего напряжения (ВН), а обмотка, имеющая меньшее напряжение,

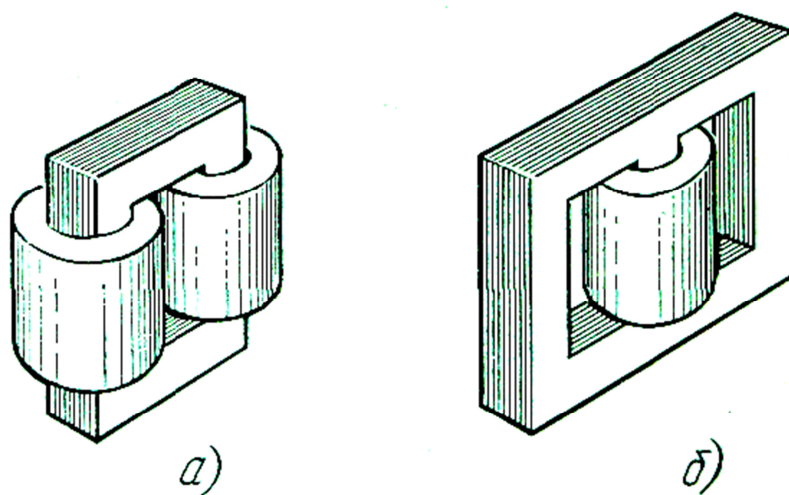


Рис. 2. Размещение обмоток на стержневом (а) и
броневом (б) магнитопроводах

называется обмоткой низшего напряжения (НН). Трансформатор, у которого первичная обмотка является обмоткой ВН, называется понижающим, а тот, у которого первичная обмотка является обмоткой НН,

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. Рассмотрим процессы, происходящие в однофазном двухобмоточном трансформаторе, электромагнитная схема которого показана на рис. 3. Если трехфазный трансформатор питает симметричную нагрузку, то токи во всех фазах будут равны, и процессы в каждой его фазе протекают так же, как и у однофазного трансформатора.

При подаче переменного напряжения U_1 на первичную обмотку w_1 в ней появляется переменный ток, который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ_m . Замыкаясь по магнитопроводу, магнитный поток Φ_m сцепляется с витками обмоток трансформатора w_1 и w_2 и наводит в них электродвижущие силы, которые определяются следующим образом:

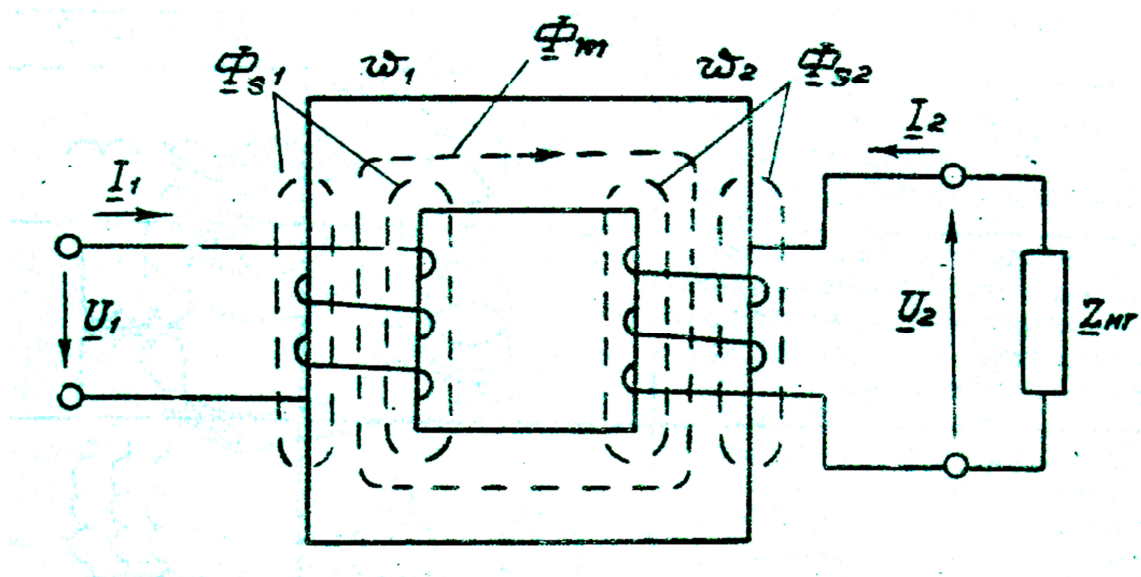


Рис. 3. Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (1)$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (2)$$

