

где α —коэффициент затухания, который для электрической цепи (как было показано в примечании на стр. 461) равен $\frac{r}{2L}$, или, что то же, $\frac{\omega_0}{2Q}$. Таким образом,

$$\omega_{\text{своб}} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}}. \quad (с)$$

Чем больше величина потерь и меньше индуктивность цепи, тем быстрее затухают свободные колебания тока в цепи, уступая место стационарному режиму вынужденных резонансных колебаний.

Из сказанного и формулы (24) ясно, что при слишком большой величине добротности резонансный контур может оказаться для некоторых применений не-пригодным, так как чрезмерно сужается ширина резонансной кривой и возрастает время установления резонансного режима¹⁾.

§ 84. Трансформация тока

Главное техническое преимущество переменного тока в сравнении с постоянным заключается в том, что величину и напряжение переменного тока можно в широчайших пределах преобразовывать (*трансформировать*) без существенных потерь мощности. Для снижения бесполезного нагревания проводов по линиям электропередачи подают ток пониженной величины и повышенного до сотен тысяч вольт напряжения, а в местах потребления в тысячи раз снижают напряжение с соответственным повышением величины тока; этим достигается уменьшение потерь в линиях передачи в миллионы раз, так как выделение тепла пропорционально квадрату величины тока. Кроме того, дополнительная трансформация тока в разнообразных приборах, использующих ток, всегда позволяет иметь ток наиболее удобного напряжения и нужной величины.

Трансформатор (рис. 354) в основном состоит из двух катушек, намотанных на общий железный сердечник. Одна из этих катушек, называемая обычно *первичной*, приключается к линии, питаемой генератором переменного тока. Устройство, потребляющее электроэнергию, будь то электромоторы, лампы накаливания и т. д., подключается ко *вторичной* обмотке трансформатора.

¹⁾ Нередко декремент затухания вычисляют по величине добротности цепи, пользуясь формулой

$$\vartheta = \frac{\pi}{\sqrt{Q^2 - \frac{1}{4}}}.$$

Эта формула, которая на первый взгляд может показаться несколько неожиданной (так как коэффициент затухания связан с добротностью весьма простым соотношением $\alpha = \frac{\omega_0}{2Q}$), является следствием формулы (с) для частоты свободных колебаний, которая входит в определение декремента затухания:

$$\vartheta = \alpha T = \alpha \frac{2\pi}{\omega_{\text{своб}}} = \frac{\pi}{Q} \frac{\omega_0}{\omega_{\text{своб}}} = \frac{\pi}{\sqrt{Q^2 - \frac{1}{4}}}.$$

1. Представим себе, что вторичная обмотка трансформатора разомкнута, т. е. трансформатор не нагружен. Тогда первичная обмотка будет представлять собой не что иное, как простую индуктивную катушку с железным сердечником.

В сердечнике мы получим синусоидально меняющийся магнитный поток, и трансформатор будет потреблять от сети реактивный ток, отстающий от напряжения на $\frac{\pi}{2}$

Какова будет электродвижущая сила на вторичной обмотке трансформатора?

Ее амплитуда и фаза определяются законом электромагнитной индукции. Так как первичная и вторичная обмотки связаны общим магнитным потоком, мы выберем этот поток в качестве основной величины. Предположим, что магнитный поток в сердечнике изменяется по закону

$$\Phi = \Phi_0 \sin \omega t.$$

Тогда как в первичной, так и во вторичной обмотке мы получаем электродвижущие силы, пропорциональные скорости изменения потока и числу витков обмотки:

$$\mathcal{E}_1 = -n_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -n_1 \Phi_0 \omega \cos \omega t,$$

$$\mathcal{E}_2 = -n_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -n_2 \Phi_0 \omega \cos \omega t.$$

Подводимое к трансформатору внешнее напряжение — напряжение сети — в любой момент должно уравновешивать электродвижущую силу первичной обмотки, т. е. должно быть ей равно и противоположно по знаку:

$$U = -\mathcal{E}_1 = n_1 \Phi_0 \omega \cos \omega t.$$

Мы видим, что электродвижущая сила вторичной обмотки по фазе противоположна напряжению сети. Отношение их амплитуд легко получить:

$$\frac{\mathcal{E}_2}{U} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (25)$$

Очевидно, что мы можем получить любое соотношение между первичным и вторичным напряжением, выбрав нужное отношение числа витков, или, как его обычно называют, коэффициент трансформации.

