

## **2. СХЕМЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ИМПУЛЬСОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

### **2.1 Высоковольтные импульсные трансформаторы**

#### **2.1.1 Общие сведения**

Импульсные трансформаторы служат для передачи коротких импульсов напряжения длительностью от долей микросекунды до сотен микросекунд и широко применяются в технике радиолокации, телевидении, импульсной радиосвязи, в установках экспериментальной физики, квантовой электроники, являются неотъемлемой частью устройств преобразовательной техники.

Импульсные трансформаторы позволяют изменить уровень формируемого импульса напряжения или тока, полярность импульса, согласовать сопротивление генератора импульсов с сопротивлением нагрузки, отделить потенциалы источника и приемника импульсов, получить на нескольких отдельных нагрузках импульсы от одного генератора импульсов, создать обратную связь в контурах схемы импульсного устройства [28-32].

В некоторых установках работа импульсного устройства практически невозможна без импульсного трансформатора. Это прежде всего относится к мощным высоковольтным и импульсным устройствам. Повышение напряжения с помощью импульсного трансформатора до уровня, необходимого по условиям работы нагрузки, особенно часто используется в тех случаях, когда напряжение источника, формирующего импульсы, ограничено допустимым напряжением коммутирующих приборов (электронных ламп, тиристоров, транзисторов) или электрической прочностью элементов

генератора (конденсаторов, дросселей), длительное время находящихся под напряжением в процессе накопления энергии.

В зависимости от назначения импульсные трансформаторы изготавливаются на напряжения от единиц до сотен киловольт, на токи от долей ампера до десятков кА, мощностью от единиц ватт до сотен мегаватт. Включение импульсного трансформатора в схему импульсного устройства всегда связано с искажением формы трансформируемого импульса, обусловленного такими параметрами трансформатора, как индуктивность рассеяния, распределенная емкость, индуктивность намагничивания. Трансформация импульса связана с потерями энергии, обусловленными магнитными и электрическими потерями в магнитопроводе и обмотках трансформатора. Включение импульсного трансформатора в схему существенно влияет на габариты и массу импульсного устройства, поэтому вопрос о применении импульсного трансформатора должен решаться комплексно с учетом требований, предъявляемых к форме выходного импульса, коэффициенту поведенного действия, габаритам, массе, а также с учетом экономических соображений.

В большинстве случаев основным требованием, предъявляемым к импульсным трансформаторам, является минимальное искажение формы трансформируемого импульса. Это требование может дополняться ограничениями на потери, массу и габариты импульсного трансформатора. Наибольшее распространение получили импульсные трансформаторы, трансформирующие импульсы, близкие по форме к прямоугольным, которые обладают крутым фронтом и постоянством напряжения вершины импульса, необходимыми для работы широкого класса нагрузок.

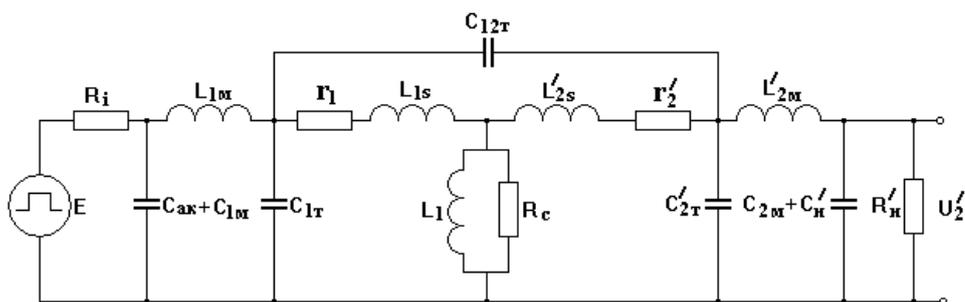
Особенностью характера работы импульсного трансформатора является кратковременность каждого рабочего цикла и связанный с этим характер процессов, происходящих в обмотках и магнитопроводе импульсного трансформатора. Высокая скорость изменения магнитного потока вызывает появление значительных вихревых токов в магнитопроводе и связанные с ними потери энергии. Кратковременность воздействующих импульсов требует учитывать не только индуктивные, но и емкостные параметры обмоток, определяющие характер формирования фронта импульса и энергетические характеристики импульсного трансформатора. Малые длительности импульсов вызывают необходимость учитывать поверхностный эффект в проводах обмоток при определении электрических потерь.

Трансформация фронта импульса с малыми искажениями достигается при малых значениях индуктивности рассеяния и

распределенной емкости трансформатора, которые уменьшаются с уменьшением числа витков обмоток, достигаемым за счет увеличения сечения магнитопровода. В то же время для трансформации вершины импульса с малым спадом следует стремиться к увеличению индуктивности намагничивания трансформатора, возрастающей с увеличением числа витков и уменьшением сечения магнитопровода. Для уменьшения массы и габаритов трансформатора необходимо увеличение электромагнитных нагрузок, но это приводит к увеличению спада вершины импульса и увеличению потерь. Удовлетворение одновременно несколькими поставленными условиями при расчете импульсного трансформатора требует нахождения компромиссного решения, которое принимается в зависимости от относительной значимости поставленных требований.

Представление импульсного трансформатора в виде эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами оправдывается чрезмерно усложненным анализом процессов в системах с распределенными параметрами, не позволяющим получить приемлемые для практических целей результаты. С другой стороны, накопленный опыт проектирования импульсных трансформаторов указывает на допустимость такого упрощения.

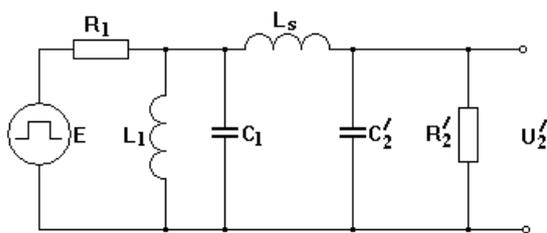
Импульсный трансформатор входит составным элементом в различные типы генераторов электрических импульсов, выполняя функции согласующего звена между этим генератором и сопротивлением нагрузки. Как генератор импульсов, так и сопротивление нагрузки характеризуются некоторыми параметрами, которые вместе с параметрами трансформатора определяют условия передачи импульсной энергии от генератора к нагрузке. Поэтому при проектировании импульсного трансформатора необходимо учитывать



**Рис. 2.1.** Эквивалентная схема трансформаторной цепи

не только параметры собственно трансформатора, но и параметры генератора импульсов и сопротивления нагрузки. Это обстоятельство требует рассматривать при расчете не изолированную эквивалентную схему трансформатора, а всю трансформаторную цепь. Эквивалентная схема трансформаторной цепи приведена на рис. 2.1. В схему входят 9

независимых реактивных элементов, способных запасать энергию. Индуктивности  $L_{1м}$  и  $L_{2м}$  являются индуктивностями соединительных элементов, емкости  $C_{1м}$  и  $C_{2м}$  – емкостями этих элементов. Они носят распределенный характер, но представлены на схеме как сосредоточенные. Емкость  $C_{ак}$  является емкостью коммутатора, а  $C'_н$  – емкость нагрузки,  $C_{1Т}$ ,  $C_{2Т}$ ,  $C'_{12Т}$  – некоторые специальным образом определенные емкости, приближенно эквивалентные соответствующим распределенным емкостям и приведенные к напряжению первичной обмотки. Индуктивности рассеяния  $L_{1S}$  и  $L'_{2S}$  учитывают потоки рассеяния, сопротивления  $r_1$  и  $r'_2$  – сопротивления первичной и вторичной обмоток, индуктивность  $L_1$  называется индуктивностью намагничивания, и она учитывает основной поток трансформатора, сопротивление  $R_C$  учитывает потери в сердечнике трансформатора на гистерезис и вихревые токи. Переходный процесс, определяющий искажения формы трансформируемого импульса