В трансформаторе, магнитопровод которого не насыщен, магнитный поток можно считать синусоидальным, т.е.

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t,$$

где Φ_m - амплитудное значение потока;

ω - угловая частота изменения магнитного потока.

Подставляя значение Φ в (2.1) и (2.2), получим:

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -w_1 \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot \cos \omega t = w_1 \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot \sin(\omega t - 90^\circ), \\ e_2 &= -w_2 \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot \cos \omega t = w_2 \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot \sin(\omega t - 90^\circ), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Из (3) следует, что электродвижущие силы в обмотках трансформатора отстают от вызывающего их магнитного потока на четверть периода, т.е. на 90 электрических градусов.

Максимальное значение ЭДС согласно (3) можно представить в виде

$$E_{1m} = w_1 \cdot \Phi_m \cdot \omega; E_{2m} = w_2 \cdot \Phi_m \cdot \omega.$$

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

$$E_1 = 4.44f w_1 \cdot \Phi_m; \quad (4)$$

$$E_2 = 4.44f w_2 \cdot \Phi_m. \quad (5)$$

Таким образом, электрическая энергия из первичной обмотки в цепь вторичной обмотки передается посредством электромагнитного поля, т.е. цепи эти не имеют гальванической связи, а ЭДС, индуцированные в обмотках трансформатора, прямо пропорциональны числам витков, т.е.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = n. \quad (6)$$

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения называется коэффициентом трансформации трансформатора и обозначается буквой n .

2. Холостой ход трансформатора

Режимом холостого хода трансформатора называется такой режим его работы, при котором первичная обмотка включена в сеть переменного тока с напряжением \underline{U}_1 и частотой f , а вторичная обмотка разомкнута, т.е. ток вторичной обмотки равен нулю (рис.4).

Под действием напряжения \underline{U}_1 по первичной обмотке протекает весьма незначительный ток холостого хода \underline{I}_{10} , который создает магнитодвижущую силу (МДС), равную

$$\underline{I}_{10} \cdot w_1,$$

где w_1 - число последовательно соединенных витков первичной обмотки. Эта МДС создает в трансформаторе магнитный поток, преобладающая часть которого $\underline{\Phi}_0$ замыкается по магнитопроводу, а другая часть потока, обычно гораздо меньшая (в 200 - 300 раз), замыкается вне магнитопровода - это так называемый поток рассеяния $\underline{\Phi}_{s1}$.

Основной магнитный поток $\underline{\Phi}_0$, будучи сцеплен с обеими обмотками, наводит в них ЭДС, которые определяются в соответствии с (4) и (5).

Поток рассеяния $\underline{\Phi}_{s1}$ сцеплен главным образом с первичной обмоткой и наводит в ней ЭДС рассеяния, связь которой с пара-

