

М.У.

Уч.З

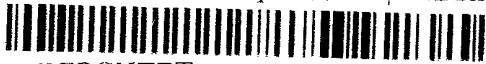
№2154

Проектирование трансфор-

03-11605

маторов для п\`04Вып. 2

МОСКОВСКИЙ



УНИВЕРСИТЕТ

ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)

---

Кафедра электрических машин

Утверждено

редакционно-  
издательским советом  
университета

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ  
ДЛЯ ПИТАНИЯ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ,  
ТЕЛЕМЕХАНИКИ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ  
СИСТЕМ**

Методические указания к курсовому проектированию  
по дисциплине «Электрические машины» для студен-  
тов специальности «Автоматика, телемеханика и  
связь»

Выпуск 2

Москва -2004

**УЧЕБНАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
МИИТ**

УДК 621.314.2

П - 79

Глущенко М.Д., Васильев Е.В., Реморов А.А., Смазнов П.П. Проектирование трансформаторов для питания устройств автоматики, телемеханики, и микропроцессорных систем. Методические указания к курсовому проектированию – М.: МИИТ, 2004 – 86 с.

Методические указания предназначены для курсового проектирования силовых однофазных трансформаторов с воздушным охлаждением. В указаниях приведены также справочные данные (по сталям, обмоточным проводам, электроизоляционным материалам и др.). Представлены также отдельные элементы конструкций маломощных трансформаторов.

© Московский государственный  
университет путей сообщения  
(МИИТ), 2004

## Введение

Трансформатор - статический электромагнитный аппарат, служащий для преобразования энергии переменного тока одного напряжения в другое при неизменной частоте.

Подводимая к трансформатору мощность равна отводимой (потерями внутри трансформатора пренебрегаем). Поэтому преобразование величины напряжения у трансформатора происходит с одновременным преобразованием величины тока. Чем выше напряжение трансформатора на выходе, тем меньше ток.

Трансформаторы разделяются на:

- повышающие и понижающие;
- однофазные и многофазные (трехфазные);
- двухобмоточные и многообмоточные.

Обмотка, которая получает энергию, носит название первичной. Обмотка, от которой отводится преобразованная энергия, называется вторичной.

К маломощным трансформаторам принадлежат трансформаторы, номинальная мощность которых находится в пределах от единиц, десятков ВА до 1000 ВА.

Наибольшее применение среди трансформаторов малой мощности имеют силовые трансформаторы, т.е. трансформаторы, предназначенные для питания электрических цепей различных устройств и схем. Такие трансформаторы применяются в устройствах автоматики, телемеханики, связи, в радиотехнике и служат для питания различных цепей управления, сигнализации, обмоток реле, для питания цепей анодов, схем с полупроводниковыми выпрямителями и т.д.

Силовые трансформаторы малой мощности обычно выполняются однофазными, имеют воздушное охлаждение

Номинальное напряжение их обмоток не превышает 1000 В, т.е. эти трансформаторы относятся к

низковольтным. Частота питания их в большинстве случаев для трансформаторов общего применения  $f = 50$  Гц, но применяется также, повышенная частота  $f = 400$  Гц и выше.

В данном руководстве дан выбор основных размеров сердечника с использованием нормализованных рядов, как имеющий основное применение в практике, но предусмотрен также, и вариант произвольного выбора размеров, который может оказаться необходимым в некоторых случаях при проектировании, например, если использование стандартного сердечника не удовлетворяет по какой-либо причине техническим требованиям, заданным при проектировании.

В настоящем руководстве используется система единиц СИ с применением долевых и кратных значений от основных единиц (например, см, мм и др.); применение долевых значений длины вместо основной - метра оказывается более удобным при расчете маломощных трансформаторов, геометрические размеры которых соответственно малы.

## 1. Основное расчётное уравнение и особенности расчёта маломощных трансформаторов

При расчете, маломощных трансформаторов для выбора главных размеров используют основное уравнение, определяемое выражением:

$$Q_c^* \cdot Q_{ок} = \frac{S_1 \cdot 10^2}{2,22 \cdot f \cdot B_c \cdot j \cdot K_c \cdot K_{ок}} \text{ (см}^4\text{)},$$

где  $S_1 = U_1 \cdot I_1$  - полная мощность, потребляемая первичной обмоткой трансформатора (ВА);

$f$  - частота (Гц);

$Q_{ок}$  - площадь окна сердечника (см<sup>2</sup>);

$Q_c$  - геометрическое сечение сердечника (см<sup>2</sup>);

$B_c$  - индукция (амплитудное значение) в стержне (Тл);

$j$  - плотность тока в обмотках (А/мм<sup>2</sup>);  
 $K_c$  - коэффициент заполнения сердечника  
сталью;

$K_{oc}$  - коэффициент заполнения окна  
сердечника обмоткой;

Основное уравнение определяет связь между мощностью и основными геометрическими размерами трансформатора. Как видно, эта связь определяется частотой и электромагнитными нагрузками - индукцией и плотностью тока. Для данной мощности при заданной частоте размеры трансформатора тем меньше, чем больше индукция и плотность тока и наоборот - чем меньше величины индукции и плотности тока, тем больше размеры трансформатора. Основные размеры трансформатора определяют его массу, от них зависит и его стоимость.

