

2.4. Катушки индуктивности, дроссели и трансформаторы в радиосистемах и устройствах.

Основные характеристики индуктивностей

Индуктивностью называется идеализированный элемент электрической цепи, в котором происходит запасание энергии магнитного поля. Это физическое понятие. Реальная катушка индуктивности неидеальна – она и запасает энергию электрического поля, и преобразует ее в другие виды, в том числе в тепловую, то есть имеет потери.

Функционирование катушек индуктивности основано на взаимодействии тока и магнитного потока.

Поток поля вектора магнитной индукции через любую конкретную фиксированную поверхность будет пропорционален току.

$$\Phi = \int_S B \, dS. \quad (2.4.1)$$

Поскольку возникающий поток пропорционален току, то $\Phi \sim I$.

А если ввести коэффициент пропорциональности L , то получим $\Phi \sim L \cdot I$, то есть L – величина индуктивности – это коэффициент пропорциональности между током через провод и создаваемым им магнитным потоком.

Известно, что при изменении магнитного потока Φ в проводнике, находящемся в магнитном поле, возникает ЭДС, определяемая скоростью изменения магнитного потока

$$\varepsilon_L = -d\Phi/dt. \quad (2.4.2)$$

По сути, индуктивность является электрической инерцией, подобной механической инерции тел, мерой ее служит как раз ЭДС.

Индуктивность короткого проводника (мкГн) определяется его размерами:

$$L = 2l(\ln(4l/d) - 1) \cdot 10^{-3}, \quad (2.4.3)$$

где l – длина провода в см, d – диаметр провода в см.

Если провод намотан на каркас, то образуется катушка индуктивности. В этом случае магнитный поток концентрируется, и величина индуктивности возрастает.

Движущиеся заряды (токи) порождают магнитное поле. Магнитное поле имеет направленный характер и характеризуется векторной величиной B , называемой электромагнитной индукцией. Было бы логично присвоить величине B по

аналогии с напряженностью электрического поля E название «напряженность магнитного поля». Однако по историческим причинам это название носит вспомогательная величина H , аналогичная вектору электрического смещения D . Связь между B и H определяется следующей формулой:

$$B = \mu_0 \mu H, \quad (2.4.4)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [Гн/м] – магнитная проницаемость вакуума (воздуха), μ – относительная магнитная проницаемость вещества по отношению к вакууму.

Магнитное поле удается сконцентрировать внутри катушки, образованной множеством близко расположенных витков с током I . Если принять, что все составляющие индукции по сечению катушки S равны некоторому среднему значению B , что справедливо для катушек с сердечником, то отдельные значения B суммируются в полный поток электромагнитной индукции или просто магнитный поток $\Phi = B \cdot S = L \cdot I$. Индуктивность зависит от геометрии катушки, от магнитной проницаемости сердечника и от магнитных свойств окружающей среды.

Как известно, единицей индуктивности является генри [Гн]. Одному генри соответствует индуктивность катушки без сердечника, которая развивает поток электромагнитной индукции в 1 вебер [Вб] в результате протекания в ней тока 1 А.

С учетом вышеприведенных выражений получаем очень важное для практики выражение для ЭДС катушки индуктивности при изменении протекающего через нее тока:

$$\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt}. \quad (2.4.5)$$

Из этого следует, что включение индуктивности последовательно с цепью нагрузки, питаемой от пульсирующего источника тока, снижает пульсации тока за счет возникающей LC самоиндукции. Благодаря этому свойству индуктивности нашли широкое применение в качестве фильтров источников питания. Другим важным выводом, вытекающим из формулы (2.4.5), является то, что резкие перепады тока в цепях, содержащих индуктивности, приводят к появлению больших перенапряжений. В ряде случаев с перенапряжениями приходится бороться, но часто они эффективно используются, например в импульсных источниках питания радиоаппаратуры.

Если предположить, что ток в катушке изменяется от некоторого значения I до нуля, то работа, совершаемая этим током за время dt , равна $dA = E I dt = -L I dI$. Примем, что индуктивность L не зависит от тока, тогда работа, затрачиваемая на исчезновение магнитного потока, равна:

$$A = - \int_I^0 L I dI = LI^2/2. \quad (2.4.6)$$

Поскольку нигде в других элементах цепи никаких изменений не происходит, остается заключить, что магнитное поле является носителем энергии, за счет которой и совершается данная работа. Таким образом, катушка с индуктивностью L , через которую протекает ток I , запасает энергию W_L , равную:

$$W_L = LI^2/2. \quad (2.4.7)$$

Катушка не может запасти энергию мгновенно. Ее нужно зарядить аналогично тому, как заряжают конденсатор. Если индуктивность подключается к источнику постоянного напряжения U , то ее зарядка происходит по экспоненциальному закону:

$$I(t) = \frac{U}{R} e^{-t/\tau}, \quad (2.4.8)$$

где R – полное активное сопротивление, ограничивающее ток индуктивности; $\tau = L/R$ – постоянная времени зарядки индуктивности.

Активное сопротивление катушек индуктивности легко измеряется с помощью омметра. Реактивное сопротивление катушек, обладающих значительной индуктивностью, может быть измерено на промышленной частоте $f = 50$ Гц. Для этого катушку подключают к источнику переменного напряжения и с помощью амперметра переменного тока измеряют эффективное (действующее) значение тока. Полученный ток обусловлен совместным влиянием активного и реактивного сопротивлений цепи:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad (2.4.9)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота. При известных значениях U , I , R и f с помощью формулы несложно вычислить индуктивность катушки L .

Теперь рассмотрим практическую реализацию катушек индуктивности. Катушка индуктивности – это действительно катушка из свёрнутого изолированного проводника, обладающая значительной индуктивностью при относительно малой ёмкости и малом активном сопротивлении.

В отличие от резисторов и конденсаторов катушки индуктивности зачастую не являются стандартизованными изделиями, а изготавливаются для конкретных целей и имеют такие параметры, которые необходимы для осуществления тех или

иных преобразований электрических сигналов, токов и напряжений. То есть, придя в магазин, вы купите конденсатор на 100 мкФ и чаще всего не готовую катушку, а ферритовый сердечник и сами намотаете на него столько витков, сколько потребовалось по расчетам для вашей схемы.

Каковы же основные характеристики катушек индуктивности?

Самое главное, естественно, – **собственно индуктивность**, как раз численно равная отношению создаваемого током потока магнитного поля, пронизывающего катушку, к силе протекающего тока.

Единицей индуктивности является генри [Гн]. Это очень много, поэтому обычно используют величины мГн и мкГн.

При последовательном соединении катушек (рис 3.1) общая индуктивность равна сумме индуктивностей всех соединённых катушек $L = L_1 + L_2 + \dots + L_n$.

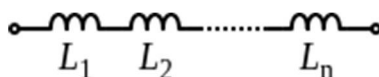


Рисунок 2.4.1 – К индуктивности последовательно соединенных катушек

При параллельном соединении (рис. 3.2) индуктивность можно описать формулой $1/L = 1/L_1 + 1/L_2 + \dots + 1/L_n$.