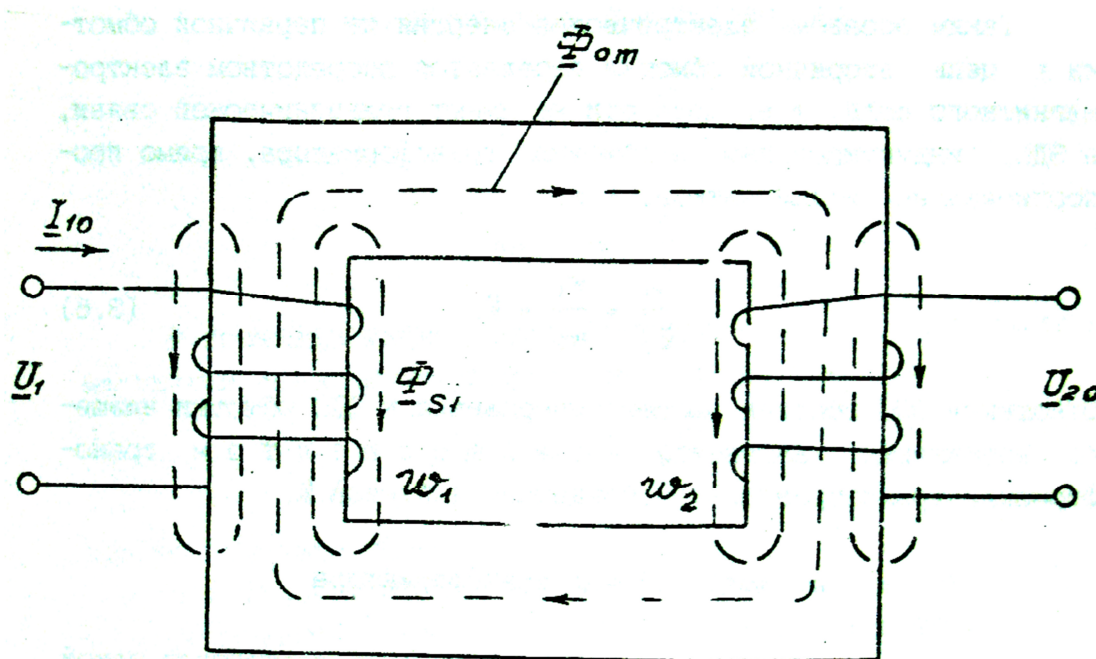


Рис. 4. Схема однофазного трансформатора
в режиме холостого хода

метрами трансформатора можно определить следующим образом. При синусоидальном изменении тока мгновенное значение ЭДС рассеяния первичной обмотки

$$\begin{aligned} e_{s1} &= -L_{s1} \cdot di_1/dt = -L_{s1} \cdot d(I_{1m} \cdot \sin \omega t)/dt = \\ &= -L_{s1} \cdot \omega \cdot I_{1m} \cdot \cos \omega t = -I_{1m} \cdot x_1 \cdot \cos \omega t. \end{aligned} \quad (7)$$

в этом выражении:

L_{s1} - индуктивность рассеяния первичной обмотки,

x_1 - индуктивное сопротивление рассеяния этой обмотки.

Таким образом, ЭДС рассеяния e_{s1} отстает по фазе от создающего ее тока i_1 на $\pi/2$, а действующее значение этой ЭДС, выраженное в комплексной форме, с учетом, что в данном случае $I_1 = I_{10}$, определяется следующим соотношением:

$$E_{s1} = -jx_1 \cdot I_{10}. \quad (8)$$

При протекании тока холостого хода I_{10} в первичной обмотке возникает падение напряжения $I_{10} \cdot r_1$, определяемое активным сопротивлением обмотки r_1 .

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

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 + \underline{E}_{s1} = \underline{I}_{10} \cdot r_1, \quad (9)$$

Откуда

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 - \underline{E}_{s1} + \underline{I}_{10} \cdot r_1, \quad (10)$$

или с учетом (8) можно записать

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + j \cdot \underline{I}_{10} \cdot x_1 + \underline{I}_{10} \cdot r_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_{10}(r_1 + j x_1) = -\underline{E}_1 + \underline{I}_{10}z_1. \quad (11)$$

Поскольку ток холостого хода очень мал, падение напряжения $\underline{I}_{10}Z_1$ обычно не превышает 0.5% от \underline{U}_1 . Поэтому с достаточной степенью точности можно считать

$$\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1, \quad (12)$$

т.е. напряжение на зажимах первичной обмотки \underline{U}_1 уравнивается ЭДС \underline{E}_1 .

