

Министерство образования и науки РФ

**Государственное образовательное учреждение высшего профес-
сионального образования**

ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА ПЕРЕМЕННОГО
ТОКА**

Методические рекомендации

Иркутск 2003

Печатается по решению научно-методического совета Иркутского государственного университета.

Рассмотрены основные положения теории электромагнитной индукции и принципы действия трансформатора. Предлагается составить схемы и экспериментально измерить основные характеристики трансформатора (коэффициент трансформации, ток холостого хода, индуктивное сопротивление обмоток).

Предназначено для студентов 1 и 2 курсов естественных факультетов.

Составители: к.ф.-м.н. доц. Алексеева Л.И.
к.ф.-м.н. доц. Красов В.И.
(кафедра общей и космической физики)

Цель работы:

1. Познакомиться с устройством и принципом действия трансформатора.
2. Определить коэффициент трансформации k повышающих и понижающих трансформаторов.
3. Изучить зависимость коэффициента трансформации от нагрузки.

Приборы и принадлежности:

1. Трансформатор, состоящий из двух обмоток, разделенных на секции несколькими выводами;
2. вольтметры на 250, 150, и 15 В;
3. амперметр на 10 А;
4. ламповый реостат;
5. набор соединительных проводов.

1. Теоретическое введение.

1.1. Явление электромагнитной индукции.

Согласно фундаментальным законам физики электрическое поле \mathbf{E} порождается либо электрическими зарядами q , либо магнитным полем \mathbf{B} . Последнее имеет место для переменных, т.е. изменяющихся во времени полей. Порождение электрического поля переменным магнитным или наоборот – это *нелокальное* явление, захватывающее определенную область пространства. В этом случае вместо локальных величин \mathbf{B} и \mathbf{E} поля удобно описывать с помощью усредненных по некоторой области пространства параметров – магнитного потока Φ и циркуляции вектора напряженности электрического поля \mathcal{E} (интегральные характеристики поля). Для выяснения их физического смысла предположим, что в некоторой области пространства имеется однородное магнитное поле $\mathbf{B} = \text{const}$. Поместим в это поле площадку величиной S (рис. 1). Нормаль к плоскости этой площадки составляет с направлением вектора магнитной индукции угол α .

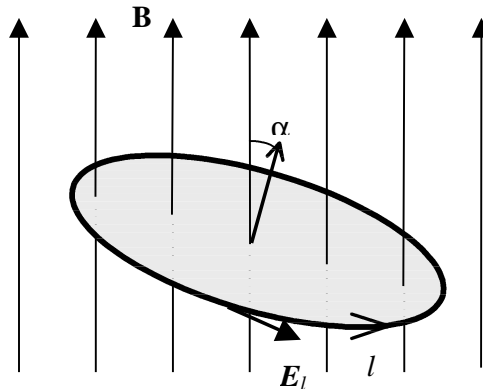


Рис. 1

Потоком вектора магнитной индукции через эту площадку или *магнитным потоком* называется величина:

$$\Phi = BS \cos \alpha = B_n S \quad (1)$$

Здесь B_n - проекция вектора \mathbf{B} на направление нормали к S .

Отметим, что в случае неоднородного магнитного поля вместо (1) необходимо пользоваться интегральным выражением:

$$\Phi = \int_S B_n dS$$

В данном случае B_n - проекция вектора \mathbf{B} на направление нормали к элементарной площадке dS , на которые разбита вся площадка S . Размер элементарной площадки настолько мал, что магнитное поле в пределах этой площадки можно считать однородным. Интеграл берется по всей площадке S .

Границей площадки S является некоторый замкнутый контур l , изображенный на рис. 1 утолщенной линией. Если в данной области пространства присутствует электрическое поле, причем напряженность поля \mathbf{E} имеет проекцию в плоскости площадки S , то *циркуляцией* вектора \mathbf{E} по замкнутому контуру l называют выражение:

$$\mathcal{E} = \oint_l E_t dl \quad (2)$$

Здесь E_t – проекция вектора \mathbf{E} на направление касательной к контуру l в точке, где берется малый участок контура dl . Интеграл берется по всему замкнутому контуру l . Выражение $E_t dl$ представляет собой работу электрического поля по перемещению единичного заряда на расстояние dl .