Однако выбор рациональной величины индукции и плотности тока обусловлен не только размерами и стоимостью трансформатора; значения этих величин определяют важнейшие эксплуатационные свойства трансформатора - его потери, нагрев, к.п.д.

Выбор рациональной величины индукции обусловлен рядом факторов: так, увеличение индукции уменьшает размеры трансформатора, но приводит к увеличению потерь в стали, т.е. к увеличению нагрева и снижению к.п.д.

При увеличении индукции увеличивается намагничивающий ток ( $I_{om}$ ); с увеличением последнего при заданной мощности возрастает и номинальный первичный ток ( $I_{1н}$ ), что требует, во избежание повышенного нагрева, увеличение сечения меди обмотки; при этом увеличиваются размеры трансформатора.

Таким образом, чрезмерное увеличение индукции в маломощных трансформаторах может привести

не к уменьшению, к увеличению размеров трансформатора, и рациональный выбор величины индукции должен быть сделан с учетом действия всех противоречивых факторов.

Плотность тока в значительной степени определяет массу, стоимость и характеристики трансформатора. При увеличении плотности тока масса меди и стоимость трансформатора уменьшаются, но возрастают потери в меди, следствием чего является увеличение нагрева обмоток и уменьшение к.п.д.

Кроме того, при увеличении плотности тока увеличивается падение напряжения в трансформаторе, т. е. напряжение на зажимах вторичных обмоток будет в большей мере зависеть от величины нагрузки и температуры обмоток.

При уменьшении плотности тока потери в меди, нагрев трансформатора уменьшаются, но масса меди и стоимость увеличиваются.

Основным фактором, определяющим величину плотности в большинстве маломощных трансформаторов, является величина допустимого нагрева обмоток, поэтому выбор плотности тока определяется мощностью трансформатора, условиями его охлаждения, конструкцией и другими факторами. Известно, чем меньше мощность трансформатора, тем лучше условия его охлаждения, так как выделяющимся потерям соответствует относительно большая поверхность охлаждения.

Каковы бы ни были факторы, определяющие выбор индукции и плотности тока, спроектированный трансформатор должен иметь нагрев, не превышающий допустимый, так как в противном случае разрушается изоляция, следовательно, уменьшается надежность, и срок службы трансформатора резко сокращается.

Исследованиями установлено, что, например, для изоляции класса А повышение температуры на каждые  $8^{\circ}\text{C}$  выше нормы снижает срок службы её вдвое. Величина допустимой температуры определяется классом примененной изоляции.

Поэтому приведенный ниже расчет трансформатора производится исходя из основного требования - получения допустимого нагрева.

Дополнительным требованием, принятым в расчете, является ограничение величины намагничивающего тока.

Что касается к.п.д., то в маломощных трансформаторах, в отличие от трансформаторов большой и средней мощностей, получение наивыгоднейшей его величины не является, как правило, обязательным требованием, так как сама мощность таких трансформаторов относительно мала. Но, учитывая эксплуатационные расходы и все возрастающее количество применяемых маломощных трансформаторов, следует при проектировании стремиться к получению достаточно хорошего к.п.д.; практические величины к.п.д. для маломощных трансформаторов указаны в таблице 1.

Из основного уравнения видно, что размеры, а, следовательно, и масса трансформатора заданной мощности уменьшаются с повышением частоты. Поэтому трансформаторы, работающие в установках специального назначения, в которых весьма важным является требование малой массы, выполняются на повышенную частоту питания - 400 Гц, а в некоторых случаях - 500 Гц и 1000 Гц.

Следует отметить, что при повышении частоты размеры трансформатора уменьшаются в меньшей степени, чем увеличивается частота, так как при этом следует уменьшить величину индукции, по сравнению с таковой при 50 Гц, во избежание чрезмерного увели-

чения потерь в стали. При повышенной частоте относительное значение намагничивающего тока уменьшается по сравнению с таковым при  $f = 50$  Гц.