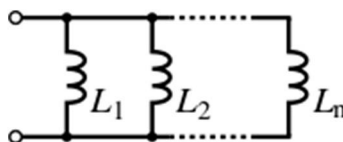


Рисунок 2.4.2 – К индуктивности параллельно соединенных катушек

Далее – **сопротивление потерь**, так как всегда наблюдаются паразитные эффекты, вследствие которых импеданс катушки не является чисто реактивным.

$$R_{\text{пот}} = r_{\omega} + r_d + r_s + r_e, \quad (2.4.10)$$

где r_{ω} – потери на сопротивление, поскольку провода обмотки обладают омическим (активным) сопротивлением, r_d – потери от диэлектрика межвиткового конденсатора (межвитковые утечки и прочие потери, характерные для диэлектриков конденсаторов), r_s – потери в сердечнике, которые складываются из потерь на перемагничивание ферромагнетика, r_e – потери на вихревые токи.

Следующий параметр, который необходимо учитывать в расчетах, – это **добротность контура**. Под добротностью понимается отношение между реактивным и активным сопротивлением катушки индуктивности. Добротность обычно бы-

вайт в пределах 15-350. Повышение добротности достигается оптимальным выбором диаметра провода, увеличением размеров катушки индуктивности и применением сердечников с высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями.

Температурный коэффициент индуктивности (ТКИ) описывает изменение индуктивности с температурой. Температурная нестабильность индуктивности обусловлена целым рядом факторов: при нагреве увеличивается длина и диаметр провода обмотки, увеличивается длина и диаметр каркаса, в результате чего изменяются шаг и диаметр витков; кроме того, при изменении температуры изменяются диэлектрическая проницаемость материала каркаса, что ведёт к изменению собственной ёмкости катушки. Очень существенно влияние температуры на магнитную проницаемость ферромагнетика сердечника:

$$TKL = \frac{\Delta L}{L\Delta T}. \quad (2.4.11)$$

Аналогичным образом вводится температурный коэффициент добротности (ТКД или TKQ), параметр, характеризующий зависимость добротности катушки от температуры. Температурная нестабильность добротности обусловлена тем же рядом факторов, что и индуктивности.

$$TKQ = \frac{\Delta Q}{Q\Delta T}. \quad (2.4.12)$$

Для объяснения некоторых других свойств катушек индуктивности удобно использовать ее эквивалентную схему, представленную на рис. 2.4.3.

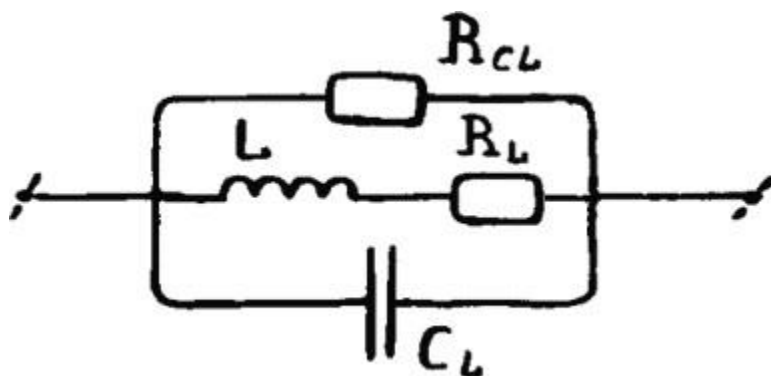


Рисунок 2.4.3 – Эквивалентная схема катушки индуктивности

В первом приближении можно принять, что реальная катушка эквивалентно представляет собой идеальную индуктивность, включенную последовательно с резистором активного сопротивления обмотки с присоединенной параллельно этой цепочке паразитной ёмкостью. Межвитковая паразитная ёмкость проводника в составе катушки индуктивности превращает катушку в распределенную

цепь. В результате этого катушка индуктивности представляет собой колебательный контур с характерной частотой резонанса. Эта резонансная частота может быть измерена и называется собственной частотой резонанса катушки индуктивности.

Перечисленные выше основные свойства индуктивностей позволяют разделить их на несколько основных классов.

Контурные катушки индуктивности. Эти катушки используются совместно с конденсаторами для получения резонансных контуров. Они должны иметь высокую стабильность, точность и добротность.

Катушки связи применяются для обеспечения индуктивной связи между отдельными цепями и каскадами. Такая связь позволяет разделить по постоянному току цепи базы и коллектора и т. д. К таким катушкам не предъявляются жесткие требования на добротность и точность, поэтому они выполняются из тонкого провода в виде двух обмоток небольших габаритов. Основными параметрами этих катушек являются индуктивность и коэффициент связи.

Вариометры – катушки, в которых предусмотрена возможность изменения индуктивности в процессе эксплуатации для перестройки колебательных контуров. Они состоят из двух катушек, соединенных последовательно. Одна из катушек неподвижная (статор), другая располагается внутри первой и вращается (ротор). При изменении положения ротора относительно статора изменяется величина взаимоиндукции, а следовательно, и индуктивность вариометра. Такая система позволяет изменять индуктивность в 4-5 раз.

Дроссели. Это катушки индуктивности, обладающие высоким сопротивлением переменному току и малым сопротивлением постоянному. Обычно включаются в цепях питания усилительных устройств и предназначены для защиты источников питания от попадания в них высокочастотных сигналов. На низких частотах они используются в фильтрах цепей питания и обычно имеют металлические сердечники.

Индуктивность в цепи постоянного и переменного тока

В цепях постоянного тока распределение электрических зарядов на проводниках и токов на участках цепи стационарно, то есть неизменно во времени. Если на каком-то участке цепи происходят изменения силы тока или напряжения, то другие участки цепи могут «почувствовать» эти изменения только через некоторое время, которое по порядку величины равно времени τ распространения элек-

ромагнитного возмущения от одной точки цепи к другой. Так как электромагнитные возмущения распространяются с конечной скоростью, равной скорости света c , то

$$\tau = \frac{l}{c}, \quad (2.4.13)$$

где l – расстояние между наиболее удаленными точками цепи. Если это время τ много меньше длительности процессов, происходящих в цепи, то можно считать, что в каждый момент времени сила тока одинакова во всех последовательно соединенных участках цепи. Процессы такого рода в электрических цепях называются квазистационарными.

Мы рассматривали процессы зарядки и разрядки конденсатора и выводили выражение $U(t) = \varepsilon (1 - \exp(-t/\tau))$, где $\tau = RC$ – так называемая постоянная времени цепи, состоящей из резистора и конденсатора. Величина τ является характеристикой скорости процесса. Аналогично можно описать индуктивность.

В начале зарядки (рис. 3.4) индуктивность, упрощенно говоря, не заполнена током, ток через нее не течет – и напряжение, поданное на нее, максимально.

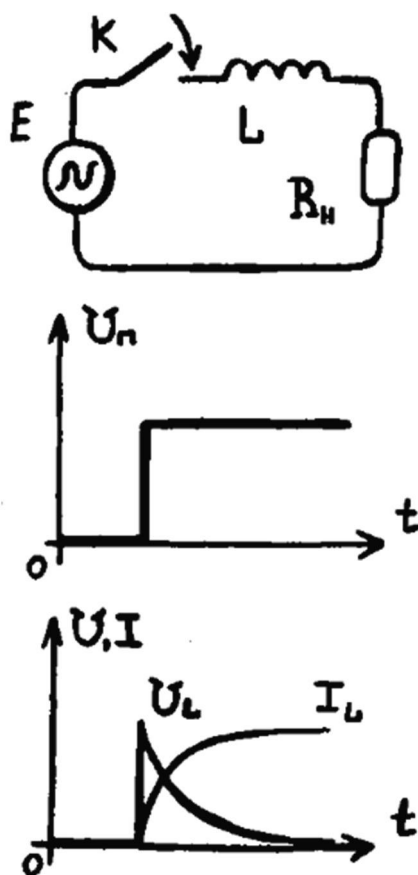


Рисунок 2.4.4 – Зарядка индуктивности в цепи постоянного тока

Непосредственно после замыкания ключа ток отсутствует из-за возникновения ЭДС самоиндукции, а затем начинает плавно возрастать. Напряжение на катушке, наоборот, в начальный момент времени максимально, а затем уменьшается. График напряжения на нагрузке будет по форме (но не по величине) совпадать с графиком тока через катушку (поскольку при последовательном соединении ток, протекающий через разные элементы цепи, одинаковый). Таким образом, если в качестве нагрузки мы будем использовать лампу, то она загорится не сразу после замыкания переключателя, а с небольшой задержкой (в соответствии с графиком тока).