**Рис. 2.2.** Упрощенная эквивалентная схема повышающего импульсного трансформатора

напряжения, описывается уравнением 9-го порядка. Для получения пригодного для практических целей решения, эквивалентную схему упрощают (рис. 2.2). Эти упрощения достигаются за счет объединения внутреннего сопротивления генератора импульсов с сопротивлением обмоток, индуктивности

рассеяния первичной обмотки – с индуктивностью рассеяния вторичной обмотки и индуктивностями монтажа, емкости первичной обмотки – с емкостями первичной цепи, емкости вторичной обмотки – с емкостями вторичной цепи. Все перечисленные упрощения не приводят к значительным расхождениям между данными теоретического исследования и экспериментом [29].

### 2.1.2 Распределенная емкость обмоток

В импульсном трансформаторе существуют распределенные емкости обмоток на землю (магнитопровод), междувитковые и междуобмоточные. При расчетах распределенная емкость обмоток заменяется сосредоточенной (динамической) емкостью, определяемой по энергии электрического поля.

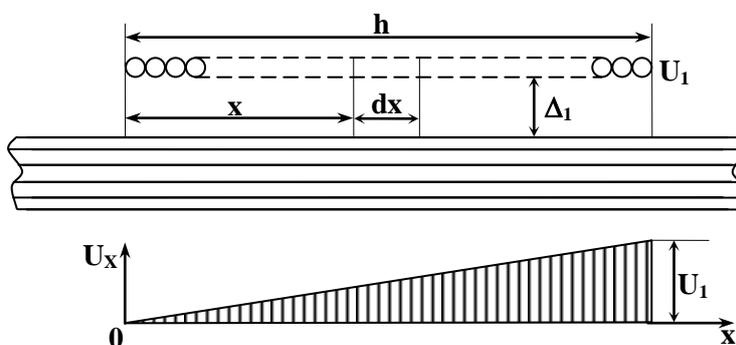
Определим динамическую емкость многообмоточного трансформатора, имеющего однослойные обмотки.

Если между магнитопроводом и ближайшей расположенной к нему обмоткой действует постоянное напряжение, то при  $h \gg \Delta$  электрическое поле в промежутке однородно и емкость этой обмотки относительно магнитопровода может быть вычислена по формуле плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{\Delta_1} = \frac{\varepsilon_0 \cdot P \cdot h}{\Delta_1}, \quad (2.1)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость изоляционного материала,  $P$  – периметр обмотки,  $h$  – высота обмотки,  $\Delta_1$  – изоляционное расстояние между магнитопроводом и первичной обмоткой.

Из-за наличия на обмотке импульсного напряжения, распределение потенциалов по высоте обмотки изменяется по линейному закону (рис. 2.3).



**Рис. 2.3** Распределение напряжения между первичной обмоткой и сердечником в импульсном трансформаторе

Для однослойной обмотки напряжение на произвольном удалении  $x$  от начала обмотки равно  $U_x = U(x/l)$ .

Элементарная емкость участка  $dx$  составит:

$$dC_{1x} = \frac{\varepsilon_0 \cdot P dx}{\Delta_1}, \quad (2.2)$$

а сосредоточенная в ней энергия

$$dW_{1x} = \frac{\varepsilon_0 \cdot P \cdot U_{1x}^2 dx}{2\Delta_1}. \quad (2.3)$$

Интегрирование этого выражения в пределах от 0 до  $h$  дает значение всей энергии электрического поля, сосредоточенной между обмоткой и магнитопроводом

$$W_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot P \cdot U_1^2}{2\Delta_1 \cdot h^2} \int_0^h x^2 dx = \frac{\varepsilon_0 \cdot P \cdot h \cdot U_1^2}{6\Delta_1} = \frac{C_{1T} \cdot U_1^2}{2}, \quad (2.4)$$

откуда

$$C_{1T} = \frac{\varepsilon_0 \cdot P_1 \cdot h}{3\Delta_1}. \quad (2.5)$$

Таким образом, динамическая емкость первичной обмотки имеет величину в три раза меньшую статической емкости.

Эквивалентная междуобмоточная динамическая емкость многообмоточного трансформатора может быть вычислена по формуле [32]

$$C_T' = \frac{\varepsilon_0 \cdot P \cdot h^2}{\Delta} \cdot \left( \sum_{k=2}^k \sqrt{\alpha_{(k-1)k}} \right)^2, \quad (2.6)$$

где  $k$  – количество обмоток,  $\alpha_{(k-1)k}$  – потенциальный коэффициент,  $\Delta$  – суммарная приведенная толщина изоляции. Коэффициент  $\alpha$  представляет собой безразмерную величину, которая учитывает распределение напряжения между обмотками, что в свою очередь определяется схемой соединения обмоток и схемой включения их в генераторе импульсов.

С помощью потенциального коэффициента  $\alpha$  при проектировании импульсных трансформаторов осуществляется приведение статических емкостей к динамическим и к напряжению первичной обмотки. Для каждой пары соседних обмоток  $n$  и  $m$   $\alpha$  вычисляется по формуле

$$\alpha_{nm} = \frac{(U_{\text{вн}} - U_{\text{вм}})^2 + (U_{\text{вн}} - U_{\text{вм}})(U_{\text{нн}} - U_{\text{нм}}) + (U_{\text{нн}} - U_{\text{нм}})^2}{3U_1}, \quad (2.7)$$

где  $U_{\text{вн}}$  и  $U_{\text{вм}}$  – потенциалы концов обмоток  $n$  и  $m$ ,  $U_{\text{нн}}$  и  $U_{\text{нм}}$  – потенциалы начал обмоток  $n$  и  $m$ .

При расчете коэффициента приведения необходимо учитывать знаки потенциалов на концах обмоток, зависящие от полярности импульса, направления намотки, соединения обмоток на стержнях и др. Общая динамическая емкость обмоток трансформатора

$$C'_{ST} = C'_{1T} + C'_T. \quad (2.8)$$

В случае магнитопровода стержневого типа обмотки обычно располагают на обоих стержнях, при этом секции первичной и вторичной обмоток можно соединить как параллельно, так и последовательно. В этом случае емкостные коэффициенты вычисляются по эпюрам распределения потенциалов.

При параллельном соединении секций обмоток на обоих стержнях емкостной коэффициент для всего импульсного трансформатора при любом исполнении обмоток будет равняться удвоенному емкостному коэффициенту при расположении обмоток на одном стержне.

При последовательном соединении секций обмоток на двух стержнях и одинаковом выполнении секций этих обмоток на каждом из стержней емкостной коэффициент также равен удвоенному значению коэффициента для случая расположения обмоток на одном стержне.

