

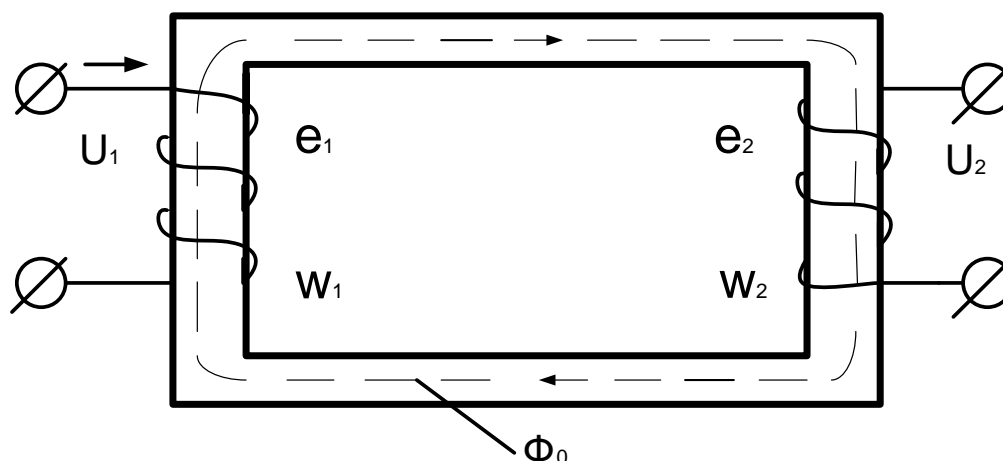
Трансформаторы

Устройство и принцип работы трансформатора

Трансформатор - это статический электромагнитный аппарат, служащий для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока того же или иного напряжения при неизменной частоте.

Трансформатор состоит из двух основных частей: *магнитопровода* (сердечника) и *обмоток*. Для уменьшения потерь от вихревых токов, возникающих при перемагничивании, сердечники собирают из отдельных тонких (0,3-0,5 мм) пластин специальной трансформаторной стали. Эта сталь характеризуется узкой петлей гистерезиса (см. разд. 3.2) и большим электрическим сопротивлением. Для уменьшения потерь от вихревых токов пластины изолируют друг от друга путем покрытия их изолирующими пленками.

Простейший однофазный трансформатор состоит из стального сердечника и двух обмоток - первичной и вторичной. Если к первичной обмотке трансформатора подвести переменное напряжение U_1 , то в ней появится некоторый ток I_m , который создаст в сердечнике переменный магнитный поток Φ_0 .



Этот поток по закону электромагнитной индукции наведет в обеих обмотках ЭДС индукции e_1 и e_2 :

$$\begin{aligned} e_1 &= -w_1 \frac{\Delta \Phi_0}{\Delta t} \\ e_2 &= -w_2 \frac{\Delta \Phi_0}{\Delta t} \end{aligned} \quad (1)$$

где w_1, w_2 - число витков в первичной и вторичной обмотках соответственно.

Если приложенное напряжение

$$U_1 = U_{m1} \sin \omega t,$$

то в идеальном трансформаторе (без потерь) его первичная обмотка будет представлять собой чистую индуктивность и ток будет отставать по фазе от напряжения на $\pi/2$:

$$i_{01} = I_{01m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (2)$$

а магнитный поток будет совпадать по фазе с создающим его током:

$$\Phi_0 = \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = -\Phi_m \cos \omega t. \quad (3)$$

Тогда ЭДС, e_1 и e_2 будут равны:

$$\begin{aligned} e_1 &= -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_1 \omega \Phi_m \sin \omega t = -E_{m1} \sin \omega t; \\ e_2 &= -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_2 \omega \Phi_m \sin \omega t = -E_{m2} \sin \omega t. \end{aligned} \quad (4)$$

Поскольку для идеального трансформатора в соответствии со вторым законом Кирхгофа $u_1 = -e_1$ и $u_2 = e_2$, то

$$\left| \frac{u_2}{u_1} \right| = \left| \frac{e_1}{e_2} \right| \text{ или } \left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{E_{m2}}{E_{m1}} = \frac{w_2}{w_1} = k, \quad (5)$$

где k - коэффициент трансформации.

Мы видим, что отношение напряжений на вторичной и первичной обмотках трансформатора равно отношению чисел витков в этих обмотках. Отметим, что формула (5) выполняется точно только для идеального трансформатора или в режиме холостого хода.

