

ГЛАВА 7  
ТРАНСФОРМАТОРЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТИПОВ

§ 25. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Автотрансформатором называется статический электромагнитный аппарат, имеющий одну обмотку, часть которой принадлежит одновременно первичной и вторичной сети. Принципиальная схема понижающего автотрансформатора показана на рис. 33. Первичное напряжение подведено к зажимам  $A-X$  первичной обмотки с числом витков  $w_1$ . Вторичной обмоткой является часть первичной  $a-X$  с числом витков  $w_2$ .

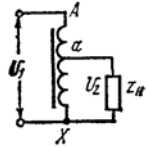


Рис. 33. Принципиальная схема понижающего автотрансформатора

Пренебрегая падением напряжения в сопротивлениях первичной обмотки от тока холостого хода, можно записать уравнения равновесия э. д. с. для первичной и вторичной обмоток:

$$U_1 = E_1 = 4,44w_1f\Phi_m \cdot 10^{-8},$$

$$U_2 = E_2 = 4,44w_2f\Phi_m \cdot 10^{-8}.$$

Отношение напряжений первичной и вторичной обмоток при холостом ходе называется коэффициентом трансформации автотрансформатора, т. е.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k.$$

Если вторичную обмотку автотрансформатора замкнуть на какой-либо приемник энергии, во вторичной цепи будет протекать ток  $I_2$ . Пренебрегая потерями энергии в автотрансформаторе, мощность, потребляемую автотрансформатором из сети, можно принять равной мощности, отдаваемой во вторичную сеть, т. е.

$$P = U_1 I_1 = U_2 I_2, \text{ откуда } \frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}.$$

Таким образом, основные соотношения трансформатора остаются без изменения в автотрансформаторах.

Из условия постоянства магнитного потока при неизменном напряжении сети  $U_1$  можно записать уравнение равновесия намагничивающих сил автотрансформатора:

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1.$$

По части обмотка  $a-X$  с числом витков  $w_2$  протекает ток  $I_{12}$ , равный геометрической сумме токов первичной и вторичной цепи:

$$I_{12} = I_1 + I_2.$$

Если пренебречь током холостого хода за его малостью, можно считать, что токи  $I_1$  и  $I_2$  сдвинуты по фазе на  $180^\circ$  и их геометрическая сумма равна арифметической разности, т. е.

$$I_{12} = I_2 - I_1 = I_2 \left(1 - \frac{1}{k}\right).$$

В понижающем автотрансформаторе ток  $I_{12}$  совпадает по направлению с током  $I_2$ , в повышающем — направлен противоположно току  $I_2$ .

Конструктивно автотрансформатор отличается от обычного трансформатора только электрическим соединением между обмотками. Преимуществом автотрансформатора перед трансформатором той же полезной мощности является меньший расход активных материалов (меди и стали), меньшие потери энергии, более высокий к. п. д., меньшее изменение напряжения при изменениях нагрузки.

Вес меди автотрансформатора примерно в  $\frac{k}{k-1}$  раз меньше веса трансформатора при одинаковых плотностях тока. Это объясняется тем, что у трансформатора на сердечнике имеется две обмотки — первичная с числом витков  $w_1$ , сечение провода которой рассчитано на ток  $I_1$ , и вторичная с числом витков  $w_2$ , сечение провода которой рассчитано на ток  $I_2$ . У автотрансформатора также две обмотки, но одна из них (часть  $A-a$ ) имеет число витков ( $w_1 - w_2$ ) и сечение ее провода рассчитано на ток  $I_1$ , а другая часть (часть  $a-X$ ) имеет число витков  $w_2$  и сечение ее провода рассчитано на разность токов  $I_2 - I_1 = I_{12}$ .

Сечение и вес стали магнитопровода автотрансформатора также меньше сечения и веса стали магнитопровода трансформатора. Это объясняется тем, что в трансформаторе энергия передается из первичной сети во вторичную магнитным путем вследствие электромагнитной связи между обмотками. В автотрансформаторе энергия передается из первичной сети во вторичную частично за счет электрического соединения первичной и вторичной сетей, т. е. электрическим путем. В процессе передачи этой части энергии магнитный поток не участвует, поэтому электромагнитная мощность у автотрансформатора меньше, чем у трансформатора.

