

Тема: “Трансформаторы”.

План:

1. Введение.
2. Теоретическая часть.
 - 2.1. Основные понятия.
 - 2.2. Принцип действия трансформаторов.
 - 2.3. Конструкция трансформаторов.
 - 2.4. Физические основы рабочего процесса трансформатора.
Рабочие свойства трансформаторов.
Параллельная работа трансформаторов.
Специализированные трансформаторы.
3. Расчетная часть.
4. Заключение.
5. Используемая литература.
6. Содержание.

Тема: “Трансформаторы”.

1. Основные понятия.

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока, имеющую другие характеристики.

Наибольшее применение трансформаторы получили для преобразования напряжения в системах передачи электроэнергии от электростанций к промышленным предприятиям.

Известно, что передача электроэнергии на дальние расстояния осуществляется при высоком напряжении, благодаря чему значительно уменьшаются потери энергии в линии.

Но так как напряжение непосредственно на выходе электрических генераторов обычно не превышает 20 кВ, то в начале линии электропередачи устанавливают повышающие трансформаторы, которые повышают напряжение переменного тока до нужной величины. Это напряжение должно быть тем выше, чем больше протяженность линии электропередачи и больше передаваемая мощность. Например, для передачи мощности порядка 103 Мвт на расстояние 1000 км необходимо напряжение около 500 кВ.

В местах распределения электроэнергии между потребителями устанавливают понижающие трансформаторы, которые понижают напряжение до требуемой величины, например до 6 кВ и, наконец, в местах потребления электроэнергии напряжение еще раз снижается посредством понижающих трансформаторов до 127, 220 или 380 В и подается непосредственно к электроприемникам предприятий и в жилые помещения.

Помимо этого основного применения, трансформаторы используются в различных электроустройствах (нагревательных, сварочных и т.п.), в устройствах радио, связи, автоматики и т.д.

В зависимости от назначения трансформаторы разделяются на силовые общего применения и специализированные. Силовые трансформаторы общего применения используются в системах передачи и распределения электроэнергии в качестве повышающих или понижающих.

К специализированным трансформаторам относятся: силовые специального назначения (печные, выпрямительные, сварочные,

радиотрансформаторы), автотрансформаторы, измерительные и испытательные трансформаторы, трансформаторы для преобразования частоты и т. д.

Трансформаторы разделяются на однофазные и многофазные, из последних наибольшее применение имеют трехфазные трансформаторы.

Кроме того, трансформатор может быть двухобмоточным, если он имеет две обмотки, или многообмоточным, если он имеет более двух обмоток на каждую фазу.

В зависимости от способа охлаждения трансформаторы разделяются на масляные, погруженным в масло, и сухие, охлаждаемые воздухом.

Однако, несмотря на большое разнообразие типов трансформаторов, принцип действия и физические процессы в них, по существу, одни и те же. Поэтому работу трансформатора следует рассматривать на основном типе трансформатора, за который принят двухобмоточный силовой трансформатор.

2.2. Принцип действия трансформатора.

Рассмотрим принцип действия трансформатора на примере однофазного двухобмоточного трансформатора, конструктивная схема которого представлена на рис.9.2. Этот трансформатор состоит из магнитопровода и двух расположенных на нем обмоток. Одна из обмоток подключается к источнику переменного тока Γ на напряжение U_1 ; эта обмотка называется первичной. К другой обмотке подключает потребитель Z_H , оно называется вторичной.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции.

При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток i_1 , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ . Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток сцепляется с обеими обмотками и индуцирует в них ЭДС в первичной обмотке

$$e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

во вторичной обмотке

$$e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

где ω_1 и ω_2 - число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

При подключении нагрузки Z_H к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием ЭДС e_2 в цепи этой обмотки создается ток i_2 .

При этом на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение U_2 .

В повышающих трансформаторах $U_2 > U_1$, а в понижающих $U_2 < U_1$.

Из формул (1) и (2) следует, что ЭДС e_1 и e_2 могут отличаться друг от друга из-за числа витков в обмотках. Поэтому, применяя обмотки с требуемым соотношением витков, можно изготовить трансформатор на любое отношение напряжений.

Обмотка трансформатора, подключенная к сети с более высоким напряжением, называется обмоткой высшего напряжения (ВН); обмотка, присоединенная к сети меньшего напряжения, называется обмоткой низшего напряжения (НН).