### 2.1.3 Индуктивность рассеяния обмоток

Индуктивность рассеяния обмоток импульсного трансформатора, обусловленная потоками рассеяния, в схеме замещения представляется в виде сосредоточенного элемента и определяется по магнитной энергии, запасаемой в потоках рассеяния.

Для простых концентрических обмоток, расположенных на одном стержне

магнитопровода двухобмоточного трансформатора, расчет индуктивности рассеяния выполняется по известной формуле [32]

$$L_p = \frac{\mu_0 \cdot \omega_1^2 \cdot \pi D_{cp}}{h} \cdot \left( a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right). \quad (2.9)$$

В этой формуле  $D_{cp}$  – средний периметр канала рассеяния,  $a_{12}$  – ширина канала рассеяния,  $a_1, a_2$  – радиальные размеры обмоток,  $h$  – высота обмотки.

Индуктивность рассеяния обмоток зависит от их геометрических размеров и канала рассеяния между ними. Индуктивность рассеяния будет меньше, если обмотку с низшим напряжением располагать ближе к стержню. При этом изоляционный канал между обмоткой и стержнем получается меньше, чем в том случае, когда ближе к стержню расположена обмотка высокого напряжения. Следовательно, уменьшится средний диаметр канала рассеяния.

Импульсные трансформаторы выполняются как двухобмоточными, так и многообмоточными. Картина поля рассеяния у многообмоточных трансформаторов является более сложной, чем у двухобмоточных. Следовательно для таких трансформаторов особенно важно правильно выбрать взаимное расположение обмоток, которое привело бы к наименьшей индуктивности рассеяния.

Для многообмоточного трансформатора можно рассчитать индуктивность рассеяния между двумя любыми однослойными обмотками

$$L_{1k} = \frac{\mu_0 \cdot \omega_1^2 \cdot P_{cp}}{h} \cdot \left( \Delta_{1k} + \frac{d_1 + d_2}{3} \right), \quad (2.10)$$

где  $\Delta_{1k}$  – расстояние между первичной и  $k$ -той обмотками,  $d_1$  и  $d_k$  – диаметры проводов обмоток,  $P_{cp}$  – средний периметр,  $h$  – высота обмотки.

Зная индуктивность рассеяния между первичной обмоткой и каждой из вторичной обмоток, можно определить общую эффективную индуктивность рассеяния многообмоточного импульсного трансформатора по формуле

$$L'_{ST} = \sum_{k=2}^k L_{1k} \frac{U_k I_k}{P_H}. \quad (2.11)$$

Минимальная индуктивность рассеяния  $L'_{ST}$  соответствует случаю, когда первичная обмотка располагается между вторичными, причем так, что наиболее мощная из вторичных обмоток максимально приближена к первичной, т.е. наматывается до или после нее.

Иногда в двухобмоточных трансформаторах первичную обмотку разделяют на две равные части и между ними помещают вторичные обмотки. Такое разделение первичной обмотки может быть названо секционированием, оно приводит к уменьшению индуктивности рассеяния.

При расположении обмоток на двух стержнях на каждом стержне МДС составляет половину МДС трансформатора. Поэтому как при параллельном, так и при последовательном соединении частей обмоток двух стержней результирующая индуктивность рассеяния импульсного трансформатора будет равна половине индуктивности, определенной для обмоток одного стержня.

#### 2.1.4 Электромагнитные процессы в магнитопроводе

Процессы в магнитопроводе импульсного трансформатора значительно сложнее, чем в силовых трансформаторах. Дополнительные особенности этих процессов связаны с несимметричным перемагничиванием в пределах петли гистерезиса, возникновением мощных вихревых токов, явлениями последействия и насыщения. Сложность электромагнитных процессов в сердечниках трансформаторов затрудняет и теоретические исследования.

При анализе вводится ряд допущений, упрощающих работу как самого трансформатора, так и работу схемы, в которой он используется. На процессы в магнитопроводе «паразитные» параметры обмоток (емкости и индуктивности рассеяния) влияют незначительно и поэтому ими при анализе явлений намагничивания пренебрегают.

При воздействии на первичную обмотку импульсного трансформатора прямоугольного однополярного импульса напряжения в обмотке индуцируется ЭДС, определяемая по закону электромагнитной индукции

$$U_1 \cong -e_1 = \omega_1 \frac{d\Phi}{dt} = \omega_1 S \frac{dB}{dt}, \quad (2.12)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток,  $B$  – средняя по сечению индукция,  $\omega$  – число витков первичной обмотки,  $S$  – поперечное сечение стержня. Из формулы (2.12) приращение индукции

$$dB = \frac{U_1}{\omega_1 S} dt,$$

$$\int_0^t dB = \int_0^t \frac{1}{\omega_1 \cdot S} \cdot U_1 dt. \quad (2.13)$$

Приращение индукции за время  $t$

$$B(t) - B(0) = \frac{1}{\omega_1 \cdot S} \int_0^t U_1 dt = \frac{U_1}{\omega_1 \cdot S} \cdot t. \quad (2.14)$$

Таким образом, приращение индукции происходит по линейному закону и пропорционально вольт-секундной площади импульса напряжения. Напряженность магнитного поля

$$H = \frac{\Delta B}{\mu_{\Delta}}, \quad (2.15)$$

где  $\mu_{\Delta}$  – действующая в импульсном режиме магнитная проницаемость. По закону полного тока

$$H \cdot l_c = i_{\mu} \cdot \omega_1, \quad (2.16)$$

где  $l_c$  – средняя длина магнитной силовой линии по контуру магнитопровода,  $i_\mu$  – намагничивающий ток.

Из выражения (2.13, 2.15, 2.16) получим

$$i_\mu = \frac{U_1 \cdot l_c}{S \cdot \omega_l^2 \cdot \mu_d} \cdot t. \quad (2.17)$$

Из этого выражения следует, что при постоянной магнитной проницаемости намагничивающий ток в зависимости от времени должен нарастать по линейному закону.

Полная индуктивность первичной обмотки получится

$$L_\mu = \frac{\omega_l^2 \cdot S \cdot \mu_d}{l_c}. \quad (2.18)$$

Следовательно, намагничивающий ток

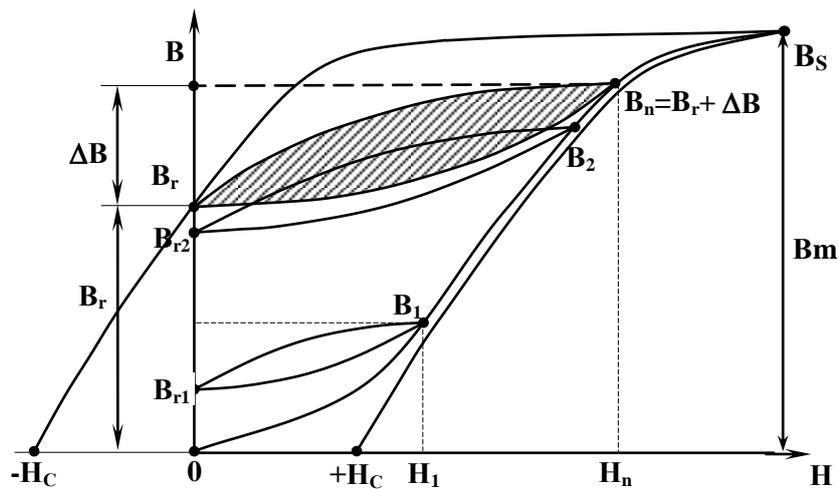
$$i_\mu = \frac{U_1}{L_\mu} \cdot t. \quad (2.19)$$

К моменту окончания импульса намагничивающий ток достигнет величины

$$I_\mu = \frac{U_1 \cdot t_u}{L_1}. \quad (2.20)$$

Процесс намагничивания магнитопровода импульсного трансформатора при подаче на первичную обмотку однополярных импульсов напряжения приведен на рис. 3.4. В диапазоне изменения индукции  $-B_s$  до  $+B_s$  на постоянном токе перемагничивание происходит по основной граничной петле гистерезиса.