Таким образом, трансформатор преобразует подведенное к нему напряжение в соответствии с отношением числа витков его обмоток. Преобразование электрической энергии в трансформаторе сопровождается потерями. В отличие от электрических машин трансформатор не имеет движущихся частей, поэтому механические потери при работе отсутствуют. Имеющиеся потери обусловлены явлением гистерезиса, вихревыми токами, потоками рассеяния магнитного поля и активным сопротивлением обмоток.

Как известно, ферромагнитные материалы состоят из небольших областей самопроизвольного намагничивания, которые называются доменами.

Магнитные моменты всех доменов по всему объему ферромагнетика ориентированы беспорядочно, поэтому результирующий магнитный момент всего ферромагнетика в отсутствие внешнего магнитного поля равен нулю. Если ферромагнетик поместить в магнитное поле, то магнитные моменты отдельных доменов получают преимущественную ориентацию в направлении поля. Чем больше индукция внешнего поля B , тем сильнее эта

ориентация, тем сильнее намагничивается ферромагнетик. При некоторой достаточной величине внешнего поля все магнитные моменты доменов оказываются ориентированными вдоль поля.

Если ферромагнетик поместить в переменное магнитное поле, создаваемое переменным током, то ферромагнетик будет циклически перемагничиваться с частотой переменного тока. При этом домены будут менять свою ориентацию с такой же частотой. При переориентациях доменов совершается работа из-за внутреннего трения доменов друг о друга.

Как известно, в ферромагнетике, подвергнутом циклическому перемагничиванию, магнитный поток связан с током зависимостью, выражаемой петлей гистерезиса. При этом при каждом перемагничивании сердечника затрачивается работа, пропорциональная площади петли гистерезиса. Эта работа вследствие внутреннего трения идет на нагревание сердечника.

Для уменьшения потерь на гистерезис сердечники трансформаторов изготавливают из специальной трансформаторной стали.

Вихревые токи, или *токи Фуко*, возникающие в проводниках, находящихся в переменных магнитных полях, создаются и в сердечнике трансформатора. Замыкаясь в толще сердечника, эти токи нагревают его и приводят к потерям энергии. Поскольку вихревые токи возникают в плоскостях, перпендикулярных магнитному потоку, то для их уменьшения сердечники трансформаторов набирают из отдельных изолированных друг от друга стальных пластин.

Потоки рассеяния в сердечнике трансформатора создаются той частью магнитного потока, которая замыкается не через магнитопровод, а через воздух в непосредственной близости от витков. Потоки рассеяния составляют около одного процента от основного магнитного потока трансформатора.

Активное сопротивление обмоток создает потери за счет активных токов, нагревающих обмотки. Для их уменьшения обмотки трансформаторов выполняют, как правило, из меди.

Режимы работы трансформатора

Режим работы трансформатора, при котором его вторичная обмотка разомкнута, называют *режимом холостого хода* (трансформатор работает без нагрузки). Режим работы трансформатора, при котором во вторичную обмотку включена нагрузка, называют *рабочим*.

В режиме холостого хода основной магнитный поток в сердечнике Φ_0 создает в первичной обмотке ЭДС самоиндукции, которая уравнивает большую часть приложенного напряжения. Так будет до тех пор, пока вторичная обмотка разомкнута. Если во вторичную обмотку включить нагрузку, то в ней появится ток I_2 , возбуждающий в том же сердечнике свой магнитный поток Φ_2 , знак которого в соответствии с правилом Ленца противоположен знаку магнитного потока Φ_1 , создаваемому первичной обмоткой. В результате суммарный магнитный поток в сердечнике уменьшится, а это приведет к уменьшению ЭДС E_1 в первичной обмотке. Вследствие этого часть приложенного напряжения U_1 окажется неуравновешенной, что приведет к увеличению тока в первичной обмотке. Очевидно, что ток в первичной обмотке будет возрастать до тех пор, пока не прекратится размагничивающее действие тока нагрузки. После этого суммарный магнитный поток восстановится приблизительно до прежнего значения Φ_0 .

При увеличении сопротивления вторичной обмотки уменьшаются ток I_2 и магнитный поток Φ_2 , что приводит к возрастанию суммарного магнитного потока и, следовательно, к возрастанию E_1 . В результате нарушится равновесие между приложенным напряжением U_1 и ЭДС E_1 : их разность уменьшится, а следовательно, уменьшится и ток I_1 до такого значения, при котором суммарный магнитный поток вернется к прежнему значению.

