

Исследование трансформатора

Протекание переменного тока в цепях с железом

Все ферромагнитные материалы имеют нелинейные магнитные свойства - зависимость магнитной индукции B от напряженности H в этих материалах не является прямо пропорциональной. Это вносит существенные усложнения в описание процессов, происходящих в цепях переменного тока, включающих катушки с ферромагнитными сердечниками. Однако в технике с такими цепями приходится сталкиваться очень часто.

Пусть к катушке с ферромагнитными сердечниками приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$. При этом в катушке возникает переменный ток, форма которого, вследствие нелинейности магнитных свойств железа, уже не будет синусоидальной. Для исследования происходящих в катушке и сердечнике процессов мы предположим, что величина тока i в каждый момент времени нам известна, и попытаемся найти связь между током и напряжением.

Когда по катушке течет ток i , в ней возникает магнитное поле напряженности $H = 4\pi ni/l$, где n - число витков в катушке, а l - длина соленоида или, при наличии замкнутого ферромагнитного сердечника, длина магнитопровода. Магнитная индукция B , возникающая в сердечнике, является очень сложной, нелинейной и неоднозначной функцией напряженности H . Мы ограничимся рассмотрением стационарного установившегося режима, когда после включения напряжения прошло длительное время. Тогда можно считать, что изменение магнитного состояния железа описывается стационарной, т.е. замкнутой и симметричной петлей гистерезиса (рис. 1). При этом максимальное значение напряженности поля H_m определит, по какой из петель гистерезиса будет происходить перемагничивание, а значение B в каждый момент времени t определится величиной H в тот же момент t , в соответствии с данной петлей.

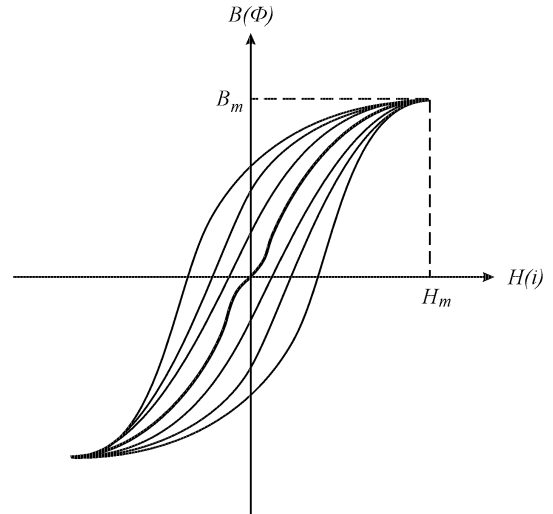


Рис. 1.

Для дальнейшего анализа удобно будет откладывать по оси абсцисс не напряженность поля H , а намагничивающий ток i . По оси ординат также можно откладывать не индукцию B , а пропорциональную ей величину магнитного потока через поперечное сечение сердечника $\Phi = BS$ (S - площадь сечения). Таким образом, петля гистерезиса представляет собой также и график зависимости потока магнитной индукции Φ от намагничивающего тока i . Зная зависимость тока от времени, мы можем, пользуясь петлей гистерезиса, найти временную зависимость потока.

Если бы катушка не имела железного сердечника, то между Φ и i существовала бы линейная зависимость: поток $n\Phi$, сцепленный со всеми витками обмотки, был бы равен Li , где L - коэффициент самоиндукции. Для катушки с железом ввести коэффициент самоиндукции, очевидно, невозможно, так как зависимость потока от тока является нелинейной и неоднозначной. Во многих случаях все же вводят коэффициент самоиндукции и для таких катушек, но тогда необходимо в каждом отдельном случае указывать, что именно следует понимать под величиной L . Очень часто имеют в виду дифференциальный коэффициент самоиндукции.

$$L = n \frac{d\Phi}{di}$$

При работе на переменном токе определяют L как отношение максимальных значений потока и тока ($L = n\Phi_m/I_m$) или чаще как отношение эффективных (средних квадратичных) значений.

Изменение магнитного потока во времени вызывает появление электродвижущей силы индукции (в данном случае - самоиндукции)

$$e = -n \frac{d\Phi}{dt}$$

Если пренебречь падением напряжения на сопротивления обмотки, то можно считать, что внешнее напряжение, приложенное к катушке, целиком идет на преодоление э.д.с. самоиндукции e :

$$u = -e = n \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Таким образом, зная ток, текущий в катушке, можно вычислить приложенное к ней напряжение.

Фактически нам задано напряжение и нужно вычислить ток. Поэтому мы должны повторить все рассуждения в обратном порядке. Подставляя в (1) синусоидальное напряжение $U = U_m \sin \omega t$ и интегрируя, мы получим, что поток тоже должен быть синусоидальной функцией времени:

$$\Phi = -\frac{U_m}{n\omega} \cos \omega t = \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2)$$

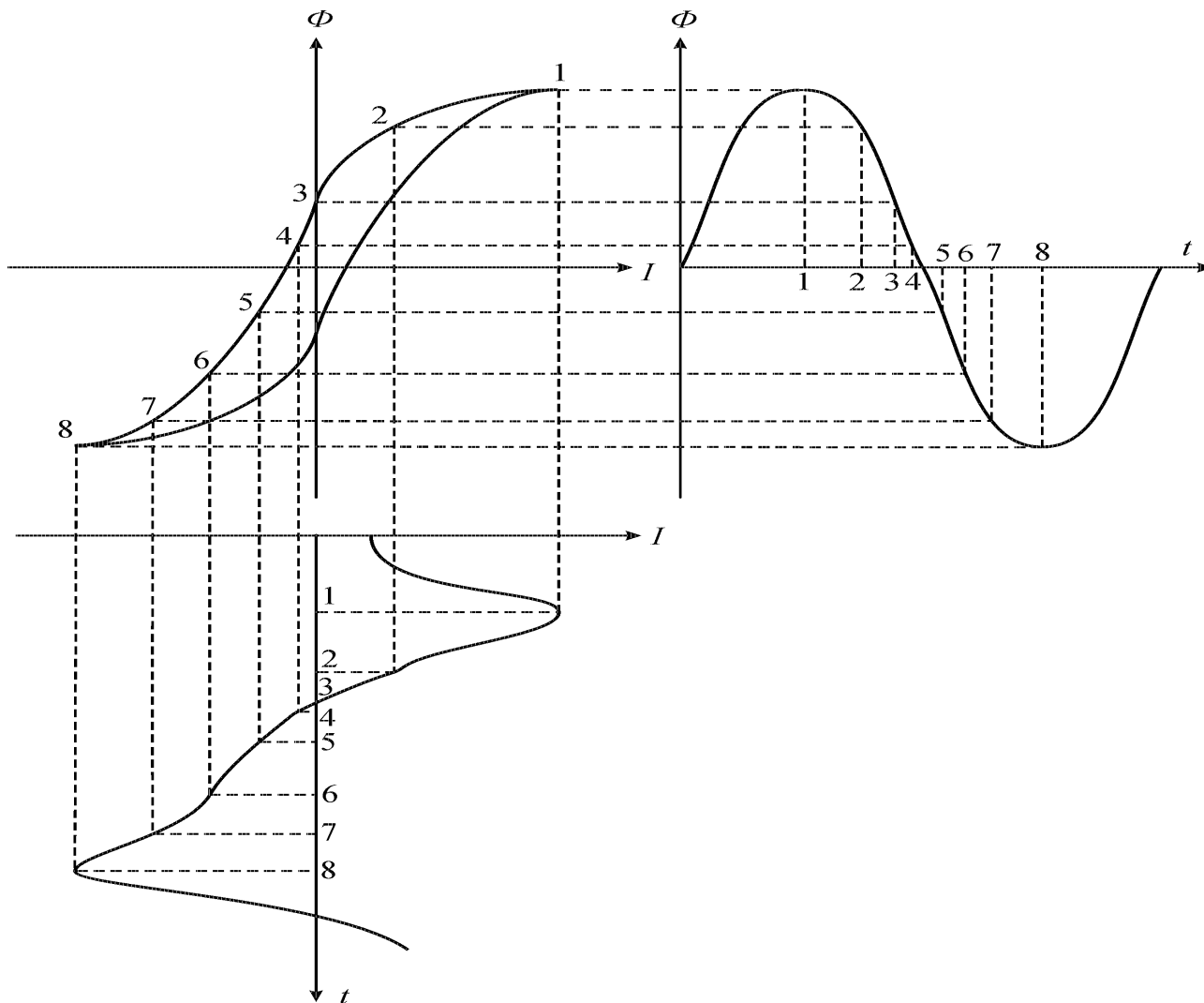


Рис. 2.

Амплитуда потока однозначно связана с амплитудой подводимого напряжения. Переходя от амплитудного значения напряжения к эффективному $U = U_m / \sqrt{2}$ и от круговой частоты ω - к циклической $\nu = \omega / 2\pi$, имеем

$$\Phi_m = \frac{U_m}{n\omega} = \frac{U}{\sqrt{2}\pi n\nu} = \frac{U}{4,44n\nu}. \quad (3)$$

По фазе поток отстает от напряжения на $\frac{\pi}{2}$. Если бы катушка не имела железного сердечника, то поток был бы пропорционален току и изменялся в фазе с ним, т.е. мы получили бы, что ток отстает от напряжения на четверть периода, как это и должно быть для катушки самоиндукции.

Ток, протекающий в катушке, должен быть таким, чтобы обеспечить изменение потока в соответствии с формулой (2).