Трансформаторы обладают свойством обратимости: один и тот же трансформатор может быть использован как повышающий или понижающий. Но обычно трансформатор имеет определенное значение: либо он является повышающим, либо понижающим.

3.3. Конструкция трансформаторов.

Основными частями трансформатора являются его магнитопровод обмотки. Магнитопровод трансформатора выполняется из листовой электротехнической стали при толщине листов 0,35 или 0,5 мм. Перед сборкой листы с двух сторон изолируются лаком. Такая конструкция магнитопровода дает возможность в значительной степени ослабить в нем вихревые токи. Часть магнитопровода, на которой располагаются обмотки, называется стержнем (Рис. 3.) Стержни соединяются между собой ярком.

В зависимости от конструкции магнитопровода трансформаторы разделяются на два типа: стержневой и броневой. Наибольшее распространение получил стержневой тип трансформатора.

Трансформаторы броневого типа имеют разветвленный магнитопровод (Рис.4.) с одним стержнем и ярками, частично прикрывающими («бронирующими») обмотки.

В трансформаторах большой мощности применяют бронестержневую конструкцию магнитопровода (рис.5.), которая, хотя и требует несколько повышенного расхода электротехнической стали, но позволяет уменьшить высоту

магнитопровода ($H_{bc} < H_c$), а следовательно, уменьшить и высоту трансформатора. Это имеет большое значение при его перевозке в собранном виде.

По способу соединения стержней с ярами различают магнитопроводы *стыковые* (рис.6, а) и *шихтованные* (рис.6, б). В стыковых магнитопроводах стержни и яра собираются отдельно, а затем соединяются посредством крепежных частей. Такая конструкция магнитопровода облегчает посадку обмоток на стержни, так как для этого достаточно снять только верхнее яро. Но при шихтовой сборке магнитопровода, когда листы (полосы) собираются «внахлестку», воздушный зазор в месте стыка стержней и ярем может быть сделан минимальным, что значительно снизит магнитное сопротивление магнитопровода.

Кроме того, механическая прочность шихтованного магнитопровода намного выше, чем у стыкового. Все это привело к тому, что шихтованные магнитопроводы получили в СНГ основное применение.

Форма поперечного сечения стержней зависит от мощности трансформатора (рис.8): в не больших трансформаторах применяются стержни прямоугольного сечения, в трансформаторах средней и большой мощности применяются стержни ступенчатого сечения с числом ступеней, возрастающим с увеличением мощности трансформатора.

Ступенчатое сечение стержней обеспечивает лучшее использование площади внутри обмотки, так как периметр ступенчатого стержня приближается к окружности.

В трансформаторах большой мощности для улучшения теплоотдачи между пакетами стали магнитопровода устраивают вентиляционные каналы. (рис.9).

Обмотки трансформаторов выполняют из медных проводов круглого и прямоугольного сечения, изолированных хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой.

По взаимному расположению обмоток высшего и низшего напряжений и по способу их размещения на стержнях различают обмотки концентрические и дисковые (чередующиеся).

Концентрические обмотки выполняют в виде цилиндров (рис.10) и размещают на стержнях концентрически: ближе к стержню- обмотка НН, требующая меньшей электрической

изоляции от стержня, затем идет слой изоляции из картона или бумаги и обмотка ВН (си. рис. 3).

В дисковых обмотках дискообразные катушки НН и ВН размещаются на стержнях в чередующемся порядке. Дисковые обмотки в сравнении с концентрическими более трудоемки в изготовлении и механически менее прочны. Поэтому преимущественное распространение в трансформаторах получили концентрические обмоток.

В масляных трансформаторах магнитопровод с обмотками помещен в бак, наполненный трансформаторным маслом, которое, омывая обмотки и магнитопровод, отбирает от них тепло и через стенки бака и трубы радиатора отдает в окружающую среду. Кроме того, наличие масла обеспечивает более надежную работу высоковольтных трансформаторов, так как электрическая прочность масла намного выше, чем воздуха.

Для увеличения охлаждаемой поверхности бака применяют трубчатые баки. Дальнейшее усиление охлаждения достигается применением радиаторных баков с дутьевым охлаждением радиаторов (рис.11). Для компенсации объёма масла при изменении температуры, а также для защиты масла трансформатора от окисления и увлажнения при контакте с воздухом в трансформаторах мощностью свыше 50 кВА при напряжении свыше 6 кВА применяется расширитель. Расширитель представляет собой цилиндрический сосуд, установленный на крышке бака и сообщающийся с ним. Колебания уровня масла с изменением его температуры происходит не в баке, который всегда заполнен маслом, а в расширителе, сообщающемся с атмосферой.

