

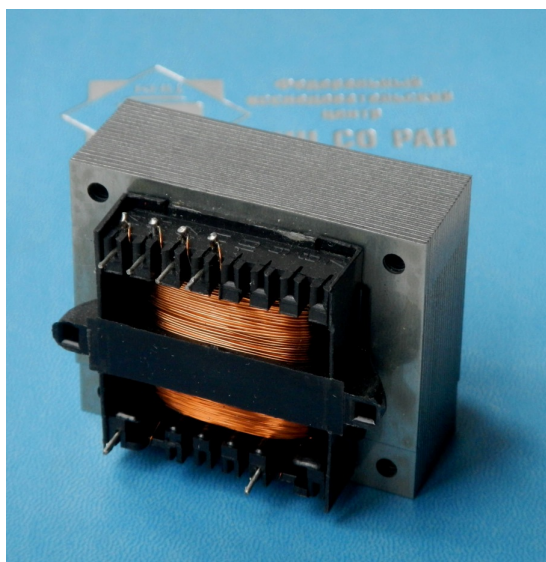
Как работает трансформатор

Несмотря на огромное количество литературы, для многих работа трансформатора так и остаётся загадкой. После самостоятельного разбора данной темы стало ясно, что ни в одном источнике нет правильного объяснения принципов его работы. Устраним этот пробел.

Уточню, что речь пойдёт о обычном трансформаторе напряжения, прочие эксклюзивные варианты, такие как токовый трансформатор или трансформатор обратного преобразователя рассмотрим в другой раз.

Что такое трансформатор

Трансформатор – устройство, состоящее из двух или более катушек индуктивности с общим магнитным сердечником. В более общем случае сердечник может и отсутствовать.



Одна из катушек является первичной, а остальные – вторичными; и называются первичная и вторичные обмотки, сокращённо ПО и ВО. Первичная обмотка подключается к источнику переменного тока, а вторичная – к нагрузке.

Трансформатор служит для преобразования напряжения U_1 и тока I_1 цепи первичной обмотки в другие, необходимые напряжение U_2 и ток I_2 вторичной обмотки:

$$U_2 = U_1 \cdot K ; I_2 = \frac{I_1}{K} \quad (1)$$

где K – коэффициент трансформации, определяемый соотношением числа витков первичной N_1 и вторичной N_2 обмоток:

$$K = \frac{N_2}{N_1} \quad (2)$$

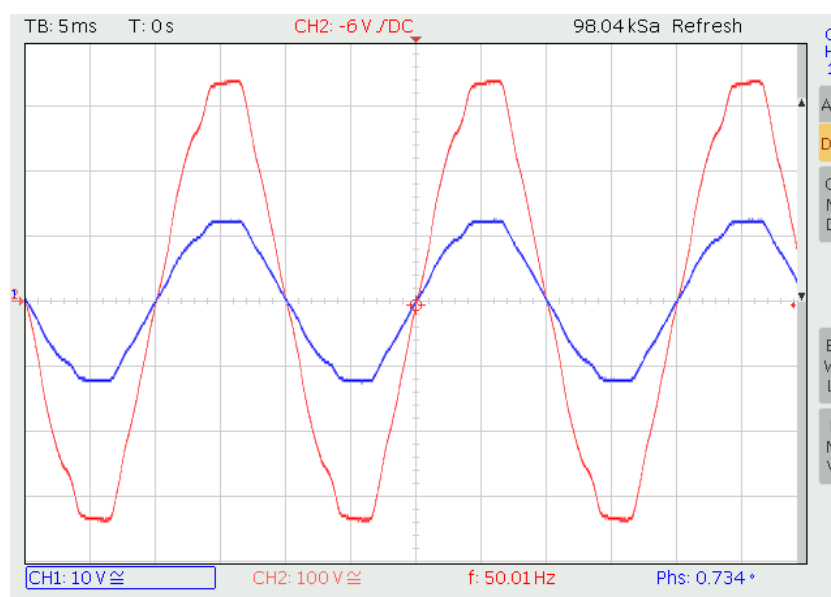
Какое простое и полезное устройство!

Как объясняется работа трансформатора:

«Протекающий по первичной обмотке переменный ток создаёт переменное магнитное поле (магнитный поток), которое индуцирует во всех обмотках трансформатора э.д.с. индукции, и следовательно, напряжение на вторичной обмотке.»