Если предположить, что сердечник был размагничен, то начало процесса будет совпадать с началом координат. При подачи импульса напряжения индукция нарастает на величину  $\Delta B$ , определяемую амплитудой напряжения  $U_1$  и длительностью  $t_u$ .



**Рис. 2.4.** Шлейф статической характеристики намагничивания ферромагнитного материала сердечника

Во время первого импульса намагничивание происходит по основной кривой намагничивания от точки 0 до  $B_1$  (рис.2.4). За время паузы между импульсами индукция уменьшится до значения  $B_{r1}$ . За следующий импульс индукция снова нарастает на величину  $\Delta B$ , сердечник намагничивается по кривой  $B_{r1}B_1B_2$ . За следующую паузу индукция спадет до значения  $B_{r2}$  и т.д. Этот процесс постепенного нарастания индукции происходит до тех пор, пока во время паузы размагничивание не произойдет до значения  $B_r$ , соответствующего остаточной индукции симметричного гистерезисного цикла перемагничивания. В дальнейшем процесс устанавливается, и перемагничивание сердечника за период импульса происходит по частному (несимметричному) циклу  $B_rB_n$ . Приращению индукции  $\Delta B$  частного цикла соответствует напряженность магнитного поля  $\Delta H = H_n$ , определяющая индуктивность намагничивания на частном цикле, и соответствующий ей намагничивающий ток.

Если уменьшить амплитуду импульса, то уменьшится приращение индукции, уменьшится напряженность поля, и магнитопровод будет перемагничиваться по другому частному циклу. При увеличении амплитуды импульса соответствующим образом изменится приращение индукции и напряженность поля. Возможное максимальное приращение индукции  $\Delta B_m$  для данной петли гистерезиса будет определяться насыщением магнитопровода, и частный цикл перемагничивания будет предельным.

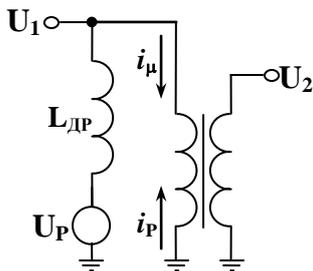
Средняя магнитная проницаемость на частном цикле  $B_rB_n$  определяется как приращение индукции к напряженности магнитного поля

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\Delta H}. \quad (2.21)$$

Средняя магнитная проницаемость на предельном частном цикле

$$\mu_{\Delta m} = \frac{\Delta B_m}{\Delta H_m} = \frac{B_m - B_r}{\Delta H_m}. \quad (2.22)$$

Из рис. 3.4 видно, что  $\mu_{\Delta} < \mu = B_n/H_n$ , следовательно, явление гистерезиса значительно понижает магнитную проницаемость в магнитопроводе импульсного трансформатора по сравнению с трансформатором обычного исполнения, сердечник которого перемагничивается по симметричному гистерезисному циклу. В тех



**Рис. 2.5.** Схема дополнительного размагничивающего тока

случаях, когда требуются высокие значения  $\Delta B$  и  $\mu_{\Delta}$ , можно применить одно из средств, улучшающих характеристики материала сердечника: 1) ввести в сердечник воздушный зазор длиной  $l_0$ ; 2) применить обратное размагничивающее поле.

Введение воздушного зазора в магнитопровод снижает остаточную индукцию, что позволяет работать при приращениях индукции, приближающихся к индукции насыщения  $B_m$ . При этом также изменяется средняя импульсная проницаемость. Длина воздушного зазора должна быть много меньше общей длины

магнитопровода  $l_0 \ll l$ , то есть  $l_0 / l \approx 0,001 \div 0,0001$ .

Применение разрезных магнитопроводов технологически удобно в массовом производстве, так как позволяет изготавливать катушки с обмотками отдельно от магнитопровода.

Способ размагничивания, применяемый для магнитопроводов без зазора из сталей с малой коэрцитивной силой, состоит в том, что через первичную обмотку пропускается постоянный или пульсирующий ток, создающий поле, обратное полю импульсного намагничивания. Если размагничивающая сила велика, то в принципе можно получить остаточную индукцию отрицательного знака и таким образом получить приращение индукции насыщения. Такой способ размагничивания требует специального источника постоянного или пульсирующего тока и включенного последовательно с ним дросселя, который необходим для изоляции и предотвращения короткого замыкания обмотки импульсного трансформатора в процессе трансформирования импульсов (рис. 2.5).

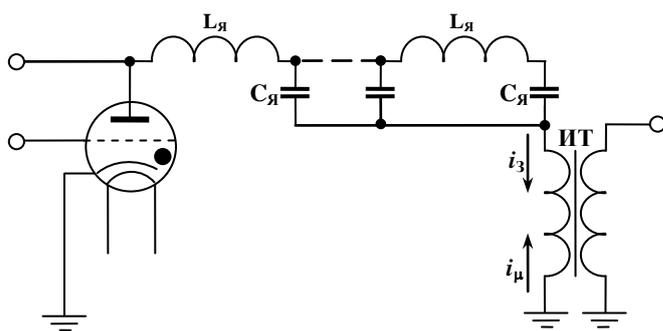


Рис. 2. 6. Схема с формирующей линией

Обычно большие приращения индукции требуются для мощных импульсных трансформаторов на высокие напряжения. Если первичный импульс формируется от формирующей линии, то размагничивающее поле создается зарядным током накопительных емкостей,

который протекает через первичную обмотку трансформатора (рис. 2.6). В импульсном режиме изменение индукции в магнитопроводе импульсного трансформатора происходит с очень большой скоростью, достигающей  $10^6$  Тл/с. Это приводит к возникновению в стали магнитопровода мощных вихревых токов, которые создают размагничивающее поле и потери энергии. Для уменьшения вихревых токов необходимо выбирать материал магнитопровода импульсного трансформатора с большим удельным электрическим сопротивлением и уменьшать толщину листов.

### 2.1.5 Анализ переходных процессов в импульсном трансформаторе

**Искажение фронта импульса.** Прямоугольный импульс напряжения, поданный на первичную обмотку, на нагрузку приходит весьма искаженным. Возникновение сложного колебательного процесса в трансформаторной цепи обусловлено прежде всего наличием индуктивностей рассеяния и емкостей элементов обмоток трансформатора, а также влиянием индуктивностей и емкостей схемы, в которой используется трансформатор. Колебания носят затухающий характер вследствие наличия активных сопротивлений обмоток трансформатора и активных элементов схемы. Кроме того, увеличивается фронт импульса.