Тогда циркуляция \mathcal{E} – это работа электрического поля по перемещению единичного заряда по замкнутому контуру l .

Необходимо сделать важное замечание. Величины Φ и \mathcal{E} – скалярные. Они могут быть как положительными, так и отрицательными. Знак Φ зависит от того, куда направлен вектор нормали к площадке S (по полю или в противоположном направлении), а знак \mathcal{E} зависит от направления обхода контура l при интегрировании.

Договоримся считать *положительным* направление обхода, связанное с направлением нормали *правилом правого винта* (на рис 1 показано стрелкой).

После этого знаки интегральных характеристик электрического и магнитного полей полностью определены.

Связь между переменными электрическим и магнитным полями устанавливается фундаментальным *законом электромагнитной индукции*, открытым М.Фарадеем (1831 г.) и обобщенным впоследствии Дж. Максвеллом. Формулировка этого закона в наиболее общей форме дана Максвеллом.

Всякое изменение магнитного поля во времени возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле. Циркуля-

ция вектора напряженности \mathbf{E} этого поля по любому неподвижному замкнутому контуру l определяется выражением:

$$\oint_l \mathbf{E}_i d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

Выражение (3) носит название *закона Фарадея*.

Отметим, что в данном случае возникающее электрическое поле – *вихревое*, и этим оно отличается от *потенциального* поля неподвижных зарядов, циркуляция которого по любому замкнутому контуру равна нулю. Уравнение (3) является интегральной формой одного из четырех уравнений Максвелла, определяющих электромагнитное поле.

Заменим теперь воображаемый контур l реальным кольцом из проводника. Под действием вихревого электрического поля заряды в проводнике придут в движение. Возникнет электрический ток, который называется *током индукции*. Вихревое электрическое поле в данном случае является *сторонней силой*, а циркуляция вектора \mathbf{E} по этому контуру по определению является *электродвижущей силой (ЭДС) индукции* \mathcal{E}_i . Закон Фарадея теперь можно записать в виде:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Найдем направление тока индукции в контуре. Рассмотрим рис. 2. Так

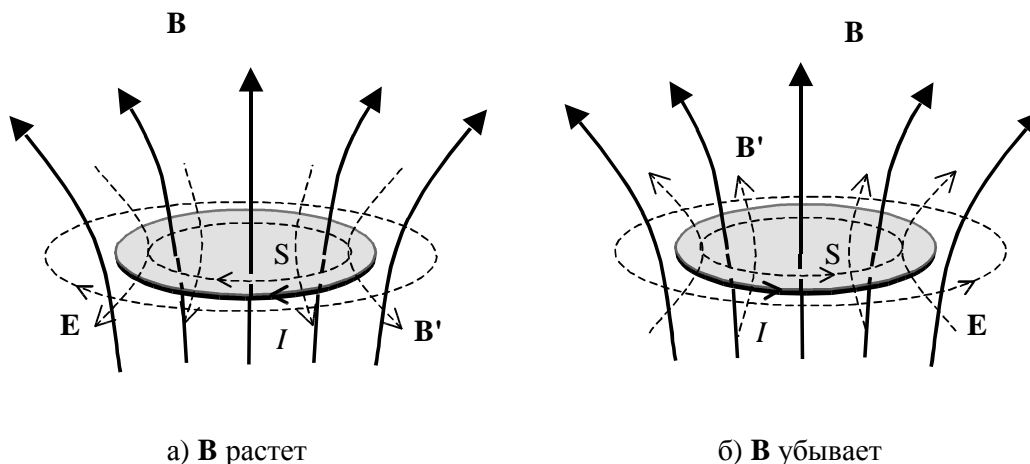


Рис. 2

как ток течет по направлению поля \mathbf{E} , то согласно формуле (2), при увеличении магнитного потока ($d\Phi/dt > 0$), ток будет течь по часовой стрелке, если смотреть с конца вектора \mathbf{B} (рис. 2 а). Но в этом случае магнитное поле, которое порождает сам этот ток \mathbf{B}' , будет направлено в сторону, противоположную внешнему магнитному полю, уменьшает его и компенсирует увеличение магнитного потока. При уменьшении магнитного потока ($d\Phi/dt < 0$) меняется направление электрического поля \mathbf{E} и ток индукции будет течь против часовой стрелки (рис. 2 б). Собственное магнитное поле тока индукции \mathbf{B}' в этом случае будет направлено в сторону внешнего поля, увеличивает его и тем самым компенсирует

уменьшение магнитного потока. Направление тока индукции таким образом подчиняется *правилу Ленца*.