Если в цепи ключ K сначала был замкнут, а затем внезапно разомкнут (рис. 2.4.5), то начнется процесс уменьшения тока.

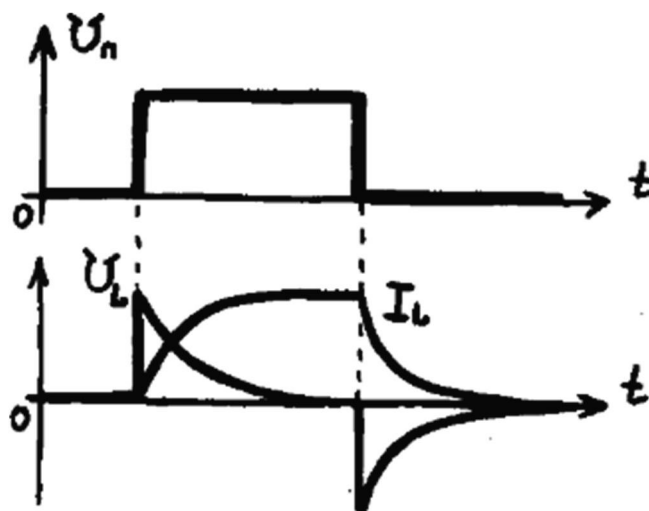


Рисунок 2.4.5 – Разрядка индуктивности

Процесс зарядки описывается уравнением, совпадающим по виду с уравнением разрядки конденсатора, только теперь переменной величиной является сила тока I , имеющая вид

$$I(t) = \frac{\varepsilon}{R} (1 - \exp(-t/r)), \quad (2.4.14)$$

где постоянная времени $r = L/R$.

Аналогичным образом можно получить закон убывания тока в цепи после замыкания ключа K :

$$I(t) = \frac{\varepsilon}{R} \exp(-t/r). \quad (2.4.15)$$

В катушке индуктивности возникнет ЭДС самоиндукции, но индукционный ток в случае размыкания будет направлен в том же самом направлении, что и ток

в цепи, а не в противоположном, поэтому запасенная энергия катушки индуктивности пойдет на поддержание тока в цепи. Таким образом, в начале зарядки катушка представляет собой разрыв, а в конце зарядки – короткое замыкание.

Поэтому в начале напряжение максимально, ток равен нулю, а в конце – напряжение равно нулю, так как сопротивление практически равно нулю, и, следовательно, ток максимален.

Интереснее катушка ведет себя при подаче переменного напряжения.

При подключении к проводнику источника постоянного напряжения ток в нем устанавливается не сразу, так как в момент включения изменяется магнитный поток и в проводе индуцируется ЭДС, препятствующая нарастанию тока, а спустя некоторое время, когда магнитный поток перестает изменяться. Если же к проводнику подключен источник переменного напряжения, то ток и магнитный поток будут изменяться непрерывно, и наводимая в проводнике ЭДС будет препятствовать протеканию переменного тока, что эквивалентно увеличению сопротивления проводника. Чем выше частота изменения напряжения, приложенного к проводнику, тем больше величина ЭДС, наводимая в нем, следовательно, тем больше сопротивление, оказываемое проводником протекающему току. Это сопротивление X_L не связано с потерями энергии, поэтому является реактивным. При изменении тока по синусоидальному закону наводимая ЭДС будет равна

$$\varepsilon_L = -\omega L I_m \cos(\omega t). \quad (2.4.16)$$

Она пропорциональна частоте ω , а коэффициентом пропорциональности является индуктивность L . Следовательно, индуктивность характеризует способность проводника оказывать сопротивление переменному току. Величина этого сопротивления $X_L = \omega L$.

Величина ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна величине индуктивности катушки и скорости изменения тока в ней. Но так как переменный ток непрерывно изменяется, то непрерывно возникающая в катушке ЭДС самоиндукции создает сопротивление переменному току.

Для уяснения процессов, происходящих в цепи переменного тока с катушкой индуктивности, обратимся к графику. На рис. 3.6 построены зависимости тока в цепи, напряжения на катушке и возникающего в ней ЭДС самоиндукции. С начального момента наблюдения за током он начал быстро возрастать, но по мере приближения к своему максимальному значению скорость нарастания тока уменьшалась. В момент, когда ток достиг максимальной величины, скорость его изменения на мгновение стала равной нулю, т. е. прекратилось изменение тока.

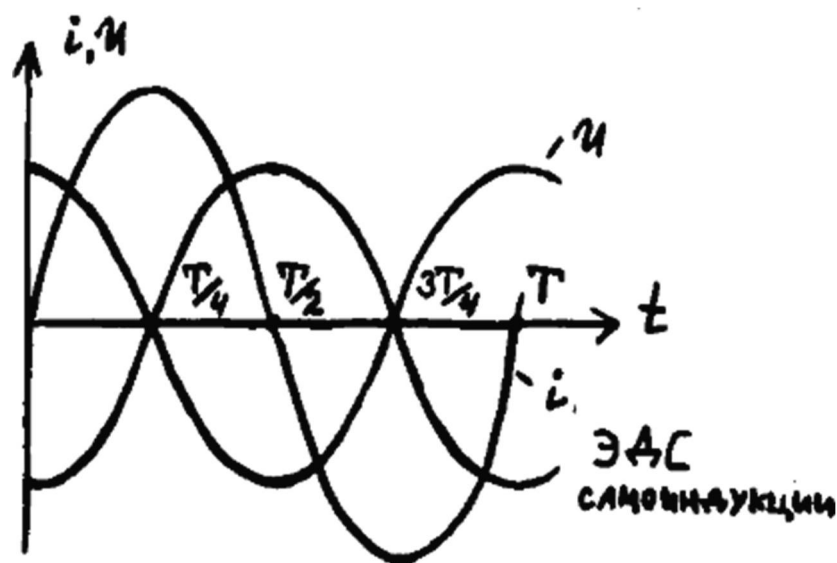


Рисунок 2.4.6 – Индуктивность в цепи переменного тока

Затем ток начал сначала медленно, а потом быстро убывать и по истечении второй четверти периода уменьшился до нуля. Скорость же изменения тока за эту четверть периода, возрастая от нуля, достигла наибольшей величины тогда, когда ток стал равным нулю.

Из построений видно, что при переходе кривой тока через ось времени увеличение тока за небольшой отрезок времени t больше, чем за этот же отрезок времени, когда кривая тока достигает своей вершины.

Следовательно, скорость изменения тока уменьшается по мере увеличения тока и увеличивается по мере его уменьшения независимо от направления тока в цепи.

Очевидно, и ЭДС самоиндукции в катушке должна быть наибольшей тогда, когда скорость изменения тока наибольшая, и уменьшаться до нуля, когда прекращается его изменение. Действительно, на графике кривая ЭДС самоиндукции за первую четверть периода, начиная от максимального значения, упала до нуля.