В процессе работы трансформаторов не исключена возможность возникновения в них явлений, сопровождающихся бурным выделением газов, что ведет к значительному увеличению давления внутри бака. Поэтому во избежание повреждения баков трансформаторы мощностью 1000 кВА и выше снабжают *выхлопной трубой*, которая устанавливается на крышке бака. Нижним концом труба сообщается с баком, а ее верхний конец заканчивается фланцем, на котором укреплен стеклянный диск. При давлении, превышающем безопасное для бака, стеклянный диск лопается и газы выходят наружу.

Трансформаторы средней и большой мощности снабжаются *газовым реле*. При возникновении в трансформаторе значительных повреждений, сопровождаемых обильным выделением газов (например, при коротком замыкании между витками обмоток), газовое реле срабатывает и замыкает контакты цепи управления выключателя. В результате трансформатор отключается от сети.

Вывод концов обмоток из бака осуществляется посредством выводных изоляторов, которые чаще всего выполняются из фарфора и монтируются на крышке бака.

На трансформаторах имеется табличка, где указано следующее:

- 1). Номинальная мощность трансформатора в киловольтамперах;
- 2). линейные напряжения в вольтах или киловольтах;
- 3). линейные токи при номинальной мощности;
- 4). частота;
- 5). число фаз;
- 6). схема и группа соединения обмоток;
- 7). напряжение короткого замыкания;
- 8). способ охлаждения;
- 9). режим работы: длительный и кратковременный.

На табличке также указаны завод-изготовитель, вес трансформатора, заводской номер.

2.4. Физические основы рабочего процесса трансформатора.

Предварительные замечания

В настоящей главе изложены физические основы рабочего процесса силовых трансформаторов общего применения, т. е. трансформаторов, предназначенных для преобразования напряжения переменного тока при неизменной частоте. При этом сначала рассматриваются процессы работы на примере однофазного трансформатора, а затем излагаются особенности работы трехфазных трансформаторов. Следует отметить, что основы рабочего процесса однофазного и трехфазного трансформаторов в принципе не отличаются друг от друга. Однако принятый порядок несколько облегчает изложение вопроса.

Уравнение электродвижущих сил.

Основной магнитной поток Φ в магнитопроводе трансформатора, сцеплен с витками обмоток ω_1 и ω_2 (рис.12), благодаря чему в них наводятся ЭДС.

$$e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Предположим, что магнитный поток Φ является синусоидальной функцией времени, т. е.

$$\Phi = \Phi_{\text{МАКС}} \sin \omega t, \quad (3).$$

где $\Phi_{\text{МАКС}}$ - максимальное значение потока. Тогда, подставив выражение (12) в формулу ЭДС e_1 и дифференцируя, получим

$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_{\text{МАКС}} \cos \omega t. \quad (4).$$

Но так как

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

то

$$e_1 = \omega w_1 \Phi_{\text{МАКС}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (5).$$

По аналогии

$$e_2 = \omega w_2 \Phi_{\text{МАКС}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (6).$$

Из полученных формул (10.3) и (10.4) следует, что Э.Д.С. e_1 и e_2 отстают по фазе от тока Φ на угол $\frac{\pi}{2}$. Максимальное значение ЭДС e_1 равно

$$E_{1\text{МАКС}} = \omega w_1 \Phi_{\text{МАКС}}. \quad (7).$$

Разделив величину $E_{1\text{МАКС}}$ на $\sqrt{2}$ и подставив $\omega = 2\pi f$, получим формулу действующего значения ЭДС e_1

$$E_1 = \frac{E_{1\text{МАКС}}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \omega_1 f \Phi_{\text{МАКС}} = 4,44 w_1 f \Phi_{\text{МАКС}}, \quad (8).$$

где $\Phi_{\text{МАКС}}$ выражено в веберах, а E_1 - в вольтах.

Аналогично для вторичной ЭДС.

$$E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_{\text{МАКС}}. \quad (9).$$

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения называется коэффициентом трансформации

$$K = \frac{E_1}{E_2}.$$

Подставив вместо ЭДС E_1 и E_2 их значения по формулам (8) и (9), получим

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (10).$$

Токи I_1 и I_2 в обмотках трансформатора, помимо основного потока Φ , создают магнитные потоки рассеяния Φ_{p1} и Φ_{p2} .