Индукционный ток всегда имеет такое направление, что он ослабляет действие причины, возбуждающей этот ток.

Правило Ленца является частным случаем фундаментального физического закона, который называется *принципом Ле-Шателье*. Смысл этого закона заключается в том, что любая система реагирует на внешнее воздействие таким образом, чтобы уничтожить изменения, порожденные этим воздействием.

1.2. Самоиндукция и взаимная индукция.

Электрический ток I , текущий по замкнутому контуру, создает магнитный поток Φ , пронизывающий этот контур. Величина этого потока, согласно закону *Био-Савара* пропорциональна I :

$$\Phi = L \cdot I, \quad (3)$$

где L - коэффициент *самоиндукции* или *индуктивность* контура. Формула (3), выражающая линейную связь между магнитным потоком и вызывающим его током, справедлива в отсутствие ферромагнетиков и при небольших токах, когда эффект насыщения ферромагнетика слабо выражен.

При изменении тока I в контуре возникает ЭДС индукции, согласно закону Фарадея:

$$\mathcal{E}_s = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt},$$

которую необходимо учитывать при расчете электрических цепей переменного тока. Это явление носит название *самоиндукции*.

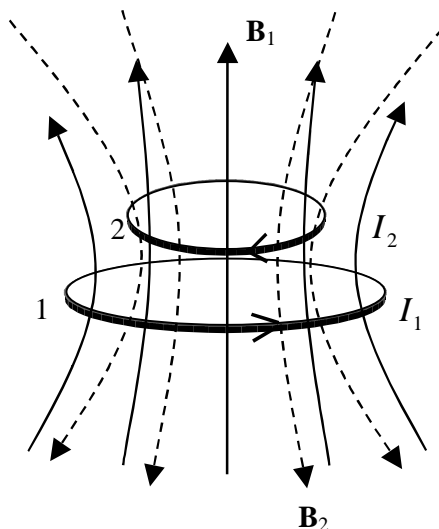


Рис.3

Если магнитный поток Φ в контуре 1 возникает за счет тока I_2 , текущего в контуре 2 (см. рис.3), то:

$$\Phi = L_{12} \cdot I_2,$$

где L_{12} – коэффициент *взаимной индукции*. В общем случае магнитный поток в контуре 1 создается за счет тока I_1 , текущего в этом контуре и тока I_2 , текущего в контуре 2:

$$\Phi_1 = L_1 I_1 + L_{12} I_2 \quad (4)$$

То же самое можно записать и для контура 2:

$$\Phi_2 = L_2 I_2 + L_{21} I_1, \quad (5)$$

где Φ_1 и Φ_2 – магнитные потоки, пронизывающие контуры 1 и 2, L_1 и L_2 – индуктивности этих контуров, L_{12} и L_{21} – коэффициенты взаимной индукции, причем, согласно *теореме взаимности*:

$$L_{12} = L_{21} \quad (6)$$

Используя уравнения (4) и (5), ЭДС индукции в контурах 1 и 2 можно записать в виде:

$$\mathcal{E}_1 = L_1 \frac{dI_1}{dt} + L_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad (7)$$

$$\mathcal{E}_2 = L_2 \frac{dI_2}{dt} + L_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (8)$$

ЭДС в контурах складывается из ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимной индукции.

2. Трансформатор.

2.1. Принцип действия трансформатора.