При проектировании маломощных трансформаторов, кроме указанных выше требований, определяющих технические характеристики трансформаторов, во многих случаях предъявляется требование минимальной стоимости - для трансформаторов общего, массового применения, или минимальной массы - для трансформаторов специального применения, например, применяемых в переносных радиостанциях.

При заданных мощности, частоте и выбранных величинах индукции и плотности тока из основного уравнения получается произведение  $Q_c \cdot Q_{ок}$ .

Исследования показывают, что можно спроектировать маломощный трансформатор на заданное условие - превышение температуры (перегрев) или на заданную величину  $U$  с соотношениями сечений стержня (сердечника) и окна, обеспечивающими минимальную стоимость или минимальную массу. Следовательно, для каждого конкретного требования существует так называемая оптимальная геометрия, т.е. наилучшее соотношение между основными размерами трансформатора, причем для выполнения различных требований оптимальная геометрия получается различной. Анализ показывает, что невозможно создание единой оптимальной геометрии для удовлетворения различных требований при различных условиях.

В практике проектирования маломощных трансформаторов применяются обычно нормализованные сердечники, разработанные с учетом различных технико-экономических условий.

При пользовании ими надо иметь в виду, что ряды этих нормализованных сердечников во многих случаях не удовлетворяют условиям оптимальной геометрии (по причине, указанной выше).



## 2. Определение токов в обмотках трансформатора

Токи во вторичных обмотках определяются по следующим формулам:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2}(A), \quad I_3 = \frac{S_3}{U_3}(A),$$

Ток в первичной обмотке определяется из выражения:

$$I_1 = \frac{P_{II}}{U_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi}(A),$$

где  $P_{II}$  - суммарная активная мощность вторичных обмоток трансформатора в Вт, равная

$$P_{II} = S_2 \cdot \cos \varphi_2 + S_3 \cdot \cos \varphi_3;$$

$\eta$  - к.п.д трансформатора - отношение активной отдаваемой мощности к активной потребляемой мощности, величина его определяется в результате расчета. Здесь принимается предварительная величина к.п.д., которая может быть взята из табл.1, где  $S_{II} = S_2 + S_3$  (ВА) - сумма полных мощностей всех вторичных обмоток.

Таблица 1.

К.п.д. трансформатора броневое типа.

Частота, Гц	Суммарная активная мощность вторичных обмоток $S_{II} = S_2 + S_3$		
	50 - 150	150 - 300	300 - 500
f = 50	0,8 - 0,9	0,9 - 0,93	0,93 - 0,94
f = 400	0,87 - 0,94	0,94 - 0,96	0,96

Коэффициент мощности первичной обмотки  $\cos \varphi_1$  также неизвестен в начале расчёта, т.к. не определён ещё намагничивающий ток трансформатора  $I_{0н}$ .

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1} = \frac{I_{1a}}{\sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}},$$

где  $I_{1a}$  – активная,  $I_{1p}$  – реактивная составляющие тока первичной обмотки. Они определяются из следующих выражений:

$$I_{1a} = \frac{S_2 \cdot \cos \varphi_2 + S_3 \cdot \cos \varphi_3 + \dots + S_n \cdot \cos \varphi_n}{\eta \cdot U_1};$$

$$I_{1p} = \frac{S_2 \cdot \sin \varphi_2 + S_3 \cdot \sin \varphi_3 + \dots + S_n \cdot \sin \varphi_n}{\eta \cdot U_1}.$$

Предварительная величина намагничивающего тока  $I_{0m}$  может быть взята для маломощных трансформаторов при частоте  $f = 50$  Гц в пределах 35 -50% от  $I_{1a}$  при активной нагрузке и несколько меньшей – при смешанной активно-индуктивной нагрузке трансформаторов.

Последнее объясняется тем, что во втором случае величина реактивной составляющей первичного тока определяется не только намагничивающим током, но и реактивным током, определяемым нагрузкой.

При частоте  $f = 400$  Гц относительное значение намагничивающего тока должно быть меньшим, чем при частоте  $f = 50$  Гц, т.е. порядка 10 – 20% от  $I_{1a}$ .

Величина намагничивающего тока в последующем расчёте уточняется.

Определённая таким образом величина тока в первичной обмотке  $I_1$  является предварительной и в дальнейшем процессе расчёта уточняется.