Что касается вторичной цепи, то тока при холостом ходе в ней нет, а потому напряжение на ее зажимах \underline{U}_2 точно равно ЭДС \underline{E}_2

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2. \quad (13)$$

Учитывая (6), (12) и (13), можно записать

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \approx n, \quad (14)$$

т.е. коэффициент трансформации равен отношению напряжений при холостом ходе трансформатора.

Действие противо-ЭДС \underline{E}_1 можно представить в виде падения напряжения от тока холостого хода $\underline{I}_{10} \cdot X_1$ на некотором сопротивлении \underline{Z}_m

$$-\underline{E}_1 = \underline{E}_{10} \cdot \underline{Z}_m = \underline{I}_{10} \cdot r_m + j \cdot x_m \cdot \underline{I}_{10},$$

где $\underline{Z}_m = \sqrt{r_m^2 + x_m^2}$ - параметр, характеризующий магнитную трансформатора и называемый полным сопротивлением контура намагничивания;

r_m - активное сопротивление контура намагничивания, определяемое потерями в стали трансформатора;

x_m - индуктивное сопротивление контура намагничивания, определяемое потокоцеплением основного потока с первичной и вторичной обмотками при токе в первичной обмотке, равном \underline{I}_{10} .

С учетом этого уравнение напряжений первичной цепи при холостом ходе может быть записано в виде

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_{10} \cdot r_m + j \cdot x_m \cdot \underline{I}_{10} + \underline{I}_{10} \cdot r_1 + j \cdot \underline{I}_{10} \cdot x_1. \quad (15)$$

3. Работа трансформатора при нагрузке

Под нагрузкой понимается ток вторичной цепи: чем он больше, тем больше нагрузка. К трансформатору подключаются различного рода потребители: электрические двигатели, освещение и т.п.

При подключении нагрузки $\underline{Z}_{н0}$ к зажимам вторичной обмотки трансформатора в последней появляется ток \underline{I}_2 (рис. 5).