Электрический трансформатор – прибор, служащий для преобразования переменного тока заданного напряжения в переменный ток другого напряже-

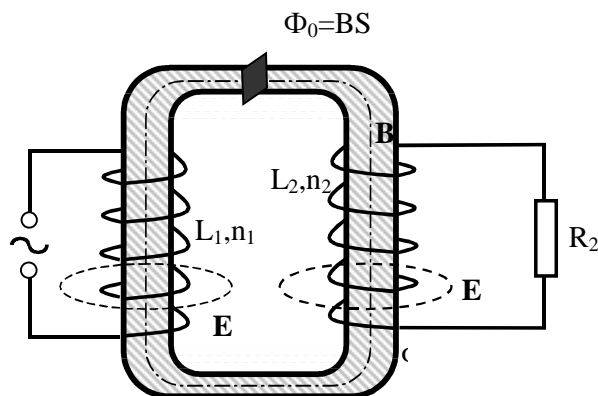


Рис.4

ния, той же частоты. Трансформатор состоит из замкнутого сердечника, на котором располагаются две или больше обмоток провода, электрически не соединенных между собой (см. рис.4). Обмотки представляют собой большое количество витков медного провода, обвитого вокруг сердечника. Одна из этих обмоток является *первичной*, остальные – *вторичные*. Сердечник является магнитопроводом. Его изготавливают из ферромагнитного материала. Роль сердечника заключается в том, чтобы по возможности без потерь пропустить магнитный поток через все обмотки трансформатора. Использование железного сердечника с магнитной проницаемостью $\mu \approx 10^3$ в μ раз увеличивает магнитный поток Φ в сердечнике и уменьшает потери на рассеяние магнитного потока. Магнитное поле концентрируется внутри магнитопровода.

Когда на первичную обмотку подают переменную ЭДС от внешнего источника, по ней течет ток I_1 , который возбуждает в сердечнике переменное магнитное поле. Так как все обмотки расположены на одном магнитопроводе, то и магнитный поток Φ , пронизывающий витки всех обмоток, будет одинаковым. При изменении магнитного потока в магнитопроводе во всех витках будет возбуждаться ЭДС индукции \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , и, если вторичный виток замкнут через сопротивление нагрузки R_2 , то в нем потечет переменный ток I_2 той же частоты, что и в первичной обмотке. Токи I_1 и I_2 связаны друг с другом благодаря взаимной индукции.

Трансформатор, изображенный схематически на рис.4, имеет первичную обмотку с n_1 витками и одну вторичную обмотку с n_2 витками. Электрические схемы обоих контуров приведены на рис.5 (r_1, r_2 – это сопротивление первичной и вторичной обмоток, R_2 – сопротивление нагрузки, L_1 и L_2 – индуктивности обмоток). Уравнения, описывающие электрические токи в обмотках трансформатора, записываются с помощью закона Ома для участка цепи:

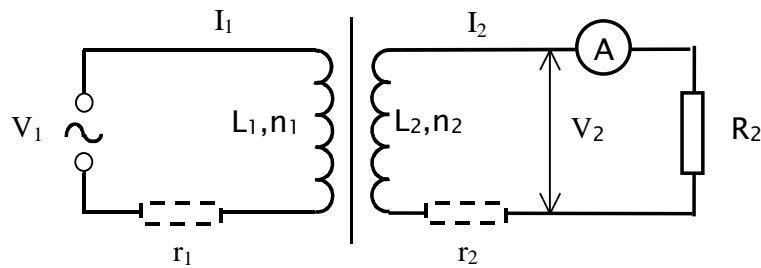


Рис. 5

$$V_1 = I_1 r_1 - \mathcal{E}_1, \quad V_2 = I_2 r_2 - \mathcal{E}_2 \quad (9)$$

Здесь \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 – ЭДС индукции, возникающие в обмотках при изменении магнитного потока Φ . За счет витков магнитный поток Φ пронизывает первичную обмотку n_1 раз, а вторичную – n_2 раз, поэтому при его изменении в обмотках возникает ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad \mathcal{E}_2 = n_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Подставляя эти выражения в (9), получим:

$$V_1 = I_1 r_1 - n_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad V_2 = I_2 r_2 - n_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Исключая $d\Phi/dt$ из этих уравнений, получим:

$$\frac{V_1}{n_1} - \frac{V_2}{n_2} = \frac{I_1 r_1}{n_1} - \frac{I_2 r_2}{n_2} \quad (10)$$