Полезная мощность автотрансформатора при активной нагрузке

$$P_2 = U_2 I_2.$$

Имея в виду, что  $I_2 = I_1 + I_{12}$ , получим

$$P_2 = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = P_{2л} + P_m,$$

где  $P_m$  — электромагнитная мощность автотрансформатора, определяющая необходимый магнитный поток, сечение и вес стали магнитопровода. Эта мощность является расчетной или габаритной мощностью автотрансформатора.

Недостатками автотрансформаторов являются: малое сопротивление короткого замыкания, что обуславливает большую крат-

ность тока короткого замыкания; возможность попадания высшего напряжения в сеть низшего напряжения за счет электрической связи между этими сетями. Кроме того, наличие электрической связи между сетью источника и приемника энергии делает невозможным применение автотрансформатора в случае, когда приемник энергии имеет заземленный полюс (в выпрямительных устройствах). Автотрансформаторы применяются при небольших коэффициентах трансформации ( $k=1\div 2$ ).

Очень часто автотрансформаторы применяют в установке высокого и низкого напряжения в случаях, когда необходимо изменить напряжение на каком-либо участке сети в небольших пределах



Рис. 34. Схемы включения двухобмоточного трансформатора по автотрансформаторной схеме:

а и б — для повышения напряжения, в и г — для понижения напряжения

(50÷100%). Применять обычные трансформаторы в этом случае нецелесообразно по экономическим соображениям. Включение двухобмоточного трансформатора по автотрансформаторной схеме (рис. 34) дает возможность повысить или понизить напряжение в сети. Первичная обмотка трансформатора подключена к сети с напряжением  $U_1$ , а вторичная с напряжением  $U_2$  — последовательно в сеть, чтобы напряжение этой обмотки добавлялось к напряжению  $U_1$  и в сумме с ним создавало требуемое напряжение на выходе. При этом изоляция вторичной обмотки должна быть рассчитана на напряжение  $U'$ , а не на напряжение  $U_2$ , как в обычном трансформаторе.

Полезная, или проходная, мощность автотрансформатора  $U'I_2 = (U_1 + U_2)I_2$ , в то время как расчетная, или габаритная, мощность  $U_2I_2$ , т. е. расчетная мощность значительно меньше полезной мощности.

Возможны четыре схемы включения автотрансформатора, из которых две (рис. 34, а и б) применяют для повышения напряжения в сети ( $U' > U$ ) и две (рис. 34, в и г) — для понижения напряжения. В последних двух схемах первичная обмотка имеет противоположное включение по сравнению со схемами, изображенными на рис. 34, а и б. Следовательно, вторичное напряжение  $U_2$  изменяет свою фазу, т. е. окажется направленным встречно приложенному напряжению  $U_1$ , поэтому напряжение на выходе  $U'$  понижается.

Автотрансформаторы используют для связи высоковольтных сетей с близкими по величине напряжениями, например 150 и 220 кВ, 220 и 330 кВ. Широко применяют автотрансформаторы также для пуска синхронных и асинхронных двигателей переменного тока. В трехфазных сетях используют трехфазные автотрансформаторы,

обмотки которых могут быть соединены в звезду или треугольник. Наибольшее распространение имеют трехфазные трансформаторы, обмотки которых соединены в звезду. В этом случае нулевую точку либо заземляют, либо присоединяют к нейтральному проводу.

## § 26. ТРЕХОБОМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Если необходимо получить несколько напряжений, то вместо требующихся для этого нескольких отдельных двухобмоточных трансформаторов с различными коэффициентами трансформации может быть использован один многообмоточный трансформатор. Это позволяет упростить и удешевить трансформаторную подстанцию. Процессы, происходящие в двухобмоточных трансформаторах, можно обобщить и вывести общие уравнения, описывающие процессы, происходящие в многообмоточном трансформаторе.

Пусть трансформатор имеет  $n$  обмоток. Для такого  $n$ -обмоточного трансформатора справедливы уравнения равновесия э. д. с. и намагничивающих сил.