С помощью петли гистерезиса нетрудно графическим методом достроить кривую тока. Построение показано на рис. 2. Цифрами обозначены последовательные моменты времени. На рис. 3 на общей оси вычерчены кривые зависимости потока (штриховая линия), напряжения и тока (сплошные линии) от времени. Цифрами обозначены те же моменты времени, что и на рис. 2.

Из рис. 2, 3 видно, что форма кривой тока оказывается резко несинусоидальной. Пик тока совпадает с максимумом потока и отстает на четверть периода от максимума напряжения¹, т.е. совпадает с моментом, когда напряжение проходит через нуль. Дальше уменьшение потока происходит вдоль пологого участка петли гистерезиса (отрезок 1 - 3), и ток должен уменьшаться очень резко, чтобы обеспечить синусоидальное спадание потока. Когда направление тока меняется на обратное, точка, изображающая магнитное состояние железа, движется по очень крутому участку петли гистерезиса, так что нужное изменение потока обеспечивается незначительным нарастанием тока: на кривой тока наблюдается пологий участок (4 - 6). Наконец, в области насыщения (участок 7 - 8) ток должен резко возрасти, чтобы поток мог достичь своего максимального значения: на кривой тока наблюдается острый пик.

¹Здесь нельзя говорить об отставании по фазе, так как для несинусоидальной кривой тока понятие фазы не имеет смысла.

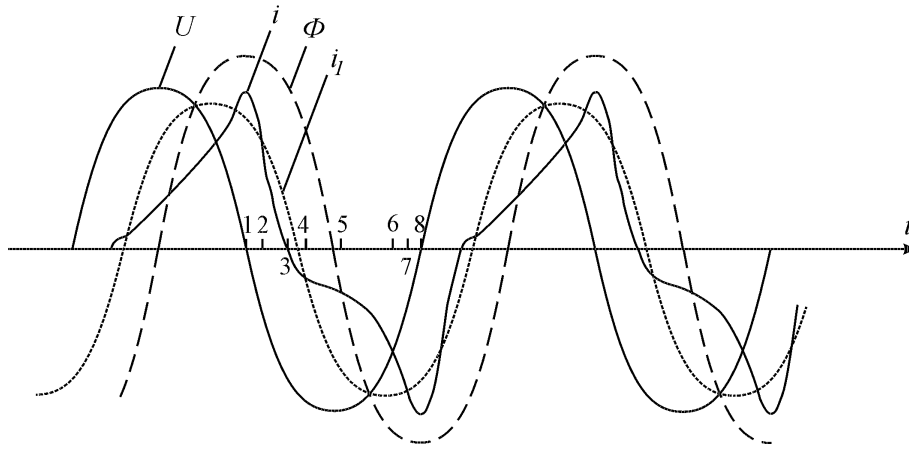


Рис. 3.

Этот пик может оказаться очень высоким, если сердечник имеет небольшое сечение, или катушка имеет недостаточное число витков, или подаваемое на нее напряжение слишком велико. Действительно, при этом может оказаться, что для создания необходимой э.д.с. индукции $e = -\dot{\Phi}$ амплитуда магнитной индукции $B_m = \Phi_m/S$ должна быть больше, чем индукция насыщения, и для создания такой индукции необходим очень большой ток. Конечно, в этом случае уже нельзя будет пренебрегать падением напряжения на сопротивлении обмотки.

Мы ограничимся рассмотрением катушек с не очень перегруженным сердечником, в которых пик тока не очень высок. Применяемые в технике трансформаторы и дроссели обычно рассчитывают так, чтобы при рабочем напряжении индукция в сердечнике не достигала насыщения. При этом условии искажение кривой тока оказывается не очень значительным.

Для многих вопросов практической электротехники несинусоидальную форму кривой тока можно приближенно заменить синусоидальной. Для этого нужно разложить функцию $i(t)$ в ряд Фурье

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (4)$$

член a_0 в разложении отсутствует, так как среднее значение тока равно нулю. Отбрасывая высшие гармоники, имеем

$$i(t) \approx a_1 \sin \omega t + b_1 \cos \omega t = I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (5)$$

Величина $I_{1m} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$ представляет собой амплитуду первой гармоники тока, $\varphi_1 = \arctg \frac{b_1}{a_1}$ - сдвиг фаз между током (первой гармоникой) и напряжением (начало отсчета времени мы с самого начала выбрали так, чтобы начальная фаза напряжения была равна нулю). На рис. 3 первая гармоника тока изображена пунктирной линией.

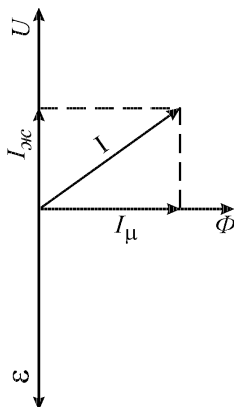


Рис. 4.

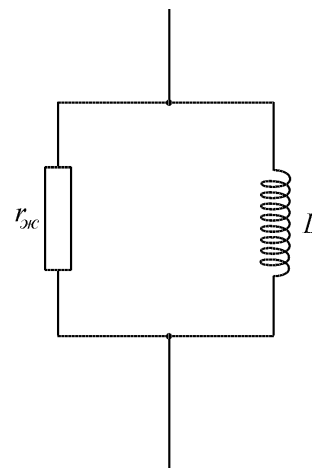


Рис. 5.

Если сердечник трансформатора не слишком перегружен, то приближение оказывается довольно хорошим. Оно оправдывается в особенности тем, что только первая гармоника потребляет мощность². Действительно, мощность,

²Подумайте, почему катушка с железом не представляет собой чистой индуктивности, а потребляет мощность.

потребляемая катушкой, равна

$$W = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} i(t)u(t) dt = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} i(t)U_m \sin \omega t dt$$

($T = 1/\nu$ - период). Подставляя (4) и пользуясь свойством ортогональности тригонометрических функций, получим

$$W = \frac{U_m a_1}{2} = \frac{U_m I_{1m}}{2} \cos \varphi_1. \quad (6)$$

Таким образом, составляющую тока a_1 , совпадающую по фазе с напряжением и ответственную за потери энергии в железе сердечника, можно назвать *активной* составляющей тока. Соответственно, составляющую b_1 , отличающуюся по фазе от напряжения на $\frac{\pi}{2}$, можно назвать *реактивной* составляющей тока. Эта составляющая совпадает по фазе с магнитным потоком, и поэтому ее называют также *намагничивающим* током. При более строгом рассмотрении к намагничивающему току следует отнести также и все высшие гармоники.

Если ограничиться рассмотрением только первой гармоники тока, то для анализа процессов, происходящих в катушке с железом (дросселе или трансформаторе), можно пользоваться векторными диаграммами. На рис. 4 приведена такая диаграмма. На этом рисунке векторы изображают эффективные значения, и вместо обозначений $a_1/\sqrt{2}$ и $b_1/\sqrt{2}$ использованы более употребительные обозначения $I_{ж}$ (ток потерь в железе) и I_{μ} (намагничивающий ток). Угол сдвига фаз между током и магнитным потоком называется *углом магнитного запаздывания*

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi_1.$$

Векторной диаграмме рис. 4 соответствует параллельная эквивалентная схема рис. 5, где проводимость активной ветви учитывает потери энергии в сердечнике.

Теория трансформатора

Из общего курса физики известно, что трансформатор, в простейшем случае, состоит из двух электрически не связанных между собой обмоток, выполненных на замкнутом железном сердечнике. Первичная обмотка трансформатора включается в сеть и служит для создания переменного магнитного потока. Во вторичной обмотке индуцируется э.д.с. измененного значения, используемая обычно для той или другой цели.

Изучение процессов, протекающих в трансформаторе, нужно начать с рассмотрения работы трансформатора в режиме *холостого хода*, когда вторичная обмотка разомкнута. Этот режим был рассмотрен в предыдущей главе, где были выведены все формулы, касающиеся первичной обмотки. Здесь мы только заменим обозначения: число витков первичной обмотки будем обозначать n_1 (вместо n); приложенное к первичной обмотке напряжение обозначим u_1 (вместо u) и индуцируемую в ней э.д.с. - e_1 , (вместо e); ток холостого хода обозначим i_0 (вместо i) и будем считать его синусоидальным (т.е. будем рассматривать только его первую гармонику); магнитный поток в сердечнике при холостом ходе обозначим Φ_0 (вместо Φ); сдвиг фаз между током в первичной обмотке и приложенным к ней напряжением φ_0 (вместо φ).

В трансформаторе, имеющем две обмотки - первичную и вторичную с n_1 и n_2 витками, изменение магнитного потока в сердечнике вызывает появление э. д. с. индукции в обеих обмотках:

$$e_1 = -n_1 \frac{d\Phi_0}{dt}; \quad e_2 = -n_2 \frac{d\Phi_0}{dt}. \quad (7)$$

Нетрудно видеть, что $e_2/e_1 = n_2/n_1$; такая же связь существует, очевидно, между амплитудными и между эффективными значениями электродвижущих сил, возникающих во вторичной и первичной обмотках:

$$\frac{\mathcal{E}_{2m}}{\mathcal{E}_{1m}} = \frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{n_2}{n_1} = k. \quad (8)$$

Отношение числа витков вторичной, обмотки к числу витков первичной обмотки является важнейшей характеристикой трансформатора и называется *коэффициентом трансформации*.

Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода была уже построена (рис. 4). Приводим эту диаграмму еще раз с новыми обозначениями и с добавлением вектора $\vec{\mathcal{E}}_2 = k\vec{\mathcal{E}}_1$ (рис. 6).