Математический анализ формы фронта импульса производится с помощью схемы замещения (рис. 2.2), в которой можно принять индуктивность намагничивания очень большой по сравнению с индуктивностью рассеяния и ее шунтирующим действием пренебречь. Это допущение основано на том, что длительность фронта импульса мала по сравнению с постоянной времени процессов в магнитопроводе. Емкости  $C_1$  и  $C_2$  можно объединить. Тогда схема упростится, и система

уравнений тоже упрощается до второго порядка. Решение уравнения определяет форму фронта трансформируемого импульса. Это решение представлено графически на рис. 2.7 для различных параметров трансформаторной цепи [29]. Для удобства анализа процесса решение этого уравнения может быть записано в виде выражений, где коэффициент затухания определяет характер переходного процесса.

1). При  $\delta < 1$  возникает колебательный процесс на вершине импульса. Решение запишется в следующем виде:

$$U = 1 - e^{-\delta\tau} \left( \frac{\delta}{\sqrt{1-\delta^2}} \sin\sqrt{1-\delta^2} \cdot \tau + \cos\sqrt{1-\delta^2} \cdot \tau \right). \quad (2.23)$$

2) При  $\delta > 1$  переходный процесс носит аperiodический характер. Решение можно записать

$$U = 1 - e^{-\delta\tau} \left[ \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2-1}} \operatorname{Sh}\sqrt{\delta^2-1} \cdot \tau + \operatorname{Ch}(\sqrt{\delta^2-1} \cdot \tau) \right]. \quad (2.24)$$

На рис. 2.7 видно, что при малых значениях  $\delta$  получается большая

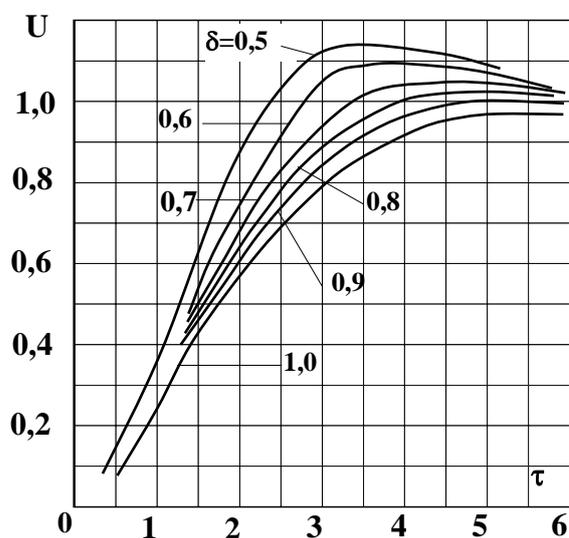


Рис. 2.7. Графики переходных процессов на фронте импульса при линейной нагрузке

амплитуда наложенных колебаний на фронте импульса, но зато меньше относительная длительность фронта импульса. Наоборот, при увеличении  $\delta$  колебания снижаются, но относительная длительность фронта импульса возрастает.

Длительность фронта импульса  $t_{и}$  и амплитуда колебаний определяются в основном двумя величинами: паразитной постоянной времени и волновым сопротивлением трансформаторной цепи.

Постоянная времени  $T$  и волновое сопротивление зависят от паразитных параметров схемы и

прежде всего от индуктивности рассеяния и паразитной емкости обмоток трансформатора  $L_{ST}'$ ,  $C_{ST}'$ .

Как видно из графиков (рис. 3.7) при  $\delta \geq 0,5$  амплитуда колебаний на фронте импульса не превышает 16%, что для многих практических случаев является допустимым. При  $\delta \geq 0,7$  амплитуда колебаний находится в пределах 5%.

**Искажение вершины импульса.** При рассмотрении процессов на вершине импульса можно пренебречь влиянием емкостей  $C_1$  и  $C_2'$  и индуктивности  $L_S$  (рис. 2.2), так как после окончания процесса формирования фронта импульса напряжение на этих емкостях и ток нагрузки, протекающий через индуктивность, достигают установившихся значений и далее, в течение времени действия импульса, изменяются незначительно. Пока примем, что сопротивление нагрузки линейно.

К моменту начала формирования вершины импульса ток в индуктивности намагничивания трансформатора можно считать равным нулю. С течением времени он возрастает, что приводит к увеличению тока генератора импульсов и увеличению падения напряжения на его внутреннем сопротивлении. Значит, происходит некоторое уменьшение напряжения на сопротивлении нагрузки и протекающего через него тока. Это изменение напряжения на нагрузке будет тем больше, чем больше длительность импульса  $t_n$ , меньше индуктивность намагничивания  $L_1$  и больше сопротивление  $R_1$ . Процессы в такой схеме описываются уравнениями:

$$\begin{cases} U_2' = L_1 \cdot \frac{di_L}{dt} \\ E = U_2' + (i_L + i_2') \cdot R_1 \end{cases} \quad (2.25)$$

с начальными условиями:  $t=0$

$$U_2' = U_L = \frac{E \cdot R_2'}{R_1 + R_2'} \quad (2.26)$$

Решение этих уравнений приводит к следующему выражению для напряжения на сопротивлении нагрузки:

$$U_2' = \alpha \cdot E \cdot e^{-t/T_{nr}}, \quad (2.27)$$

где  $\alpha = \frac{R_2'}{R_1 + R_2'}$  – коэффициент передачи напряжения из первичной цепи

во вторичную,  $T_{nr} = \frac{L_1(R_1 + R_2')}{R_1 \cdot R_2'}$  – постоянная времени спада.

Поскольку обычно допустимый относительный спад не превышает 10% амплитуды импульса, то, разлагая экспоненту (2.27) в степенной ряд и ограничиваясь двумя первыми членами ряда, можно представить относительное изменение напряжения за время действия импульса как

$$\Delta = \frac{\Delta U}{\alpha \cdot E} = \frac{t_u}{T_{nr}} = \frac{t_u \cdot R_1 \cdot R'_2}{(R_1 + R'_2) \cdot L_\mu}, \quad (2.28)$$

так как при  $t=0$   $U_2' = \alpha E$ .

Тогда индуктивность намагничивания

$$L_1 \geq \frac{t_u \cdot R_1 \cdot R'_2}{(R_1 + R'_2) \cdot \Delta}. \quad (2.29)$$

Несмотря на упрощения, формула 2.29 достаточно точна.

Если импульсный трансформатор нагружен магнетронным генератором, у которого вольт-амперная характеристика резко нелинейна, то задается допустимое значение изменения не напряжения, а тока за время действия импульса.

Процессы в трансформаторной цепи после окончания импульса. Упрощенно анализ колебаний на срезе импульса может быть проведен по схеме замещения (рис. 2.2). После прохождения импульса будет происходить рассеяние энергии, запасенной в индуктивности намагничивания, индуктивности рассеяния и распределенной емкости трансформатора (в соответствующих магнитных и электрических полях). Основной процесс состоит в появлении обратного напряжения. Для ослабления колебаний, возникающих после среза импульса, включают добавочное сопротивление, шунтирующее обмотки трансформатора или диод, шунтирующий нагрузку в обратном направлении. Номинальный импульсный ток отсекающего диода должен быть равен намагничивающему току импульсного трансформатора.