Обозначим через  $I_1, I_2, \dots, I_n$  токи, протекающие в обмотках трансформатора, а через  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$  числа витков соответствующих обмоток. Согласно закону магнитного равновесия получим:

$$I_1\omega_1 + I_2\omega_2 + I_3\omega_3 + \dots + I_n\omega_n = I_0\omega_1,$$

т. е. сумма намагничивающих сил всех обмоток равна намагничивающей силе холостого хода. Намагничивающая сила первичной обмотки создает магнитный поток в магнитопроводе и компенсирует размагничивающее действие токов всех остальных обмоток.

Рассмотрим трехобмоточные трансформаторы, имеющие широкое распространение. Опыт холостого хода трехобмоточного трансформатора, когда обе вторичные обмотки разомкнуты, ничем не отличается от опыта холостого хода обычного двухобмоточного трансформатора и дает возможность определить ток холостого хода  $I_0$ , потери холостого хода  $P_0$  и коэффициенты трансформации.

В данном случае мы получим два коэффициента трансформации:  $k_{12}$  и  $k_{13}$  между первой и второй и между первой и третьей обмотками трансформатора. По общему правилу

$$k_{12} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad k_{13} = \frac{E_1}{E_3} = \frac{\omega_1}{\omega_3}.$$

По известным двум коэффициентам трансформации можно определить третий  $k_{23}$  между второй и третьей обмотками:

$$k_{23} = \frac{E_2}{E_3} = \frac{\omega_2}{\omega_3} = \frac{k_{13}}{k_{12}}.$$

Для определения параметров короткого замыкания производят три опыта короткого замыкания: между обмотками 1 и 2 при разомкнутой обмотке 3; между обмотками 1 и 3 при разомкнутой обмотке 2; между обмотками 2 и 3 при разомкнутой обмотке 1.

Пусть  $r_1, r_2, r_3$  — активные сопротивления и  $x_1, x_2, x_3$  — индуктивные сопротивления соответствующих обмоток. В двухобмоточных трансформаторах индуктивные сопротивления обмоток определяются потоками рассеяния этих же обмоток. В трехобмоточных трансформаторах индуктивные сопротивления обмоток определяются некоторым эквивалентным потоком рассеяния, слагающимся из потока рассеяния данной обмотки и потоков рассеяния двух других обмоток.

Обозначим через  $r_2', r_3', x_2', x_3'$  активные и индуктивные сопротивления обмоток 2 и 3, приведенные к первичной, через  $r_{к12}, r_{к13}, r_{к23}, x_{к12}, x_{к13}, x_{к23}$  — активные и индуктивные сопротивления короткого замыкания, полученные из трех опытов короткого замыкания.

Активные сопротивления короткого замыкания:

$$r_{к12} = r_1 + r_2 k_{12}^2; \quad r_{к13} = r_1 + r_3 k_{13}^2; \quad r_{к23} = r_2 + r_3 k_{23}^2.$$

Последнее равенство можно записать в ином виде, заменив  $k_{23}$  дробью  $\frac{k_{13}}{k_{12}}$ ,

$$r_{к23} k_{12}^2 = r_{к23}' = r_2 k_{12}^2 + r_3 k_{13}^2,$$

где  $r_{к23}'$  — активное сопротивление, полученное из опыта короткого замыкания между обмотками 2 и 3 и приведенное к первичной обмотке.

Из записанных трех уравнений мы определим три неизвестных сопротивления:

$$r_1 = \frac{r_{к12} + r_{к13} - r_{к23}'}{2}; \quad r_2' = \frac{r_{к12} + r_{к23}' - r_{к13}}{2}; \quad r_3' = \frac{r_{к13} + r_{к23}' - r_{к12}}{2}.$$

Совершенно аналогично получим выражения для индуктивных сопротивлений обмоток 1, 2 и 3:

$$x_1 = \frac{x_{к12} + x_{к13} - x_{к23}'}{2}; \quad x_2' = \frac{x_{к12} + x_{к23}' - x_{к13}}{2}; \quad x_3' = \frac{x_{к13} + x_{к23}' - x_{к12}}{2},$$

где  $x_{к23}'$  — индуктивное сопротивление, полученное из опыта короткого замыкания между обмотками 2 и 3 и приведенное к первичной обмотке.