Для экспериментального определения величин, характеризующих работу трансформатора в режиме холостого хода, можно измерить напряжения на обмотках, ток I_0 и мощность, потребляемую трансформатором. Поскольку ток во вторичной отсутствует, а в первичной обмотке очень мал, то падения напряжения на внутренних сопротивлениях обмоток можно не учитывать, и измеренные напряжения практически равны соответствующим э. д. с. Таким образом, измерение, напряжений на зажимах обмоток при холостом ходе позволяет найти коэффициент трансформации.

$$k = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)_{\text{хол}}. \quad (9)$$

Поскольку потери энергии в проводах при холстом ходе малы, то мощность, потребляемая трансформатором в режиме холостого хода, дает *величину потерь энергии в железе сердечника* (на перемагничивание и токи Фуко). Эти потери обозначаются $W_{ж}$.

Если измерены напряжение U_1 , ток I_0 и мощность $W_{ж}$, то нетрудно вычислить сдвиг фаз φ_0 по формуле

$$W_{ж} = U_1 I_0 \cos \varphi_0. \quad (10)$$

Таким образом, векторная диаграмма рис. 6 может быть целиком построена. Вначале откладывают на каком-либо удобном масштабе вектор \vec{U}_1 (в произвольном направлении). Вектор \vec{I}_0 откладывается под углом φ_0 к вектору \vec{U}_1 . Масштаб для токов можно, разумеется, выбирать независимо от масштаба для напряжений. Далее ток I_0 раскладывается на активную компоненту $I_{ж}$ и реактивную компоненту I_{μ} . Из рис. 6 видно, что

$$I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0, \quad I_{ж} = I_0 \cos \varphi_0.$$

Удобнее всего вычислить I_{μ} и $I_{ж}$ по этим формулам и откладывать их в соответствующих направлениях, пользуясь только угольником (без транспортира), и вектор \vec{I}_0 строить затем как сумму $\vec{I}_0 = \vec{I}_{\mu} + \vec{I}_{ж}$. Угол магнитного запаздывания α равен $90^\circ - \varphi_0$. Электродвижущие силы $\vec{\mathcal{E}}_1$ и $\vec{\mathcal{E}}_2$ откладываются параллельно U_1 , в противоположном направлении. Вектор потока $\vec{\Phi}_0$ строится параллельно \vec{I}_{μ} (перпендикулярно \vec{U}_1). Величина потока Φ_0 может быть вычислена по формуле (3), если известно число витков первичной обмотки n_1 . Однако это число обычно бывает неизвестно, и в большинстве случаев знать его и не нужно (хотя оно может быть измерено, см. ниже). Поэтому масштаб для построения вектора потока выбирают таким, чтобы длина вектора $\vec{\Phi}_0$ равнялась длине вектора $\vec{\mathcal{E}}_1$. Поскольку на практике обычно интересны только величины э.д.с., а величина потока используется только как вспомогательный параметр, такой выбор масштаба для $\vec{\Phi}_0$ оказывается очень удобным: мы просто откладываем вектор $\vec{\Phi}_0$, равный по длине $\vec{\mathcal{E}}_1$, перпендикулярно $\vec{\mathcal{E}}_1$ (в сторону опережения). Разумеется, нельзя написать $\vec{\Phi}_0 = \vec{\mathcal{E}}_1$, это видно хотя бы из того, что поток измеряется в вольтсекундах (веберах), а э.д.с. - в вольтах.

В предыдущем изложении мы ввели некоторые упрощающие предположения, которые в дальнейшем, при анализе работы нагруженного трансформатора, будут уже недопустимыми. Прежде всего нужно будет учесть падение напряжения на внутреннем сопротивлении первичной обмотки трансформатора r_1 . Во-вторых, не весь магнитный поток, создаваемый током первичной обмотки, проходит в железном сердечнике: часть его рассеивается в воздухе и не проходит через вторичную обмотку. Эта часть потока, сцепленная только с витками первичной обмотки, называется потоком рассеяния Φ_s . Очевидно, что поток Φ_s будет участвовать в создании э. д. с. индукции в первичной обмотке, но не будет участвовать в создании э. д. с. \mathcal{E}_2 . Вторая часть потока, пронизывающая все витки как первичной, так и вторичной обмоток, называется *поток сцепления* Φ_c . В предыдущем изложении мы пренебрегали потоком рассеяния Φ_s , так как в трансформаторе с железом он мал, и при холстом ходе, когда i_0 мало, практически можно положить

$$e_1 = -n_1 \frac{d\Phi_c}{dt},$$

пренебрегая величиной

$$e_s = -n_1 \frac{d\Phi_s}{dt}.$$

В общем же случае поток рассеяния можно учесть, вводя *индуктивное сопротивление первичной обмотки* $x_1 = \omega L_1$.

"Самоиндукция рассеяния" $L_1 = n_1 \Phi_s / i_0$ - это, конечно, не то же самое, что измеряемая обычным способом самоиндукция первичной обмотки, которая равна

$$\frac{n_1(\Phi_s + \Phi_c)}{i_0} = \frac{4\pi\mu n_1^2 S}{l};$$

L_1 составляет только малую часть этой самоиндукции.

Омическое сопротивление r_1 и индуктивное сопротивление x_1 определяют *полное внутреннее сопротивление (импеданс) первичной обмотки* z_1 . С учетом z_1 формула (1) переходит в

$$u_1 = -e_1 + i_0 z_1, \quad (11)$$

т. е. подаваемое напряжение u_1 уже не полностью идет на преодоление э.д.с. самоиндукции e_1 , а частично падает на внутреннем сопротивлении обмотки. В векторной диаграмме рис. 6 мы должны для получения вектора \vec{U}_1 добавить к вектору $-\vec{\mathcal{E}}_1$, составляющему главную часть \vec{U}_1 , векторы, изображающие падение напряжения на r_1 и x_1 . Они равны соответственно $I_0 r_1$ и $I_0 x_1$. Вектор $\vec{I}_0 r_1$ откладывается параллельно \vec{I}_0 , вектор $\vec{I}_0 x_1$ - перпендикулярно \vec{I}_0 , в сторону опережения (индуктивность!). Построение показано на рис. 7 (длины векторов $\vec{I}_0 r_1$ и $\vec{I}_0 x_1$ сильно преувеличены).

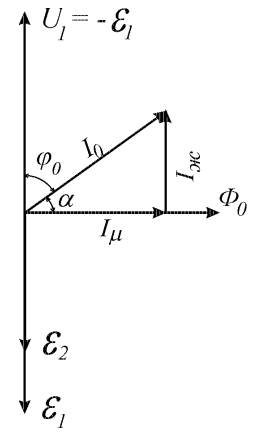


Рис. 6.

Вектор U_1 равен теперь $\vec{\mathcal{E}}_1 + I_0 r_1 + I_0 x_1$. Из рис. 7 видно, что при заданном U_1 э. д. с. \mathcal{E}_1 и, следовательно, поток Φ_0 (точнее было бы писать Φ_c , но мы сохраним старые обозначения) оказываются несколько меньше, чем следует из формул (1) и (3). Однако при холостом ходе это различие невелико и им обычно пренебрегают.

Мы будем пользоваться в дальнейшем при исследовании режима холостого хода упрощенной векторной диаграммой рис. 6, а не точной рис. 7.

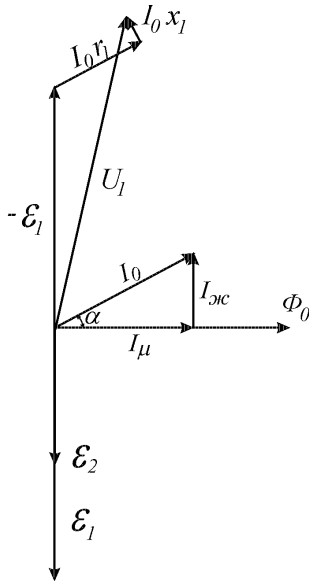


Рис. 7.

Имеем

При замыкании вторичной обмотки на какое-либо сопротивление во вторичной обмотке появится ток i_2 , который внесет существенные изменения и в процессы, происходящие в первичной обмотке. Появление тока во вторичной цепи приводит к изменению тока первичной обмотки. Действительно, ток i_2 создает свое магнитное поле H_2 и, таким образом, добавочный поток в сердечнике. Этот добавочный поток создает добавочные э.д.с. в обеих обмотках, вследствие чего в них потекут добавочные токи. Эти токи, в свою очередь, создадут новые потоки, возникнут новые э.д.с. и т.д., до бесконечности. Очевидно, что с помощью таких рассуждений мы не приходим к какому-либо определенному результату. Однако мы можем подойти к вопросу с другой стороны. Магнитный поток в сердечнике, как мы уже видели, определяется только приложенным к первичной обмотке напряжением (если пренебречь ее сопротивлением z_1), и, следовательно, все вновь возникшие потоки должны взаимно скомпенсироваться. Ток во вторичной цепи i_2 определяется (по закону Ома) ее сопротивлением и э.д.с. e_2 , т. е., в конечном счете, потоком. Таким образом, его тоже можно считать известным. Остается ток в первичной обмотке i_1 . В ней должен протекать, прежде всего, ток холостого хода i_0 , необходимый для создания магнитного потока Φ_0 . Далее, для того, чтобы появление тока i_2 не изменило величины магнитного потока, в первичной обмотке должен протекать добавочный ток Δi_1 , уничтожающий магнитное поле, созданное током i_2 . Для этого ток Δi_1 должен создавать свое магнитное поле ΔH_1 , равное полю H_2 тока i_2 по величине, но противоположное по направлению (можно сказать "по фазе", так как токи i_2 и Δi_1 синусоидальны).

$$H_2 = \frac{4\pi n_2 i_2}{l},$$

$$\Delta H_1 = \frac{4\pi n_1 \Delta i_1}{l},$$

$$\Delta H_1 = -H_2,$$

откуда

$$\Delta i_1 = -\frac{n_2}{n_1} i_2 = -k i_2. \quad (12)$$

Ток Δi_1 называется *приведенным током*.