Каждый из этих потоков сцеплен лишь с витками собственной обмотки и индуцирует в ней ЭДС рассеяния: в первичной обмотке

e_{p1} , а во вторичной – e_{p2} . Действующие значения этих ЭДС пропорционально соответствующим токам в обмотках:

$$\begin{aligned} -E_{p1} &= I_1 jx_1; \\ -E_{p2} &= I_2 jx_2, \end{aligned} \quad (11).$$

где x_1 и x_2 – индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток, Ом.

Знаки минус в выражениях (11) свидетельствуют о реактивном характере ЭДС рассеяния.

Таким образом, в каждой обмотке трансформатора индуктируется основная ЭДС и ЭДС рассеяния.

Рассмотрим действие этих ЭДС в обмотках трансформатора.

В первичной обмотке ЭДС E_1 представляет собой ЭДС самоиндукции, а поэтому она направлена против первичного напряжения U_1 , т.е. находится с ним в противофазе. В связи с этим уравнение ЭДС для первичной обмотки имеет вид

$$U_1 = (-E_1) + (-E_{p1}) + I_1 r_1,$$

или

$$U_1 = (-E_1) + I_1 jx_1 + I_1 r_1. \quad (12).$$

Произведение $I_1 r_1$ представляет собой активное падение напряжения в первичной обмотке.

Выражение (12) является уравнением равновесия ЭДС, согласно которому напряжение U_1 уравнивается суммой противодействующих ЭДС.

Обычно напряжение $I_1 jx_1$ и $I_1 r_1$ невелики, а поэтому, с некоторым приближением, можно считать, что подведенное к трансформатору напряжение U_1 уравнивается ЭДС E_1 ,

$$U_1 \approx (-E_1).$$

Во вторичной обмотке ток I_2 замкнутой цепи зависит от величины ЭДС E_2 , которая в значительной части идет на создание напряжения на выводах вторичной обмотки $U_2 = I_2 Z_H$.

Оставшаяся часть ЭДС E_2 идет на компенсацию ЭДС рассеяния и активного падения напряжения во вторичной обмотке $I_2 r_2$. Таким образом, уравнение ЭДС для вторичной цепи

$$E_2 = U_2 + (-E_{p2}) + I_2 r_2,$$

или

$$U_2 = E_2 - I_2 jx_2 - I_2 r_2. \quad (13).$$

Уравнение намагничивающих сил.

Предположим, что трансформатор находится в режиме холостого хода (рис. 13 а), т.е. к зажимам его первичной обмотки подведено напряжение U_1 , а вторичная обмотка разомкнута ($I_2=0$).

Ток I_0 в первичной обмотке при этих условиях называется током холостого хода. Намагничивающая сила, созданная этим током $I_0 w_1$, наводит в магнитопроводе трансформатора основной магнитный поток, максимальное значение которого определяется выражением

$$\Phi_{\text{макс}} = \frac{I_0 w_1}{R_M} \sqrt{2}. \quad (14).$$

где R_M - магнитное сопротивление магнитопровода.

При замыкании вторичной обмотки на нагрузку Z_H (рис.13, б) в ней возникает ток I_2 . При этом ток в первичной обмотке увеличивается до значения I_1 .

Теперь поток $\Phi_{\text{макс}}$ создается действием двух н.с.: $I_1 \omega_1$ и $I_2 \omega_2$

$$\Phi_{\text{макс}} = \frac{i_1 \omega_1 + i_2 \omega_2}{R_M} \sqrt{2} \quad (15)$$

Но величину потока $\Phi_{\text{макс}}$ можно также определить из выражения (8)

$$\Phi_{\text{макс}} = \frac{E_1}{4.44 \omega_1 f}$$

или, принимая во внимание, что $U_1 \approx (-E_1)$, получим

$$\Phi_{\text{макс}} \approx \frac{U_1}{4.44 \omega_1 f} \quad (16)$$

Из выражения (16) следует, что основной поток $\Phi_{\text{макс}}$ не зависит от нагрузки трансформатора, так как напряжение U_1 во всем диапазоне нагрузки трансформатора остается неизменным. Этот вывод дает право приравнять выражение (14) и (15)

$$\frac{I_0 \omega_1}{R_M} \sqrt{2} = \frac{i_1 \omega_1 + i_2 \omega_2}{R_M} \sqrt{2}, \quad (17)$$

или

$$I_0 \omega_1 = I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2$$

Здесь $I_0 \omega_1$ – намагничивающая сила, необходимая для создания в магнитопроводе трансформатора основного магнитного потока.