### 3. Выбор электромагнитных нагрузок магнитной индукции и плотности тока

А. Величина допустимой магнитной индукции в сердечнике обусловлена для маломощных трансформаторов факторами, отмеченными выше. Она зависит также от мощности, частоты, типа трансформатора, числа стыков, материала сердечника. При частоте 50 Гц для пластинчатых сердечников броневое и стержневого типа с числом стыков до двух (по контуру магнитной линии) при применении горячекатанной стали марок 1511, 1512, 1513, 1514 индукция в стержне может быть принята в пределах  $B_c = 1,2 \div 1,3$  Тл при мощности трансформатора от десятка до нескольких сот ВА.

Если броневой или стержневой трансформатор выполнен с уширенным ярмом, то можно выбрать  $B_c = 1,25 \div 1,35$  Тл.

Если трансформатор стержневого типа выполнен с числом стыков в сердечнике до четырёх (что нецелесообразно для маломощных трансформаторов), то величина индукции в стержне должна быть взята приблизительно на 5 – 10% меньше чем при числе стыков до двух.

В броневых и стержневых трансформаторах с ленточными сердечниками из холоднокатанной стали марок 3411, 3412, 3413, 3414 индукция в стержне может быть взята примерно  $B_c = 1,75 \div 1,88$  Тл. Такая же индукция может быть принята и для броневых трансформаторов с пластинчатым сердечником.

Марки электротехнических сталей расшифровываются следующим образом: первая цифра - вид прокатки, структурное состояние (1-горячекатанная изотропная, 2 - холоднокатанная изотропная, 3 - холоднокатанная анизотропная); вторая цифра - содержание

кремния (0-до 0,4%, 1- от 0,4 до 0,8%, 2 - от 0,8 до 1,8%, 3- от 1,8 до 2,8%, 4- от 2,8 до 3,8%, 5- от 3,8 до 4,8%); третья цифра - группа по основной нормируемой характеристике (0- удельные потери при магнитной индукции 1,75 Тл на частоте 50 Гц, 1- удельные потери для магнитной индукции 1 Тл на частоте 400 Гц); четвертая цифра - порядковый номер типа стали.

При частоте  $f = 400$  Гц при выборе индукции в сердечнике можно руководствоваться данными таблице 2.

Таблица 2  
Значение магнитной индукции (Тл)

Тип сердечника	Материал сердечника	Суммарная полная мощность вторичных обмоток $S_{II}$ , ВА			
		15 - 50	150-300	300-500	500-1000
Индукция					
Броневой пластинчатый сердечник	1511, 1512, 1513	1,25-1,3	1,3-1,35	1,35-1,4	1,4
Броневой ленточный сердечник	3411, 3412	1,75-1,8	1,8-1,85	1,85-1,9	1,9
Стержневой ленточный сердечник	3413, 3414	1,8-1,82	1,82-1,85	1,85-1,9	1,9

Примечание: Для броневого пластинчатого сердечника указана величина индукции в стержне.

**Б. Плотность тока** определяется с учётом различных факторов, отмеченных выше.

Рекомендуемые различными авторами величины плотности тока значительно отличаются друг от друга.

В среднем можно принимать приближенно для трансформаторов с суммарной вторичной мощностью до 100 ВА при частоте 50 Гц плотность тока  $j = 3,5 \div 4,5 \text{ А/мм}^2$ , а при мощности от 100 ВА до 300 ВА  $j = 2,5 \div 3,5 \text{ А/мм}^2$ .

При более точном выборе плотности тока следует учитывать конструкцию сердечника (тип, а также его материал). Так при частоте 50 Гц можно выбрать величину плотности тока, руководствуясь следующими данными:

а) для трансформаторов с броневым пластинчатым сердечником типа ШУ (т.е. с уширенным ярмом) и стержневым ленточным сердечником типа ПЛ (с двумя катушками) в пределах мощности от 30 ВА до 100 ВА значение  $j$  можно принять от 4,5 до 3,5 А/мм<sup>2</sup>, а мощностью от 100 ВА до 300 ВА значение  $j$  - от 3,5 до 2,4 А/мм<sup>2</sup>.

б) для трансформаторов с броневым ленточным сердечником типа ШЛ и броневым пластинчатым сердечником типа Ш мощностью в пределах от 30 ВА до 100 ВА значение плотности тока можно принять соответственно от 2,8-2,7 А/мм<sup>2</sup> до 2,5-2,2 А/мм<sup>2</sup>, а мощностью от 100 ВА до 300 ВА - от 2,5-2,2 А/мм<sup>2</sup> до 2,2-1,7 А/мм<sup>2</sup>.