Заметим, что хотя в конечном счете физической причиной появления тока Δi_1 является переменное поле, создаваемое током i_2 , но прямой подсчет Δi_1 из величины i_2 по законам электромагнитной индукции невозможен: для такого подсчета понадобилось бы фактически просуммировать все упомянутые добавочные токи, потоки и э.д.с. Это суммирование обычно практически невыполнимо (ряды расходятся). Результат же его ясен из приведенных выше физических рассуждений: все добавочные потоки и э.д.с., а также добавочные токи во вторичной цепи должны целиком скомпенсироваться; в первичной обмотке сумма добавочных токов должна быть отличной от нуля, чтобы обеспечить компенсацию добавочных потоков.

Заметим, что использованное в этом рассуждении приближенное равенство потоков в нагруженном и ненагруженном трансформаторе в действительности не является необходимым. Важно только, что реально существующий поток Φ однозначно определяет э.д.с. e_2 и ток i_2 ; следовательно, в первичной обмотке должен, кроме намагничивающего тока, течь ток

$$\Delta i_1 = -\frac{n_2}{n_1} i_2,$$

чтобы суммарное поле токов i_1 и i_2 как раз обеспечивало существование потока Φ .

Полный ток в первичной обмотке нагруженного трансформатора равен $i_1 = i_0 + \Delta i_1$. Благодаря наличию приведенного тока, потери напряжения на внутреннем сопротивлении первичной обмотки $i_1 z_1$ оказываются уже не настолько малыми, чтобы ими можно было пренебречь. Поэтому амплитудно-фазовые соотношения для нагруженного трансформатора будут значительно сложнее, чем для ненагруженного.

Эквивалентная схема нагруженного трансформатора приведена на рис. 8. Здесь использованы, в дополнение к введенным ранее, следующие обозначения: r_2 , x_2 и z_2 - соответственно активное, реактивное и полное внутреннее сопротивления вторичной обмотки (происхождение x_2 аналогично x_1 - это индуктивность рассеяния вторичной обмотки); r , x , z - активное, реактивное и полное сопротивления нагрузки; U_2 напряжение на зажимах вторичной обмотки. Все сопротивления мы будем считать известными (методы их измерения см. ниже). Токи I_1 и I_2 и напряжения U_1 , и U_2 легко могут быть измерены.

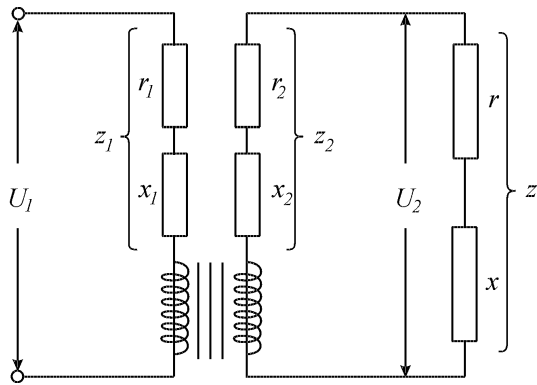


Рис. 8. Эквивалентная схема нагруженного трансформатора.

Доступны измерению также и углы сдвига фаз φ_1 и φ_2 между I_1 и U_1 и между I_2 и U_2 соответственно (с помощью ваттметра, амперметра и вольтметра).

Построение векторной диаграммы удобнее всего начинать с вектора тока \vec{I}_2 , который может быть непосредственно измерен. Этот вектор откладывается в удобном масштабе в произвольном направлении (рис. 9). Масштаб токов следует выбрать таким, чтобы вектор \vec{I}_2 имел длину 5-10 см.

Зная I_2 , легко подсчитать падение напряжения на нагрузке. Падение напряжения на активном сопротивлении нагрузки равно $I_2 r$, на реактивном - $I_2 x$. Вектор $\vec{I}_2 r$ откладывается в направлении \vec{I}_2 .³ Масштаб для напряжений удобно выбрать таким, чтобы 1 в изображался отрезком 1 мм. Тогда подаваемое на трансформатор сетевое напряжение (номинально 127 в) изобразится отрезком длиной 12 - 13 см. Вектор $\vec{I}_2 x$ откладывается перпендикулярно \vec{I}_2 в сторону опережения для индуктивной нагрузки и в сторону запаздывания для емкостной (рис. 9 строится для емкостной нагрузки). Сумма векторов $\vec{I}_2 r$ и $\vec{I}_2 x$, дает напряжение на зажимах вторичной обмотки

$$\vec{U}_2 = \vec{I}_2 r + \vec{I}_2 x = \vec{I}_2 z.$$

Величины U_2 и I_2 , как уже говорилось, могут быть непосредственно измерены. Легко вычислить также фазовый угол φ_2 , если измерить мощность, потребляемую нагрузкой

$$W_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2. \quad (13)$$

На практике вам придется именно из этих измерений определять сопротивление нагрузки. Как видно из векторной диаграммы рис. 9,

$$z = \frac{U_2}{I_2}, \quad (14)$$

$$r = z \cos \varphi_2 = \frac{W_2}{I_2^2}, \quad (15)$$

$$x = z \sin \varphi_2. \quad (16)$$

Вычисленные по формулам (13 - 16) сопротивления r и x совместно с измеренным значением тока I_2 используются при построении векторной диаграммы трансформатора.

На рис. 10 продолжено построение векторной диаграммы. Падение напряжения на активной части внутреннего сопротивления вторичной обмотки, равное $I_2 r_2$, изображается вектором, параллельным \vec{I}_2 , а падение на реактивной части $I_2 x_2$ вектором, перпендикулярным \vec{I}_2 (в сторону опережения). Сумма всех падений напряжения на внешних и внутренних сопротивлениях вторичной цепи равна э.д.с. вторичной обмотки:

$$\vec{\mathcal{E}}_2 = \vec{I}_2 r + \vec{I}_2 x + \vec{I}_2 r_2 + \vec{I}_2 x_2.$$

Зная э.д.с. вторичной обмотки, легко найти э.д.с. индукции в первичной обмотке: $\mathcal{E}_1 = \frac{1}{k} \mathcal{E}_2$ (коэффициент трансформации, как уже указывалось, измеряется в режиме холостого хода). Вектор $\vec{\mathcal{E}}_1$ совпадает по фазе с $\vec{\mathcal{E}}_2$ (рис. 11). По известным э.д.с. \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 можно найти создающий их магнитный поток Φ . В соответствии с принятым выше соглашением относительно масштаба для потока, вектор $\vec{\Phi}$ строится равным по длине вектору $\vec{\mathcal{E}}_1$. По фазе магнитный поток на 90° опережает э.д.с. индукции, соответственно вектор $\vec{\Phi}$ строится перпендикулярно $\vec{\mathcal{E}}_1$ и $\vec{\mathcal{E}}_2$ в сторону опережения.

³ Все векторы откладываются из общего начала; однако если несколько векторов придется суммировать, мы будем откладывать их последовательно друг за другом так, чтобы воспользоваться правилом замыкающей для векторной суммы.

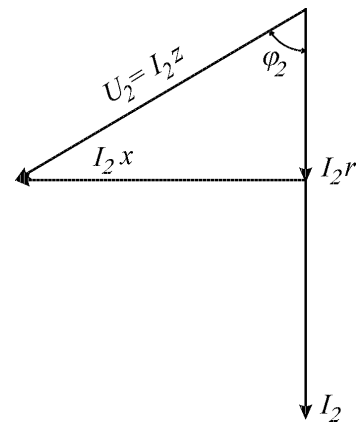


Рис. 9.

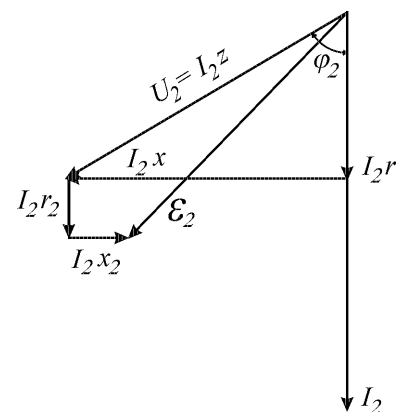


Рис. 10.

Задача нахождения той части тока в первичной обмотке, которая создает поток Φ , вообще говоря, очень сложна. Дело в том, что связь между током и магнитным потоком в железном сердечнике нелинейна. Однако в правильно рассчитанном трансформаторе индукция в железе значительно меньше индукции насыщения, и поэтому можно приближенно считать, что магнитный поток пропорционален намагничивающему току; это тем более допустимо, что когда трансформатор не перегружен, поток Φ мало отличается от потока в режиме холостого хода Φ_0 .

Таким образом, мы можем перенести найденную ранее в условиях холостого хода связь между потоком Φ и вызывающим его током I_0 и на случай нагруженного трансформатора. В этом случае нам известен поток Φ и требуется найти вызывающий его ток I'_0 . Согласно сказанному, можно положить

$$I'_0 = I_0 \frac{\Phi}{\Phi_0} = I_0 \frac{\mathcal{E}_1}{(\mathcal{E}_1)_{\text{хол}}}$$

Угол магнитного запаздывания также считаем равным углу α для режима холостого хода. Итак, вектор \vec{I}'_0 откладывается под углом α к вектору $\vec{\Phi}$ (в сторону опережения). Этот вектор на рис. 11 значительно короче, чем на рис. 6, так как на рис. 11 масштаб тока выбран удобным для построения больших токов в обмотках нагруженного трансформатора, а ток I'_0 (так же, как и I_0) очень мал.