На протяжении следующей четверти периода ток от максимального значения уменьшался до нуля, однако скорость его изменения постепенно возрастала и была наибольшей в момент, когда ток стал равным нулю. Соответственно, и ЭДС самоиндукции за время этой четверти периода, появившись вновь в катушке, постепенно возрастала и оказалась максимальной к моменту, когда ток стал равным нулю. Однако направление свое ЭДС самоиндукции изменила на обратное, так как возрастание тока в первой четверти периода сменилось во второй четверти его убыванием. Третья и четвертая четверти будут выглядеть аналогично.

Таким образом, ЭДС самоиндукции, вызываемая самим переменным током, препятствует его возрастанию и, наоборот, поддерживает его при убывании. При этом напряжение на зажимах катушки в любой момент времени равно и противоположно ЭДС самоиндукции, возникающей в ней. Напряжение это создается генератором переменного тока и идет на то, чтобы погасить действие в цепи ЭДС самоиндукции. Таким образом, в катушке индуктивности, включенной в цепь переменного тока, создается сопротивление прохождению тока. Но так как такое сопротивление вызывается в конечном счете индуктивностью катушки, то и называется оно индуктивным сопротивлением.

Изменение ЭДС самоиндукции в катушке и напряжения на ее зажимах не совпадает по времени. Иначе говоря, синусоиды тока, напряжения и ЭДС самоиндукции оказались для рассматриваемой нами цепи сдвинутыми по времени одна относительно другой (рис. 2.4.7). В технике переменных токов такое явление принято называть сдвигом фаз.

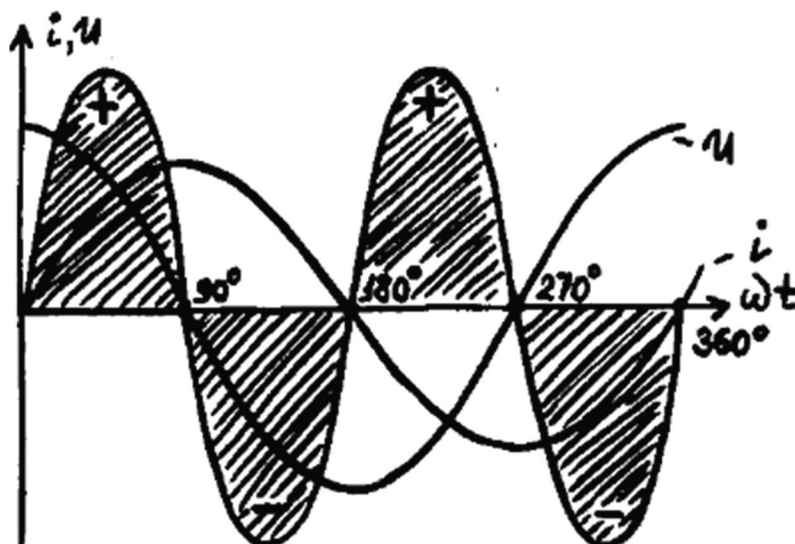


Рисунок 2.4.7 – Мощность в цепи с идеальной индуктивностью

Поэтому, как и в случае с конденсатором, раз цепь не содержит активного сопротивления (мы условно считаем его равным нулю), а состоит лишь из индуктивного сопротивления катушки, энергия источника тока расходуется не на нагрев проводов, а только на создание ЭДС самоиндукции, т. е. она превращается в энергию магнитного поля. Однако переменный ток непрерывно изменяется как по величине, так и по направлению, а следовательно, и магнитное поле катушки непрерывно изменяется в такт с изменением тока. В первую четверть периода, когда ток возрастает, цепь получает энергию от источника тока и запасает ее в

магнитном поле катушки. Но как только ток, достигнув своего максимума, начинает убывать, он поддерживается за счет энергии, запасенной в магнитном поле катушки посредством ЭДС самоиндукции.

Таким образом, источник тока, отдав в течение первой четверти периода часть своей энергии в цепь, в течение второй четверти получает ее обратно от катушки, выполняющей при этом роль своеобразного источника тока. Иначе говоря, цепь переменного тока, содержащая только индуктивное сопротивление, не потребляет энергии: в данном случае происходит колебание энергии между источником и цепью.

Индуктивность витка и тороидальной катушки, сердечники

Конструкционной основой катушки индуктивности является диэлектрический каркас, на который наматывается провод в виде спирали.

Часто для увеличения индуктивности внутрь каркаса вводят сердечник из ферромагнетика, а для уменьшения индуктивности сердечник должен быть латунным. То есть можно получить нужную индуктивность не увеличением числа витков, что ведёт к увеличению сопротивления, а использовать катушку с меньшим числом витков, но использовать ферритовый сердечник.

На рис. 2.4.8 изображен график $\Phi(i)$ зависимости магнитного потока от намагничивающего тока катушки с ферромагнитным сердечником (петля магнитного гистерезиса). Петля гистерезиса, полученная при медленном циклическом изменении намагничивающего тока, называется статической.

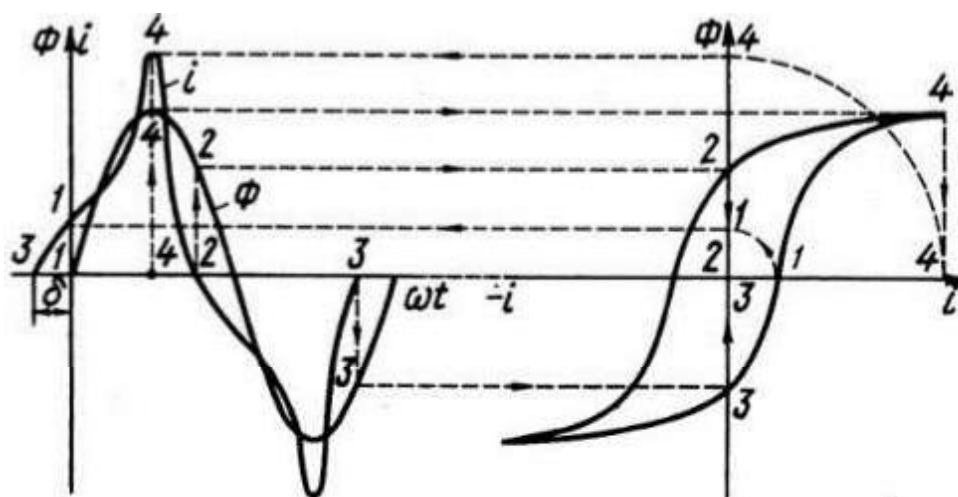


Рисунок 2.4.8 – Зависимость магнитного потока от тока в катушке с сердечником

На этом же рисунке дана кривая тока $I(\omega t)$, показывающая, что при увеличении магнитного потока кривая тока идет выше, а при уменьшении потока –

ниже кривой, построенной при тех же условиях по основной кривой намагничивания. Кроме того, начальные фазы потока и тока не совпадают (угол сдвига), в связи с чем первая гармоника тока (или эквивалентный ток) отстает от приложенного напряжения на угол $j < 90^\circ$.

Наличие сдвига по фазе между током и напряжением, меньшего 90° , указывает на то, что активная мощность в цепи не равна нулю даже в том случае, если активное сопротивление обмотки катушки $R = 0$.

Следовательно, ток катушки из-за потерь на гистерезис имеет активную составляющую, а средняя мощность за период не равна нулю.

