

ГЛАВА 3

ХОЛОСТОЙ ХОД ТРАНСФОРМАТОРА

§ 12. ОПЫТ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

Холостым ходом трансформатора является такой предельный режим работы, когда его вторичная обмотка разомкнута и ток вторичной обмотки равен нулю ($I_2=0$). Опыт холостого хода позволяет определить коэффициент трансформации, ток, потери и сопротивление холостого хода трансформатора.

При опыте холостого хода первичную обмотку однофазного трансформатора включают в сеть переменного тока на номинальное напряжение U_1 (рис. 15).

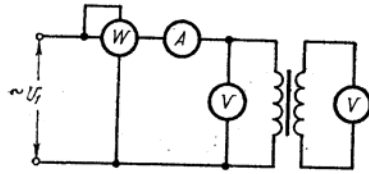


Рис. 15. Схема опыта холостого хода однофазного трансформатора

Под действием приложенного напряжения по обмотке протекает ток $I_1=I_0$, равный току холостого хода. Практически ток холостого хода равен примерно 5—10% номинального, а в трансформаторах малой мощности (десятки вольтампер) достигает значений 30% и более номинального.

Для измерения тока холостого хода, приложенного к первичной обмотке напряжения и потребляемой мощности в цепь первичной обмотки трансформатора включены измерительные приборы (амперметр A , вольтметр V и ваттметр W). Вторичная обмотка трансформатора замкнута на вольтметр, сопротивление которого очень велико, так что ток вторичной обмотки практически равен нулю.

Ток холостого хода возбуждает в магнитопроводе трансформатора магнитный поток, который индуцирует э. д. с. E_1 и E_2 в первичной и во вторичной обмотках.

Во вторичной обмотке трансформатора нет тока и, следовательно, нет падения напряжения в сопротивлении этой обмотки, поэтому э. д. с. равна напряжению, т. е. $E_2=U_2$. Следовательно, э. д. с. вторичной обмотки определяется показанием вольтметра, включенного в эту обмотку.

Ток холостого хода, протекающий в первичной обмотке, очень мал по сравнению с номинальным, так что падение напряжения в сопротивлении первичной обмотки очень мало по сравнению с приложенным напряжением. Поэтому приложенное напряжение практически уравнивается э. д. с. первичной обмотки и численные

значения напряжения U_1 и э. д. с. E_1 приблизительно равны. Следовательно, при опыте холостого хода э. д. с. первичной обмотки определится показанием вольтметра, включенного в ее цепь.

Для большей точности измерения при опыте холостого хода первичной обмоткой служит обмотка низшего напряжения, а вторичной — обмотка высшего напряжения. Это объясняется тем, что для обмотки НН номинальный ток будет больше, чем для обмотки ВН. Так как ток холостого хода небольшой и составляет несколько процентов номинального, то при использовании обмотки НН в качестве первичной ток холостого хода окажется больше и может быть измерен более точно, чем в случае использования обмотки ВН в качестве первичной.

Имея в виду равенства $E_2=U_2$ и $E_1 \approx U_1$, коэффициент трансформации можно определить отношением э. д. с. или чисел витков обмоток, т. е.

$$k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{4,44w_2f\Phi_m}{4,44w_1f\Phi_m} = \frac{w_2}{w_1}$$

Таким образом, при холостом ходе трансформатора коэффициент трансформации определится отношением показателей вольтметров, включенных в первичной и вторичной обмотках.

Для трехфазного трансформатора различают фазный и линейный коэффициенты трансформации. Фазный коэффициент трансформации определяет соотношение чисел витков обмоток ВН и НН и равен отношению фазных напряжений. Линейный коэффициент трансформации равен отношению линейных напряжений на стороне ВН и НН.

Если схемы соединения обмоток ВН и НН одинаковы (например, звезда — звезда или треугольник — треугольник), отношения фазных и линейных напряжений также одинаковы, т. е. фазный и линейный коэффициенты трансформации равны. Если же схемы соединения обмоток ВН и НН различны (звезда — треугольник или треугольник — звезда), фазный и линейный коэффициенты трансформации отличаются в $\sqrt{3}=1,73$ раза.

