

Лекция 12

Измерительные трансформаторы и устройства

1. Трансформаторы напряжения.
2. Трансформаторы тока.
3. Ёмкостные делители напряжения.
4. Сведения о конструкции.
5. Параметры, схемы соединения обмоток, схемы включения.
6. Области применения.

В цепях переменного тока часто применяют измерительные трансформаторы напряжения и тока, с помощью которых измеряют большие напряжения и токи с помощью приборов, рассчитанных на измерение небольших значений этих величин. Кроме того, измерительные трансформаторы позволяют изолировать электроизмерительные приборы цепи от высокого напряжения и тем самым обеспечить безопасность работы обслуживающего персонала.

Трансформаторы напряжения служат для подключения вольтметров, катушек напряжения ваттметров, счетчиков, фазометров и реле, рассчитанных на работу со стандартными приборами напряжением 100 В; их выпускают на различные значения первичного напряжения, достигающего десятков киловольт.

Трансформаторы тока используют для включения амперметров, токовых катушек ваттметров, счетчиков и т. д., рассчитанных на работу со стандартными приборами на ток 1; 2; 3,5; 5 А.

Измерительным трансформатором напряжения называют трансформатор, предназначенный для преобразования напряжения до значения, удобного для измерения, и выполненный так, что вторичное напряжение трансформатора, увеличенное в $k_{\text{НОМ}}$ раз, соответствует с требуемой точностью первичному напряжению (при изменении последнего в определенных пределах) как по модулю, так и по фазе. Множитель $k_{\text{НОМ}}$ представляет собой номинальный коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

Номинальный коэффициент трансформации равен отношению номинальных первичного и вторичного напряжений:

$$k_{\text{НОМ}} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}}$$

В отличие от силовых трансформаторов номинальный коэффициент трансформации трансформатора напряжения несколько отличается от отношения чисел витков $n = \omega_1 / \omega_2$

Номинальные первичные напряжения трансформаторов стандартизированы в соответствии со шкалой номинальных линейных напряжений сетей. Исключения составляют однофазные трансформаторы, для которых в качестве номинальных первичных напряжений приняты фазные напряжения сетей.

Номинальные вторичные напряжения основных вторичных обмоток трансформаторов напряжения установлены равными 100 или $100/\sqrt{3}$.

Напряжение U_1 , измеряемое с помощью трансформатора напряжения, определяют умножением вторичного напряжения U_2 на номинальный коэффициент трансформации.

Вторичное напряжение трансформатора, увеличенное в $k_{\text{НОМ}}$ раз, несколько отличается от первичного напряжения как по модулю, так и по фазе вследствие потерь мощности в трансформаторе. Разность этих напряжений, отнесенная к первичному напряжению, представляет собой погрешность в напряжении:

$$f = \frac{U_2 k_{\text{НОМ}} - U_1}{U_1}$$

Погрешность в напряжении положительна, если $U_2 k_{\text{НОМ}} > U_1$.

Погрешность трансформатора может быть выражена в процентах. Для этого в выражение следует ввести множитель 100.

Вторичная нагрузка трансформатора напряжения – условное понятие, а именно: полная(кажущаяся) мощность внешней вторичной цепи, ВА, найденная в предположении, что напряжение у вторичных зажимов равно номинальному:

$$S_2 = \frac{U_{2\text{НОМ}}^2}{Z}$$

Где $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ - полное(кажущееся) сопротивление внешней цепи, присоединенной к вторичным зажимам. Ом.

Вместе со значением S_2 должен быть указан коэффициент мощности цепи. Эти две величины S_2 и $\cos \varphi_2$ полностью определяют сопротивление внешней цепи и, следовательно, вторичную нагрузку трансформатора.

Под номинальной нагрузкой трансформатора напряжения понимают наибольшую нагрузку, при которой погрешности не выходят за допустимые пределы, установленные для трансформаторов рассматриваемого класса напряжения.