Вектор I'_0 можно откладывать и без помощи транспортира, нужно вычислить его составляющие $I'_\mu = I_\mu \frac{\Phi}{\Phi_0}$ и $I'_\text{ж} = I_\text{ж} \frac{\Phi}{\Phi_0}$ и затем отложить их параллельно и перпендикулярно Φ (как на рис. 6).

Полный ток в первичной обмотке нагруженного трансформатора складывается из тока i'_0 и приведенного тока ΔI_1 , который должен уничтожить магнитное поле тока I_2 . Величина ΔI_1 , вычисляется по формуле (12): $\Delta I_1 = kI_2$. Вектор $\vec{\Delta I}_1$ откладывается параллельно вектору \vec{I}_2 в сторону, противоположную \vec{I}_2 (рис. 12). Полный ток первичной обмотки изображается вектором $\vec{I}_1 = \vec{I}'_0 + \vec{\Delta I}_1$.

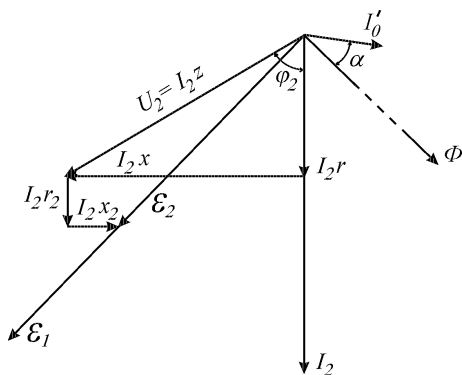


Рис. 11.

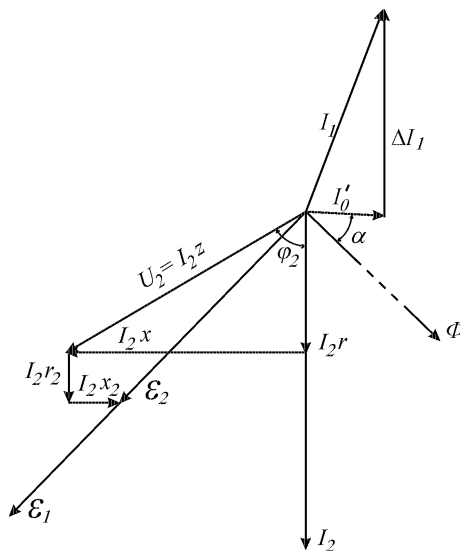


Рис. 12.

Теперь мы можем построить вектор внешнего напряжения \vec{U}_1 , приложенный к первичной обмотке трансформатора. Главная часть напряжения U_1 идет на преодоление э.д.с. индукции \mathcal{E}_1 , т.е. равна $-\mathcal{E}_1$. На векторной диаграмме (рис. 13) она изображается вектором $-\vec{\mathcal{E}}_1$, равным по величине и противоположным по направлению вектору $\vec{\mathcal{E}}_1$. Кроме того, в первичной обмотке происходит падение напряжения на ее внутреннем сопротивлении z_1 . Вектор падения напряжения на активном сопротивлении $\vec{I}_1 r_1$ откладывается параллельно \vec{I}_1 , а вектор падения напряжения на реактивном сопротивлении $\vec{I}_1 x_1$ - перпендикулярно \vec{I}_1 в сторону опережения. Внешнее напряжение U_1 равно векторной сумме $\vec{U}_1 = -\vec{\mathcal{E}}_1 + \vec{I}_1 r_1 + \vec{I}_1 x_1$.

Рис. 13 представляет собой полную векторную диаграмму нагруженного трансформатора. Величины U_1 и I_2 , так же как и сдвиг фаз между током и напряжением в первичной обмотке φ_1 могут быть непосредственно измерены (φ_1 - из мощности, потребляемой трансформатором, по формуле $W_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$). Сравнение измеренных величин U_1 , I_1 , и φ_1 с полученными из векторной диаграммы позволяет проверить теорию трансформатора. Такая проверка для различных типов нагрузки (индуктивная, емкостная, активная) и является одной из задач данной работы.

Кроме сдвига фаз φ_1 , полезно сравнить также теоретическое и экспериментальное значение потребляемой трансформатором мощности $W_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$. Определение теоретических значений W_1 (следовательно, и φ_1) можно провести без помощи транспортира, найдя активную (параллельную U_1) составляющую вектора \vec{I}_1 и умножая ее на U_1 (или наоборот). Можно сравнивать также значения коэффициентов мощности $\cos \varphi_1$.

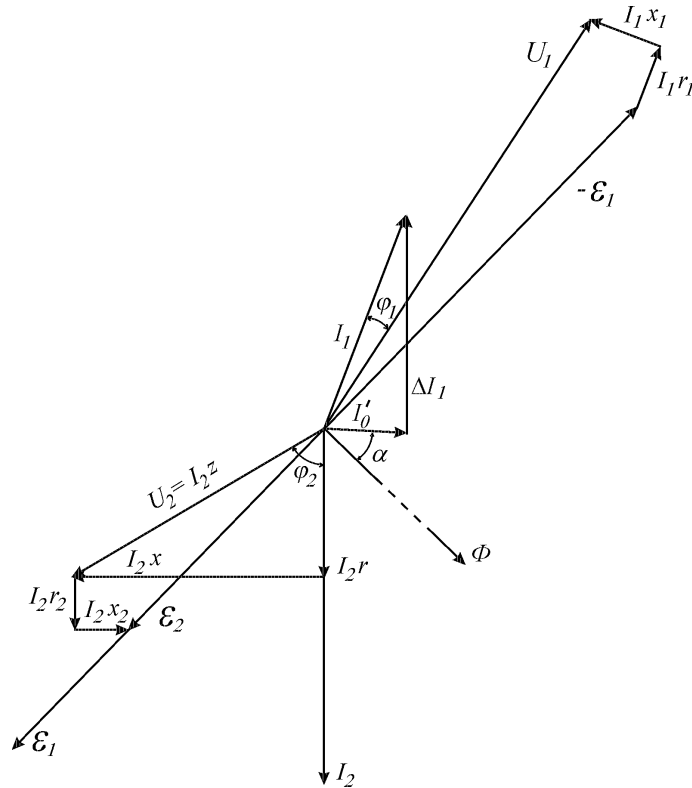


Рис. 13. Полная векторная диаграмма нагруженного трансформатора.

На практике векторная диаграмма трансформатора обычно используется для предварительного расчета его работы. В этом случае, очевидно, уже нельзя использовать в качестве исходного параметра для построения диаграммы измеренное значение I_2 , так как известно только напряжение сети, в которую будет включен трансформатор. Ясно, что построить векторную диаграмму, начиная с вектора I_2 невозможно. Поэтому расчет трансформатора ведут следующим образом: задают какое-либо произвольное значение I_2 , например 10 а , и строят всю диаграмму исходя из этого значения. Построение приводит к какой-то величине U_1 , скажем 300 в . Действительное же напряжение сети, в которой будет включен трансформатор, равно, например, 127 в . Это значит, что следует укрупнить масштабы токов и напряжений в отношении $300/127$, т.е. если при построении 1 см соответствовал 1 а и 20 в , то теперь 1 см равен $127/300 \text{ а}$ и $(127/300) \cdot 20 \text{ в}$. В этом новом масштабе векторная диаграмма даст уже истинные значения всех токов и напряжений. Так, ток I_2 окажется равным $10 \cdot (127/300) \text{ а}$.

Для того чтобы ваша работа была ближе к практической задаче расчета трансформатора, полезно провести построение векторной диаграммы именно таким способом, приводя напряжение U_1 к практически измеренной величине напряжения на зажимах первичной обмотки. При этом, конечно, потеряет смысл сравнение экспериментального и вычисленного значений U_1 . Для проверки теории следует провести такое сравнение для величин I_1 , φ_1 и I_2 (или U_2).

При построении векторной диаграммы мы считали известными значения всех сопротивлений r_1 , x_1 , r_2 , x_2 , r и x . Сопротивление нагрузки $z(r, x)$, как уже указывалось, может быть найдено непосредственно время работы с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра во вторичной цепи. Сопротивление $z_2(r_2, x_2)$ измеряют в режиме короткого замыкания, т.е. когда вторичная обмотка замкнута накоротко (обычно включают во вторичную обмотку амперметр для измерения тока). При этом в первичную обмотку необходимо включить большое сопротивление, чтобы ток не оказался слишком большим.

Полное внутреннее сопротивление вторичной обмотки можно подсчитать по закону Ома:

$$z_2 = \left(\frac{\mathcal{E}_2}{I_2} \right)_{\text{кз}}. \quad (17)$$

Однако для этого необходимо найти способ измерения э.д.с., индуцируемой во вторичной обмотке в условиях короткого замыкания. Очевидно, что $(\mathcal{E}_2)_{\text{кз}}$ нельзя измерить непосредственно, так как напряжение на зажимах вторичной обмотки при коротком замыкании равно нулю. Нельзя также принять $(\mathcal{E}_2)_{\text{кз}}$ равным э.д.с. \mathcal{E}_2 , измеренной в режиме холостого хода: как будет показано ниже, в режиме короткого замыкания магнитный поток очень мал, и соответственно $(\mathcal{E}_2)_{\text{кз}}$ также мало. Вычисление $(\mathcal{E}_2)_{\text{кз}}$ с помощью коэффициента трансформации из измеренного значения $(U_1)_{\text{кз}}$ также недопустимо, так как даже приближенно нельзя положить $(U_1)_{\text{кз}} = -(\mathcal{E}_1)_{\text{кз}}$.