При частоте 400Гц можно выбирать ориентировочно плотность тока в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3

Значение плотности тока в обмотках

Тип сердечника	Материал сердечника	Суммарная полная мощность вторичных обмоток $S_{II}$ , ВА			
		15-50	50-150	150-300	300-1000
		Плотность тока (А/мм <sup>2</sup> )			
Броневой пластинчатый	1511, 1512, 1513, 1514	5,5-5,0	5,0-4,0	4,0-2,8	2,8-1,5
Броневой ленточный	3411, 3412	6,0-4,5	4,5-3,5	3,5-2,5	2,5-1,5
Стержневой ленточный	3413, 3414	6,0-5,2	3,5-2,5	2,5-2,0	2,0-1,5

#### 4. Определение основных размеров сердечника

А. Для определения главных размеров сердечника используется основное уравнение:

$$Q_c \cdot Q_{ок} = \frac{S_1 \cdot 10^2}{2,22 \cdot f \cdot B'_c \cdot j' \cdot K_c \cdot K_{ок}} \text{ (см}^4\text{)},$$

где  $B'_c$  - индукция (амплитудное значение) в стержне (Тл), здесь подразумевается предварительное значение индукции (поэтому знак "штрих"), которое при дальнейшем расчете уточняется;

$j'$  - плотность тока в обмотках (ориентировочное значение (А/мм<sup>2</sup>)); остальные обозначения см. в главе 1.

Величины  $B_c'$  и  $j'$  выбираются в соответствии с гл.3. Величина коэффициента  $K_c$  зависит от толщины стали, вида изоляции пластин, технологии изготовления сердечника. Она дается в таблице 4.

Таблица 4.

Коэффициент заполнения  $K_c$  сердечника сталью для пластинчатых сердечников

Толщина пластин, мм	Вид изоляции		
	бумага	лак	Без спец. изоляции
0,5	0,89	0,94	0,97
0,35	0,85	0,91	0,95
0,2	0,77	0,85	0,91
0,1	0,6	0,7	0,8

для ленточных сердечников

Толщина ленты, мм	Способ изготовления сердечника		
	Навивка ленты		Штамповка и гибка ленты
	Изоляция ленты- оксидная, тальк и т.д.		
	Тороидальные сердечники	Броневые и стержневые сердечники	
0,5	-	-	
0,35	0,93	0,92	0,93
0,15-0,2	0,92	0,88-0,9	0,9-0,1
0,08	0,92	0,85	0,87
0,05	0,87	0,75	0,85

Величина  $K_{ок}$  зависит от многих факторов: абсолютных размеров окна, сечения провода, массы изоляции, технологии намоточных работ и т.п. По данным практики значение  $K_{ок}$  может выбираться для

маломощных трансформаторов в соответствии с таблицей 5.

Таблица 5.

Значение коэффициента заполнения окна  $K_{ок}$

Тип трансформатора	Частота, Гц	Суммарная полная мощность вторичных обмоток $S_{П}$ , ВА			
		15-50	51-150	151-300	301-1000
Броневой	50	0,22-0,28	0,18-0,34	0,34-0,36	0,37-0,38
Стержневой		0,18-0,26	0,26-0,30	0,30-0,33	0,33-0,35
Броневой	400	0,21-0,25	0,25-0,28	0,28-0,30	0,30-0,37
Стержневой		0,17-0,22	0,22-0,25	0,25-0,27	0,27-0,35

Приближенно для маломощных трансформаторов от 25 до 200 ВА при частоте 50 Гц можно принимать  $K_{ок} = 0,2-0,3$ .

После определения величины  $Q_c \cdot Q_{ок}$  необходимо произвести выбор основных размеров трансформатора.

Геометрическое сечение стержня броневого и стержневого трансформатора равно  $Q_c = a \cdot b$  (см<sup>2</sup>), геометрическое сечение сердечника тороидального трансформатора  $Q_c = a \cdot b$  (см<sup>2</sup>); площадь окна броневого и стержневого сердечников равна  $Q_{ок} = c \cdot n$  (см<sup>2</sup>), площадь окна тороидального сердечника:

$$Q_{ок} = \frac{\pi \cdot c^2}{4} \text{ (см}^2\text{) (рис. 1).}$$



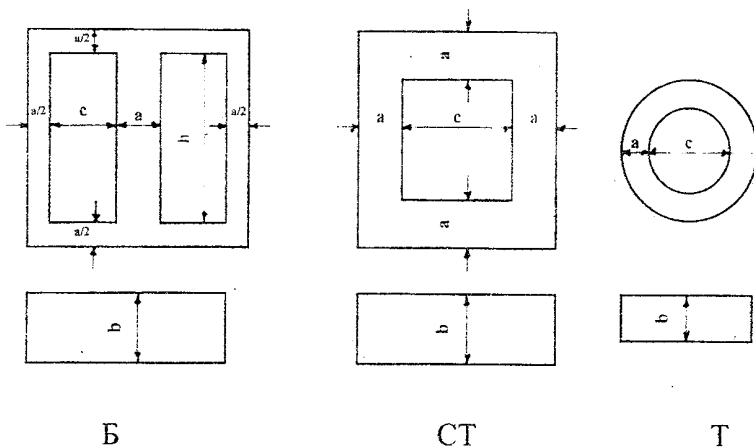


Рис. 1. Основные размеры броневое сердечника.  
 Б – броневой; СТ – стержневой; Т - тороидальный