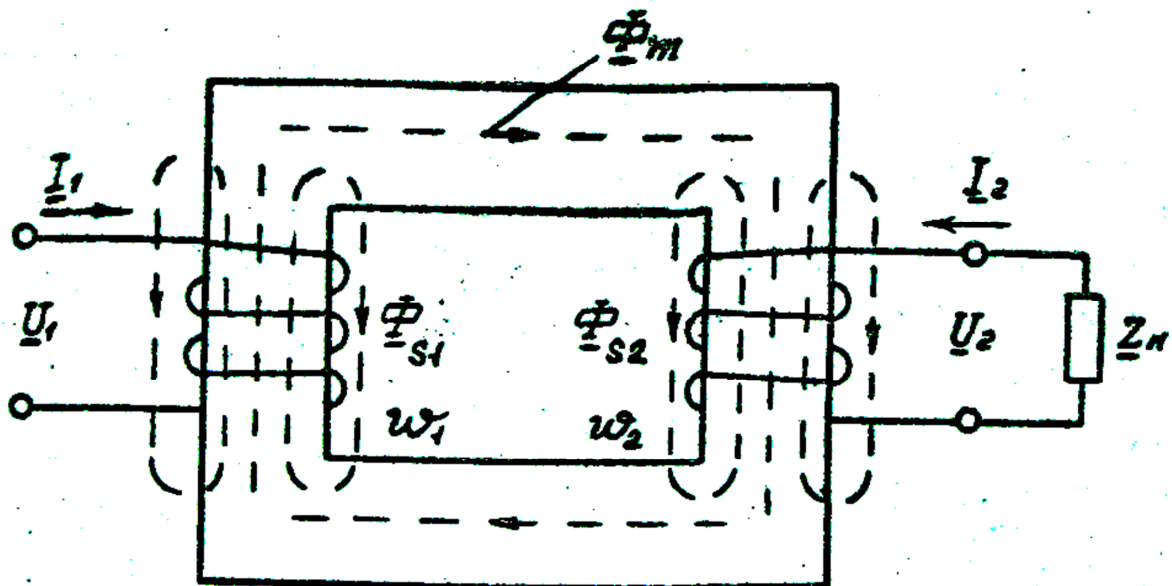


Рис. 5. Схема однофазного трансформатора в режиме нагрузки

Ток \underline{I}_2 , протекая по вторичной обмотке, создает магнитный поток вторичной обмотки $\underline{\Phi}_2$. Основная часть этого потока замыкается по магнитопроводу трансформатора, сцепляясь со вторичной и первичной обмотками. Меньшая (в 200 - 300 раз) часть потока вторичной обмотки - поток рассеивания $\underline{\Phi}_{s2}$ сцепляется только со вторичной обмоткой и наводит в ней ЭДС рассеивания \underline{E}_{s2} . По аналогии с выражениями для ЭДС рассеивания первичной обмотки (7) и (8) можно записать:

$$\underline{E}_{s2} = -j \cdot x_2 \cdot \underline{I}_2, \quad (16)$$

где x_2 - индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки.

Согласно закону Ленца магнитный поток вторичной обмотки $\underline{\Phi}_2$ направлен навстречу потоку первичной обмотки $\underline{\Phi}_1$ и стремится уменьшить суммарный магнитный поток трансформатора $\underline{\Phi}$, который может быть выражен суммой

$$\underline{\Phi} = \underline{\Phi}_1 + \underline{\Phi}_{s1} + \underline{\Phi}_2 + \underline{\Phi}_{s2}. \quad (17)$$

Напряжение сети, к которой подключена первичная обмотка, стремится восстановить значение магнитного потока, посылая в первичную обмотку трансформатора дополнительный ток. Таким образом, при нагрузке трансформатора ток первичной обмотки \underline{I}_1 можно выразить

$$\underline{I}_1 = I_{10} + \Delta I_1, \quad (18)$$

где I_{10} - ток холостого хода,

ΔI_1 - ток, идущий на поддержание неизменным магнитного потока при подключении нагрузки (появлении тока \underline{I}_2).

В этом сказывается общий принцип саморегулирования, который действителен для всех электрических машин. Количественная зависимость между вторичным и первичным током устанавливается на основании уравнения магнитодвижущих сил.

Умножив обе части уравнения (18) на число витков w_1 первичной обмотки, получим уравнение

$$\underline{I}_1 \cdot w_1 = \underline{I}_{10} \cdot w_1 + \Delta \underline{I}_1 \cdot w_1. \quad (19)$$

Поскольку увеличение МДС первичной обмотки $\Delta \underline{I}_1 \cdot w_1$ при нагрузке в каждый момент времени равно и противоположно по направлению МДС вторичной обмотки, т.е.

$$\Delta \underline{I}_1 \cdot w_1 = - \underline{I}_2 w_2, \quad (20)$$

то уравнение МДС (3.19) можно записать как

$$\underline{I}_1 \cdot w_1 = \underline{I}_{10} \cdot w_1 - \underline{I}_2 w_2. \quad (21)$$

Разделив обе части (3.21) на w_1 , получим уравнение токов трансформатора

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} - \underline{I}_2 (w_2 / w_1). \quad (22)$$

Если обозначить

$$\underline{I}'_2 = \underline{I}_2 (w_2 / w_1),$$

где \underline{I}'_2 - ток вторичной обмотки, приведенный к числу витков первичной обмотки, то уравнение токов (22) примет вид

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + (- \underline{I}'_2). \quad (23)$$

Ток во вторичной обмотке \underline{I}_2 определяется ЭДС \underline{E}_2 , которая в значительной части идет на создание напряжения на выводах вторичной обмотки

$$\underline{U}_2 = \underline{I}_2 \cdot Z_{\text{н}}.$$

Оставшаяся часть \underline{E}_2 идет на компенсацию ЭДС рассеяния \underline{E}_{s2} (16) и падения напряжения на активном сопротивлении вторичной обмотки $\underline{I}_2 \cdot r_2$.