В данном случае активная мощность характеризует расход энергии на перемагничивание ферромагнитного сердечника.

Рассмотрим цикл перемагничивания сердечника, начиная с точки 1, когда $i = 0$ и $B = -B$ (рис. 2.4.9). Для размагничивания сердечника от $-B$ до 0 и последующего намагничивания до B_{max} затрачивается энергия, которая определяется площадью, ограниченной контуром 1 – 2 – 3 – 4 – 0 – 1. На всем протяжении рассматриваемой части петли магнитного гистерезиса (1 – 2 – 3) напряженность поля H положительна.

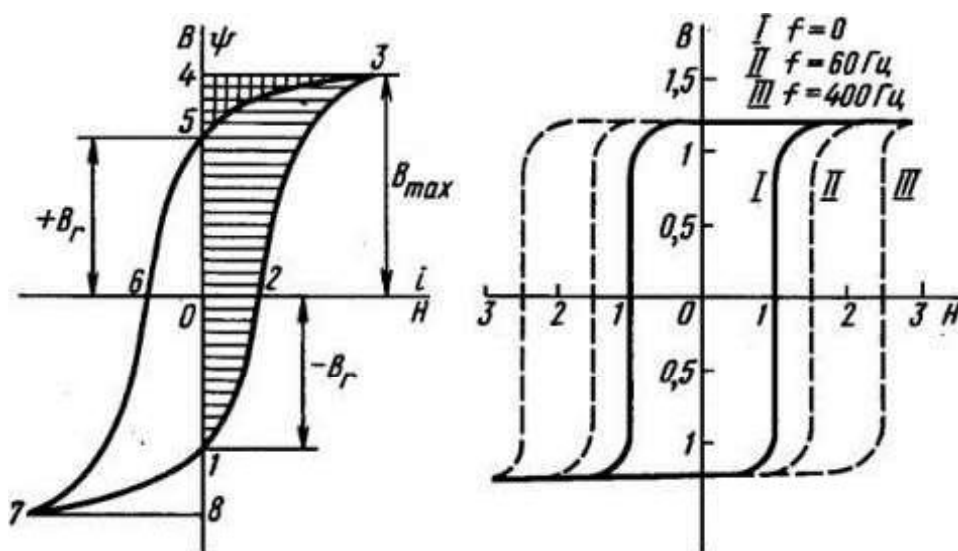


Рисунок 2.4.9 – Зависимость магнитного потока от тока в катушке с сердечником

При размагничивании от B_{max} до $+B$ (участок 3 – 5) напряженность поля по-прежнему положительна, а приращения потокосцепления отрицательны. Площадь, ограниченную контуром 3 – 4 – 5 – 3, нужно считать отрицательной. Энергия, пропорциональная этой площади, возвращается источнику. На участке 5 – 6 – 7 петли гистерезиса напряженность поля и приращения потокосцепления

отрицательны. Площадь, ограниченная контуром 5 – 6 – 7 – 2.4 – 1 – 0 – 5, положительна. Это означает, что энергия опять потребляется от источника. Размагничивание на участке 7 – 1 сопровождается возвращением энергии источнику в количестве, пропорциональном площади 7 – 2.4 – 1 – 7. Таким образом, энергия, израсходованная в единице объема ферромагнитного сердечника за один цикл перемагничивания, определяется площадью, ограниченной петлей магнитного гистерезиса.

При достаточно быстром изменении намагничивающего тока в ферромагнитном сердечнике возникают вихревые токи.

Вихревые токи создают намагничивающую силу, направленную навстречу намагничивающей силе обмотки с током, поэтому изменения магнитной индукции и магнитного потока в сердечнике как бы задерживаются: те же величины магнитной индукции и потока получатся при большем намагничивающем токе в обмотке. Это значит, что при переменном токе в обмотке петля магнитного гистерезиса шире статической петли в связи с действием вихревых токов. Возникновение вихревых токов вызывает дополнительный расход энергии в сердечнике. Энергия, израсходованная на перемагничивание сердечника и поддержание в нем вихревых токов, преобразуется в теплоту.

Помещенный внутрь катушки сердечник концентрирует магнитное поле и тем самым увеличивает ее индуктивность. Катушка индуктивности с сердечником может быть подстроечной и переменной (вариометром). Примеры обозначений катушек на схемах приведены на рис. 2.4.10.







Обычная	
с отводами	
с сердечником	
экранированная	
вариометр	
подстроечная	

Рисунок 2.4.10 – Обозначение разных типов катушек

Простейшей катушкой является один виток, индуктивность которого можно определить по формуле

$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{2.4R}{r} - 2 + \frac{1}{4}\mu \right), \quad (2.4.17)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость материала проводника, R – радиус витка, r – сечение витка.

Естественно, катушку из одного витка никто не делает, поэтому индуктивность катушки из нескольких витков (соленоида) будет выглядеть как

$$L = \mu_0 \mu N^2 S / l, \quad (2.4.18)$$

где S – площадь поперечного сечения катушки, N – количество витков, l – длина катушки.

Из формулы следует, что при увеличении числа витков или, к примеру, диаметра (а соответственно, и площади поперечного сечения) катушки, индуктивность будет увеличиваться, следовательно, витки стоит располагать как можно ближе друг к другу, поскольку это приведет к уменьшению длины катушки.

Другой способ повышения индуктивности – соединить сердечник в кольцо и уже на него намотать витки, тогда мы получим тороидальную катушку, индуктивность которой определяется выражением

$$L = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \mu h}{2\pi} \cdot \ln \frac{R}{r}. \quad (2.4.19)$$

Здесь R и r – наружный и внутренний радиус тороида, а h – высота тороида.

Тороидальные катушки имеют ряд преимуществ перед предыдущими индуктивными элементами, в частности, лучшие массогабаритные показатели.

Как уже говорилось, катушки индуктивности часто являются нестандартными изделиями, но все-таки выпускается достаточно большое количество стандартных катушек, и, естественно, они обладают своей маркировкой. Для обозначения номинала катушки индуктивности используют буквенную или цветовую маркировку (рис. 3.11).

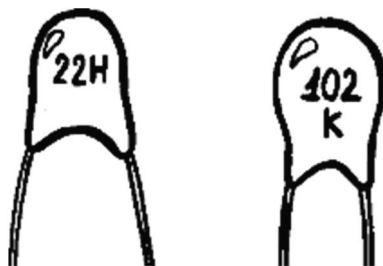


Рисунок 2.4.11 – Буквенно-цифровая маркировка катушек

На рис. 2.4.11 показан пример обозначения набором букв и цифр. Буква используется вместо десятичной запятой (в примере на рисунке – 22 нГн, $10 \cdot 10^2$ мкГн = 1000 мкГн). Цветовую маркировку можно распознать аналогично таковой на резисторах. Первое кольцо делают шире остальных или смещают к краю корпуса.