Для трехобмоточного трансформатора, так же как и для двухобмоточного, можно построить эквивалентную схему (рис. 35).

Наиболее широкое распространение имеют трехобмоточные трансформаторы, имеющие одну первичную и две вторичные обмотки. Как видно из векторной диаграммы и эквивалентной схемы такого трансформатора, характерной особенностью его является взаимное влияние вторичных обмоток. Если изменится нагрузка в одной из обмоток (например, второй), то изменится напряжение  $U_2$  не только этой обмотки, но и напряжение  $U_3$  другой вторичной обмотки. Это объясняется тем, что изменение тока в какой-либо одной вторичной обмотке вызывает соответствующее изменение тока в

первичной обмотке. Вследствие изменения падения напряжения в полном сопротивлении первичной обмотки меняются как э. д. с., так и напряжения всех вторичных обмоток.

В конструктивном отношении трехобмоточные трансформаторы подобны двухобмоточным. На магнитопроводе трехобмоточного трансформатора помещаются три обмотки — высшего напряжения, среднего напряжения и низшего напряжения. На стержне магнитопровода обмотки могут располагаться различным образом. Ближе к стержню может быть расположена обмотка НН, СН или ВН (рис. 36, а, б и в). Располагать обмотку ВН около стержня нецелесообразно, так как очень сложно

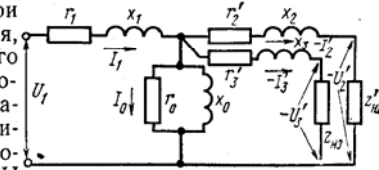


Рис. 35. Эквивалентная схема трехобмоточного трансформатора

осуществить изоляцию ее от магнитопровода. При расположении обмотки ВН на периферии (рис. 36, а и б) индуктивные сопротивления рассеяния и напряжения короткого замыкания между обмотками ВН и какой-либо другой (СН и НН) будут меньше для той обмотки, которая расположена ближе к обмотке ВН.

Номинальной мощностью трехобмоточного трансформатора называется мощность его наиболее мощной обмотки, которой всегда является обмотка ВН. Изготовление трехобмоточного трансформатора в случае, когда мощность одной из его вторичных обмоток невелика, неэкономично. Поэтому мощности обмоток ВН, СН, НН трехобмоточного трансформатора в процентах от его номинальной мощности обычно составляют: 1) 100, 100, 100; 2) 100, 100, 66,7; 3) 100, 66,7, 100; 4) 100, 66,7, 66,7.

Трехфазные трансформаторы также выполняются трехобмоточными либо с соединением обмоток ВН и СН в звезду, а обмотки НН в треугольник, либо с соединением обмотки ВН в звезду, а обмоток СН и НН — в треугольник. Схемы соединения обмоток, диаграммы векторов фазных э. д. с. и условные обозначения трехфазных трехобмоточных трансформаторов приведены на рис. 37.

Трехобмоточные трансформаторы обычно строят на большие мощности: 6300—40 000 ква (трехфазные) и 5000—40 000 ква (од-

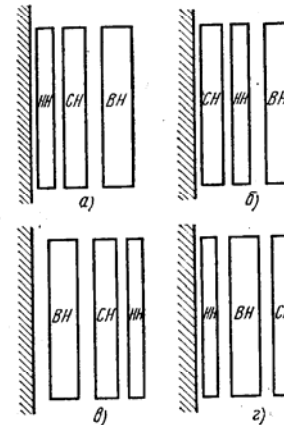


Рис. 36. Размещение обмоток трехобмоточного трансформатора на магнитопроводе:

а и б — применяемое расположение обмоток, в и г — неприменяемое расположение обмоток



нофазные) при напряжении обмоток ВН 110—121 кВ, СН 34,5—38,5 кВ и НН 3,15—15,75 кВ.