Следует отметить, что падение напряжения на сопротивлениях обмоток ($I_1 r_1$ и $I_2 r_2$) приводит к нагреву обмоток, потере энергии и ухудшению работы трансформатора, поэтому сопротивления обмоток стараются сделать как можно меньше. Пренебрегая сопротивлением обмоток (т.е. приравнивая $r_1 = 0$, $r_2 = 0$), из (10) получим:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (11)$$

Как видно из (11), использование трансформатора позволяет увеличить напряжение на сопротивлении нагрузки в n_2/n_1 раз. Отношение $k = n_2/n_1$ называется *коэффициентом трансформации*. Выражение (11) используется для измерения коэффициента трансформации.

Так как ко вторичной обмотке трансформатора подключено сопротивление нагрузки R_2 , то пренебрегать сопротивлением вторичной обмотки можно, если $R_2 \gg r_2$, в частности, когда цепь вторичной обмотки разомкнута ($R_2 \rightarrow \infty$, $I_2 = 0$). Если это условие не выполнено, формула (11) дает заниженное значение коэффициента трансформации.

Рассмотрим подробнее работу трансформатора в режиме "холостого хода", то есть при разомкнутой вторичной обмотке. В этом случае ток в первичной обмотке называется *током "холостого хода"* трансформатора I_x . Так как при этом $I_2 = 0$, то в уравнении (9) для первичной обмотки величина \mathcal{E}_1 имеет смысл ЭДС самоиндукции:

$$\mathcal{E}_1 = -L_1 \frac{dI_x}{dt}$$

тогда

$$V_1 = I_1 r_1 - L_1 \frac{dI_x}{dt} \quad (12)$$

Когда на первичную обмотку подается переменное напряжение, ток I_x изменяется по синусоидальному закону: $I_x = I_0 \sin(\omega t)$. Подставляя это значение в (12), получим:

$$V_1 = I_0 r_1 \sin(\omega t) - \omega L I_0 \cos(\omega t) = I_0 \sqrt{r_1^2 + (\omega L)^2} \sin(\omega t - \alpha) \quad (13)$$

Напряжение на первичной обмотке отстает по фазе от тока. Из (13) видно, что пренебречь сопротивлением первичной обмотки можно только тогда, когда $r_1 \ll \omega L$. Величина $R_L = \omega L$ называется индуктивным сопротивлением обмотки. Пренебрегая величиной r_1 , из (12) можно получить:

$$V_1 = I_0 \cdot \omega L \sin\left(\omega t - \frac{p}{2}\right)$$

В этом случае напряжение отстает от тока на $p/2$, а амплитуда напряжения связана с амплитудой тока "холостого хода" выражением:

$$V_0 = I_0 R_L$$

Обычно ток холостого хода мал из-за большой величины R_L и его роль заключается в создании магнитного потока Φ в магнитопроводе.

При подключении к вторичной обмотке сопротивления нагрузки R_2 по вторичной обмотке потечет ток I_2 . Согласно правилу Ленца он направлен так, чтобы уменьшить по амплитуде переменный магнитный поток Φ , его вызвавший. В свою очередь, благодаря взаимной индукции, при этом будет увеличиваться ток в первичной обмотке, чтобы компенсировать уменьшение магнитного потока. В результате взаимного влияния друг на друга токов, протекающих в обеих обмотках, амплитуда суммарного магнитного потока в магнитопроводе практически не изменится. Это обстоятельство можно использовать для нахождения связи между токами в обмотках трансформатора. Магнитные потоки, создающиеся в магнитопроводе обмотками трансформатора можно записать следующим образом:

$$\Phi_1 = \frac{L_1 I_1}{n_1}, \quad \Phi_2 = \frac{L_2 I_2}{n_2}.$$

Здесь учтено, что витки обмотки охватывают один и тот же магнитный поток, т.е. рассчитывается поток, приходящийся на один виток. Суммарный магнитный поток получим, складывая эти два выражения:

$$\Phi = \frac{L_1 I_1}{n_1} + \frac{L_2 I_2}{n_2} \approx \frac{L_1 I_x}{n_1} \quad (14)$$