Для измерения магнитного потока и, следовательно, э.д.с. индукции в обмотках в условиях короткого замыкания необходимо иметь на трансформаторе третью, дополнительную обмотку, состоящую хотя бы из одного-двух витков

(намотать большое число витков на готовый трансформатор затруднительно). Э.д.с. в третьей обмотке создается тем же потоком и, следовательно, пропорциональна \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 . Коэффициенты трансформации между основными обмотками и дополнительной равны

$$k_{13} = \frac{n_3}{n_1} = \frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_1}; \quad k_{23} = \frac{n_3}{n_2} = \frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_2}. \quad (18)$$

Их легко определить одновременно с основным коэффициентом трансформации $k_{12} = \frac{n_2}{n_1} = k$ в условиях холостого хода, когда все э.д.с. \mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_2 и могут быть непосредственно измерены на зажимах обмоток. Из формулы (18) очевиден, между прочим, способ определения абсолютного числа витков в обмотках.

Использование добавочной обмотки с малым числом витков возможно лишь при наличии чувствительного вольтметра с очень большим внутренним сопротивлением. Для этой цели вполне годны многошкальные ламповые вольтметры.

При наличии третьей обмотки измерение $(\mathcal{E}_2)_{кз}$ не представляет труда. Измеряется э.д.с. в третьей обмотке $(\mathcal{E}_3)_{кз}$ и по ней вычисляется

$$(\mathcal{E}_2)_{кз} = \frac{(\mathcal{E}_3)_{кз}}{k_{23}}. \quad (19)$$

Из $(\mathcal{E}_2)_{кз}$ и $(I_2)_{кз}$ по формуле (17) вычисляется z_2 .

Для разделения z_2 на активную и реактивную компоненты нельзя воспользоваться обычным методом - измерить фазовый угол с помощью вольтметра, амперметра и ваттметра, так как вольтная обмотка ваттметра ни в какой мере не может считаться чувствительным вольтметром с очень большим внутренним сопротивлением. Поэтому приходится идти другим путем. Во вторичную обмотку включают небольшое известное (чисто активное) сопротивление и таким же способом, как было описано выше, измеряют измененное сопротивление обмотки. Получается какое-то новое значение полного сопротивления z'_2 . Мы имеем систему из двух уравнений

$$\begin{cases} z_2^2 = r_2^2 + x_2^2 \\ z_2'^2 = (r_2 + r_0)^2 + x_2^2 \end{cases}$$

с двумя неизвестными r_2 и x_2 . Решая эту систему, получим

$$r_2 = \frac{z_2'^2 - z_2^2 - r_0^2}{2r_0}, \quad x_2 = \sqrt{z_2^2 - r_2^2} \quad (20)$$

(явное выражение для x_2 через z_2 , z_2' и r_0 слишком громоздко, так что пользоваться им неудобно).

Может показаться, что в этом же опыте короткого замыкания можно найти и z_1 , так как падение напряжения на z_1 , равное $(I_1)_{кз} z_1$, представляет собой разность между подводимым напряжением $(U_1)_{кз}$ и той его частью $-(\mathcal{E}_1)_{кз}$, которая расходуется на преодоление э.д.с. индукции. Однако в действительности это невозможно, так как мы имеем дело здесь с векторными величинами

$$\vec{(U_1)}_{кз} = \vec{(\mathcal{E}_1)}_{кз} + \vec{(I_1)_{кз} z_1},$$

а сдвиг фаз между напряжениями $(U_1)_{кз}$ и $(I_1)_{кз} z_1$ неизвестен (фаза $(I_1)_{кз} z_1$ не совпадает с фазой $(I_1)_{кз}$!).

Для определения сопротивления первичной обмотки z_1 следует проделать те же операции, которые были проделаны при определении z_2 , но в этом случае нужно первичную обмотку считать вторичной и замкнуть ее на амперметр, вторичную же считать первичной и подать на нее напряжение. Все прочие операции остаются без изменений. Вычисления ведутся по формулам (19-20), в которых индекс 2 заменяется на 1.

Режим короткого замыкания очень важен для исследования трансформатора, так как в этом режиме удается определить, кроме z_1 и z_2 , ряд других существенных величин.

Начнем с построения векторной диаграммы для режима короткого замыкания (рис. 14). Она строится точно так же, как и для режима рабочего хода (рис. 9 - 13), но в этом случае сопротивление нагрузки $z = 0$ и, следовательно, $U_2 = 0$, так что э.д.с. E_2 равна падению напряжения на внутреннем сопротивлении вторичной обмотки. В остальном диаграмма рис. 14 не отличается от рис. 13. Пунктиром на рис. 14 показано падение напряжения на реостатах $(I_1)_{кз} R$, которые должны быть включены в первичную обмотку для того, чтобы поддержать токи в обмотках в допустимых пределах. Напряжение сети U_c равно векторной сумме напряжения на зажимах первичной обмотки и падения на реостатах:

$$\vec{U}_c = \vec{(U_1)_{кз}} + \vec{(I_1)_{кз} R}$$

Именно такое значение имело напряжение на зажимах первичной обмотки в рабочем режиме трансформатора (вектор \vec{U}_1 на рис. 13). Отсюда легко представить себе соотношение масштабов для напряжения на рис. 13 и 14.

На рис. 14 видно, прежде всего, что большая часть напряжения сети падает на внешнем добавочном сопротивлении R , а также на z_1 , и только незначительная часть его идет на преодоление э.д.с. индукции $(\mathcal{E}_1)_{кз}$. Таким образом, \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 при коротком замыкании очень малы, а следовательно, мал и вызывающий их поток $\Phi_{кз}$. Из этого следует, что потери энергии в железе при коротком замыкании, также малы (они равны $I_{ж} \mathcal{E}_1$, т. е. приблизительно пропорциональны Φ_2). Так как нагрузка отсутствует, то это означает, что вся подводимая к трансформатору мощность идет на нагревание проводов.

Таким образом, режим короткого замыкания позволяет определять *потери на джоулево тепло* в проводах обмоток (и меди): они равны мощности, потребляемой первичной обмоткой трансформатора $W_M = (W_1)_{кз}$. Изменяя балластное сопротивление R , можно менять ток во вторичной обмотке и изучить зависимость потерь в меди от тока (т. е. нагрузки), что очень важно. Это позволяет, в частности, выбрать оптимальный режим работы трансформатора, т. е. режим, при котором его коэффициент полезного действия максимален. Ниже будет показано, что это имеет место приблизительно при условии равенства потерь, в меди и в железе $W_M \approx W_{ж}$.

Далее, в режиме короткого замыкания можно определить *потери напряжения* в трансформаторе. Действительно, вектор $(\mathcal{E}_2)_{кз}$ учитывает потери напряжения во вторичной обмотке, а вектор $-(\mathcal{E}_1)_{кз}$ - те же потери с пересчетом в первичную цепь. Таким образом, вектор $(U_1)_{кз}$ определяет величину потерь напряжения при заданном значении I_2 , т. е. нагрузки.

Изучив в режиме короткого замыкания зависимость потерь напряжения от I_2 , можно в значительной степени упростить анализ работы нагруженного трансформатора. Действительно, векторную диаграмму рис. 13 можно тогда приблизительно заменить упрощенной диаграммой рис. 15. Все потери напряжения считаются теперь сосредоточенными в первичной цепи (вектор $\vec{U}_{1кз}$ строится под углом $\varphi_{1кз}^4$ к \vec{I}_1); измерять сопротивления обмоток оказывается ненужным.

Наконец, рассмотрим *энергетический баланс* трансформатора и условия его наиболее экономичной работы.

Полная мощность, потребляемая трансформатором из сети (мощность первичной цепи W_1), идет на полезную работу W_2 (W_2 - мощность, выделяемая на нагрузку), потери в проводах обмоток W_M и потери в железе $W_{ж}$ (на токи Фуко и на перемагничивание):

$$W_1 = W_2 + W_M + W_{ж}$$

или

$$U_1 I_1 \cos \varphi_1 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 + I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 + W_{ж}.$$

Коэффициент полезного действия трансформатора равен

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 + W_{ж}}. \quad (21)$$

Существенный интерес представляет зависимость к.п.д. от нагрузки. Будем считать, что импеданс нагрузки изменяется но сдвиг фаз φ_2 остается постоянным. Далее, будем пренебрегать изменением U_2 в зависимости от I_2 ; это допустимо, если трансформатор не перегружен (потери напряжения малы). Кроме того, если нагрузка не слишком мала, можно пренебречь током холостого хода I_0' , по сравнению с приведенным током ΔI_1 . Тогда $I_1 \approx \Delta I_1 = k I_2$. Наконец, будем считать, что потери в железе сердечника не зависят от нагрузки. Это соответствует предположению, что потери напряжения малы и амплитуду магнитного потока можно считать не зависящей от нагрузки. Действительно, величина $W_{ж}$ однозначно связана с амплитудой потока: потери на токи Фуко пропорциональны Φ_m^2 , а потери на перемагничивание в трансформаторных сталях пропорциональны объему сердечника и частоте и сложным образом зависят от амплитуды потока. (Экспериментальные исследования показали, что для трансформаторных сталей потери на перемагничивание приблизительно пропорциональны $\Phi_m^{1,6}$).