В некоторых случаях применяют трехобмоточные трансформаторы с двумя первичными и одной вторичной обмоткой. Такие трансформаторы используют на крупных электрических станциях, когда возникает необходимость в работе двух или трех генераторов

| Схемы соединения обмоток |    |    | Диаграммы векторов |    |    | Условные обозначения |
|--------------------------|----|----|--------------------|----|----|----------------------|
| ВН                       | СН | НН | ВН                 | СН | НН |                      |
|                          |    |    |                    |    |    | $Y/\Delta-0-11$      |
|                          |    |    |                    |    |    | $Y/\Delta-11-11$     |

Рис. 37. Схемы соединения обмоток, диаграммы векторов фазных э. д. с. и условные обозначения трехфазных трехобмоточных трансформаторов

на общую линию электропередачи через один мощный повышающий трансформатор. Иногда трансформаторы имеют две первичные обмотки с различными номинальными напряжениями.

### § 27. СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Сварочные трансформаторы применяют для контактной и дуговой электросварки. Короткое замыкание вторичной обмотки трансформатора является нормальным режимом работы при контактной сварке (при соприкосновении электродов) и часто возникает при дуговой сварке. Для ограничения токов короткого замыкания сварочные трансформаторы строятся с большим индуктивным сопротивлением и имеют сравнительно низкий коэффициент мощности.

Индуктивное сопротивление обмоток сварочного трансформатора может быть увеличено либо применением специальной конструкции обмоток, либо включением дополнительной индуктивности в цепь вторичной или первичной обмоток. Увеличение индуктивных сопротивлений обмоток в самом трансформаторе достигается увеличением потоков рассеяния, для чего обмотки трансформатора размещают на разных стержнях магнитопровода или в различных местах по высоте стержня. Включение магнитных шунтов в магнитопровод (рис. 38, а) также резко увеличивает потоки рассеяния и индуктивное сопротивление обмоток трансформатора.

Трансформаторы для контактной сварки делают со вторичной обмоткой, состоящей из одного витка, напряжение на которой обычно не превышает 14 в. Для регулирования тока, протекающего

через свариваемую деталь, первичная обмотка сварочного трансформатора имеет несколько выводов, переключение которых позволяет изменять число витков обмотки.

В настоящее время наиболее широко распространены сварочные трансформаторы, предназначенные для дуговой электросварки. Такие трансформаторы строят на вторичное напряжение 60—70 в (напряжение зажигания дуги). Особенностью работы этих

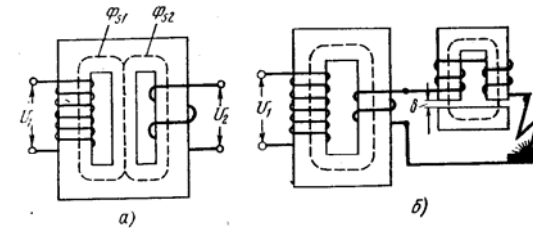


Рис. 38. Схемы устройства сварочных трансформаторов: а — с магнитным шунтом, б — с индуктивной катушкой

трансформаторов является прерывистый режим работы с резкими переходами от холостого хода к короткому замыканию и обратно. Для устойчивого и непрерывного горения дуги необходимы незначительные изменения тока и значительная индуктивность в сварочной цепи.

Для регулирования тока в сварочной цепи последовательно со вторичной обмоткой трансформатора включают индуктивную катушку со стальным магнитопроводом (рис. 38, б). Величина сварочного тока зависит от диаметра электрода и регулируется реактивным сопротивлением индуктивной катушки, которое зависит от величины воздушного зазора  $\delta$ . Увеличение воздушного зазора в магнитопроводе индуктивной катушки вызывает уменьшение ее реактивного сопротивления, вследствие чего ток в сварочной цепи увеличивается. Иногда индуктивные катушки совмещают в одно целое со сварочным трансформатором.

### § 28. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Измерительные трансформаторы применяют в установках переменного тока для изоляции цепей измерительных приборов и реле от сети высокого напряжения, для расширения пределов измерения измерительных приборов. Непосредственное включение измерительных приборов в цепь высокого напряжения сделало бы опасным прикосновение к ним. Конструкция приборов в этом случае была бы сильно усложнена, так как изоляция токоведущих частей должна была бы быть рассчитана на высокое напряжение, а их сечение — на большие токи.