В трехфазной системе измерению подлежат:

- 1) Линейные напряжения;
- 2) Напряжения относительно земли;
- 3) Напряжение нулевой последовательности, появляющееся при замыкании на землю.

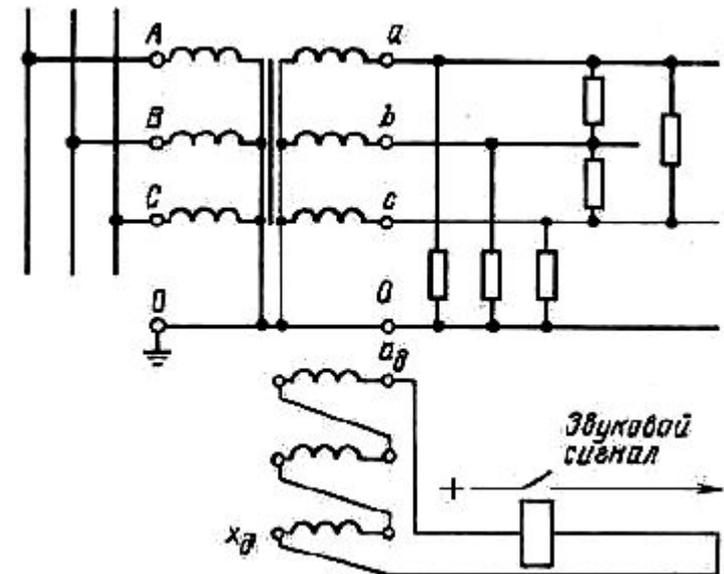
Линейные напряжения подводят к соответствующим обмоткам измерительных приборов и реле.

Напряжения относительно земли и напряжение нулевой последовательности используют для релейной защиты, а также сигнализации однофазных замыканий в сетях, где повреждения этого вида не подлежат автоматическому отключению и могут иметь место длительно (сети незаземленные и компенсированные).

Для измерения перечисленных напряжений применяют однофазные и трехфазные трансформаторы напряжения, включающие соответствующим образом.

Три однофазных трансформатора напряжения, включенные по схеме звезда с заземленной нейтралью высшего напряжения.

Схема для измерения напряжений с помощью трех однофазных трансформаторов, включенных по схеме звезда с заземленной нейтралью



Эта схема получила широкое применение вследствие ее универсальности, в особенности в установках 35 кВ и выше. Обмотки однофазных трансформаторов могут быть изолированы на полное напряжение с одного конца. Второй конец обмоток подлежит заземлению. Это упрощает конструкцию трансформатора и снижает его стоимость. Схема позволяет измерить напряжение трех проводов относительно земли U_{A3} , U_{B3} , U_{C3} , а также три линейных напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} . Последние получаются как разности соответствующих напряжений относительно земли $U_{AB} = U_{A3} - U_{B3}$; $U_{BC} = U_{B3} - U_{C3}$; $U_{CA} = U_{C3} - U_{A3}$;

Напряжение нулевой последовательности может быть измерено с помощью дополнительных вторичных обмоток, подлежащих включению в разомкнутый треугольник. При нормальном состоянии сети напряжение у зажимов $a_x d_d$ разомкнутого треугольника равно нулю, так как сумма трех фазных ЭДС, индуктируемых в дополнительных обмотках, равна нулю.

При однофазном замыкании в сети у зажимов разомкнутого треугольника появляется напряжение, соответствующее тройному напряжению нулевой последовательности, значение которого зависит от системы рабочего заземления сети. Число витков на фазу дополнительной обмотки выбирают с таким расчетом, чтобы при замыкании в сети напряжение у зажимов разомкнутого треугольника составляло около 100 В.

Трансформаторы напряжения, предназначенные для незаземленных или компенсированных сетей, где напряжение нулевой последовательности достигает фазного напряжения сети, имеют дополнительные обмотки с номинальным напряжением 100/3 В(на фазу).