### 2.1.6 Магнитные материалы, применяемые для сердечников

Требования, предъявляемые к форме выходного напряжения, в значительной степени зависят от материала, из которого изготавливается сердечник. При конструировании импульсных трансформаторов необходимо учитывать поведение магнитных материалов в различных условиях. У магнитных материалов в условиях

климатического и механического воздействия могут существенно изменяться характеристики, а следовательно, и выходные параметры трансформатора. При этом представляет интерес изменение динамической магнитной проницаемости ( $\mu_{\Delta}$ ). Она должна быть стабильной при различных климатических и механических воздействиях.

Кроме того, существенной величиной, которая влияет на габариты трансформатора, является максимально допустимое значение приращения индукции ( $\Delta B$ ) за импульс. Материал, используемый для импульсных сердечников, должен иметь малые потери на вихревые токи и перемагничивание, чтобы сердечник не перегревался при достаточно больших индукциях.

Учитывая перечисленные выше специфические особенности импульсных трансформаторов, рекомендуется применять следующие магнитные материалы: холоднокатаную текстурованную ленту из электротехнической стали; железоникелевые сплавы (пермаллой); ферриты (оксиферы).

Холоднокатаную электротехническую сталь марок 3422, 3423, 3424 (ГОСТ 21427.4-78) применяют для изготовления магнитопроводов импульсных трансформаторов, используемых для трансформации импульсов микросекундной длительности. Буквы и цифры в марках электротехнической стали обозначают следующее: первая цифра 3 – класс по структурному состоянию и виду прокатки – холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой; вторая цифра 4 – класс по содержанию кремния – свыше 2,8 до 3,8% включительно; третья цифра 2 – группа по основной нормируемой характеристике – удельные потери при магнитной индукции 1 Тл при частоте 400 Гц; четвертая цифра – порядковый номер марки стали с улучшением магнитных свойств по мере возрастания номера [32].

Пермаллой марок 34НКМП, 38НС, 50НП, 50НГ 80НХС, 76НХД, 79НМ, 79НМУ, 80НХС и др. (ГОСТ 10160-75) применяют для изготовления магнитопроводов импульсных трансформаторов, используемых для трансформации коротких импульсов большой мощности с жесткими требованиями к форме импульса и особенно к спаду его вершины. Названия марок состоят из буквенных обозначений элементов и двузначного числа впереди, определяющего в процентах содержание никеля, входящего в основу сплава. Химические элементы в марках сплавов обозначаются следующими буквами: Д – медь, К – кобальт, М – молибден, Н – никель, С – кремний, Х – хром. Буквой (П) обозначаются сплавы, обладающие прямоугольной петлей гистерезиса.

Марки сплавов с улучшенными свойствами имеют в конце обозначения букву «У».

Поскольку пермаллоевые сплавы обладают малой величиной коэрцитивной силы, то они с успехом применяются в режиме с размагничиванием (снижением остаточной индукции  $B_r$ ). Режим размагничивания позволяет увеличить приращение индукции за импульс, что очень важно в мощных импульсных трансформаторах (так как габариты трансформатора уменьшаются). Это приводит к увеличению максимальной магнитной проницаемости на частном цикле и благоприятно сказывается на плоской части импульса.

Следует отметить как недостаток сердечников из пермаллоевых сплавов их чувствительность к механическим действиям. Это заставляет конструктора принимать специальные меры и помещать сердечник в коробки из изоляционного материала, защищая их таким образом от механических воздействий. Широко применяются пермаллоевые сплавы 79НМ и 80НХС.

Ферриты марок 300НН, 1000НН, 1500НМ и др. используют для изготовления магнитопроводов импульсных трансформаторов, работающих с большой частотой следования. Обозначение марок ферритов расшифровывается следующим образом: число впереди – относительная магнитная проницаемость; буквы обозначают добавку к окислам железа окислов других металлов – НН – никеля-цинка, НМ – марганца-цинка и т.д.

Ферриты имеют весьма низкую индукцию насыщения ( $0,4 \div 0,5$  Тл), большую амплитудную и температурную нестабильность магнитной проницаемости, большую чувствительность к подмагничивающему полю. Это ограничивает их использование в области низких частот и средних полей. Но в слабых полях ферриты обладают высокой магнитной проницаемостью, не зависящей от частоты.

Процесс изготовления изделий из феррита сводится к тому, что в смесь предварительно обожженных и тонко измельченных в порошок окислов металлов добавляют пластификатор (обычно поливиниловый спирт) и из полученной массы под большим давлением прессуют изделия. Изделия подвергают обжигу в окислительной среде (кислороде) при температуре  $1100\text{—}1400^\circ\text{C}$ , при этом происходит спекание твердого раствора феррита. Усадка ферритов при обжиге может достигать 20%, в результате трудно выдерживать размеры сердечника. Это является недостатком ферритов.

Ферриты – твердые и хрупкие материалы, не позволяющие производить обработку резанием, но допускают только шлифовку и полировку [32].

### **2.1.7 Конструкция и технология изготовления сердечников**

Сердечник является одним из основных элементов трансформатора. Технические требования, предъявляемые к импульсным трансформаторам, привели к появлению новых конструкций сердечников, разработке новых магнитных материалов и технологии их изготовления [29,30,32].

В импульсных трансформаторах широко применяются навитые ленточные сердечники. При толщине пластин меньше 0,1 мм существующая конструкция шихтованных сердечников делается нетехнологичной, и поэтому в таких случаях возможно применение только навитых ленточных сердечников. Большая скорость изменения магнитного потока в импульсных трансформаторах приводит к возникновению в сердечнике мощных вихревых токов. Для их уменьшения необходимо изготавливать магнитную систему из очень тонкого материала (0,02—0,08 мм).

Ленточные, навитые сердечники дают возможность также полностью использовать текстурованные свойства магнитных материалов. При направлении магнитного потока вдоль прокатки (текстуры) уменьшаются потери в стали и намагничивающий ток. Навитые сердечники получили большое распространение еще и потому, что их производство можно полностью автоматизировать, обеспечить минимальные отходы стали, уменьшить габариты и вес. Все это выгодно отличает навитой сердечник от шихтованного. Ленточные сердечники однофазных трансформаторов по конструктивному исполнению разделяются на стержневые, броневые и тороидальные. Эти типы сердечников могут изготавливаться как разъемными, так и неразъемными.

Сердечники изготавливаются из узкой длинной ленты электротехнической стали (или специальных сплавов) требуемой толщины. Ширина ленты подбирается по стандарту. В случае необходимости производится ее продольная резка, которая выполняется с таким расчетом, чтобы полученные ленты использовались в других трансформаторах. Путем машинной навивки на металлическую оправу цилиндрической, квадратной или прямоугольной формы получают замкнутый сердечник. Замкнутые сердечники имеют малое магнитное сопротивление потоку, проходящему вдоль ленты сердечника. Но при использовании замкнутых сердечников затрудняется намотка обмотки. Обмотку

нельзя изготовить заранее. Она наматывается вручную, что нетехнологично и мало производительно.

Однако сердечники из сплавов делают неразрезными, так как магнитные свойства сплавов резко ухудшаются при механической обработке.

Готовые витые сердечники из электротехнической стали разрезают на две половинки. Половинки сердечника вставляют в заранее намотанную на станке катушку, а затем обе половинки стягивают стальной лентой толщиной  $0,25 \div 0,5$  мм. Места разъема сердечника должны быть очень хорошо подогнаны, чтобы обеспечить оптимальное значение воздушного зазора.