И... всё? А как связана форма напряжения на первичной и вторичной обмотках? При подключении нагрузки ко вторичной обмотке в ней появляется ток и в первичной обмотке тоже. Откуда первичная обмотка узнаёт, какой ток ей необходимо взять с источника? ..! На самом деле, тут всё только начинается.

Википедия уверяет, что *«Форма напряжения во вторичной обмотке связана с формой напряжения в первичной обмотке довольно сложным образом»*. Меня всегда интересовал вопрос, а как же трансформаторы используются в усилителях звуковой частоты? Ведь звук, и следовательно форма сигнала передаётся без существенных искажений. При том, что напряжение э.д.с. индукции зависит от изменения, дифференциала тока первичной обмотки. Ткнув осциллографом в простой силовой трансформатор, убедился, что **форма напряжения вторичной обмотки повторяет форму напряжения первичной**. Благо напряжение у нас в розетке по форме далеко от синусоиды.



Осциллограмма 1
красный – напряжение ПО
синий – напряжение ВО

Импульсный трансформатор также прекрасно транслирует импульсы из ПО в ВО. Трансформаторы раньше использовались в телевизорах для для передачи управляющих пилообразных сигналов строчной и кадровой развёртки.

Всё оказалось просто:

Трансформатор без нагрузки функционирует как катушка индуктивности. И при этом на вторичной обмотке присутствует напряжение, равное напряжению э.д.с. индукции для неё (для вторичной обмотки):

* Что такое напряжение э.д.с. читайте «Что такое ЭДС» [1]. О работе катушки индуктивности написано в статье «Как работает катушка индуктивности» [2].

Итак, напряжение э.д.с. индукции равно:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

где Φ – магнитный поток

Напряжение э.д.с. индукции \mathcal{E} уравнивается приложенным к ПО (первичной обмотке) напряжением: $U_{\text{ПО}} = \mathcal{E}$ [*2]. На каждый виток приходится напряжение э.д.с. индукции: $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}/N_{\text{ПО}}$, где $N_{\text{ПО}}$ – число витков первичной обмотки. Так как магнитный поток пронизывает и витки вторичной обмотки, то и в каждом витке вторичной обмотки также наводится напряжение э.д.с. индукции \mathcal{E}_1 . Таким образом $\mathcal{E}_{\text{ВО}} = \mathcal{E}_1 * N_{\text{ВО}}$, где $N_{\text{ВО}}$ – число витков вторичной обмотки, что и формирует напряжение на ВО:

$$U_{\text{ВО}} = \mathcal{E}_{\text{ВО}} = U_{\text{ПО}} \cdot \frac{N_{\text{ВО}}}{N_{\text{ПО}}} \quad (4)$$

которое в точности повторяет форму напряжения на первичной обмотке. При этом в первичной обмотке будет течь небольшой ток, равный:

$$I_{\text{ПО}} = \frac{\int U_{\text{ПО}} \cdot dt}{L_{\text{ПО}}} \quad (5)$$

где $L_{\text{ПО}}$ – индуктивность первичной обмотки
(следует из формулы 3)

что для синусоидальной формы напряжения даст отставание по фазе 90° , как для обычной катушки индуктивности. Этот ток – так называемый ток холостого хода. (Нагрузку ко вторичной обмотке мы пока не подключили.)

На рис. 1 показано, как направлены э.д.с. индукции в первичной и вторичной обмотках в некоторый момент времени. Точкой у обмоток обозначено условное начало, т.е. концы, от которых витки идут в одну сторону, например, по часовой стрелке. Т.е. э.д.с. индукции во всех обмотках направлены одинаково.

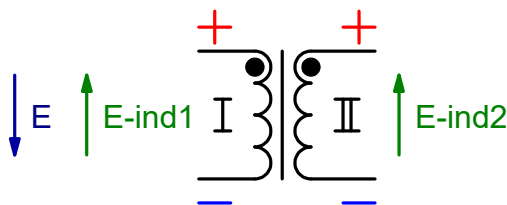


Рис. 1

E – электрическое поле
 $E\text{-ind}$ – напряженность сил индукции

Теперь подключим ко вторичной обмотке нагрузку:

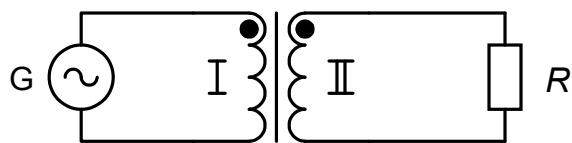


Рис. 2

В нагрузке потечёт ток, равный $I=U/R$ (закон Ома), где U и I – мгновенные значения напряжения и тока в некоторый момент времени. (И считаем пока наш трансформатор идеальным, полагая сопротивление обмоток пренебрежимо малым.) Разумеется, этот ток будет полностью повторять форму напряжения на вторичной обмотке по закону Ома. (Для активной нагрузки.) Откуда же он берётся? Во вторичной обмотке ток течёт по направлению э.д.с. индукции; вторичная обмотка – это источник тока в своей цепи. В первичной же обмотке ток течёт по полю, против э.д.с. индукции; первичная обмотка – это нагрузка в своей цепи.