Основные характеристики трансформаторов

Трансформатор – электрическое устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки (рис. 2.4.12) и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

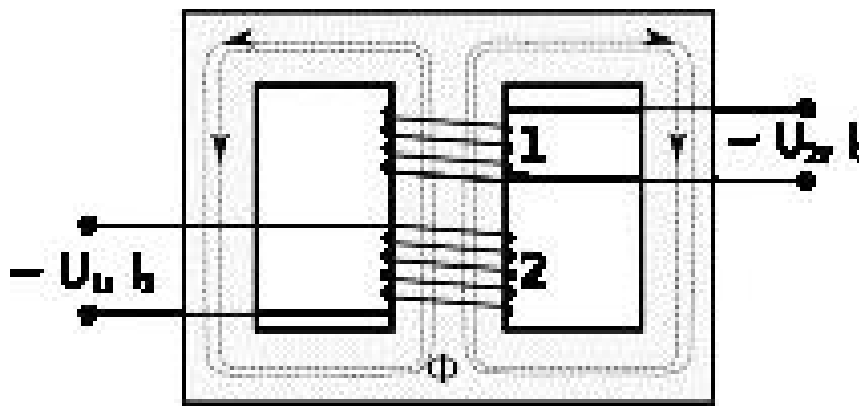


Рисунок 2.4.12 – К пояснению принципа работы трансформатора

Схематичное изображение будущего трансформатора впервые появилось в 12.431 году в работах Фарадея и Генри. Однако ни тот, ни другой не отмечали в своём приборе такого свойства трансформатора, как изменение напряжений и токов, то есть трансформирование переменного тока.

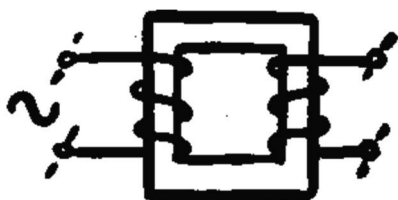
В 12.442.4 году французский механик Г. Румкорф изобрёл индукционную катушку особой конструкции. Она явилась прообразом трансформатора.

30 ноября 1876 года, дата получения патента Яблочковым Павлом Николаевичем, считается датой рождения первого трансформатора. Это был трансформатор с разомкнутым сердечником, представлявшим собой стержень, на который наматывались обмотки.

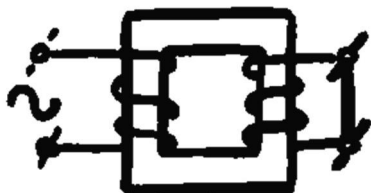
Работа трансформатора основана на двух базовых принципах: изменяющийся во времени электрический ток создаёт изменяющееся во времени магнитное поле (электромагнетизм), а изменение магнитного потока, проходящего через обмотку, создаёт ЭДС в этой обмотке (электромагнитная индукция).

На одну из обмоток, называемую первичной обмоткой, подаётся напряжение от внешнего источника. Протекающий по первичной обмотке переменный ток создаёт переменный магнитный поток в магнитопроводе. В результате электромагнитной индукции переменный магнитный поток в магнитопроводе создаёт во всех обмотках, в том числе и в первичной, ЭДС индукции, пропорциональную первой производной магнитного потока, при синусоидальном токе сдвинутой на 90° в обратную сторону по отношению к магнитному потоку.

При изучении трансформатора целесообразно рассмотреть его основные режимы работы (рис. 2.4.13).



Холостой ход



Короткое замыкание



Нагрузка

Рисунок 2.4.13 – Режимы работы трансформатора

Когда вторичные обмотки ни к чему не подключены (**режим холостого хода**), ЭДС индукции в первичной обмотке практически полностью компенсирует напряжение источника питания, поэтому ток через первичную обмотку невелик. Для трансформатора с сердечником из магнитомягкого материала (например, из трансформаторной стали) ток холостого хода характеризует величину потерь в сердечнике на вихревые токи и на гистерезис. Мощность потерь можно вычислить, умножив ток холостого хода на напряжение, подаваемое на трансформатор. Для трансформатора без ферромагнитного сердечника потери на перемагничивание отсутствуют, а ток холостого хода определяется сопротивлением индуктивности первичной обмотки, которое пропорционально частоте переменного тока и величине индуктивности. Напряжение на вторичной обмотке в первом приближении определяется законом Фарадея.

В **режиме короткого замыкания** на первичную обмотку трансформатора подается переменное напряжение небольшой величины, выводы вторичной обмотки соединяют накоротко. Величину напряжения на входе устанавливают такой, чтобы ток короткого замыкания равнялся номинальному (расчетному) току трансформатора. В таких условиях величина напряжения короткого замыкания характеризует потери в обмотках трансформатора, потери на омическом сопротивлении. Мощность потерь можно вычислить, умножив напряжение короткого замыкания на ток короткого замыкания. Данный режим широко используется в измерительных трансформаторах тока.

При подключении нагрузки (**режим с нагрузкой**) к вторичной обмотке во вторичной цепи возникает ток, создающий магнитный поток в магнитопроводе, направленный противоположно магнитному потоку, создаваемому первичной обмоткой. В результате в первичной цепи нарушается равенство ЭДС индукции и ЭДС источника питания, что приводит к увеличению тока в первичной обмотке до тех пор, пока магнитный поток не достигнет практически прежнего значения.

Схематично, процесс преобразования можно изобразить следующим образом $U_1 \rightarrow I_1 \rightarrow I_1 \cdot N \rightarrow \varepsilon_2 \rightarrow I_2$. Мгновенный магнитный поток в магнитопроводе трансформатора определяется интегралом по времени от мгновенного значения ЭДС в первичной обмотке и в случае синусоидального напряжения сдвинут по фазе на 90° по отношению к ЭДС. Наведённая во вторичных обмотках ЭДС пропорциональна первой производной от магнитного потока и для любой формы тока совпадает по фазе и форме с ЭДС в первичной обмотке.

ЭДС, создаваемая во вторичной обмотке, может быть вычислена по закону Фарадея, который гласит, что:

$$U_2 = N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.4.20)$$

где U_2 – напряжение на вторичной обмотке, N_2 – число витков во вторичной обмотке, Φ – суммарный магнитный поток через один виток обмотки. Если витки обмотки расположены перпендикулярно линиям магнитного поля, то поток будет пропорционален магнитному полю B и площади S , через которую он проходит. То есть $\Phi = BS$, при этом $B = \mu_0 H$, тогда как $H = (I \cdot N)/L$, где I – ток, N – число витков первичной обмотки, L – длина витка (контура).

Поскольку ЭДС, создаваемая в обмотке, пропорциональна числу витков этой обмотки, то, соответственно:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (2.4.21)$$

Это уравнение и описывает коэффициент трансформации для идеального трансформатора, у которого отсутствуют потери энергии на нагрев обмоток и потоки рассеяния обмоток. В идеальном трансформаторе все силовые линии проходят через все витки обеих обмоток, и поскольку изменяющееся магнитное поле порождает одну и ту же ЭДС в каждом витке, суммарная ЭДС, индуцируемая в обмотке, пропорциональна полному числу её витков. Такой трансформатор всю поступающую энергию из первичной цепи трансформирует в магнитное поле и затем в энергию вторичной цепи. В этом случае поступающая энергия равна преобразованной энергии.

Следует заметить, что коэффициент трансформации вводится разными способами – когда говорят о трансформаторе тока, то коэффициент трансформации n выражает отношение первичного (входного) и вторичного (выходного) токов, то есть $n = I_1/I_2 = N_2/N_1$, а когда говорят о трансформаторе напряжения – то ко-

эффициент трансформации n выражает отношение первичного (входного) и вторичного (выходного) напряжений $n = U_1/U_2 = N_1/N_2$;

Конструкции и разновидности трансформаторов

В зависимости от целей классификации трансформаторы можно классифицировать по следующим принципам:

По **назначению** – лабораторные, защитные, промежуточные, измерительные, по **напряжению** (низко- и высоковольтные), по **способу установки** (переносные, стационарные, наружные и внутренние, опорные, шинные), по **количеству ступеней** (одно- и многоступенчатые) и по **характеру изоляции обмотки** (сухая, компаундная, бумажно-масляная).