Трансформаторы, предназначенные для эффективно-заземленных сетей, имеют дополнительные обмотки с номинальным напряжением 100 В на фазу, поскольку ожидаемое напряжение нулевой последовательности здесь меньше.

Условия работы однофазных трансформаторов, включенных по схеме звезда с заземленной нейтралью высшего напряжения, неодинаковы в незаземленной или компенсированной сети и сети эффективно-заземленной. В первом случае при однофазном замыкании напряжения неповрежденных проводов относительно земли повышаются в пределе до линейного напряжения, причем такой режим может быть продолжительным. Трансформаторы, включенные между неповрежденными проводами и землей, оказываются под напряжением, превышающим номинальное в $\sqrt{3}$ раз. Соответственно увеличиваются индукция в магнитопроводе, ток намагничивания и выделение тепла. Во избежание нагревания, опасного для изоляции, такие трансформаторы выполняют с индукцией ниже обычной

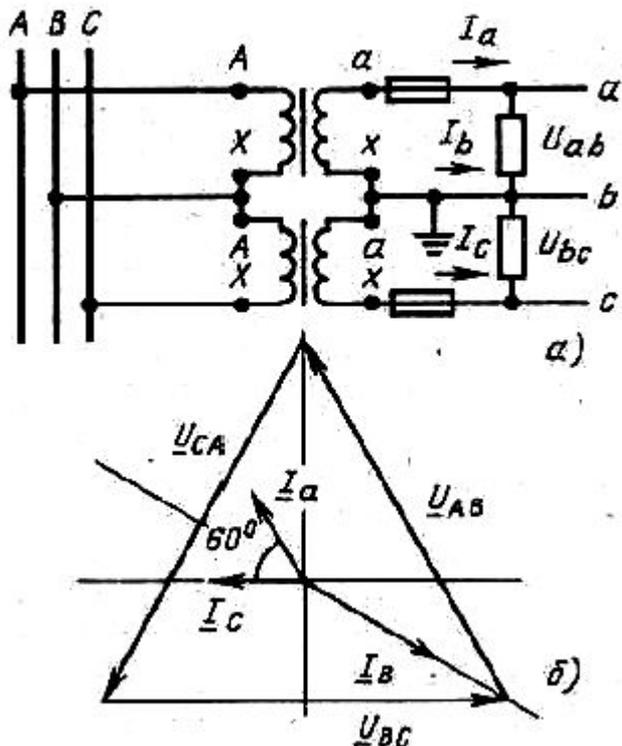
В эффективно-заземленных сетях напряжение неповрежденных проводов относительно земли при однофазном замыкании не выходят за пределы 1,2-1,4 фазного напряжения сети, причем ненормальное состояние сети не может быть продолжительным, поскольку поврежденный участок подлежит автоматическому отключению. Поэтому трансформаторы не могут оказаться в условиях, описанных выше применительно к незаземленным или компенсированным сетям

Трехфазные трансформаторы напряжения

Получили применение в установках с номинальным напряжением до 20 кВ включительно. При этих напряжениях они заменяют описанные выше группы из трех однофазных трансформаторов, соединенных в звезду, при меньшей стоимости.

Трехфазные трансформаторы имеют пятистержневые магнитопроводы броневого типа, обеспечивающие замыкание в них магнитных потоков нулевой последовательности, соответствующих системе напряжений и токов нулевой последовательности, возникающих при замыканиях на землю. С помощью трансформатора этого типа могут быть измерены напряжения проводов относительно земли, линейные напряжения и напряжения нулевой последовательности в незаземленных и компенсированных сетях. Основные обмотки трансформатора имеют группу соединений Y_0-Y_0-12 с заземленными нейтралями. Дополнительные обмотки соединены в разомкнутый треугольник. Схема в предыдущем случае справедлива в рассматриваемом случае.