Таким образом, магнитный поток в трансформаторе остается практически постоянным

как в режиме холостого хода, так и режиме переменной нагрузки. Это свойство трансформатора называют *способностью саморегулирования*, т. е. способностью автоматически регулировать значение первичного тока I_1 при изменении тока нагрузки I_2 .

Коэффициент полезного действия трансформатора

Как уже говорилось, преобразование электрической энергии в трансформаторе сопровождается потерями. Коэффициент полезного действия трансформатора (к. п. д.) - это отношение отдаваемой активной мощности к потребляемой:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \quad (6)$$

где P_1 - мощность, потребляемая из сети, P_2 - мощность, отдаваемая нагрузке. Таким образом, для практического определения к.п.д. трансформатора при номинальной нагрузке необходимо измерить мощности в первичной и вторичной обмотках. Это измерение можно значительно упростить, включив во вторичную обмотку активную нагрузку. Тогда $\cos \varphi \approx 1$ (поток рассеяния невелик), и мощность P может быть вычислена по показаниям амперметра и вольтметра, включенных во вторичную цепь. Такой метод определения к.п.д. называется *методом непосредственных измерений*. Он весьма прост, но имеет два существенных недостатка: малую точность и неэкономичность. Первый из них обусловлен тем, что к.п.д. промышленных трансформаторов очень высок (до 99%), поэтому мощности P_2 и P_1 иногда мало отличаются по величине. В этом случае незначительные ошибки в показаниях приборов приведут к большим ошибкам в значении к.п.д. Неэкономичность этого способа связана с большим расходом электроэнергии за время испытания, так как трансформатор приходится нагружать до номинальной мощности. Поэтому метод непосредственных измерений не нашел промышленного применения, но может быть использован для трансформаторов малой мощности с небольшим к.п.д. (например, в учебной практике).

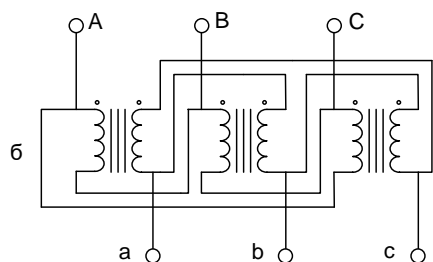
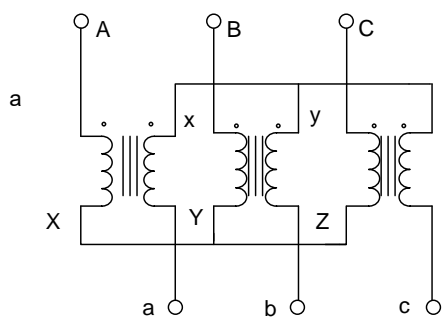
На практике к.п.д. трансформаторов определяют *косвенным методом*, т.е. путем раздельного определения потерь. При этом исходят из того, что к.п.д. трансформатора может быть представлен в следующем виде:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{ст} + P_{м}} \quad (7)$$

где $P_{ст}$ - потери в стали (в сердечнике), а $P_{м}$ - потери в меди (в обмотках). Потери в стали и потери в меди измеряют в опытах холостого хода и короткого замыкания соответственно.

В опыте холостого хода, в котором на первичную обмотку подают номинальное напряжение, а вторичную обмотку оставляют разомкнутой, определяют *потери в стали*, т.е. потери на гистерезис и вихревые токи. Так как при номинальном напряжении на первичной обмотке магнитный поток практически

постоянен, то независимо от того, нагружен трансформатор или нет, потери в стали для него являются постоянной величиной. Таким образом, можно считать, что в режиме холостого хода энергия, потребляемая трансформатором из сети, расходуется только на потери в стали, поэтому мощность этих потерь измеряют ваттметром, включенным в цепь первичной обмотки. При этом, правда, не учитываются потери на нагревание провода первичной обмотки током холостого хода. Но этот ток невелик, и потери от него также



невелики. В этом опыте определяется также коэффициент трансформации k и ток холостого хода I_{01} .