Построим (рис. 355) векторную диаграмму трансформатора на холостом ходу. Вектор напряжения сети и вектор вторичной электродвижущей силы прямо противоположны друг другу; отношение

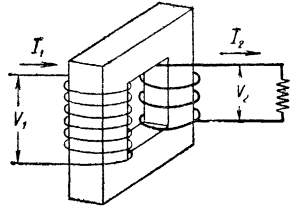


Рис 354. Схема трансформатора

их величин определяется коэффициентом трансформации. Вектор магнитного потока и находящийся с ним в фазе вектор реактивного ¹⁾ намагничивающего тока I в первичной обмотке («ток холостого хода») отстают от вектора напряжения сети на $\frac{\pi}{2}$.

II. Нагрузим вторичную обмотку, приключив к ее концам активное сопротивление (рис. 356); при этом в ней должен возникнуть ток I_2 , находящийся в фазе со вторичной электродвижущей силой. Этот вторичный ток I_2 создаст в сердечнике магнитный поток, находящийся в фазе с током I_2 .

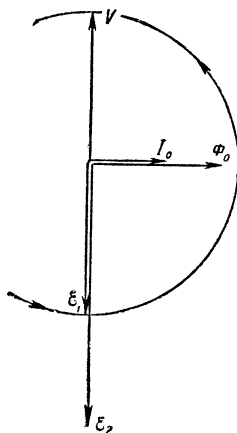


Рис. 355. Векторная диаграмма трансформатора на холостом ходу.

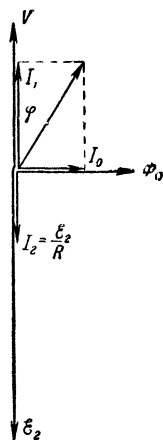


Рис. 356. Векторная диаграмма для нагруженного трансформатора.

Но магнитный поток всецело (по величине и по фазе) определяется при заданной конструкции трансформатора напряжением внешней сети:

$$U = -\mathcal{E}_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

и при неизменном значении U и n_1 он не может измениться.

Нарушенное равновесие восстанавливает первичная обмотка; в ней возникает ток I_1 , в каждый момент намагничивающий сердечник в направлении, противоположном тому, которое создается током вторичной обмотки. Этот ток I_1 в первичной обмотке противоположен по фазе вторичному, т. е. он совпадает по фазе с напряжением сети и, следовательно, является активным током.

¹⁾ В целях упрощения мы не учитываем здесь омического сопротивления обмотки и потерь на гистерезис.

Общий ток первичной обмотки складывается теперь из неизменно присутствующего реактивного намагничивающего тока и рабочего активного тока.

Соотношение между амплитудами (или эффективными значениями) первичного и вторичного активных токов легко найти из условия, что магнитодвижущая сила, создаваемая активным током первичной обмотки, должна быть по величине равна той магнитодвижущей силе, которая создается вторичной обмоткой (по направлению, как было сказано выше, она противоположна ей). Иначе говоря, в любой момент ампервитки обмоток равны друг другу: $I_1 n_1 = I_2 n_2$,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (26)$$

Величины токов, как мы видим, обратно пропорциональны числам витков обмоток.

Мощность, отдаваемая вторичной обмоткой (если не учитывать омических потерь в обмотках и потерь на вихревые токи в сердечнике), равна той мощности, которую трансформатор берет от сети. Действительно, по формулам (25) и (26)

$$\frac{I_2 \mathcal{E}_2}{I_1 U} = \frac{n_1 n_2}{n_2 n_1} = 1$$

или

$$I_2 \mathcal{E}_2 = I_1 U.$$

Это можно было, конечно, предвидеть, основываясь на законе сохранения энергии.

Для нагруженного трансформатора (см. рис. 356) сдвиг фаз между напряжением сети и суммарным током первичной обмотки тем меньше, чем меньше реактивный ток по сравнению с активным, т. е. чем больше индуктивность первичной обмотки трансформатора. Однако значительное увеличение индуктивности во многих случаях невыгодно экономически, так как требует больших объемов железа сердечника и большой затраты меди на изготовление обмоток. Поэтому трансформаторы небольших мощностей и дешевого типа зачастую обладают плохим $\cos \varphi$ ¹⁾.

¹⁾ Индукционные печи, упомянутые на стр. 388, в сущности, тоже представляют собой трансформаторы, в которых роль сердечника и одновременно вторичной обмотки выполняет масса металла, загруженного в тигель. В этом случае $\cos \varphi$ весьма мал (порядка 0,1); чтобы компенсировать индуктивное сопротивление печи, к ее обмотке подключают конденсаторы соответствующей мощности. Так как в индукционной печи почти все потери на джоулево тепло идут по «прямому назначению» — на нагревание металла, то в итоге коэффициент полезного действия оказывается удовлетворительным (около 60%).