Два однофазных трансформатора напряжения, включенных в неполный треугольник



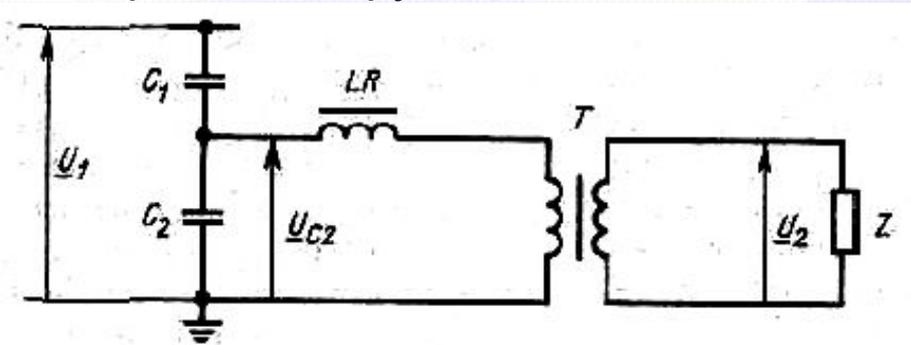
Эта схема позволяет непосредственно измерить два линейных напряжения U_{AB} и U_{BC} . Она целесообразна во всех случаях, когда основную нагрузку трансформаторов составляют счетчики и ваттметры. Как известно, в трехфазной трехпроводной системе применяют счетчики и ваттметры с двумя измерительными системами. Токowe обмотки этих приборов принято присоединять к трансформаторам тока, включенным в фазы А и С. При этом обмотки напряжения должны быть присоединены к зажимам трансформаторов напряжения ab и bc . Такое единообразие в присоединении измерительных приборов облегчает монтаж и проверку вторичных цепей и является общепринятым. Если к трансформаторам напряжения присоединены только счетчики и ваттметры, они нагружены одинаково. Векторы токов I_a и I_c сдвинуты на угол 60 градусов. Нагрузки и соответствующие погрешности могут быть определены. Необходимость в третьем трансформаторе отпадает.

- Схема включения двух однофазных трансформаторов в неполный треугольник.
- А) Схема
Б) Векторная диаграмма

Емкостные трансформаторы напряжения

Емкостные трансформаторы напряжения предназначены для измерения напряжения в установках 110 кВ и выше. При напряжении 500-1150 кВ они по экономическим показателям, надежности превосходят обычные электромагнитные трансформаторы напряжения.

Емкостный трансформатор состоит из емкостного делителя напряжения и присоединенного к нему электромагнитного согласующего устройства. Делитель напряжения состоит из двух конденсаторов, включенных последовательно. Они присоединяются одним концом к проводнику, напряжение которого подлежит измерению, а другим – к земле.



Емкость конденсатора C_2 значительно больше емкости конденсатора C_1 . Поэтому напряжение U_{C2} составляет небольшую часть напряжения U_1 - около 12 кВ.

Электромагнитное согласующее устройство состоит из реактора LR и понижающего трансформатора T специальной конструкции, к вторичным зажимам которого присоединена нагрузка Z- измерительные приборы и устройства релейной защиты. При отключенном согласующем устройстве напряжение U_{C20} на конденсаторе C_2 пропорционально фазному напряжению сети U_1 :

$$U_{C20} = U_1 \frac{\frac{1}{\omega C_2}}{\frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2}} = U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{U_1}{k_d}$$

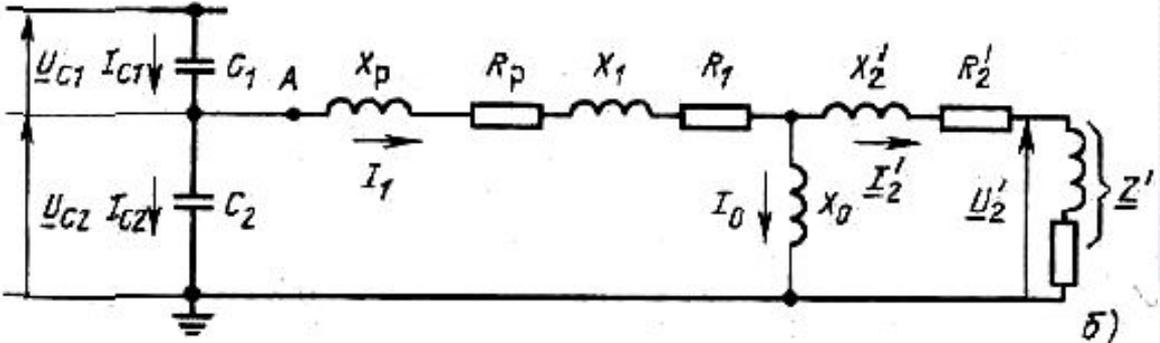
Где $k_d = (C_1 + C_2)/C_1$ – коэффициент деления. индекс C20 указывает, что рассматривается емкостный делитель при холостом ходе.