Направления токов и полярность напряжений в трансформаторе в некоторый момент времени:

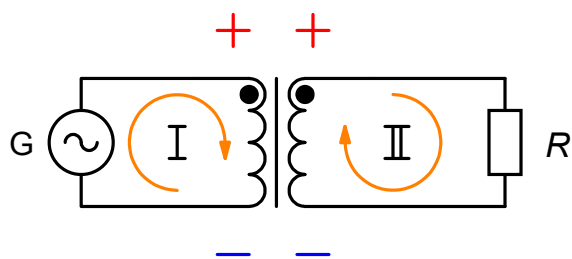


Рис. 3

Появление тока во вторичной цепи провоцирует изменение магнитного потока, но это изменение мгновенно компенсируется возросшим током первичной обмотки, и магнитный поток остаётся таким же, как и в случае холостого хода.

Назовём эти токи токами нагрузки. В отличие от тока холостого хода.

Магнитный поток тока нагрузки для какой-либо обмотки пропорционален току и числу витков: $\Phi \sim I \cdot N$. Следовательно для того, чтобы магнитные потоки от токов нагрузки компенсировали друг друга, необходимо чтобы выполнялось соотношение:

$$I_{\text{по}} \cdot N_{\text{по}} = I_{\text{во}} \cdot N_{\text{во}} \quad (6)$$

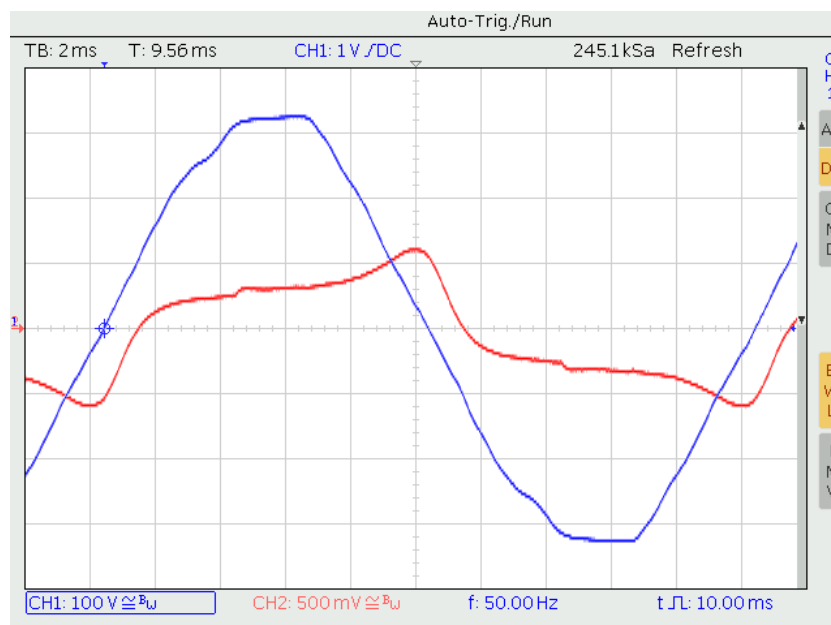
т. е. получили из практики известные формулы 1 и 2.

В случае нескольких вторичных обмоток ток первичной обмотки компенсирует суммарный магнитный поток токов всех вторичных обмоток.

Ток первичной обмотки состоит из тока холостого хода и тока нагрузки. Ток вторичной обмотки – только из тока нагрузки. Обычно индуктивность первичной обмотки выбирается достаточно большой, чтобы уменьшить ток холостого хода. Но

именно благодаря этому маленькому току во вторичных обмотках индуцируется напряжение.

На практике к току холостого хода ещё добавляется ток на перемагничивание сердечника и в результате этот ток может иметь достаточно сложную форму:



Осциллограмма 2. Ток холостого хода в сетевом трансформаторе

синий – напряжение
красный – ток (25 мА на деление)

Не стоит забывать при проектировании трансформатора и про активное сопротивление обмоток.

Андрей Борус, инженер