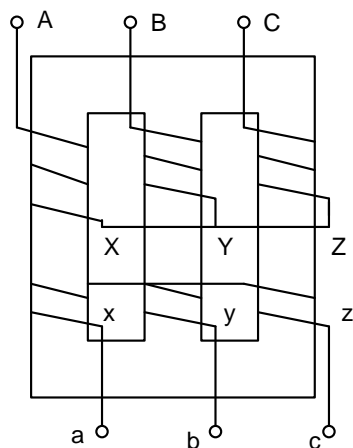
Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть накоротко, а на первичную обмотку подать такое пониженное напряжение, при котором токи в обмотках не превышают номинальных значений, то энергия, потребляемая трансформатором из сети, расходуется в основном на тепловые потери в проводах обмоток трансформатора. В самом деле, при короткозамкнутой вторичной обмотке к первичной подводится пониженное напряжение, поэтому магнитный поток очень мал и потери в стали, зависящие от значения магнитного потока, также малы. Этот опыт называют опытом *короткого замыкания*. Следовательно, ваттметр, включенный в цепь первичной обмотки трансформатора в этом опыте, покажет мощность, соответствующую потерям в меди (P_M).

Трехфазные трансформаторы

Для преобразования тока трехфазной системы можно воспользоваться группой из трех однофазных трансформаторов, обмотки которых могут быть соединены либо звездой, либо треугольником. В этом случае каждый трансформатор работает независимо от остальных как обычный однофазный трансформатор, включенный в одну из фаз трехфазной системы.

На практике значительно чаще применяют трехфазные трансформаторы, выполненные на одном магнитопроводе. При этом три магнитных потока, возбуждаемые токами в первичных обмотках, замыкаются через два других стержня сердечника.

При изготовлении трехфазных трансформаторов на каждый стержень его сердечника навивают по две обмотки: низкого напряжения, а поверх нее - высокого напряжения. Выводы обмоток принято обозначать следующим образом: начала обмоток - заглавными буквами латинского алфавита A, B и C для обмоток высокого напряжения и строчными буквами a, b и c для обмоток низкого напряжения; концы обмоток - буквами X, Y и Z для обмоток высокого напряжения и буквами x, y и z - для обмоток низкого напряжения.



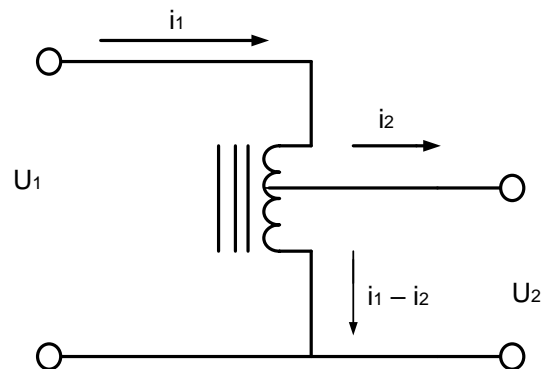
Обмотки трехфазного трансформатора обычно соединяют звездой или треугольником. Наиболее простым и дешевым является первый способ. В этом случае каждая обмотка и ее изоляция при заземлении нулевой точки должны быть рассчитаны только на фазное напряжение и линейный ток. Поскольку число витков обмотки трансформатора прямо пропорционально напряжению, то при соединении звездой каждая обмотка требует меньшего количества витков при большем сечении провода; при этом изоляция проводников должна быть рассчитана лишь на фазное напряжение. Такое соединение

широко применяется для трансформаторов небольшой и средней мощности. Соединение звездой наиболее желательно для высокого напряжения, так как изоляция рассчитывается лишь на фазное напряжение. Соединение треугольником удобнее при больших токах и в тех случаях, когда нагрузки могут быть подключены без нулевого провода. Применяется также комбинированное включение трехфазных трансформаторов (первичные обмотки соединены звездой, а вторичные - треугольником, или наоборот). Соединение звезда/треугольник часто используют для трансформаторов большой мощности в тех случаях, когда на стороне низкого напряжения не требуется нулевой провод.

Из соотношений в трехфазной системе следует, что при трехфазной трансформации только отношение фазных напряжений всегда приблизительно равно отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток. Отношение же линейных напряжений зависит от способа соединения обмоток трансформатора. При одинаковом способе соединения (звезда/ звезда или треугольник/треугольник) отношение линейных напряжений равно фазному коэффициенту трансформации. Но при комбинированных способах соединения (звезда/треугольник или треугольник/звезда) отношение линейных напряжений меньше или больше этого коэффициента в $\sqrt{3}$ раз. Это дает возможность регулировать вторичное линейное напряжение трансформатора соответствующим изменением схемы соединения его обмоток.