Также трансформаторы делятся на несколько основных типов.

Самые распространенные – **силовые трансформаторы**, назначение которых – изменение напряжения тока в сетях освещения, питания оборудования, энергосистем.

Измерительные трансформаторы используются для контроля рабочих показателей напряжения, фазы или тока в первичной цепи.

Автотрансформаторы, обмотки в которых соединяются между собой гальваническим способом, устанавливаются в стабилизаторах напряжения, системах релейной защиты, запуска крупных электроустановок, работающих от сети с переменным током.

Импульсные трансформаторы применяются в вычислительных устройствах электронного типа, системах радиолокации, импульсной связи, в качестве главного измерителя в электросчетчиках.

Согласующий трансформатор является, по сути, гальванической развязкой и согласует показатели сопротивления каскадов схем таким образом, что сигнал практически не искажается.

Для надежной работы трансформатора необходимо, чтобы он эксплуатировался в заданных режимах работы, обеспечивал рассеяние неиспользуемой мощности, электрическую прочность и так далее. Современный трансформатор представляет собой порой чрезвычайно сложную конструкцию, далеко ушедшую от простого сердечника с намотанными на него двумя проводами.

Основными частями конструкции силового трансформатора являются магнитная система (магнитопровод), обмотки и система охлаждения (при необходимости).

Магнитная система (магнитопровод) трансформатора – комплект элементов (чаще всего пластин) электротехнической стали или другого ферромагнитного материала, собранных в определённой геометрической форме, предназначенный для локализации в нём основного магнитного поля трансформатора. Магнитная система в полностью собранном виде совместно со всеми узлами и

детальями, служащими для скрепления отдельных частей в единую конструкцию, называется остовом трансформатора.

Часть магнитной системы, на которой располагаются основные обмотки трансформатора, называется стержень, часть магнитной системы трансформатора, не несущая основных обмоток и служащая для замыкания магнитной цепи, называется ярмо. По типу магнитопровода трансформаторы делятся на трансформаторы стержневого и броневое типа.

В то время как обмотки стержневого типа заключают в себе сердечник, сердечник броневое типа заключает в себе обмотки (рис. 2.4.14).

Если смотреть на активный компонент (сердечник с обмотками) стержневого типа, обмотки хорошо видны, но они скрывают за собой стержни магнитной системы сердечника. Видно только верхнее и нижнее ярмо сердечника. В конструкции броневое типа сердечник скрывает в себе основную часть обмоток.

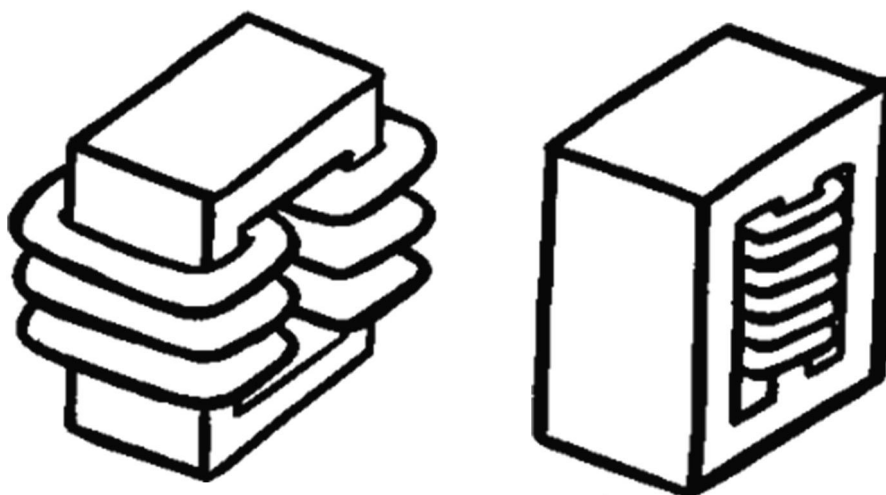


Рисунок 2.4.14 – Сердечники стержневого и броневое типа

Обмотка – это совокупность витков, образующих электрическую цепь, в которой суммируются ЭДС, наведённые в витках. Проводник обмотки в силовых трансформаторах обычно имеет квадратную форму для наиболее эффективного использования имеющегося пространства (для увеличения коэффициента заполнения в окне сердечника). При увеличении площади проводника проводник может быть разделён на два и более параллельных проводящих элемента с целью снижения потерь на вихревые токи в обмотке и облегчения функционирования обмотки. Проводящий элемент квадратной формы называется жилой. Каждая жила изолируется при помощи либо бумажной обмотки, либо эмалевого лака. Две отдельно изолированных и параллельно соединённых жилы иногда могут иметь

общую бумажную изоляцию. Две таких изолированных жилы в общей бумажной изоляции называются кабелем. Особым видом проводника обмотки является непрерывно транспонированный кабель. Этот кабель состоит из жил, изолированных при помощи двух слоёв эмалевого лака, расположенных в осевом положении друг к другу, как показано на рисунке. Непрерывно транспонированный кабель получается путём перемещения внешней жилы одного слоя к следующему слою с постоянным шагом и применения общей внешней изоляции. Бумажная обмотка кабеля выполнена из тонких (несколько десятков микрометров) бумажных полос шириной несколько сантиметров, намотанных вокруг жилы. Бумага заворачивается в несколько слоёв для получения требуемой общей толщины.

Большую роль для повышения надежности трансформаторов сыграло введение масляного охлаждения (конец 1880-х годов, Д. Свинберн). Свинберн помещал трансформаторы в керамические сосуды, наполненные маслом, что значительно повышало надежность изоляции обмоток. Поэтому сейчас, если трансформатор рассчитан на большую мощность и/или на высокое напряжение, то для повышения электрической прочности и обеспечения теплоотвода используется трансформаторное масло (рис. 2.4.15).

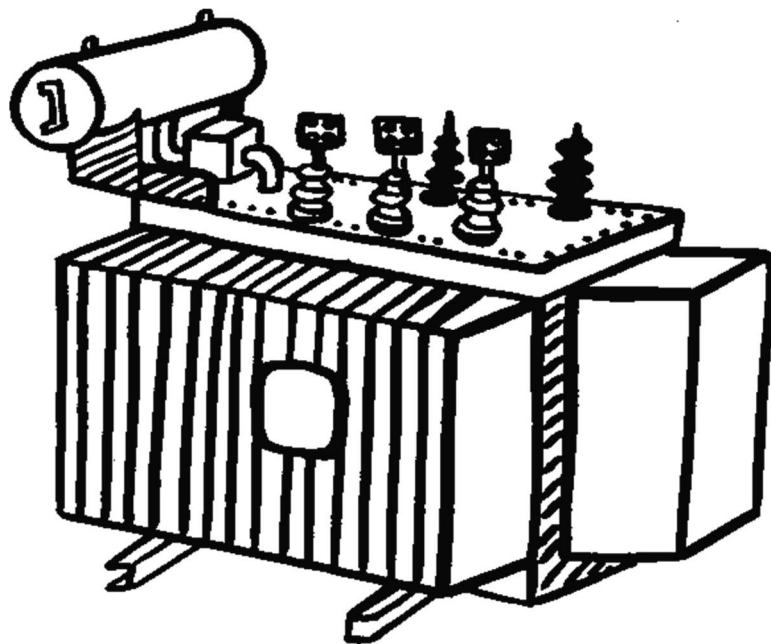


Рисунок 2.4.15 – Внешний вид силового трансформатора с масляным охлаждением

Бак в первую очередь представляет собой резервуар для масла, а также обеспечивает физическую защиту для активного компонента. Он также служит в качестве опорной конструкции для вспомогательных устройств и аппаратуры управления (рис. 2.4.16).