Учитывая, что индуктивность обмотки (которую в данном случае можно рассматривать как соленоид) пропорциональна квадрату числа витков ($L \propto n^2$), из (14) можно получить:

$$n_1 I_x \approx n_1 I_1 + n_2 I_2$$

Произведение тока (в амперах) на число витков называется *ампервитками* и является важной характеристикой обмоток трансформатора. Так как ток холостого хода обычно мал, то, пренебрегая им, получим:

$$\left| \frac{I_2}{I_1} \right| \approx \frac{n_1}{n_2} \quad (14)$$

Из этого соотношения видно, что отношение токов в обмотках обратно пропорционально отношению напряжений в них. Это означает, что идеальный трансформатор передает мощность из первичной обмотки во вторичную без изменения.

В качестве нагрузки R_2 к вторичной обмотке трансформатора подключают устройства, потребляющие электроэнергию. При большой мощности потребителей и, соответственно, малой величине R_2 увеличивается ток во вторичной обмотке. Это приводит к увеличению потерь на нагревание обмотки и *кажущемуся* уменьшению коэффициента трансформации. Поэтому мощные трансфор-

маторы в качестве материала обмоток используют толстый медный провод для уменьшения сопротивления, а иногда применяется принудительное охлаждение обмоток (воздушное или жидкостное).

Вторым источником потерь энергии в трансформаторе являются затраты на перемагничивание материала сердечника и вихревые токи в нем. Поскольку магнитопровод является проводником, в нем самом могут возбуждаться токи за счет электромагнитной индукции. Такие токи называются *вихревыми* или *токами Фуко*. Для того, чтобы избавиться от вихревых токов, сердечник собирают из тонких стальных пластин, электрически изолированных друг от друга с помощью тонкого слоя лака.

В результате этого к.п.д. трансформаторов может достигать 95%.

2.2. Применение трансформаторов.

В зависимости от величины k трансформаторы бывают *повышающие* ($k > 1$) и *понижающие* ($k < 1$). По назначению трансформаторы делятся на несколько видов.

Основной вид трансформаторов – *силовые* трансформаторы. Они применяются для питания приборов и аппаратуры. Такие трансформаторы имеют одну первичную и несколько вторичных обмоток, рассчитанных на разное напряжение. К этому же типу относятся и трансформаторы, устанавливаемые на линиях электропередачи. Для передачи электроэнергии на большие расстояния необходимо повышать напряжение до *сотен тысяч вольт*, а затем понижать до напряжений, на которых работают потребители. Эти трансформаторы, как правило, имеют две обмотки, предназначены для передачи большой электрической мощности и обладают внушительными размерами.

Вторым важным видом трансформаторов являются *разделительные трансформаторы*, предназначенные для электрической изоляции различных электрических схем друг от друга и от источников питания. Это необходимо для защиты работающего персонала от поражения электрическим током и для защиты чувствительных приборов от электрических наводок. Такие трансформаторы часто даже не меняют напряжение источника, напряжения в первичной и вторичной обмотке у них может быть одно и то же.

Широкое применение имеют в технике *высокочастотные трансформаторы*, преобразующие токи высокой частоты. С увеличением частоты переменного тока уменьшаются размеры трансформатора, они становятся миниатюрными и могут быть использованы в портативной радио- и видеоаппаратуре. В качестве сердечника таких трансформаторов используются *ферриты*, специальные композиционные материалы на основе окислов железа и других ферромагнетиков, имеющие огромную магнитную проницаемость ($\mu \approx 10^6$) и способные перемагничиваться с большой частотой.

Трансформаторы, у которых вторичной обмоткой служит часть первичной обмотки, называются *автотрансформаторами* (ЛАТР). У них один из контактов обычно делают подвижным, чтобы плавно менять выходное напряжение.

3. Порядок выполнения работы.

Схема исследуемого трансформатора изображена на рис.6.