Измерительные трансформаторы делят на трансформаторы тока и трансформаторы напряжения. Их применение дает возможность пользоваться для измерения самых различных напряжений и токов одними и теми же приборами со стандартными пределами измерения. Трансформаторы тока преобразуют измеряемый ток большой силы в ток малой силы, а трансформаторы напряжения — измеряемое высокое напряжение в низкое.

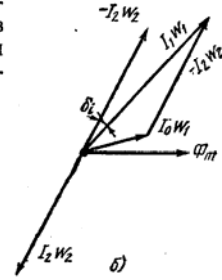
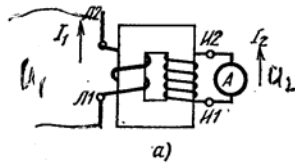


Рис. 39. Схема включения (а) и векторная диаграмма намагничивающих сил (б) трансформатора тока

Первичную обмотку трансформатора тока, имеющую малое число витков, включают последовательно в линию, в которой измеряют или контролируют ток (рис. 39, а). Начало и конец этой обмотки обозначают буквой Л (линия) с цифрами соответственно 1 и 2, начало и конец вторичной обмотки — буквой И (измерение) с цифрами 1 и 2.

В цепь вторичной обмотки трансформатора тока включают прибор с малым сопротивлением. Таким прибором может быть амперметр, токовая катушка ваттметра, счетчика, какого-либо иного измерительного прибора или реле. Приборы во вторичную цепь включают так, чтобы положительное направление тока в приборе совпадало по направлению с положительным направлением тока в контролируемой цепи. Это очень важно для включения ваттметров и счетчиков при измерении мощности и энергии.

Первичные номинальные токи трансформаторов тока стандартизованы в пределах 5—15 000 а. Для вторичных номинальных токов установлены стандартные значения 5 а и в специальных случаях 1 а.

В цепь вторичной обмотки трансформатора тока можно включить несколько приборов, соединив их последовательно, чтобы через них проходил один и тот же ток. Однако включать в цепь вторичной обмотки большое число измерительных приборов нежелательно, так как это увеличивает сопротивление нагрузки трансформаторов и снижает точность измерения. Сопротивление нагрузки, включаемой в цепь вторичной обмотки трансформатора тока при номинальном токе 5 а, должно быть не более 0,2—2 ом.

Условия работы трансформатора тока близки к короткому замыканию вторичной обмотки силового трансформатора. Так как сопротивление нагрузки очень мало, напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора тока также мало. Следовательно, малы э. д. с. вторичной обмотки и магнитный поток в магнитопроводе трансформатора, необходимый для индуктирования этой э. д. с. Поэтому намагничивающий ток относительно мал и намагничивающие силы первичной и вторичной обмоток практически взаимно уравновешены, т. е.  $I_1\omega_1 = I_2\omega_2$ .

Зная коэффициент трансформации трансформатора тока  $k_i$ , т. е. отношение чисел витков вторичной и первичной обмоток, по показанию амперметра во вторичной цепи легко определить ток в первичной контролируемой цепи.

При увеличении сопротивления внешней нагрузки напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора тока также увеличивается. Это увеличивает э. д. с. во вторичной обмотке и магнитный поток в магнитопроводе. Для создания большого магнитного потока требуется больший намагничивающий ток, что приводит к большим погрешностям при измерении, так как нарушается равенство намагничивающих сил первичной и вторичной обмоток ( $I_1\omega_1 \neq I_2\omega_2$ ).

Соответствующая неточность в передаче значения измеряемого тока называется *токовой погрешностью* ( $f_i$ ) и определяется соотношением

$$f_i \% = \frac{I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} - I_1}{I_1} \cdot 100.$$

Допустимое значение токовой погрешности для трансформаторов тока классов точности 0,2; 0,5; 1; 3; 10 составляет соответственно 0,2; 0,5; 1; 3; 10% при номинальном первичном токе.