Масса стали  $M_c$  в трансформаторах, как правило, больше массы меди  $M_m$ . Так как стоимость стали намного меньше стоимости меди, то трансформаторы минимальной стоимости имеют большую величину  $\frac{M_c}{M_m}$ , чем трансформаторы, спроектированные на минимальную массу.

Ясно, что основное уменьшение массы трансформатора может быть получено за счёт уменьшения массы стали. Соответственно этому в трансформаторах, рассчитанных на рассчитанных на минимальную стоимость отношение сечений  $Q_c / Q_{ок}$  больше, чем у трансформаторов, спроектированных на минимальную массу.

Таким образом, от соотношения между размерами окна и стержня (или сердечника) зависит при заданной мощности, частоте и данном значении

электромагнитных нагрузок стоимость и масса трансформатора.

Ниже приводятся способы выбора основных размеров сердечника.

**Б.** Если требуется использовать нормализованный сердечник из стандартного ряда, то надо выполнить следующее: руководствуясь заданием, в котором указан тип сердечника, по соответствующей таблице для нормализованных сердечников найти сердечник, в котором величина  $Q_c \cdot Q_{ок}$  равна приблизительно полученной выше или несколько больше ее.

Если требуется выполнить броневого трансформатор с пластинчатым сердечником, и в задании указано, в качестве особого условия, произвести расчёт на минимальную стоимость, либо на минимальную массу, то при выборе сердечника следует также учесть соотношения таблицы 6, где даны рекомендуемые оптимальные геометрические соотношения между размерами (см. рис. 1), для получения трансформаторов минимальной стоимости или минимальной массы.

Выбор сердечника в этом случае должен быть сделан по требуемой величине  $Q_c \cdot Q_{ок}$  и с возможно большим приближением к соотношениям между размерами, рекомендуемыми в таблице 6.

Таблица 6.

Оптимальная геометрия маломощных  
броневых трансформаторов

Частота	По массе			По стоимости		
	x	y	z	x	y	z
Нормальная	0,9- 1,3	2,0	2,5-5	0,3	0,6	1-3
Повышенная	0,5- 1; 1,5	0,5; 1-2	3,5-4	-	-	-

Если при выборе броневго пластинчатого сердечника окажется, что стандартная толщина пакета (размер «b») не подходит из условий получения требуемой величины  $Q_c \cdot Q_{ok}$ , то можно несколько изменить размер "b"; в этом случае, следовательно, будет использован не нормализованный сердечник, а только применены стандартные пластины для сборки сердечника.

При выборе ленточного броневго или ленточного стержневого трансформатора, в случае невозможности подобрать подходящий сердечник из стандартного ряда, допускается, в крайнем случае, изменить высоту окна.

#### *Пример выбора основных размеров сердечника.*

Требуется выбрать пластинчатый сердечник для броневго трансформатора из стандартного ряда, причём задано условие - провести расчёт на минимальную стоимость. Пусть на основании п. 3А определена величина  $Q_c \cdot Q_{ok} = 54 \text{ см}^4$ . Так как согласно заданию требуется выполнить сердечник с использованием Ш – образных штампованных пластин, то следует руководствоваться данными Приложения 2 либо Приложения 1. По данным приложения 2, исходя из требуемой величины  $Q_c \cdot Q_{ok} = 54 \text{ см}^4$ , может быть использован как сердечник ШУ 22×44, так и сердечник ШУ 26×26.

Принимая во внимание условие минимальной стоимости и соотношения таблицы 6, следует выбрать сердечник ШУ 22×44, у которого получаются:

$x = c/a = 0,54$ ;  $y = b/a = 2$ ;  $z = h/a = 1,78$ , т.е. значения соотношения размеров удовлетворяют условиям, требуемым для получения трансформатора минимальной стоимости.

Соответствующие величины, определенные для сердечника ШУ 26×26 равны:  $x = 0,65$ ,  $y = 1$ ,  $z = 1,8$ ,

т.е. соотношение размеров значительно отклоняется от величин таблицы 6 (величина у).