При включенном согласующем устройстве напряжение U_{C2} не пропорционально напряжению U_1 , однако достаточная точность измерения может быть обеспечена, если сумма индуктивных сопротивлений реактора и обмоток трансформатора пр

$$\omega(L_p + L_1 + L'_2) \approx \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)}$$

Измерительные устройства такого рода получили название настроенных устройств, так как индуктивность $L_\Sigma = L_p + L_1 + L'_2$ настроена в резонанс с емкостями $C_1 + C_2$.

Схема замещения ЕТН приведена внизу. Здесь X_p, R_p – сопротивления реактора; X_1, X'_2, R_1, R'_2 – сопротивления обмоток трансформатора; X_0 – индуктивное сопротивление ветви намагничивания; Z' – сопротивление нагрузки.



Потери мощности в конденсаторах приняты равными нулю.

Измерительные трансформаторы тока

Измерительным трансформатором тока называют трансформатор, предназначенный для преобразования тока до значения, удобного для измерения, и выполненный так, что вторичный ток, увеличенный в $K_{ном}$ представляет собой номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока.

Применение трансформаторов тока обеспечивает безопасность при работе с измерительными приборами и реле, поскольку цепи высшего и низшего напряжений разделены; позволяет унифицировать конструкции измерительных приборов для номинального вторичного тока 5А(реже 1 или 2,5 А), что упрощает их производство и снижает стоимость.

Первичную обмотку трансформатора тока включают последовательно в цепь измеряемого тока. Она имеет небольшое число витков(вплоть до одного витка) и выполняется из проводника относительно большого сечения. Вторичная обмотка рассчитана на значительно меньший ток и соответственно имеет большее число витков. Токовые катушки измерительных приборов или реле подключают ко вторичной обмотке трансформатора тока последовательно. Поскольку сопротивление трансформатора тока вместе с присоединениями к нему приборами ничтожно мало, оно никак не влияет на значение первичного тока. Последний может изменяться в широких пределах: в нормальном режиме – от 0 до 1,2 – 1,3 номинального, а при КЗ может превысить номинальный в десятки раз. Выводы первичной обмотки обозначают буквами Л₁ и Л₂, вторичной – И₁ и И₂.

Под номинальным первичным током понимают ток, для которого предназначен трансформатор. Он принят в качестве базисной величины, к которой отнесены другие характерные параметры.

Стандартная шкала номинальных первичных токов содержит значения токов от 1 до 40000 А.

Под номинальным вторичным током трансформатора понимают ток, для которого предназначены приборы, подлежащие присоединению к его вторичной обмотке.

Номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока равен отношению номинального первичного тока к номинальному вторичному току

$$K_{\text{ном}} = I_{1\text{ном}} / I_{2\text{ном}}$$

Шкалы измерительных приборов, присоединяемых к трансформатору тока, надписывают в значениях первичного тока, т.е. $I_2 K_{\text{ном}}$.

Отношение чисел витков вторичной и первичной обмоток $n = \omega_2 / \omega_1$ выбирают несколько меньше номинального коэффициента трансформации, что позволяет компенсировать ток намагничивания и повысить точность измерения.