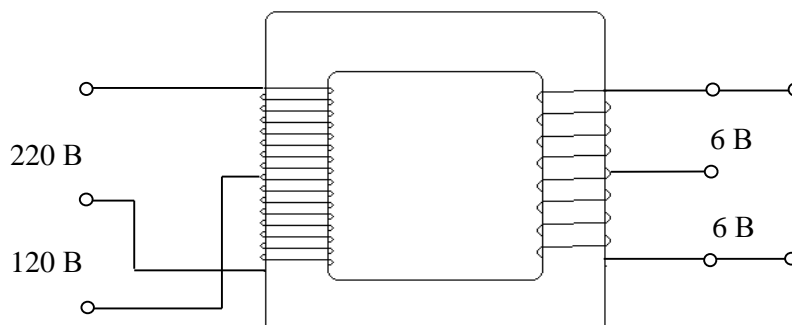


Рис.6

Внимание!

1. Следите за тем, чтобы перед началом каждого опыта регулятор ЛАТРа находился на нуле!
2. После выполнения измерений ЛАТР следует отключить от сети и только после этого можно производить переключения в схемах.

Задание 1.

- 1) Собрать схему 1 без нагрузки, V_1 – вольтметр на 250 В, А – амперметр на 10 А.
- 2) Установить напряжение $V_1 = 220$ В. Измерить ток холостого хода трансформатора.
- 3) Рассчитать индуктивное сопротивление первичной обмотки, ее индуктивность, амплитуду магнитного потока и амплитуду магнитной индукции в сердечнике. Магнитное поле внутри сердечника считать однородным, а для определения площади поперечного сечения магнитопровода измерить его размеры линейкой.

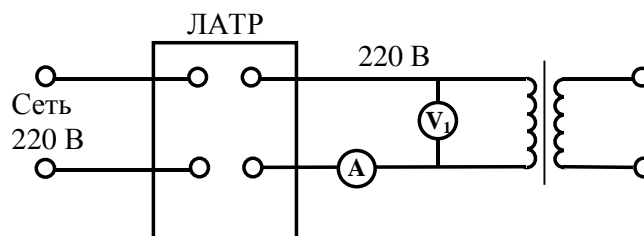


Схема 1

Внимание! Последние измерения проводить при выключенном трансформаторе.

Задание 2.

- 1) Собрать схему 2, V_1 – вольтметр на 150 В, V_2 – вольтметр на 250 В.
- 2) Используя в качестве первичной катушки на 120 В, а вторичной – на 220 В, определить коэффициент трансформации k повышающего трансформатора, изменяя V_1 от 60 В до 120 В через 10 В. Результаты измерений занести в таблицу.
- 3) Определить среднеквадратичную погрешность Δk .

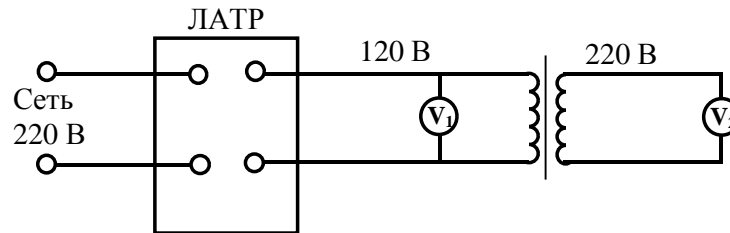


Схема 2

Задание 3.

- 1) Собрать схему 3, V_1 – вольтметр на 250 В, V_2 – вольтметр на 120 В.
- 2) Используя в качестве первичной катушки на 220 В, а вторичной – на 120 В, определить коэффициент трансформации k понижающего трансформатора, изменяя V_1 от 100 В до 220 В через 20 В. Результаты измерений занести в таблицу.
- 3) Определить среднеквадратичную погрешность Δk .

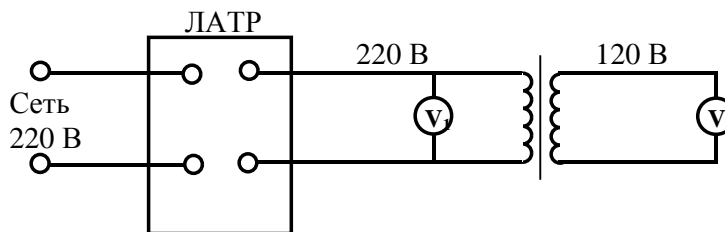


Схема 3

Задание 4.

- 1) Собрать схему 4, заменив катушку на 120 В в схеме 3 на катушку 12 В, V_1 – вольтметр на 250 В, V_2 – вольтметр на 15 В.
- 2) Определить коэффициент трансформации k понижающего трансформатора, задавая $V_1 = 110 В, 180 В, 220 В$.