Современная технология изготовления разъемных сердечников из электротехнической холоднокатаной стали состоит из следующих основных операций: резка ленты по ширине (в случае надобности); снятие заусенцев; обезжиривание ленты для равномерного нанесения изоляции; навивка сердечника с одновременным нанесением изоляции; отжиг – при температуре  $700 \div 1000^\circ\text{C}$  в безокислительной атмосфере (водород или вакуум), для восстановления магнитных свойств изделия; пропитка (клеем БФ-4 или другим составом) для обеспечения монолитности и уменьшения шума при работе трансформатора; шлифовка торцов или притирка и контроль качества.

Технология навитых ленточных сердечников из пермаллоевых сплавов и из стали имеет много общего.

Сердечники, изготовленные из пермаллоевых сплавов, делаются неразъемными. Технология их изготовления сводится к следующим основным операциям: продольная резка ленты; обезжиривание; навивка сердечника с одновременным нанесением изоляции ( $3 \div 8$  микрон); закрепление конца ленты точечной сваркой; отжиг; контроль качества изготовления и магнитных свойств сердечника.

Следует отметить, что обработка ленты из железоникелевых сплавов и особенно резка ленты снижает магнитную проницаемость и увеличивает потери в сердечнике.

Существует много способов покрытия ленты сердечника, которые должны создавать надежную изоляцию между ее витками, обеспечивать высокое значение коэффициента заполнения сечения стержня сталью, допускать при необходимости отжиг и иметь достаточно простую технологию. Известны следующие основные способы изоляции: припудривание ленты тальком, накатывание на ленту различных суспензий (для лент толще  $0,02$  мм), электрофорезная изоляция, оксидирование ленты, т. е. создание на ее поверхности тонкого слоя окисла.

Припудривание ленты тальком производится при навивке сердечника протягиванием ленты через камеру с молотым тальком. Тальк при этом осаждается на поверхности ленты слоем в несколько микрон, создавая надежную изоляцию.

В качестве изоляционного состава при накатывании изоляции используется водная суспензия окиси алюминия и окиси магния (соотношение окислов 4:1) и др. Суспензия заливается в ванну, куда помещен вращающийся ролик. Лента плотно прижимается к выступающей из суспензии поверхности ролика. При вращении ролика изоляционная суспензия накатывается на ленту.

Разработан также способ отложения изоляции на ленте методом гальваностегии (метод катафореза). К изолируемой ленте подводится положительный потенциал по отношению к электролитической ванне, заполненной суспензией кремниевой кислоты ( $H_2SiO_4$ ) в ацетоне. На ленте в виде сухого остатка осаждается слой кремниевой кислоты (2 микрона). После навивки сердечник отжигается в водороде и при этом образуется двуокись кремния ( $SiO_2$ ), которая и служит изоляцией.

Оксидирование ленты из холоднокатаной стали производится до навивки в свободно свернутых рулонах, нагреваемых до  $650^\circ C$  с доступом воздуха.

У готовых сердечников проверяются магнитные свойства на постоянном токе (начальная проницаемость, максимальная проницаемость, коэрцитивная сила и индукция насыщения). В импульсном режиме при заданной длительности импульса и приращении индукции определяется действующая магнитная проницаемость. Готовые сердечники проверяются также на механическую прочность (удары, тряску, вибрацию) и климатическое воздействие (влажность, мороз, высотность). При этих испытаниях действующая магнитная проницаемость должна изменяться в допустимых пределах.

### **2.1.8 Конструкция и технология изготовления обмоток**

Импульсные трансформаторы выполняются однофазными двухобмоточными и многообмоточными. Чаще всего применяются слоевые обмотки цилиндрического типа, изготавливаемые из круглого медного провода (рис. 2.8) [29]. Изоляция провода должна отвечать требованиям электрической и механической прочности, а также удовлетворять климатическим условиям, в которых будет работать импульсный трансформатор. Для изготовления обмоток можно

рекомендовать марку провода ПЭТВ (провод изолированный нагревостойкой, высокопрочной эмалью – МРТУ 2.43.12- 61). Эта марка

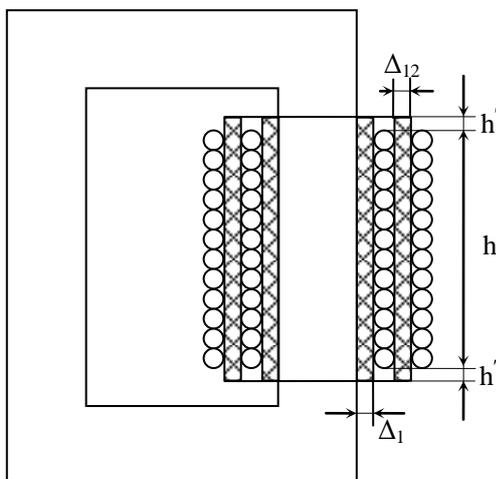


Рис. 2.8. Схематическая конструкция импульсного трансформатора с цилиндрическими обмотками

провода обладает повышенной стойкостью к тепловым ударам и является тропикоустойчивой. Применяется также марка провода ПЭВ-2 (провод, изолированный высокопрочной эмалью с утолщенной изоляцией – ГОСТ 7262-54) и др. В импульсных трансформаторах обмотки обычно выполняются квадратной или прямоугольной формы, так как они повторяют форму поперечного сечения стержня сердечника. Обмотки наматываются на каркас, гильзу или коробку, в которую закладывается сердечник. Эти детали служат изоляцией от сердечника и образуют жесткую

основу для обмоток. Они изготавливаются из кабельной бумаги, стеклоткани, текстолита, гетинакса и др. материалов.

С целью получения минимальных паразитных параметров изоляционные расстояния между обмотками в случае необходимости могут быть увеличены. Выбор материала изоляции между обмотками определяется электрической прочностью, рабочей температурой трансформатора, частотой повторения импульсов и надежностью в работе. Следует отметить, что материалы, применяемые при высоких частотах, должны иметь малую диэлектрическую проницаемость и малые потерн ( $\epsilon = 1-2,5$ ;  $tg\delta$  порядка  $10^{-4} - 10^{-3}$ ) [29].

В качестве изоляции между обмотками в сухих импульсных трансформаторах применяются пленочные материалы типа фторопласта-4, лавсана и др. Фторопласт-4 (политетрафторэтилен) — органический, высокополимерный, термопластичный материал, обладающий высокими электроизоляционными свойствами и большой химостойкостью. Он морозостоек, негорюч, негигроскопичен, относится к классу С нагревостойкости (допустимая температура  $250^{\circ}\text{C}$ ) (ГОСТ 10536-66). Хорошими электроизоляционными и другими свойствами обладают также пленки из полиэтилентерефталата (лавсан), ГОСТ 8865-58). Однако фторопласт-4 имеет малое сопротивление поверхностному разряду и поэтому слои пленки необходимо чередовать

со слоями конденсаторной или тонкой кабельной бумаги. Расстояние выбирается исходя из допустимого поверхностного градиента потенциала порядка  $0,5 \div 1$  кВ/мм. При больших средних мощностях для улучшения теплоотвода от сердечника и обмоток трансформаторы помещают в специальный бак с трансформаторным маслом.