Таким образом, напряжение \underline{U}_2 равно \underline{E}_2 (за вычетом $E_{s2} = -j \cdot I_2 \cdot x_2$ и I_2 , а значит, уравнение напряжений вторичной обмотки трансформатора можно записать в следующем виде:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - jI_2 \cdot x_2 - I_2 \cdot r_2. \quad (24)$$

Таким образом, основные уравнения трансформатора - уравнения напряжений первичной и вторичной обмоток и уравнение токов - в окончательном виде могут быть записаны в соответствии с (11), (23) и (24) в следующем виде:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot r_1 + j \cdot \underline{I}_1 \cdot x_1; \quad (25)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - jI_2 \cdot x_2 - I_2 \cdot r_2; \quad (26)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + (-\underline{I}'_2). \quad (27)$$

Уравнения (25) и (26) носят название уравнений электрического равновесия. Эти уравнения совместно с уравнением (27) описывают рабочий процесс в трансформаторе при нагрузке и являются основными уравнениями трансформатора.

Согласно (25) приложенное к первичной обмотке напряжение \underline{U}_1 уравнивается наведенной в ней ЭДС \underline{E}_1 и падением напряжения $\underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1$.

При работе трансформатора в диапазоне от холостого хода до нагрузок, незначительно превышающих номинальную, падение напряжения относительно мало (2 - 4%), и можно принять, что

$$U_1 \approx E_1.$$

Поскольку

$$E_1 = 4.44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_m, \quad (28)$$

то при $U_1 = \text{const}$ и $f = \text{const}$ можно считать, что в указанном диапазоне нагрузок поток Φ_m трансформатора должен оставаться постоянным, при этом намагничивающий ток I_{10} также будет практически неизменным и равным току холостого хода I_0 .

Для сохранения постоянного значения магнитного потока при нагрузке трансформатора с ростом тока I_2 согласно равенству

$$I_1 = I_{10} + (-I_2')$$

должен возрасти и ток I_1 , при этом магнитное действие тока I_2 будет компенсироваться магнитным действием составляющей $-I_2$ в токе I_1 .

По самому принципу действия ясно, что трансформатор нельзя включать в сеть постоянного тока. В этом случае магнитный поток в нем будет неизменным во времени и, следовательно, не будет индуцировать ЭДС в обмотках. Вследствие этого в первичной обмотке будет протекать большой ток, так как при отсутствии ЭДС он будет ограничиваться только относительно небольшим активным сопротивлением этой обмотки. Во избежание перегорания обмотки протекание такого тока допускать нельзя.

В заключение отметим, что если при работе трансформатора от сети с $U_1 = \text{const}$ изменится частота f или число витков его первичной обмотки w_1 , то для того, чтобы обеспечить равенство

$$U_1 \approx E_1,$$

поток согласно (28) также изменится. При уменьшении частоты или числа витков поток увеличивается, а при их увеличении уменьшается.

4. Приведение величин вторичной обмотки к числу витков первичной обмотки

При больших коэффициентах трансформации K численные значения токов, напряжений, ЭДС и сопротивлений первичной и

вторичной обмоток сильно отличаются друг от друга. Это в ряде случаев затрудняет количественный анализ работы трансформатора.

Например, при больших коэффициентах практически невозможно на векторной диаграмме изобразить в одном масштабе величины первичной и вторичной обмоток.

Эти затруднения можно устранить, если реальный трансформатор, имеющий различные числа витков у первичной W_1 и вторичной W_2 обмоток, заменить эквивалентным трансформатором, у которого обе обмотки будут иметь одинаковые числа витков. Эквивалентный трансформатор, у которого $W_2 = W_1$, называется *приведенным* (рис. 6).