Трансформаторы тока по своему назначению делятся на трансформаторы тока для релейной защиты трансформаторы тока для измерений. Мы будем рассматривать трансформаторы тока для измерений.

Вторичный ток трансформатора, увеличенный в $K_{\text{ном}}$ раз, отличается от первичного тока как по модулю, так и по фазе вследствие потерь мощности в трансформаторе. Разность этих значений, отнесенная к первичному току представляет собой токовую погрешность

$$f = \frac{I_2 k_{\text{ном}} - I_1}{I_1}$$

Погрешность может быть выражена в процентах. Ее считают положительной, если $I_2 k_{\text{ном}}$ превышает первичный ток.

Нагрузка трансформатора тока – это полное сопротивление внешней цепи

$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, выраженное в омах. Сопротивления R и X слагаются из сопротивлений приборов. Соединенных проводов и контактов. Вместе с сопротивлением Z должно быть указан коэффициент мощности $\cos \varphi_2$. Нагрузку трансформатора тока можно характеризовать также полной мощностью, ВА, $S_2 = I_{2\text{ном}}^2 Z$ при номинальном вторичном токе и коэффициенте мощности. Эти две величины S_2 и $\cos \varphi_2$ определяют сопротивление вторичной цепи.

Под номинальной вторичной нагрузкой трансформатора понимают нагрузку, при которой погрешности не выходят за пределы, установленные для трансформаторов рассматриваемого класса точности.

Трансформатор тока, как всякий аппарат, включаемый в сеть должен быть электродинамически и термически стойким.

Условие электродинамической стойкости трансформатора тока выражается следующим образом:

$$i_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд}}$$
$$\sqrt{2} I_{1\text{ном}} K_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд}}$$

Условие термической стойкости трансформатора тока имеет вид

$$I_{\text{тер}}^2 t_{\text{тер}} \geq B$$

или

$$(K_{\text{тер}} I_{1\text{ном}})^2 t_{\text{тер}} \geq B$$

Где B – интеграл Джоуля; $K_{\text{тер}} = I_{\text{тер}} / I_{1\text{ном}}$ – кратность тока термической стойкости.

Различают две основные группы измерительных трансформаторов тока – одновитковые и многовитковые.

Одновитковые трансформаторы наиболее просты в изготовлении. Однако при одном витке первичной обмотки и применении стали среднего качества МДС обмотки недостаточна для трансформаторов класса 0,5, если первичный ток менее 400-600 А. Одновитковые трансформаторы с меньшим номинальным током, например встроенного типа, относятся к классам 1 и 3. Применение получили три характерные конструкции одновитковых трансформаторов: стержневые, шинные и встроенные.

Стержневые трансформаторы тока изготавливают для номинальных напряжений до 35 кВ и номинальных первичных токов от 400 до 1500 А.

Шинные трансформаторы тока изготавливают для номинальных напряжений до 20 кВ и номинальных первичных токах до 24000 А.

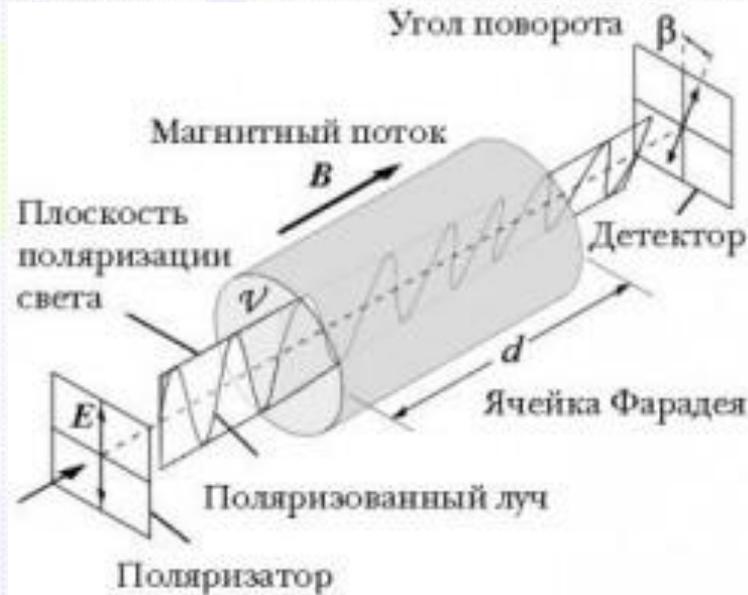
Встроенные трансформаторы тока устанавливают на вводах 35 кВ и выше масляных баковых выключателей и силовых трансформаторов.