Если выбор сердечника произвести на основании таблицы Приложения 1, то ближайшую к требуемой величине  $Q_c \cdot Q_{ок}$  имеют сердечники Ш20×25 и Ш20×32. Однако, у сердечника Ш20×25  $Q_c \cdot Q_{ок} = 50 \text{ см}^4$ , что несколько меньше требуемой величины, а у сердечника Ш 20×32  $Q_c \cdot Q_{ок} = 64 \text{ см}^4$ , что значительно больше требуемой величины. Здесь можно использовать следующие варианты решения:

1) увеличить предварительно принятое значение индукции или плотности тока (или то и другое), если это допустимо с точки зрения рекомендуемых пределов для этих величин; благодаря этому можно получить требуемое значение  $Q_c \cdot Q_{ок} = 50 \text{ см}^4$  и использовать стандартный сердечник ИП 20×25;

2) отказаться от применения сердечника, из стандартного ряда (если это допускается по условиям задания и использовать только стандартные штампованные пластины изменив толщину пакета сердечника (размер «в»). Тогда требуемый размер «в» определится (взамен  $v = 25 \text{ мм}$  у сердечника Ш 20×25) следующим образом:  $v = (54/50) \cdot 25 = 27 \text{ мм}$ . Для сердечника Ш 20×25 {Приложение 1) получается соотношение  $x = 1, y = 1,25, z = 2,5$ , а для сердечника с измененной толщиной пакета  $x = 1, y = 1,35, z = 2,5$ .

Отсюда следует, что выбор сердечника по данным Приложения 1 не дает возможности удовлетворить условию минимальной стоимости.

В результате следует выбрать сердечник ШУ 22×44 по данным Приложения 2 как наиболее подходящий из всех перечисленных вариантов.

В. Если по условиям задания необходимо произвольно выбрать размеры сердечника (допустимо не применять нормализованный сердечник), то после

определения величины  $Q_c \cdot Q_{ок}$  выбор размеров пластинчатого сердечника производится в соответствии с рекомендациями таблицы 6.

При этом ширина стержня определяется так:

$$a = \sqrt[4]{\frac{Q_c \cdot Q_{ок}}{x \cdot y \cdot z}}, \text{ см,}$$

где величины  $x, y, z$  берутся из таблицы 6, исходя из условия задания, на минимальную стоимость или минимальную массу. Затем определяются величины  $c, v, h$ .

При свободном выборе размеров пластинчатого сердечника рекомендуется поперечное сечение ярма в трансформаторе броневом типа  $Q_{я} = (1 - 1,2/2) \cdot Q_c, \text{ см}^2$  или соответственно  $h_{я} = (1 - 1,2/2) \cdot a$ ,

где  $h_{я}$  - ширина ярма (см. рис. 5).

После выбора размеров сердечника в соответствии с п. 4Б или 4В следует найти число витков обмоток, выбрать сечение медных проводов, убедиться в том, что обмотки размещаются в окне сердечника.

### 5. Определение числа витков обмоток.

Общее выражение для определения числа витков в любой обмотке трансформатора определяется по следующей формуле:

$$W = \frac{E \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot Q_c \cdot K_c},$$

где  $E$  – э.д.с. данной обмотки;

$B_c$  – индукция в стержне.

Число витков (предварительное значение) первичной обмотки:

$$W_1 = \frac{E \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot Q_c \cdot K_c},$$

где  $Q_c$  – геометрическое сечение стержня, принятое после определения размеров сердечника.

Э.д.с. первичной обмотки, равная:

$E_1 = U_1 \cdot (1 - \frac{\Delta U_1 \%}{100})$  неизвестна, т.к. падение напряжения в ней  $\Delta U_1 \%$  становится известным только в конце расчёта трансформатора.

Аналогично э.д.с. во вторичных обмотках:

$E_2(3, \dots, n) = U_2(3, \dots, n) \cdot (1 + \frac{\Delta U_2(3, \dots, n) \%}{100})$  также неиз-

вестны, т.к. не известны ещё величины падения напряжения во вторичных обмотках с  $\Delta U_2 \%$  и т.д.

Обозначая общее падение напряжения в трансформаторе на пару обмоток (первичную и вторичную) равным  $\Delta U \%$ , можно принять приближённо

$\Delta U_1 \%$   $\Delta U_2(3, \dots, n) \%$

$$\Delta U_1 \% \quad \frac{\Delta U \%}{2}, \quad \Delta U_2 \% \quad \frac{\Delta U \%}{2}, \quad \Delta U_3 \% \quad \frac{\Delta U \%}{2}$$

и т.д.