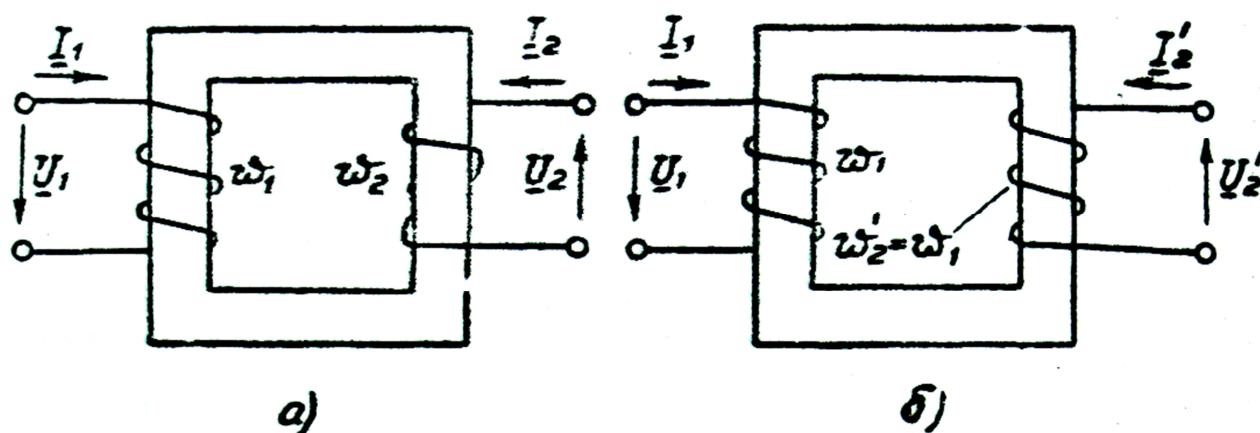


Рис. 6. Электрические величины в реальном (а) и приведенном (б) трансформаторе

Указанная замена будет правомерной, если все энергетические и электромагнитные соотношения в реальном и приведенном трансформаторах будут одинаковыми и, следовательно, не отразятся на режиме работы первичной обмотки. Исходя из этого, определяются токи, ЭДС, напряжения и сопротивления вторичной цепи приведенного трансформатора.

Эти величины называются *приведенными* к числу витков первичной обмотки или просто приведенными и обозначаются штрихом (').

Определим эти величины.

Так как

$$w_2' = w_1,$$

то

$$E_2' = E_1 = E_2 \cdot w_1 / w_2 = E_2 \cdot n.$$

Аналогично $U_2' = E_2 \cdot n$. МДС вторичной обмотки приведенного трансформатора должна быть равна МДС вторичной обмотки реального трансформатора, т.е.

$$I_2' \cdot w_1 = I_2 \cdot w_2,$$

откуда

$$I_2' = I_2 w_2 / w_1 = I_2 \cdot 1 / n, \quad (29)$$

при этом полная мощность вторичной обмотки остается неизменной:

$$U_2' \cdot I_2' = U_2 \cdot n \cdot I_2 \cdot 1 / n = U_2 \cdot I_2. \quad 30)$$

Потери во вторичной обмотке этих трансформаторов должны быть одинаковыми:

$$(I_2')^2 \cdot r_2' = (I_2)^2 \cdot r_2.$$

С учетом (29) получим

$$r_2' = r_2 \cdot (w_1/w_2)^2 = r_2 \cdot n^2.$$

Для того чтобы отношения между активными и индуктивными сопротивлениями рассеяния у трансформаторов сохранились, необходимо, чтобы выполнялось равенство

$$x_2' = x_2 \cdot n^2,$$

откуда следует, что сопротивление Z_2 вторичной обмотки приведенного трансформатора равно:

$$z_2' = z_2 \cdot n^2$$

Если сопротивление цепи нагрузки Z_n , то по аналогии

$$z_2' = z_2 \cdot n^2.$$

Для приведенного трансформатора уравнения, описывающие рабочий процесс в нем, приобретают вид:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot r_1 + j \cdot \underline{I}_1 \cdot x_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot z_1; \quad (31)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - j \underline{I}_2 \cdot x_2 - \underline{I}_2 \cdot r_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \cdot z_1; \quad (32)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + (-\underline{I}_2'). \quad (33)$$

Приведение величин вторичной обмотки позволяет также построить удобную для расчетов схему замещения трансформатора.