Автотрансформатор

Автотрансформатор представляет собой трансформатор, у которого обмотка низкого напряжения является частью обмотки высокого напряжения.

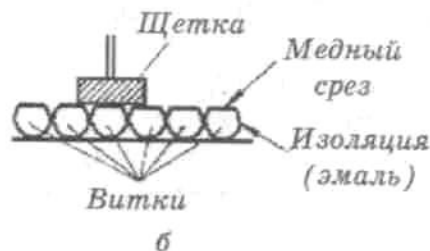


У однофазного автотрансформатора всего одна обмотка. В режиме холостого хода автотрансформатор ничем не отличается от обычного трансформатора. В режиме нагрузки по общей части витков протекает ток, который равен разности токов ($i_1 - i_2$), так как вторичный ток ослабляет магнитный поток в сердечнике (т. е. соответствующий магнитный поток имеет знак, противоположный знаку потока, создаваемого током первичной обмотки).

Чаще всего автотрансформаторы изготавливают со скользящим контактом, что позволяет плавно регулировать выходное напряжение в широких пределах. Примером может служить лабораторный автотрансформатор (ЛАТР).



а



б

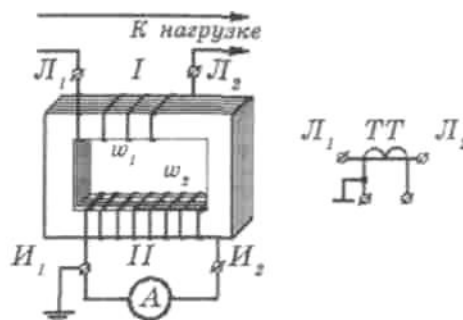
Обмотка этого трансформатора выполнена проводом круглого сечения на тороидальном стальном сердечнике. На одной торцевой стороне изоляцию снимают вместе с частью самого провода, но при этом витки остаются изолированными друг от друга. По оголенной поверхности витков скользит небольшая щетка, подключая нагрузку к различному числу витков и изменяя тем самым выходное напряжение. Так как перемещающаяся щетка замыкает накоротко сразу 1-2 витка, то при хорошем контакте между ними эти витки могут сгореть. Чтобы этого не случилось, щетку делают из графита, сопротивление которого достаточно велико для ослабления токов в короткозамкнутых витках.

Если часть обмотки автотрансформатора сделать первичной, а всю обмотку вторичной, то автотрансформатор будет повышающим.

Измерительные трансформаторы

В технике больших токов и высоких напряжений измерения электрических величин производят только через измерительные трансформаторы - *трансформаторы тока* и *трансформаторы напряжения*, так как непосредственные измерения с помощью шунтов и добавочных резисторов весьма затруднительны. Так, наибольший ток, который еще можно измерить путем непосредственного включения прибора, составляет 600А, а напряжение - 2000 В. К тому же шунты и добавочные сопротивления получаются громоздкими и дорогими, а прикосновение к таким приборам в сетях высокого напряжения опасно для жизни.

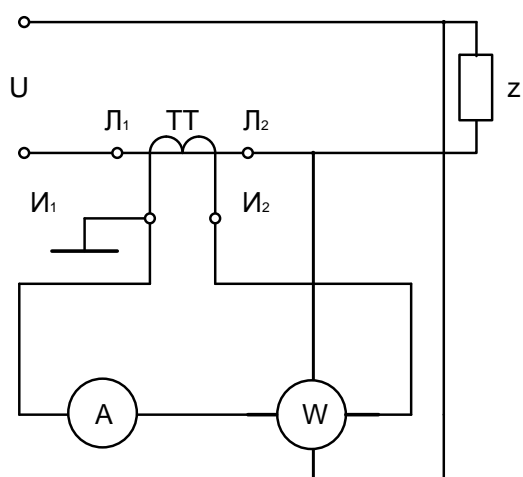
Трансформатор тока состоит из сердечника и двух обмоток - первичной и вторичной.



Первичную обмотку, которая содержит небольшое количество витков, включают последовательно с нагрузкой, в цепи которой необходимо измерить ток, а к вторичной обмотке, с большим числом витков, подключают амперметр. Так как сопротивление амперметра мало, то можно считать, что трансформатор тока работает в режиме короткого замыкания, при котором суммарный магнитный поток равен разности потоков, созданных первичной и вторичной обмотками.