Кроме того, возникает неточность в показаниях ваттметра и счетчиков из-за *угловой погрешности*  $\delta_i$ , которая определяется углом между векторами намагничивающих сил  $I_1\omega_1$  и  $-I_2\omega_2$  в минутах (рис. 39, б). Если вектор  $-I_2\omega_2$  опережает вектор  $I_1\omega_1$ , угловая погрешность считается положительной. Для трансформаторов тока классов точности 0,2; 0,5 и 1 угловая погрешность при номинальном токе не должна превышать соответственно 10; 40 и 80°. Для трансформаторов тока классов точности 3 и 10 угловая погрешность не нормирована. С увеличением намагничивающего тока увеличиваются как токовая, так и угловая погрешности.

У точных трансформаторов тока намагничивающая сила первичной обмотки при номинальном токе должна быть не менее 500 а. Число витков первичной обмотки выбирают в зависимости от номинального первичного тока и требуемой точности. Трансформаторы тока могут быть одновитковыми (первичная обмотка имеет один виток), шинными (первичной обмоткой служит шина распределительного устройства) и многovitковыми (первичная обмотка имеет два и более витков).

Трансформаторы тока изготовляют сухими с изоляцией из бакелитизированной бумаги, с керамической изоляцией, с эпоксидной изоляцией. При весьма высоких напряжениях применяют масляные трансформаторы тока.

Разновидностью шинных трансформаторов тока являются измерительные клещи, которые служат для ориентировочных измерений токов от 20 до 1000 а при рабочем напряжении до 10 кв. Магнитопровод клещей, изготовленный на листовой электротехнической стали, состоит из двух половин, стягиваемых сильной пружиной. Клещи раскрывают для введения провода, в котором нужно измерить ток. Этот провод является первичной обмоткой трансформатора тока. Вторичная обмотка расположена на магнитопроводе и замкнута на амперметр, установленный на клещах. Рукоятки отделены от высокого напряжения фарфоровыми изоляторами и для безопасности обслуживания заземлены.

В случае пробоя изоляции между обмотками трансформатора тока его вторичная обмотка окажется под высоким напряжением; в случае пробоя обмотки высокого напряжения на корпус магнитопровод окажется под высоким напряжением. Для безопасности обслуживания трансформаторов тока их вторичные обмотки и магнитопроводы заземляют.

Особенностью трансформаторов тока является то, что при их работе нельзя размыкать вторичную цепь. При размыкании цепи вторичной обмотки ток в ней становится равным нулю, тогда как в первичной обмотке ток остается неизменным. Намагничивающая сила первичной обмотки трансформатора тока, не встречая противоположно направленной намагничивающей силы вторичной обмотки, создает в магнитопроводе очень большой магнитный поток, который индуцирует во вторичной обмотке очень большую э. д. с. (до нескольких киловольт). Такая э. д. с. опасна для жизни человека и может вызвать пробой изоляции вторичной обмотки. Кроме того, большой магнитный поток в магнитопроводе значительно увеличивает потери в стали, что вызывает нагрев магнитопровода, опасный для целости изоляции.

Трансформаторы напряжения по устройству подобны силовым трансформаторам небольшой мощности. Первичную обмотку трансформатора напряжения с большим числом витков включают в сеть, напряжение в которой измеряют или контролируют (рис. 40, а).

Начало и конец первичной обмотки обозначают буквами А и Х. Вторичная обмотка с меньшим числом витков замыкается на прибор с большим сопротивлением. Таким прибором может быть вольтметр, параллельная обмотка ваттметра, счетчика или какого-либо иного измерительного прибора или реле. Начало и конец вторичной обмотки обозначают буквами а и х. По отношению к измерительному прибору вторичное напряжение должно совпадать по фазе с первичным, что достигается соответствующим соединением вторичной обмотки с прибором. Это необходимо при измерении мощности и энергии.

Сопротивление вольтметров, параллельных обмоток ваттметров, счетчиков и других измерительных приборов и реле сравнительно велико (тысячи ом). Поэтому ток в цепи вторичной обмотки трансформатора напряжения весьма мал и режим работы его близок к режиму холостого хода силового трансформатора.