С учетом этих предположений нетрудно найти условие максимума выражения (21) в зависимости от I_2 :

$$W_M = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = W_{ж} \quad (22)$$

Таким образом, максимум к.п.д. достигается, когда потери в обмотках приблизительно равны потерям в сердечнике. При расчете трансформаторов обычно добиваются выполнения этого условия для номинальной нагрузки.

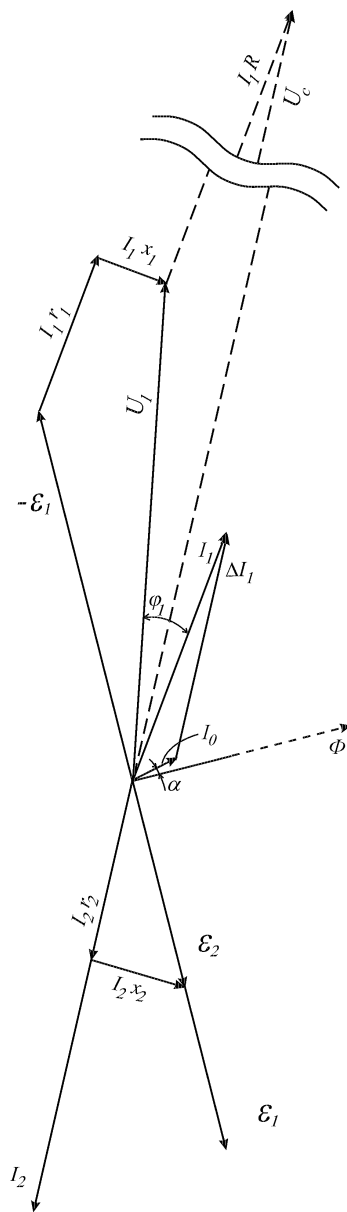


Рис. 14.

⁴ $(\cos \varphi_1)_{кз} = \left(\frac{W_1}{U_1 I_1} \right)$

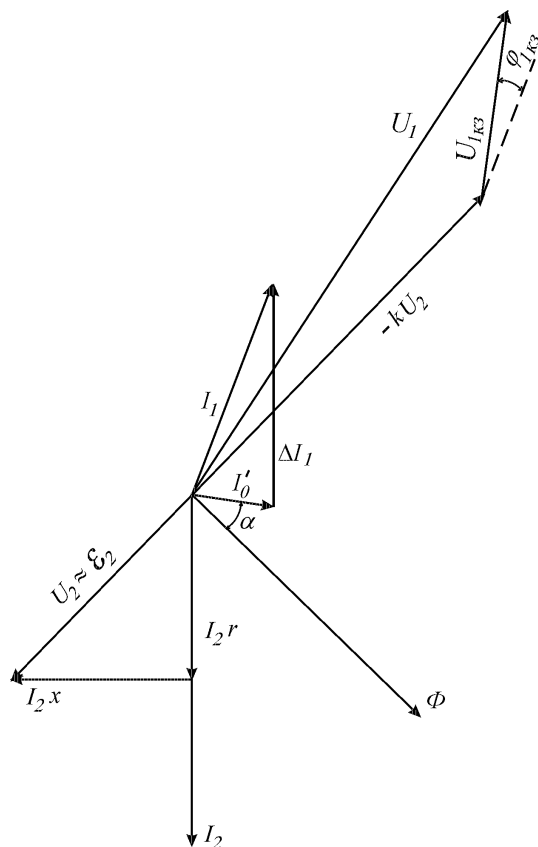


Рис. 15.

Содержание работы и порядок ее выполнения

Настоящая работа посвящена 1) определению основных характеристик трансформатора и 2) экспериментальной проверке его теории.

Для работы используются следующие приборы:

1. Исследуемый трансформатор - 1.
2. Ампервольтваттметр - 1.
3. Амперметр - 1.
4. Вольтметр - 1.
5. Ваттметр - 1.
6. Ламповый вольтметр - 1.
7. Трансформаторы тока - 2.
8. Реостаты, общим сопротивлением 100 - 150 ом.
9. Реактивные нагрузки - дроссель, конденсатор (общие для трех установок).

Ампервольтваттметр марки Д-501 используется для измерения тока, напряжения и мощности в первичной цепи. Это прибор электродинамической системы, который с помощью переключателя может быть превращен в амперметр, вольтметр или ваттметр. В исследуемую цепь он включается как ваттметр, т. е. потенциальные зажимы U^* и U 150 в включаются как вольтметр, а токовые зажимы I^* и I 5 а - 2,5 а как амперметр. Зажимы U^* и I^* должны подключаться к одному и тому же полюсу источника тока, в противном случае при работе прибора в качестве ваттметра стрелка будет отклоняться влево (эта ошибка может быть исправлена переключателем (+ -), но лучше им не пользоваться).

Для измерений во вторичной цепи используются электродинамический ваттметр и амперметр и вольтметр электромагнитной системы.

Для расширения пределов измерения следует пользоваться трансформаторами тока. В первичной цепи используется трансформатор типа И-54, во вторичной - типа МТТ-1. Через эти трансформаторы следует включать и амперметры, и токовые обмотки ваттметров.

Пределы измерения для многошкальных ваттметров и для ваттметров, включаемых через измерительные трансформаторы, определяются перемножением предельных значений тока и напряжения. Однако ваттметр ДМВ с обмотками на 120 в и 5 а градуирован на 500 вт (а не на 600). Это сделано для повышения точности измерений, так как редко бывает, чтобы U , I и $\cos \varphi$ одновременно принимали максимальные значения.

Ламповый вольтметр имеет низкую точность и применяется только для измерения э.д.с. дополнительной обмотки.

Задание 1. Определение основных характеристик трансформатора

Как видно из теории трансформатора, к его основным характеристикам относятся:

- 1) коэффициент трансформации k ,
- 2) ток холостого хода I_0 (и его составляющие $I_{ж}$ и I_{μ}),
- 3) потери в железе $W_{ж}$,
- 4) активные и реактивные сопротивления обмоток r_1, x_1 и r_2, x_2 ,
- 5) зависимость потерь напряжения от нагрузки $(U_1)_{кз} = f(I_2)$,
- 6) зависимость потерь энергии в меди от нагрузки $W_{м} = f(I_2)$,
- 7) зависимость к.п.д. от нагрузки $\eta = f(I_2)$.

Первые три задачи решаются по данным *опыта холостого хода*. В режиме холостого хода измеряются следующие характеристики:

1. Напряжение (э.д.с.) на первичной, вторичной и дополнительной (один виток) обмотках. Вычисляются коэффициенты трансформации

$$k = k_{12} = \frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1}; \quad k_{13} = \frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_1}; \quad k_{23} = \frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_2}$$

Измерения напряжения \mathcal{E}_3 производятся с помощью лампового вольтметра.

2. Ток холостого хода I_0 . Так как этот ток мал, то для его измерения на трансформаторе тока включается обмотка 1 a или даже 0,5 a . Однако в момент включения исследуемого трансформатора, пока не установится стационарный режим, ток в первичной обмотке может быть очень большим, что опасно для амперметра. Поэтому в цепь первичной обмотки трансформатора **необходимо включить реостат** сопротивлением не меньше 50-100 ом , который выводится после включения схемы. (При сопротивлении 50 ом и напряжении 127 в начальный ток может достигать 2,5 a , но очень кратковременную пятикратную перегрузку амперметр выдержит).

Ток холостого хода должен измеряться при номинальном значении входного напряжения ($U_1 = 127 \text{ в}$). Если напряжение в сети отличается от номинального, следует пересчитать значение I_0 , считая в первом приближении $I_0 \sim U_1$.

3. Мощность при холостом ходе, или потери в железе $W_{ж}$. Эта величина также должна быть отнесена к номинальному напряжению. Пересчет можно произвести, считая $W_{ж} \sim U_1^2$.

По найденным значениям I_0 и $W_{ж}$ строится векторная диаграмма для режима холостого хода при номинальном напряжении $U_1 = 127 \text{ в}$. Вычисляются величины $I_{ж}$, I_{μ} и угол магнитного запаздывания α . Вычисляется отношение I_0/\mathcal{E}_1 , являющееся мерой отношения I_0/Φ_0 . Это отношение используется в дальнейшем при построении векторной диаграммы для нагруженного трансформатора.

Остальные параметры трансформатора определяются в опыте *короткого замыкания*. Вторичная обмотка трансформатора замыкается на амперметр. В первичную обмотку необходимо включить реостат с достаточно большим сопротивлением, чтобы токи в обмотках не превосходили предельно допустимых величин (указаны на трансформаторах). Для того, чтобы можно было изменять силу тока в широких пределах, следует подбирать реостаты так, чтобы минимальный ток в первичной обмотке можно было довести до 0,5 - 1 a . **Необходимо обращать внимание также на предельный допустимый ток самих реостатов.** Уменьшая сопротивление, следует всегда выводить сначала высокоомные слаботочные реостаты, а в последнюю очередь - мощные низкоомные реостаты, **непрерывно следя по амперметру, чтобы ток не превосходил предельного для данного реостата.**

В режиме короткого замыкания проводятся следующие измерения:

1. При максимально допустимом токе (для большей точности) измеряется сопротивление вторичной обмотки. Для этого измеряют ток во вторичной обмотке $(I_2)_{кз}$ и э.д.с. дополнительной обмотки (витка) $(\mathcal{E}_3)_{кз}$. Из этих данных с помощью коэффициента трансформации k_3 находят $(\mathcal{E}_2)_{кз}$ и вычисляют z_2 . Повторяют измерения, включив во вторичную обмотку добавочное активное сопротивление $r_0 \approx 1 \text{ ом}$ (намотано на гетинаксовой пластинке) и вычисляют z'_2 .