Измеряемый ток, протекая по первичной обмотке с низким сопротивлением, создает на ней весьма небольшое падение напряжения, которое трансформируется во вторичную обмотку. Поскольку число витков вторичной обмотки значительно больше, чем у первичной, то на ней получается значительно большее напряжение при меньшем токе.

Трансформатор тока применяют не только для определения силы тока, но и для включения токовых обмоток ваттметров и некоторых других приборов. Выводы обмоток трансформатора тока маркируют следующим образом: первичная обмотка - L_1 и L_2 (линия), вторичная - I_1 и I_2 (измеритель). На рис также изображено схематическое обозначение трансформатора тока.



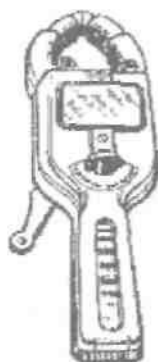
Один и тот же трансформатор тока можно использовать для одновременного включения нескольких измерительных приборов, однако желательно, чтобы их было не больше двух. Это объясняется тем, что по мере увеличения числа приборов их общее сопротивление возрастает, и режим работы трансформатора тока все более отходит от режима короткого замыкания (уменьшается ток вторичной обмотки).

Трансформатор тока не только расширяет пределы измерения приборов, но и гальванически отделяет вторичную цепь от первичной, изолируя тем самым прибор от высоких напряжений сети. Поэтому,

измерительные приборы монтируют обычным способом на распределительных щитах. При этом для безопасности один вывод вторичной обмотки заземляют для того, чтобы при пробое изоляции между обмотками провод с высоким потенциалом оказался замкнутым на землю. Трансформаторы тока изготавливают таким образом, чтобы номинальный ток вторичной обмотки составлял 5 А.

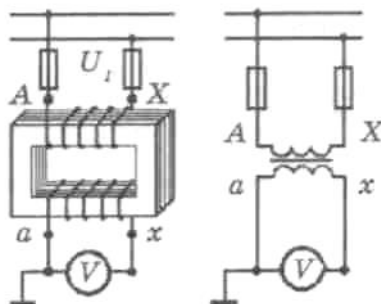
Вторичную обмотку работающего трансформатора тока нельзя размыкать и оставлять разомкнутой. Она всегда должна быть замкнута на прибор или закорочена. Это следует делать потому, что при разомкнутой вторичной обмотке магнитный поток в сердечнике обусловлен лишь большим первичным током, а не разностью потоков первичного и вторичного токов. Этот большой магнитный поток создаст на вторичной обмотке высокое напряжение, опасное для жизни. Кроме того, большой магнитный поток может вызвать перегрев сердечника.

Конструктивно трансформаторы тока выполняют по-разному. Все они, как правило, имеют несколько коэффициентов трансформации. Наиболее удобный переносной трансформатор тока - измерительные клещи.



Это трансформатор с разъемным сердечником, смонтированный в одном корпусе с амперметром. При нажатии на рукоятку сердечник размыкается и им обхватывается провод с измеряемым током. После отпускания рукоятки специальная пружина плотно замыкает сердечник, и амперметр показывает силу тока в проводе. В данном случае провод с измеряемым током выступает в роли первичной обмотки. Измерительные клещи очень удобны, так как позволяют измерять ток в любом месте линии без разрыва провода, хотя точность таких измерений невысока.

Трансформатор напряжения состоит из сердечника и двух обмоток - первичной и вторичной.



Первичная обмотка содержит значительно больше витков, чем вторичная. На первичную обмотку подается измеряемое напряжение U_1 , а к вторичной обмотке подсоединяется вольтметр. Поскольку сопротивление вольтметра велико, то по вторичной обмотке течет небольшой ток, и можно считать, что трансформатор напряжения работает в режиме холостого хода, т. е. изменения вторичного напряжения пропорциональны изменениям первичного при постоянном коэффициенте трансформации. Фаза вторичного напряжения противоположна фазе первичного. Выводы трансформатора напряжения обозначают следующим образом: выводы первичной обмотки - А, Х, выводы вторичной - а,х. Все трансформаторы напряжения изготавливают таким образом, чтобы номинальное напряжение вторичной обмотки было равно 100 В.

В целях безопасности обслуживающего персонала один зажим вторичной обмотки и стальной кожух трансформатора напряжения обязательно заземляют для того, чтобы при пробое изоляции между обмотками провод с высоким потенциалом оказался замкнутым на землю. Конструктивно трансформаторы напряжения очень похожи на маломощные силовые трансформаторы.