Выражение (17) представляет собой уравнение намагничивающих сил трансформатора. Из этого уравнения следует, что сумма намагничивающих сил первичной $I_1 w_1$ и

вторичной $I_2 w_2$ обмоток равна постоянной величине – намагничивающей силе холостого хода $I_0 w_1$.

Разделив обе части равенства на w_1 , получим

$$I_1 + I_2 \frac{w_2}{w_1} = I_0,$$

или

$$I_1 + I_2' = I_0, \quad (18)$$

где $I_2' = I_2 w_2 / w_1$ – вторичный ток, приведенный к числу витков первичной обмотки, т.е. ток, который в обмотке с числом витков w_1 создает такую же н.с., что и ток I_2 во вторичной обмотке ($I_2' w_1 = I_2 w_2$).

Из (18) получаем выражение

$$I_1 = I_0 + (-I_2'), \quad (19).$$

называемое уравнением токов трансформатора. Из этого уравнения следует, что первичный ток I_1 можно рассматривать как сумму двух составляющих: одна из них (I_0) создает основной магнитный поток, а другая ($-I_2'$) компенсирует размагничивающее действие вторичного тока.

Физически это объясняется следующим.

Так как ЭДС вторичной обмотки E_2 представляет собой ЭДС взаимной индукции, то ток I_2 , созданный этой ЭДС при подключении нагрузки, в соответствии с правилом Ленца, оказывает размагничивающее влияние на магнитопровод трансформатора. Другими словами, ток I_2 , создает н.с. $I_2 w_2$, направленную в встречную н.с. первичной обмотки $I_0 w_1$.

Но так как основной магнитный поток в магнитопроводе остается практически неизменным, то размагничивающее действие вторичного тока вызывает увеличение первичного тока до значения I_1 , превышающего ток I_0 на величину $(-I_2')$, необходимую для компенсации размагничивающего действия вторичного тока $I_0 w_1 = I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1 + (-I_2') w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1$.

Таким образом, любое изменение величины тока во вторичной цепи трансформатора сопровождается соответствующим изменением первичного тока.

Вследствие перемагничивания стали в магнитопроводе трансформатора возникают магнитные потери энергии от гистерезиса и вихревых токов. Мощность этих потерь эквивалентна активной составляющей тока холостого хода.

Следовательно, ток холостого хода наряду с реактивной составляющей I_{op} , создающей основной магнитный поток, имеет еще и активную составляющую I_{0a}

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2} . \quad (20).$$

Обычно активная составляющая I_{0a} не превышает 10% от тока I_0 и поэтому оказывает незначительное влияние на величину этого тока. На рис.14 представлена векторная диаграмма, на которой показаны векторы тока холостого хода и его составляющих. Угол δ , на который вектор основного магнитного потока Φ_{max} отстает по фазе от тока холостого хода I_0 , называется углом магнитных потерь. Нетрудно заметить, что этот угол увеличивается с ростом активной составляющей тока холостого хода I_{0a} , т.е. с ростом магнитных потерь в магнитопроводе.

Величина тока холостого хода в трансформаторах большой и средней мощности соответственно составляет 2-10% от номинального первичного тока. Поэтому при нагрузке близкой к номинальной, пренебрегая величиной тока I_0 (18) можно записать.

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

или

$$\frac{I_1}{I_2} = -\frac{w_2}{w_1} , \quad (21).$$

т.е. токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны числам витков этих обмоток: величина тока больше в обмотке с меньшим числом витков и наоборот. Этим объясняется то, что обмотки низшего напряжения выполняются проводом большего сечения, чем обмотки высшего напряжения, имеющие большее число витков.

Приведенный трансформатор.

В общем случае параметр первичной обмотки трансформатора отличаются от параметров вторичной обмотки. Эта разница наиболее ощутима при больших коэффициентах трансформации, что затрудняет расчеты и особенно построение векторных диаграмм, так как в этом случае векторы электрических величин первичной обмотки значительно отличаются по своей длине от одноименных векторов вторичной обмотки. Указанные затруднения устраняются приведением всех параметров трансформатора к одинаковому числу витков, обычно к числу

витков первичной обмотки w_1 . С этой целью все параметры вторичной обмотки пересчитывают на число витков w_1 .