По формулам (20) вычисляют r_2 и x_2 .

2. Изучают зависимость потерь напряжения $(U_1)_{кз}$ и потерь энергии в меди $W_{м} = (W_1)_{кз}$ от нагрузки. Для этого измеряют напряжение на зажимах первичной обмотки $(U_1)_{кз}$, ток $(I_1)_{кз}$ и мощность $(W_1)_{кз}$ при различных I_2 (например, через 0,5 a), от минимального достижимого тока (не больше 1 a) до максимального допустимого. Результаты этих измерений следует привести в виде графиков $(U_1)_{кз} = f(I_2)$ и $(W_1)_{кз} = f(I_2)$.

3. Обернув трансформатор, т. е. включив вторичную обмотку в сеть (через реостат), а первичную замкнув на амперметр, повторяют измерения п. 1 и вычисляют r_1 и x_1 . При этом предельный ток новой "вторичной" обмотки остается, конечно, таким же, как и раньше, когда она была первичной.

Зависимость к.п.д. от нагрузки определяется в *условиях рабочего режима*. Вторичная обмотка трансформатора замыкается на сопротивление (реостат). Реостаты подбираются по сопротивлению и предельно допустимому току так, чтобы можно было, изменяя сопротивление нагрузки, менять ток I_2 в тех же пределах, что и в опыте короткого замыкания. Измеряются мощности W_1 и W_2 в зависимости от тока I_2 . Вычисляется к.п.д. трансформатора $\eta = W_2/W_1$. Строятся графики зависимости величин W_1 , W_2 и η от нагрузки I_2 .³ Вычисляются значения $W_{ж} = W_1 - W_2 - W_{м}$ для нескольких токов. Остаются ли значения $W_{ж}$ постоянными? Совпадают ли они с величиной $(W_1)_{хол}$? Выполняется ли условие (22) для максимума η ?

³Удобно строить общий график для W_1 , W_2 и $W_{м}$.

Задание 2. Проверка теории трансформатора

Для проверки теории трансформатора необходимо построить векторные диаграммы для двух-трех различных нагрузок. С этой целью применяются: катушка самоиндукции, конденсатор и реостат (активное сопротивление). Эти нагрузки можно включить как по отдельности, так и комбинируя их различными способами. Конкретное задание получите у преподавателя.

При комбинировании нагрузок не разрешается включать самоиндукцию и емкость последовательно, так как при таком включении напряжение на конденсаторе может, благодаря резонансу, превысить предельное допустимое (60 в). Конденсатор не следует долго (более 2-3 мин) держать под напряжением, так как потери в диэлектрике конденсатора ведут к его нагреванию, и конденсатор может быть пробит. В остальном желательно, чтобы нагрузки были как можно разнообразнее как по величине, так и по сдвигу фаз.

Трансформатор включается непосредственно в сеть, и во вторичную цепь включается нагрузка. Измерению подлежат:

1) ток, напряжение и мощность во вторичной цепи I_2, U_2, W_2 ; из этих данных вычисляется величина нагрузки (формулы (14) - (16)); значение I_2 используется как исходная величина при построении векторной диаграммы;

2) ток, напряжение и мощность в первичной цепи I_1, U_1, W_1 .

Измеренные значения I_1, U_1, W_1 (или φ_1 используются для сравнения с величинами, полученными из векторной диаграммы. Результаты сравнения заносятся в таблицу.

	U_1	I_1	W_1	φ_1	U_2	I_2	W_2	φ_2
Измеренное....								
Вычисленное...					-	-	-	-

(Вычисленные значения U_2, I_2, W_2, φ_2 в таблицу не вносятся, так как эти величины используются для построения векторной диаграммы).

Содержание отчета

В качестве окончательных результатов отчет должен содержать:

1) параметры трансформатора: $k, r_1, x_1, r_2, x_2, I_0, \alpha, W_{ж}$ (для I_0 и $W_{ж}$ указать напряжение U_1),

2) график зависимости $(U_1)_{кз} = f(I_2)$ (потери напряжения),

3) график записи $W_m = f(I_2)$ (потери в меди),

4) график зависимости $\eta = f(I_2)$ (к. п. д),

5) векторную диаграмму в режиме холостого хода и две-три (по заданию преподавателя) векторных диаграммы нагруженного трансформатора. На каждой диаграмме следует привести таблицу, в которой нужно сопоставить величины U_1, I_1 и W_1 (или φ_1 , или $\cos \varphi_1$), полученные на основе построения векторных диаграмм и измеренные на опыте. Кроме того, в отчет должны быть внесены все рабочие схемы, составленные самостоятельно в ходе домашней подготовки (схемы должны быть включены в заготовку отчета). При составлении схем нужно учитывать следующие требования:

1) необходимость применения трансформаторов тока;

2) необходимость применения защитного сопротивления в режиме холостого хода;

3) различные величины токов в режиме холостого хода и рабочем режиме, с одной стороны, и в режиме короткого замыкания, с другой стороны, требуют разных способов включения вольтметра и амперметра. При коротком замыкании ток очень велик, и следует применять схему, и которой падение напряжения на амперметре не учитывается вольтметром. При холостом ходе и в рабочем режиме надо использовать схему, и которой амперметр не учитывает ток вольтметра.

ПРИЛОЖЕНИЕ. Расчет силового трансформатора

Приводим для справок обоснование метода расчета, применяемого обычно для трансформаторов небольшой мощности - до нескольких сот ватт (см., например, Г. Г. Г и н к и н. Справочник по радиотехнике. М.-Л., 1948).

Число витков первичной обмотки подбирается так, чтобы амплитуда индукции в сердечнике B_m не выходила за пределы области больших μ . Для обычных сортов трансформаторной стали можно принять $B_m = 8000$ гс.

Отсюда число витков на 1 в, согласно (3),

$$\frac{n_1}{U_1} = \frac{n_2}{U_2} = \frac{1}{\left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}}\right) \nu B_m S}, \quad (23)$$

где S - площадь сечения сердечника. Если S измеряется в $см^2$, U - в вольтах, $\nu = 50$ гц, то коэффициент

$$\frac{1}{\left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}}\right) \nu B_m} = 60 \text{ витков/см}^2 \cdot \text{в.}$$

Потери в проводах первичной обмотки $W_{m1} = r_1 I_1^2$. Сопротивление обмотки $r_1 = \rho l / S_1$, где $\rho = 0,018$ ом-мм²/м (медь), $S_1 = I_1 / j$, j - предельная допустимая плотность тока ($j = 2a/мм^2$), $l_1 = n_1 p$, $p = \alpha S^{1/2}$ - средняя длина витка.

Если сечения сердечника близко к квадратному и глубина намотки порядка толщины сердечника, то $\alpha \approx 8$. Таким образом, $W_M = \rho j \alpha S^{1/2} n_1 I_1$. Такую же величину имеют и суммарные потери в проводах всех вторичных обмоток (2, 3, ...), поскольку $n_2 I_2 + n_3 I_3 + \dots = n_1 I_1$. Таким образом, полные потери и обмотках

$$W_M = 2\rho j \alpha S^{1/2} n_1 I_1 \quad \text{или} \quad W_M = 2\rho j \alpha S^{1/2} \frac{W}{\eta} \frac{n_1}{U_1} \quad (24)$$

где W - полезная мощность трансформатора.

Потери в сердечнике на гистерезис и токи Фуко при $\nu = 50$ гц и $B_m = 8000$ гс для обычных сортов трансформаторной стали можно принять равными. $W_0 = \frac{W_{\text{ж}}}{V} = 0,015$ вт/см³, где $V = \beta S^{3/2}$ объем сердечника. Для сердечников обычной формы можно принять $\beta \approx 10$.

Условие максимума к.п.д.:

$$W_M = W_{\text{ж}} \quad \text{или} \quad \beta W_0 S^{3/2} = 2\rho j \alpha S^{1/2} \frac{W}{\eta} \frac{n_1}{U_1}. \quad (25)$$

Подставляя n_1/U_1 из (23), получаем уравнение для S , из которого

$$S = \sqrt{\frac{2\rho j}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \nu \beta B_m W_0 \eta}} \sqrt{W} \quad (26)$$

Таким образом, сечение сердечника однозначно определяется мощностью трансформатора. Подставляя указанные выше значения констант и принимая $\eta \approx 8$, получаем

$$S = A \sqrt{W} \quad (27)$$

где $A = 1,35$ см²/вт^{1/2}.

По найденному S вычисляют по формуле (23) числа витков в обмотках. Сечения проводов обмоток определяются по допустимой плотности тока. Далее остается только проверить, укладываются ли обмотки в окне сердечника выбранной формы.

Из (25) и (27) следует

$$W_M + W_{\text{ж}} = 2W_{\text{ж}} = 2\beta A^{3/2} W_0 W^{3/4} = BW^{3/4} \quad (B \approx 0,9 \text{ вт}^{1/4})$$

Отсюда

$$\eta = \frac{W - W_M - W_{\text{ж}}}{W} = 1 - \frac{B}{W^{1/4}}$$

Величина η тем больше, чем мощнее трансформатор. Для $W = 100$ вт $\eta = 85\%$, для $W = 1$ квт $\eta \approx 92\%$.