Так как при малых токах в обмотках трансформатора падения напряжения в сопротивлениях этих обмоток также малы, напряжения на зажимах первичной и вторичной обмоток практически равны э. д. с., а отношение этих напряжений равно коэффициенту трансформации  $k_u$ , т. е.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44\omega_1 f \Phi_m \cdot 10^{-8}}{4,44\omega_2 f \Phi_m \cdot 10^{-8}} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = k_u.$$

Зная коэффициент трансформации, по показаниям приборов низкого напряжения вторичной цепи легко определить измеряемое высокое напряжение:

$$U_1 = U_2 k_u = U_2 \frac{\omega_1}{\omega_2}.$$

В действительности токи в обмотках трансформатора напряжения не равны нулю. Поэтому за счет падения напряжения в сопротивлениях обмоток напряжение не равно э. д. с. Это является причиной неточности измерения, которая называется *погрешностью напряжения* ( $f_u$ ) и определяется соотношением

$$f_u \% = \frac{U_2 \frac{\omega_1}{\omega_2} - U_1}{U_1} \cdot 100.$$

Для трансформаторов напряжения различных классов точности установлена следующая допустимая погрешность напряжения: класс 0,5 —  $\pm 0,5\%$ ; класс 1 —  $\pm 1\%$ ; класс 3 —  $\pm 3\%$ .

Кроме того, за счет падения напряжения в сопротивлениях обмоток трансформатора возникает неточность в передаче фазы напряжения, называемая *угловой погрешностью* ( $\delta_u$ ). Падение напряжения в сопротивлениях обмоток трансформатора  $\Delta U$  приводит к тому, что векторы напряжений первичной обмотки  $U_1$  и приведенного напряжения вторичной обмотки с обратным знаком не совпадают (рис. 40, б). Угол между этими векторами  $\delta_u$  определяет угловую погрешность, которая измеряется в угловых минутах и влияет на показания ваттметров, счетчиков и фазометров. Угловая

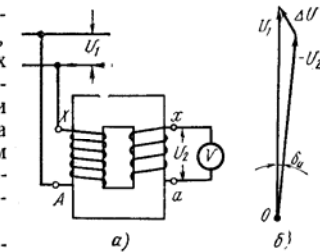


Рис. 40. Схема включения (а) и векторная диаграмма напряжений (б) трансформатора напряжения

погрешность считается положительной, если вектор  $-U_2'$  опережает вектор  $U_1$ .

Для трансформаторов напряжения классов точности 0,5 и 1 допускается угловая погрешность соответственно  $\pm 20'$  и  $\pm 40'$ . Для трансформаторов напряжения класса точности 3 угловая погрешность не нормирована.

В цепи вторичной обмотки трансформатора напряжения могут быть включены помимо вольтметра параллельные обмотки ваттметра, счетчика и т. д. Все эти приборы соединяют параллельно, чтобы на них воздействовало одно и то же напряжение.

Включение большого числа приборов в цепь вторичной обмотки трансформатора напряжения увеличивает токи в обмотках и погрешность при измерении. Поэтому общая полная мощность присоединенных ко вторичной обмотке приборов не должна превышать измерительную мощность трансформатора напряжения, на щитке которого указана наибольшая допустимая мощность нагрузки в вольтамперах.

Для напряжений до 6 кВ трансформаторы напряжения изготовляют сухими, т. е. с естественным воздушным охлаждением. Для напряжений выше 6 кВ применяют масляные трансформаторы напряжения. Трансформаторы напряжения могут быть трехфазными. Зажимы таких трансформаторов обозначают так же, как и зажимы обычных силовых трансформаторов. Для безопасности обслуживания и большей надежности работы аппаратуры магнитопровод трансформатора напряжения и один зажим вторичной обмотки заземляют.

#### *Контрольные вопросы*

1. Какое устройство имеет автотрансформатор?
2. Перечислите достоинства и недостатки автотрансформатора.
3. Изобразите эквивалентную схему трехобмоточного трансформатора.
4. Поясните устройство сварочных трансформаторов.
5. Можно ли разомкнуть вторичную обмотку трансформатора тока, не отключая его первичной обмотки?
6. Какими показателями определяется класс точности измерительных трансформаторов?