Таким образом, вместо реального трансформатора с коэффициентом трансформации $K = \frac{w_1}{w_2}$ получают эквивалентный

трансформатор с $K = \frac{w_1}{w_2} = 1$, где $w_2 = w_1$. Такой трансформатор

называется приведенным. Однако указанное приведение параметров трансформатора не должно отразиться на его энергетических показателях: все мощности и фазовые сдвиги параметров вторичной обмотки приведенного трансформатора должны остаться такими, как и в реальном трансформаторе.

Так, например, электромагнитная мощность вторичной обмотки реального трансформатора $E_2 I_2$ должна быть равна электромагнитной мощности вторичной обмотки приведенного трансформатора

$$E_2 I_2 = E_2' I_2' . \quad (22)$$

Подставив значение приведенного вторичного тока $I_2' = I_2 \frac{w_2}{w_1}$ в (22), получим формулу приведенной вторичной ЭДС.

$$E_2' = \frac{I_2}{I_2'} \quad E_2 = \frac{I_2}{I_2} \frac{w_1}{w_2} \quad E_2 = E_2 \frac{w_1}{w_2} . \quad (23)$$

Аналогично определяется приведенное напряжение вторичной обмотки: так как

$$U_2 I_2 = U_2' I_2' ,$$

то

$$U_2' = U_2 \frac{w_1}{w_2} . \quad (24)$$

Из условия равенства потерь в активном сопротивлении вторичной обмотки имеем

$$I_2^2 r_2 = I_2'^2 r_2' .$$

Определим приведенное активное сопротивление

$$r_2' = r_2 \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2 = r_2 \left(\frac{I_2}{I_2}\right)^2 \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 = r_2 \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 . \quad (25).$$

Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки определяется из условия равенства реактивных мощностей

$$I_2^2 jx_2 = I_2'^2 jx_2' ,$$

Откуда

$$x_2' = x_2 \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2. \quad (26).$$

Приведенное полное сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$$Z_2' = r_2' + jx_2' = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 (r_2 + jx_2) = Z_2 \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2. \quad (27).$$

Приведенное полное сопротивление нагрузки, подключенной на выводы вторичной обмотки, определим по аналогии с Z_2' (27)

$$Z_H' = Z_H \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 \quad (28).$$

Уравнения ЭДС и токов для приведенного трансформатора имеют вид

$$\begin{aligned} U_1 &= (-E_1) + I_1 Z_1 = (-E_1) + I_1 jx_1 + I_1 r_1, \\ U_2' &= E_2' - I_2' Z_2' = E_2' - I_2' jx_2' - I_2' r_2'; \\ I_1 &= I_0 + (-I_2'). \end{aligned} \quad (29).$$

Электрическая схема замещения трансформатора.

Еще одним средством, облегчающим исследование электромагнитных процессов и расчет трансформаторов, является применение электрической схемы замещения приведенного, в которой магнитная связь между цепями заменена электрической.

Как было установлено, в приведенном трансформаторе $K=1$, а поэтому первичная и вторичная ЭДС в этом трансформаторе равны ($E_1 = E_2'$).

Поэтому точки А и а, а также точки Х и х на приведенном трансформаторе имеют одинаковые потенциалы, что позволяет электрически соединить указанные точки, получив Т-образную схему замещения приведенного трансформатора (рис.15 б). Эта схема удовлетворяет уравнениям ЭДС и токов приведенного трансформатора (29) и представляет собой совокупность трех ветвей: *первичной*- с сопротивлением $Z_1 = r_1 + jx_1$ и током I_1 ; *намагничивающей*-с сопротивлением $Z_0 = r_0 + jx_0$ и током I_0 и *вторичной* –с сопротивлением $Z_2' = r_2' + jx_2'$ и током $-I_2'$. Изменением величины сопротивления нагрузки Z_H' на схеме замещения могут быть воспроизведены все режимы работы трансформатора.

Все параметры схемы замещения, за исключением Z_H' , являются постоянными величинами и могут быть определены из опыта холостого хода и опыта короткого замыкания.

Векторная диаграмма трансформатора.