При опыте холостого хода кроме напряжений первичной и вторичной обмоток измеряют ток холостого хода I_0 и мощность P_0 , потребляемую трансформатором. Ток холостого хода в фазе обмотки трехфазного трансформатора при соединении первичной обмотки в звезду равен измеренному току ($I_0=I$), а при соединении первичной обмотки в треугольник — в $\sqrt{3}$ раз меньше измеренного

($I_0 = \frac{I}{\sqrt{3}}$). Мощность, потребляемая трансформатором при холостом ходе, практически расходуется на покрытие потерь в стали за счет гистерезиса и вихревых токов, так как потери в проводах первичной обмотки ничтожно малы.

Полное z_0 , активное r_0 и реактивное x_0 сопротивления трансформатора при холостом ходе равны:

$$z_0 = \frac{U_1}{I_0}; r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}; x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

При испытании трехфазного трансформатора в эти выражения следует подставлять фазные значения напряжения и тока, а также мощность одной фазы, которая равна $\frac{P_0}{3}$, где P_0 — показание ваттметра.

Токи в фазах при холостом ходе трехфазного трансформатора различны, поэтому за значение тока холостого хода условно принимают его среднее значение для трех фаз, т. е.

$$I_0 = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3}.$$

§ 13. ТОК ХОЛОСТОГО ХОДА

При холостом ходе трансформатора под действием приложенного напряжения U_1 в первичной обмотке протекает ток холостого хода I_0 . Намагничивающая сила первичной обмотки $F_0 = I_0 \omega_1$ возбуждает переменное магнитное поле, большая часть магнитных линий которого замыкается через магнитопровод, образуя основной магнитный поток.

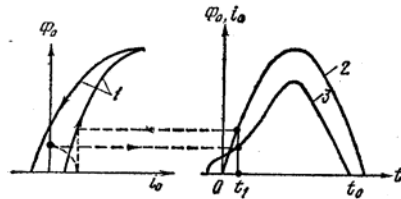


Рис. 16. Кривые магнитного потока и тока:

1 — зависимость магнитного потока от тока холостого хода, 2 — изменение магнитного потока во времени, 3 — изменение тока холостого хода во времени

Основной магнитный поток с амплитудой Φ_m пронизывает витки первичной и вторичной обмоток и индуцирует в этих обмотках э. д. с. Если бы основной поток был пропорционален току холостого хода, то для создания синусоидально изменяющегося во времени магнитного потока потребовался бы также синусоидально изменяющийся ток. Однако при сердечнике из магнитного материала магнитный поток не пропорционален току вследствие насыщения.

В магнитопроводе трансформатора при его работе происходят потери энергии на гистерезис и вихревые токи. При частоте тока 50 гц потери на гистерезис в трансформаторе в несколько раз больше потерь на вихревые токи, так что потери в стали в основном определяются гистерезисными потерями.

Положим, что для материала магнитопровода трансформатора магнитная характеристика, т. е. зависимость магнитного потока от тока холостого хода, представлена шлейфом петли гистерезиса (кривая 1 на рис. 16).

Если приложенное к первичной обмотке напряжение синусоидально, основной магнитный поток изменяется также синусоидаль-

но во времени (кривая 2). Каждому значению магнитного потока соответствуют различные значения тока холостого хода согласно восходящей и нисходящей ветвям магнитной характеристики материала магнитопровода. На рисунке показано определение одной точки кривой тока холостого хода (кривая 3).

Для произвольно выбранного момента времени t_1 определим на временной диаграмме магнитный поток, значение которого отложим на восходящей ветви магнитной характеристики. По магнитной характеристике определим ток холостого хода, необходимый для создания магнитного потока, соответствующего моменту t_1 . Это значение тока отложим на временной диаграмме для момента t_1 . Так же можно определить значения тока холостого хода для любых моментов времени.

По найденным таким образом точкам на временной диаграмме можно построить кривую тока холостого хода, которая будет иметь вид, изображенный на рисунке (кривая 3). Кривая тока холостого хода несинусоидальна и опережает кривую магнитного потока (проходит через нулевые значения раньше) на некоторое время t_0 . Произведение этого отрезка времени на угловую скорость равно углу гистерезисного опережения $\alpha = \omega t_0$. При построении векторных диаграмм несинусоидальный ток холостого хода считается таким синусоидальным током, действующее значение которого равно действующему значению реального тока.