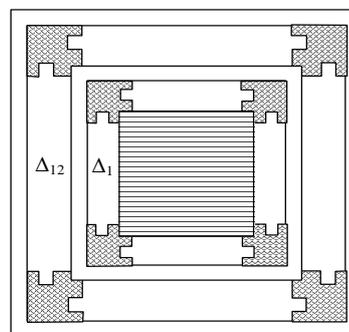
В высоковольтных импульсных трансформаторах, залитых кремнийорганической жидкостью, для междуслойной изоляции применяется пропиточная бумага (ГОСТ 3441-63). Междуслойная изоляция у краев слоя обычно выступает за торцы обмоток (рис. 2.8), а в случае надобности подворачивается таким образом, чтобы не могло произойти западание витков из слоя в слой. С этой же целью применяют подклейку проводов.

Для масляных трансформаторов лучшим типом изоляции следует считать кабельную бумагу и электрокартон марки ЭМ. Конструкция обмоток и изоляции также определяется, как на рис. 2.8, но изоляционные расстояния  $h'$  и  $h''$  выбираются исходя из допустимого поверхностного градиента в  $2 - 3$  кВ/мм. Для уменьшения емкости обмоток желательно использовать масляную изоляцию, так как у масла диэлектрическая проницаемость меньше, чем у бумажно-масляной изоляции. Пример конструкции такой обмотки приведен на рис. 2.9.

По длине сердечника накладываются профилированные угольники из изоляционного материала, на которые наносится первичная обмотка. Точно также выполняется и вторичная обмотка. При помещении трансформатора в бак изоляционные промежутки заполняются маслом, имеющим относительно низкую диэлектрическую проницаемость. В такой конструкции хорошо отводится тепло.

Кроме цилиндрических обмоток, в импульсных трансформаторах большой мощности при напряжениях, не превышающих несколько десятков киловольт, используются дисковые обмотки, намотанные широкой и тонкой проводящей лентой (рис. 2.10). Конические обмотки, в которых толщина изоляции пропорциональна действующему между отдельными элементами обмотки напряжению (рис. 2.11), используются в трансформаторах на высокое напряжение порядка сотен киловольт.

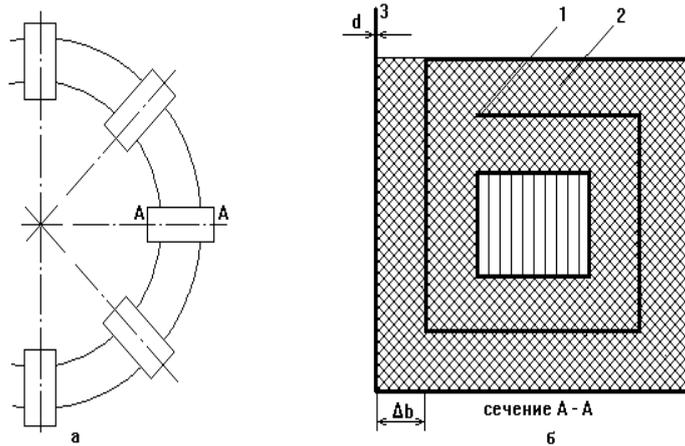
Для уменьшения индуктивности рассеяния и потерь в обмотках, связанных с поверхностным эффектом и эффектом близости, обмотки



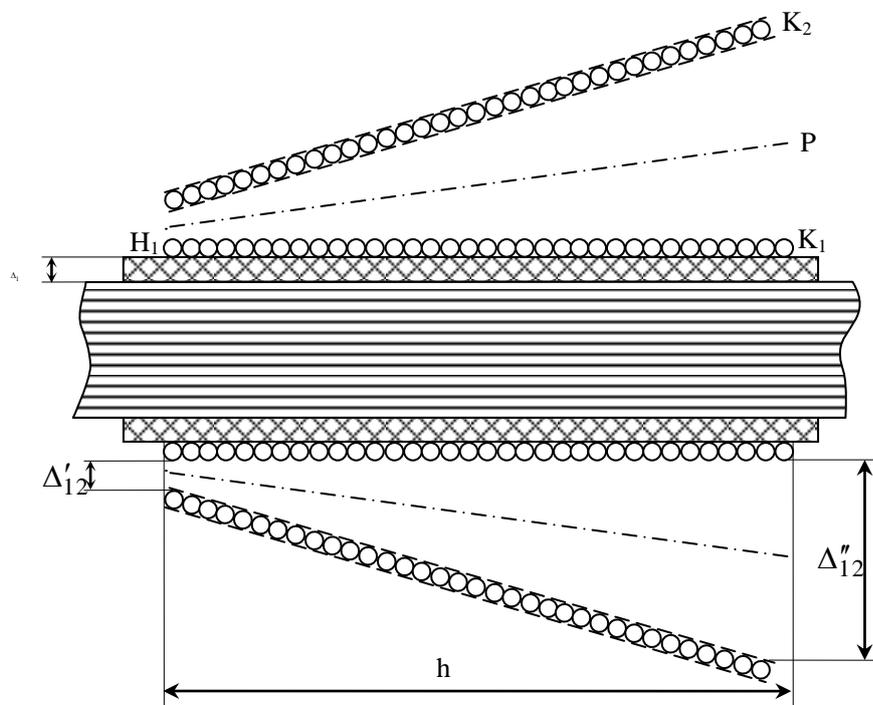
**Рис. 2. 9.** *Вариант конструкции с масляной изоляцией*

иногда выполняются несколькими намотанными параллельно тонкими проводами или тонкими шинами. При этом уменьшается полный габарит намотки, что и ведет к уменьшению рассеяния. Сечение проводов выбирается исходя из условий нагрева по максимально

допустимой плотности тока. Поскольку в большинстве случаев обмотки выполняются однослойными или имеют небольшое число слоев, то условие отвода тепла от обмоток в импульсном трансформаторе значительно лучше, чем в силовых трансформаторах. Поэтому при сухом исполнении трансформатора допустима плотность тока в проводах обмоток до  $5-8 \text{ А/мм}^2$ , а при масляном до  $20 \text{ А/мм}^2$  [29].



**Рис. 2.10.** Схематическая конструкция дисковой обмотки, намотанной на торроидальном сердечнике: а – размещение секций, б – сечение секции



**Рис. 2.11.** Схематическая конструкция конической обмотки

Исполнение трансформаторов на напряжение 10-50 кВ должно быть масляным. Наиболее распространенные виды изоляции – кабельная бумага или электрокартон. Конструкция обмоток и изоляции также определяется рис. 2.9, но изоляционные расстояния  $h'$  и  $h''$  выбираются исходя из допустимого поверхностного градиента потенциала в 2-3 кВ/мм.

Особое внимание уделяют качеству пропитки изоляции. Маслом должны быть заполнены все пустоты, так как из-за большого различия в диэлектрической проницаемости воздуха и материала изоляции в местах, где остался воздух, возникают скачки градиента потенциала, что ведет к пробое изоляции. Поэтому пропитка изоляции маслом должна проводить под вакуумом в 10÷20мм рт.ст. Бумажная изоляция в масле имеет диэлектрическую проницаемость в 2÷2,5 раза большую, чем трансформаторное масло. Поэтому, для уменьшения емкости обмоток желательна чисто маслянная изоляция. В трансформаторах при напряжениях свыше 50 кВ конструкцию обмоток определяет достаточная электрическая прочность изоляции, которая зависит от однородности поля в пространстве между обмотками и в точках высокого потенциала.