Многовитковые трансформаторы тока изготавливают для всей шкалы номинальных напряжений и для токов до 1000 – 1500 А, т.е. применительно к условиям, когда необходимая точность не может быть обеспечена при одном витке.

Для напряжений 6-10 кВ изготавливают катушечные и петлевые трансформаторы тока с эпоксидной изоляцией.

Для напряжений 35-750 кВ изготавливают трансформаторы тока наружной установки с масляным заполнением.

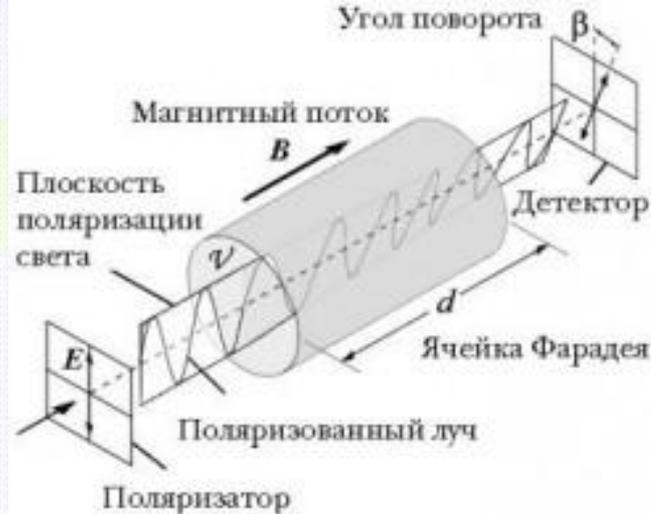
Оптический трансформатор тока



Разбирая принципы действия оптического трансформатора, стоит сначала вспомнить о поляризации света. Стоит сказать, что человека поляризованный свет постоянно окружает, но невооруженным глазом это явление заметить практически невозможно. Глаз человека может фиксировать цвет (длину волны света), а также яркость, однако поляризация остается невидимой.

Под поляризацией света понимают ориентированность в пространстве колебаний световых волн. Колебания данных световых волн имеют поперечный характер, то есть, к движению луча они всегда направлены перпендикулярно.

Для специалистов особый интерес представляет случай поляризации, когда происходит сужение эллипса, который вырождается в отрезок прямой. Если наблюдается такая поляризация, световой квант представляет собой волну, которая может для наглядности быть сравнена с волной, которая бежит по веревке при ее встряхивании.



Поляризацию такого типа используют в оптических трансформаторах. Линейно поляризованный луч, пройдя через магнитное поле от поляризатора до детектора, меняет угол поворота. Чем сильнее будет магнитное поле, тем угол отклонения сильнее.

Взяв во внимание этот факт, а также то, что проводниками, по которым будет проходить переменный ток, создается электромагнитное поле, по изменению угла светового луча можно определить силу тока, а также напряжение.

Если сравнивать с традиционными трансформаторами тока и трансформаторами напряжения, то они не совсем простые. Пока что рано говорить и об их надежности, поскольку пока они недолго используются. Скорее всего они не станут менее толерантными к вибрациям.

Скорее всего, у них будет более высокая точность на сверхвысоковольтном оборудовании, поскольку они не имеют перенасыщаемого сердечника.

Главным минусом минусов трансформаторов является их высокая стоимость. Как все новые товары, оптические измерительные трансформаторы будут иметь более дорогую цену, чем традиционные электромагнитные.