Таким образом, за счет потерь в стали ток холостого хода опережает по фазе создаваемый им магнитный поток и на векторной диаграмме (рис. 17) изображается вектором I_0 , повернутым относительно вектора Φ_m на угол α в сторону опережения. Поэтому ток I_0 может быть представлен в виде двух составляющих: реактивной составляющей I_μ , совпадающей с основным магнитным потоком, и активной составляющей I_a , параллельной вектору приложенного напряжения.

Реактивная составляющая тока холостого хода является намагничивающим током, создающим основной магнитный поток, и зависит от магнитного сопротивления магнитопровода. Чем большим будет магнитное сопротивление магнитопровода, тем большим окажется и намагничивающий ток.

Следовательно, величина намагничивающего тока зависит от магнитной проницаемости материала магнитопровода (от магнитных свойств стали), его сборки и от магнитной индукции в магнитопроводе. Чем выше магнитная проницаемость материала и лучше собран магнитопровод, т. е. чем плотнее прилегают друг к другу отдельные его части и чем меньше магнитная индукция, тем меньшим будет намагничивающий ток.

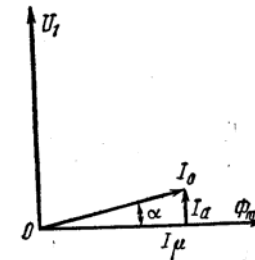


Рис. 17. Векторная диаграмма напряжения, магнитного потока и тока холостого хода

Применение для магнитопроводов материалов с более высокой магнитной проницаемостью дает возможность увеличить магнитную индукцию, т. е. уменьшить поперечное сечение магнитопровода и, следовательно, уменьшить расход материала. Расход обмоточного провода для обмоток при этом также уменьшается, так как длина витков обмоток становится меньше.

Активная составляющая тока холостого хода I_a расходуется на покрытие потерь в стали и зависит от свойств материала магнитопровода, магнитной индукции и толщины стальных пластин, из которых собран магнитопровод. Чем больше потери в стали магнитопровода, тем большей будет активная составляющая тока холостого хода.

§ 14. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА И ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

Так как при холостом ходе во вторичной обмотке тока нет, то эта обмотка не возбуждает потока рассеяния. Магнитные линии, образующие поток рассеяния, пронизывают витки только первичной обмотки, индуцируя э. д. с. рассеяния E_{s1} . Поток рассеяния, замыкающийся через немагнитную среду и встречающийся на своем пути большое магнитное сопротивление, очень мал по сравнению с основным магнитным потоком в магнитопроводе трансформатора ($\Phi_{s1} \ll \Phi_m$). Поэтому э. д. с. рассеяния также очень мала по сравнению с э. д. с., индуцированной основным магнитным потоком ($E_{s1} \ll E_1$).

Таким образом, в первичной обмотке трансформатора, помимо приложенного напряжения U_1 , возникают э. д. с. от основного магнитного потока (E_1) и потока рассеяния (E_{s1}). Первичная обмотка обладает активным сопротивлением r_1 , падение напряжения на котором при холостом ходе равно $I_0 r_1$. Согласно второму закону Кирхгофа, геометрическая сумма э. д. с. равна сумме падений напряжений в сопротивлении цепи, т. е.

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{s1} = \dot{I}_0 r_1.$$

Так как э. д. с. E_1 и E_{s1} не совпадают по фазе с напряжением U_1 , то их следует складывать геометрически, что обозначено точками в уравнении равновесия э. д. с.

Уравнение равновесия э. д. с. первичной обмотки трансформатора может быть записано в следующем виде:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{s1} + \dot{I}_0 r_1.$$

На рис. 18, а изображена векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе. По горизонтальной оси направлен вектор амплитуды основного магнитного потока Φ_m , который индуцирует в первичной и вторичной обмотках э. д. с. E_1 и E_2 , отстающие от магнитного потока по фазе на четверть периода. Поэтому действующие значения э. д. с. обмоток трансформатора изображены векторами, повернутыми в сторону отставания (по часовой стрелке)

относительно вектора магнитного потока на четверть периода (90°).

При построении векторной диаграммы предполагалось, что трансформатор повышающий и э. д. с. вторичной обмотки больше, чем э. д. с. первичной обмотки. Для понижающего трансформатора э. д. с. первичной обмотки будет больше, чем э. д. с. вторичной обмотки.