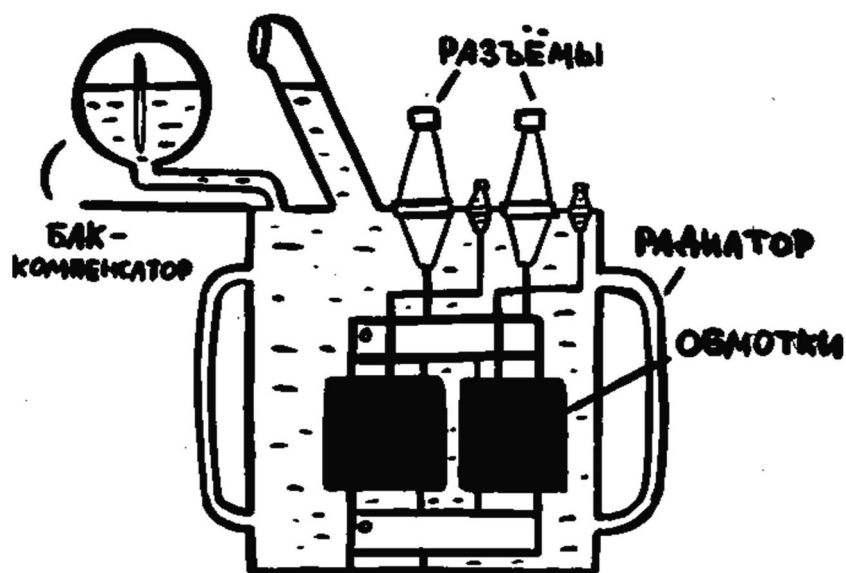


Рисунок 2.4.16 – Схема силового трансформатора с масляным охлаждением

Перед заполнением маслом бака с активным компонентом внутри из него выкачивается весь воздух, который может подвергнуть опасности диэлектрическую прочность изоляции трансформатора (поэтому бак предназначен для выдерживания давления атмосферы с минимальной деформацией). Ещё одним явлением, учитываемым при проектировании баков, является совпадение звуковых частот, вырабатываемых сердечником трансформатора, и частот резонанса деталей бака, что может усилить шум, излучаемый в окружающую среду.

Конструкция бака допускает температурно-зависимое расширение масла. Чаще всего устанавливается отдельный расширительный бачок, который также называется расширителем. При увеличении номинальной мощности трансформатора воздействие больших токов внутри и снаружи трансформатора оказывает влияние на конструкцию. То же самое происходит с магнитным потоком рассеяния внутри бака. Вставки из немагнитного материала вокруг сильноточных проходных изоляторов снижают риск перегрева. Внутренняя облицовка бака из высокопроводящих щитков не допускает попадания потока через стенки бака. С другой стороны, материал с низким магнитным сопротивлением поглощает поток перед его прохождением через стенки бака.

Вышеизложенное касалось мощных трансформаторов, в основном – силовых, но в электронике зачастую применяются миниатюрные планарные трансформаторы. Планарные трансформаторы могут быть выполнены в разных конструктивных исполнениях.

Независимый планарный трансформатор (рис. 2.4.17) – отдельный

электронный компонент, который может отдельно поставляться и изготавливаться. Такое решение хорошо при наличии большой линейки устройств, где трансформаторунифицированный.

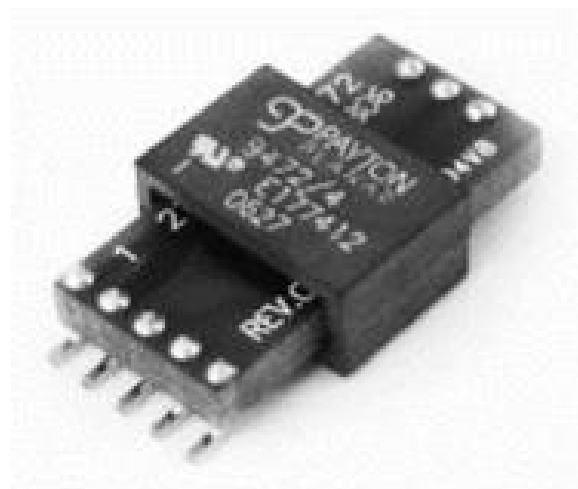


Рисунок 2.4.17 – Независимый планарный трансформатор

С общим ярмом. При таком исполнении обмотки трансформатора выполнены на основной печатной плате устройства (рис. 2.4.18) и являются его неотъемлемой частью. Сердечник же просто надевается на плату и крепится с помощью скоб или как-то иначе, например на клей или компаунд.



Рисунок 2.4.18 – Планарный трансформатор с общим ярмом

У любого типа планарного трансформатора все обмотки выполнены в виде медных дорожек на печатной плате. Выглядит планарный трансформатор в разобранном виде следующим образом(рис. 2.4.19):

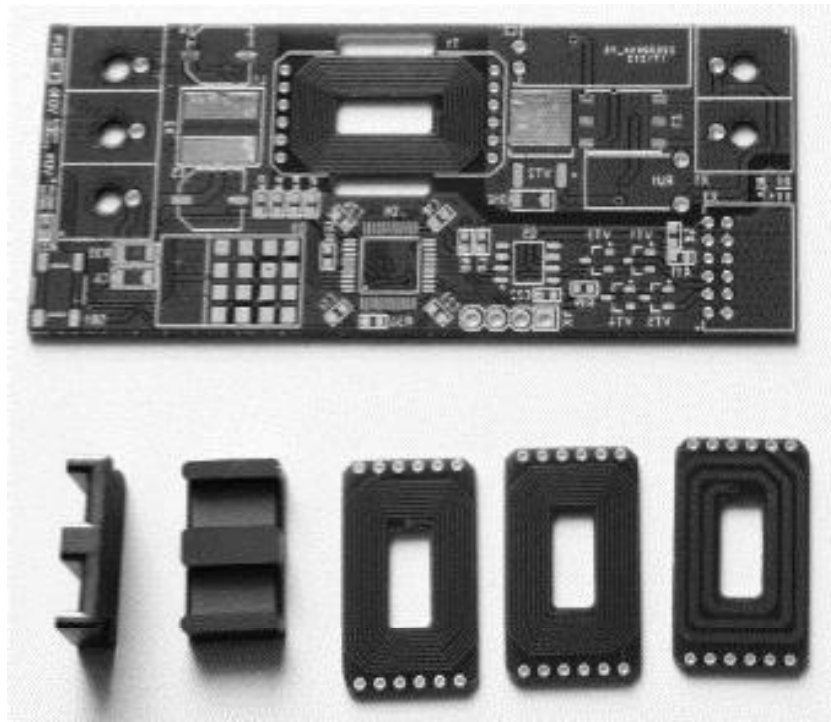


Рисунок 2.4.19 – Элементы конструкции планарного трансформатора

К плюсам планарных трансформаторов можно отнести низкое тепловое сопротивление, что обусловлено более высоким отношением площади поверхности сердечника к его объему, высокую плотность тока, повторяемость паразитных параметров, высокий коэффициент связи и малую индуктивность рассеяния.