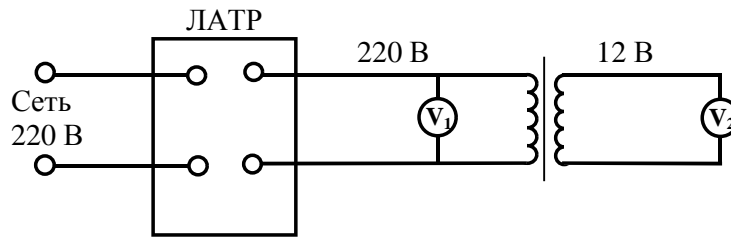


Схема 4

Задание 5.

- 1) Собрать схему 5, заменив катушку на 12 В в схеме 4 на катушку 6 В, V_1 – вольтметр на 250 В, V_2 – вольтметр на 15 В.
- 2) Определить коэффициент трансформации k понижающего трансформатора при тех же значениях V_1 .

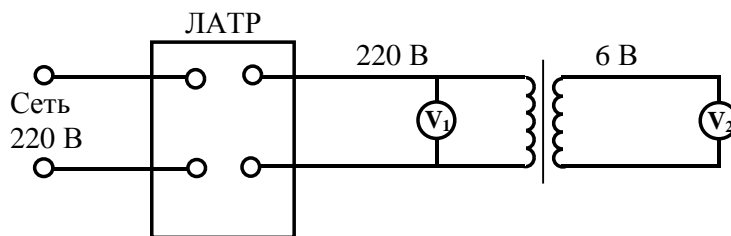


Схема 5

Задание 6.

- 1) Собрать схему 6, включить во вторичную цепь ламповый реостат, V_1 – вольтметр на 250 В, V_2 – вольтметр на 15 В, A – амперметр на 10 А.
- 2) Установить напряжение $V_1 = 150$ В. Определить напряжение V_2 и ток во вторичной цепи, постепенно увеличивая нагрузку. Для увеличения нагрузки необходимо включить одну, потом две, потом три и т.д. до шести лампочек.
- 3) Вычислить коэффициент трансформации k и построить график $k=f(I)$. Объяснить причину уменьшения коэффициента трансформации при увеличении тока.
- 4) Рассчитать величину сопротивления лампового реостат и его погрешность при однократном измерении по формуле:

$$\Delta R = R \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} \right)$$

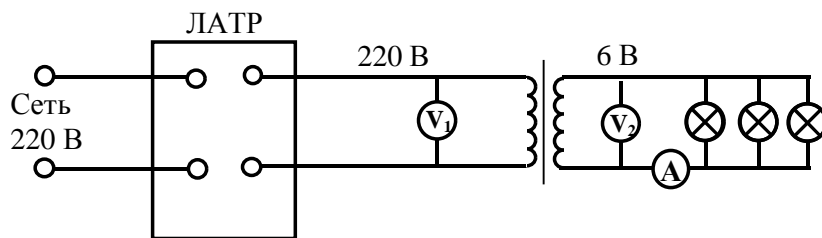


Схема 6

Контрольные вопросы.

1. На каком физическом явлении основан принцип действия трансформатора.
2. Какова причина возникновения движения электронов (тока) во вторичной обмотке и в железном сердечнике.
3. Будет ли трансформатор работать на постоянном токе? Почему? Ответ обоснуйте.
4. Какова роль сердечника в трансформаторе? Может ли трансформатор работать без сердечника? Почему?
5. Почему сердечник трансформатора делается из ферромагнетика? Можно ли применять сердечники из дерева, алюминия, меди? Почему?
6. Полезны или вредны токи Фуко? Можно ли их использовать? Можно ли от них избавиться?
7. Какую обмотку трансформатора называют первичной, какую - вторичной? Что показывает коэффициент трансформации?
8. Что называют холостым ходом трансформатора?
9. Какова роль трансформатора при передаче энергии на расстояние.

Литература

1. Д.В.Сивухин. Общий курс физики, т.3 Электричество. Москва, "Наука", 1983.