Ток холостого хода, возбуждающий магнитный поток, изображен вектором I_0 , повернутым в сторону опережения относительно вектора магнитного потока на угол α , называемый *углом гистерезисного опережения* или *углом магнитного запаздывания*. Обычно этот угол мал и составляет несколько градусов.

Основной магнитный поток, магнитные линии которого замыкаются



Рис. 18. Векторная диаграмма (а) и эквивалентная схема (б) трансформатора при холостом ходе

через сталь магнитопровода, отстает на угол α от тока за счет потерь в стали на гистерезис и вихревые токи. Поток рассеяния, магнитные линии которого замыкаются через немагнитную среду, совпадает по фазе с током, его создающим, и изображается вектором Φ_{s1} , совпадающим с вектором тока холостого хода I_0 . Э. д. с. рассеяния отстает от потока рассеяния на четверть периода и изображается вектором E_{s1} , повернутым относительно вектора Φ_{s1} на 90° в сторону отставания.

Вектор приложенного напряжения определится как геометрическая сумма трех векторов, стоящих в правой части уравнения равновесия э. д. с. Для определения вектора U_1 из начальной точки O диаграммы строим вектор $-E_1$, равный и противоположно направленный вектору э. д. с. первичной обмотки E_1 . Из конца вектора $-E_1$ строим вектор $-E_{s1}$, равный и противоположно направленный вектору E_{s1} . Из конца вектора $-E_{s1}$ строим вектор $I_0 r_1$, параллельный вектору тока холостого хода. Начало вектора $-E_1$ и конец вектора $I_0 r_1$ соединяем вектором U_1 , представляющим собой геометрическую сумму векторов $-E_1$, $-E_{s1}$ и $I_0 r_1$.

Следует иметь в виду, что векторная диаграмма изображена в искаженном масштабе. В действительности векторы $I_0 r_1$ и E_{s1} очень малы по сравнению с векторами U_1 и $-E_1$. Поэтому при изображении диаграммы в действительном масштабе векторы U_1 и $-E_1$ будут близки к совпадению.

Вектор $-E_{s1}$ можно представить падением напряжения в индуктивном сопротивлении x_1 , обусловленным действием потока рассеяния, т. е.

$$-E_{s1} = I_0 x_1.$$

Таким образом, первичная обмотка трансформатора помимо активного сопротивления r_1 имеет индуктивное сопротивление x_1 . Полное сопротивление этой обмотки

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}.$$

Вектор $-E_1$ можно представить произведением тока I_0 на некоторое сопротивление z_0 . Это сопротивление непостоянно и включает как индуктивное сопротивление x_0 , так и активное сопротивление r_0 , так как угол между векторами $-E_1$ и I_0 больше нуля, но меньше 90° . Таким образом,

$$-E_1 = I_0 z_0.$$

Так как ток холостого хода I_0 равен геометрической сумме активной I_a и реактивной I_μ составляющих, сопротивление z_0 может быть представлено в виде двух параллельных ветвей, одна из которых содержит активное сопротивление r_0 , через которое протекает ток I_a , а другая — реактивное сопротивление x_0 , через которое протекает ток I_μ .

Уравнение равновесия э. д. с. первичной обмотки с учетом приведенных выше обозначений примет следующий вид:

$$U_1 = I_0 (z_1 + z_0),$$

т. е. трансформатор при холостом ходе может быть представлен эквивалентной схемой, состоящей из двух последовательно включенных сопротивлений z_1 и z_0 .

На эквивалентной схеме индуктивное сопротивление x_0 учитывает действие основного магнитного потока, а активное сопротивление r_0 эквивалентно потерям в стали магнитопровода, т. е. мощность $I_a^2 r_0$, выделяющаяся в этом сопротивлении, равна потерям в стали. Так как основной магнитный поток в магнитопроводе много больше потока рассеяния, то и x_0 значительно больше x_1 . Активное сопротивление r_0 также много больше r_1 , так что полное сопротивление z_0 значительно больше z_1 .

Для трехфазного трансформатора векторная диаграмма и эквивалентная схема изображаются для одной фазы и имеют такой же

вид, как векторная диаграмма и эквивалентная схема однофазного трансформатора.

Контрольные вопросы

1. Как производят опыт холостого хода трансформатора и какие измерительные приборы используют при этом?
2. Почему ток холостого хода не совпадает по фазе с возбуждаемым им магнитным потоком?
3. Изобразите эквивалентную схему трансформатора при холостом ходе.