Воспользовавшись схемой замещения приведенного трансформатора и основными уравнениями ЭДС и токов (29), построим векторную диаграмму трансформатора, которая наглядно показывает соотношения между токами, ЭДС и напряжениями трансформатора.

Векторная диаграмма является графическим выражением основных уравнений приведенного трансформатора. (29).

Построение диаграммы следует начинать с вектора максимального значения основного потока $\Phi_{\text{макс}}$ (рис. 16, а)

$$\Phi_{\text{макс}} = \frac{E_1}{4,44 f w_1}.$$

Вектор тока I_0 опережает по фазе $\Phi_{\text{макс}}$ на угол δ . ЭДС E_1 и E_2 отстают по фазе от потока $\Phi_{\text{макс}}$ на угол 90° [(14) и (15)]. Далее строим вектор I_2' . Для определения угла сдвига фаз между E_2' и I_2' следует знать характер нагрузки. Предположим, что нагрузка трансформатора *активно-индуктивная*. Тогда вектор I_2' отстает по фазе от E_2' на угол ψ_2

$$\psi_2 = \arctg \frac{x_2' + x_H'}{r_2' + r_H'}.$$

Для построения вектора вторичного напряжения U_2' необходимо из вектора ЭДС E_2' вычесть векторы падений напряжения $jI_2'x_2'$ и $I_2'r_2'$. С этой целью из конца вектора E_2' опускаем перпендикуляр на направление I_2' и откладываем на нем вектор $-jI_2'x_2'$. Затем проводим прямую, параллельную I_2' и на ней откладываем вектор $-I_2'r_2'$. Построив вектор $-I_2'Z_2'$, получаем треугольник внутренних падений напряжения во вторичной цепи. Затем из точки О проводим вектор $U_2' = E_2' - I_2'Z_2'$, который опережает I_2' на угол

$$\varphi_2 = \arctg \frac{x_H'}{r_H'}.$$

Вектор первичного тока строим как векторную сумму $I_1 = I_0 + (-I_2')$. Вектор $-I_2'$ проводим из конца вектора I_0 , противоположно вектору I_2' . Для построения вектора U_1 воспользуемся уравнением

$$U_1 = (-E_1) + jI_1x_1 + I_1r_1.$$

К вектору $-E_1$, опережающему $\Phi_{\text{макс}}$ на 90° , прибавляем векторы внутренних падений напряжения первичной обмотки: вектор I_1r_1 , параллельный току I_1 , и вектор jI_1x_1 , опережающий вектор тока I_1

на угол 90° . Соединив точку O с концом вектора $I_1 Z_1$, получим вектор U_1 , который опережает по фазе I_1 на угол φ_1 .

Иногда векторную диаграмму трансформатора строят с целью определения ЭДС обмоток.

В этом случае заданными являются параметры вторичной обмотки: U_2 , I_2 и $\cos\varphi_2$. Зная $\frac{w_1}{w_2}$, определяют U_2' и I_2' а затем строят векторы этих величин под углом $\varphi_2 = \arccos n\varphi_2$ друг к другу. Вектор ЭДС $E_2' = E_1$ получают геометрическим сложением вектора напряжения U_2' с падениями напряжения во вторичной обмотке

$$E_2' = U_2' + jI_2'x_2' + I_2'r_2'$$

В случае *активно-емкостной* нагрузки векторная диаграмма трансформатора имеет вид, показанный на рис. 16, б. Порядок построения диаграммы остается прежним, но вид ее несколько изменяется. Ток I_2' в этом случае опережает по фазе ЭДС E_2' на угол φ_2

$$\psi_2 = \arctg \frac{x_2' - x_H'}{r_2' + r_H'} \quad (30).$$

При значительной емкостной нагрузке трансформатора падение напряжения в емкостной составляющей сопротивления нагрузки и индуктивное падение напряжения рассеяние во вторичной обмотке частично компенсируют друг друга. В результате напряжения U_2' может оказаться больше, чем ЭДС E_2' . Кроме того, реактивная (опережающая) составляющая вторичного тока

$$I_{2p}' = I_2' \sin\psi_2$$

совпадает по фазе с реактивной составляющей тока холостого хода I_{op} , т.е. оказывает на магнитопровод трансформатора по подмагничивающее действие (рис. 16,б).

Этот ведет к уменьшению первичного тока I_1 по сравнению с его величиной при активно-индуктивной нагрузке, когда составляющая I_{2p}' оказывает размагничивающее влияние (рис.16, а).