Значение  $\Delta U \%$  можно принимать ориентировочно по табл. 7.

Таблица 7

Приближённые значения  $\Delta U \%$

Частота, Гц	Суммарная полная мощность вторичных обмоток $S_{II}$ , ВА			
	15-50	50-150	150-300	300-1000
50	30-15	15-10	10-7	7-3
400	18-9	9-4	4-2,5	2,5-1

Тогда число витков первичной обмотки трансформатора

$$W_1' = \frac{(U_1 - \frac{\Delta U \% \cdot U_1}{200}) \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B_c' \cdot Q_c \cdot K_c}$$

Э.д.с., приходящаяся на один виток обмотки

$$e_w' = \frac{E_1}{W_1'} = \frac{U_1 - \frac{\Delta U\% \cdot U_1}{200}}{W_1'}, \text{ В/виток.}$$

Число витков вторичной обмотки

$$W_2' = E_2/e_w' = \left( U_1 + \frac{\Delta U\% \cdot U_2}{200} \right) / e_w'.$$

Число витков третьей обмотки

$$W_3' = E_3/e_w' = \left( U_1 + \frac{\Delta U\% \cdot U_3}{200} \right) / e_w',$$

где  $W_1', W_2', W_3'$  - предварительные величины числа витков;

$U_1, U_2, U_3$  - номинальные значения напряжений обмоток по заданию.

Если число витков обмотки низшего напряжения (например  $W_3'$ ) получилось не целым, то его надо округлять до ближайшего целого числа ( $W_3$ ) и соответственно пересчитать величину э.д.с. на виток, число витков в других обмотках и величину индукции. Тогда число Вольт на виток

$$e_w = e_w' \cdot \frac{W_3'}{W_3}, \text{ (Вольт/виток).}$$

Число витков

$$W_1 = W_1' \frac{W_3}{W_3'},$$

$$W_2 = W_2' \frac{W_3}{W_3'}.$$

Действительная величина индукции в стержне окажется равной:

$$B_c = B'_c \frac{W'_3}{W_3}.$$

Если число витков обмотки низшего напряжения оказалось целым числом, т.е. пересчёта не требуется, и значит:

$$W_1 = W'_1, W_2 = W'_2, W_3 = W'_3, e_w = e'_w, B_c = B'_c,$$

то определённые ранее предварительные числа витков оказываются фактически принятыми.

В последующем расчёт производят исходя из величин

$$W_1, W_2, W_3, e_w, B_c.$$

Однако, после определения величин вторичных напряжений при нагрузках, полученных в результате расчёта, может потребоваться корректировка числа витков в случае несоответствия полученной величины с заданием (см. ниже).

Напряжение на вторичных обмотках при холостом ходе

$$U_{20} = E_{20} = e_w \cdot W_2, U_{30} = E_{30} = e_w \cdot W_3, \text{ и т.д.}$$

## 6. Определение сечения и диаметра проводов обмоток

Предварительные значения поперечных сечений проводов обмоток  $q'_1, q'_2, q'_3$  определяются по формулам:

$$q'_1 = \frac{I_1}{j'_1}, \text{ мм}^2, q'_2 = \frac{I_2}{j'_2}, \text{ мм}^2, q'_3 = \frac{I_3}{j'_3}, \text{ мм}^2 \text{ и т.д.}$$

где  $j'_1, j'_2, j'_3$  - предварительные величины плотности тока, выбор которых производится на основании п.3.

Плотности тока в отдельных обмотках выбирают приблизительно одинаковыми (практически приблизительно, равными исходной принятой величине  $j'$ ).



В соответствии с определёнными предварительными значениями сечений проводов выбирают по таблице 2 (Приложение 5) ближайшие стандартные сечения и получают, таким образом, величины сечений меди  $q_1, q_2, q_3$  (мм<sup>2</sup>), диаметры проводов без изоляции  $d_1, d_2, d_3$  (мм). Выбрав марку изоляции, получают величины  $d_{из1}, d_{из2}, d_{из3}$  (мм) – диаметры провода с изоляцией. Все указанные величины записываются в расчёте.

Наибольшее распространение в маломощных трансформаторах имеют эмалированные провода, у которых наименьшая толщина изоляции. Из эмалированных проводов наиболее дешёвыми являются провода марки ПЭЛ, однако, надёжность этой изоляции ограниченная. Большую надёжность имеют провода марки ПЭВ-2 и ПЭЛШКО удовлетворяют повышенным требованиям по надёжности.

Для маломощных силовых, трансформаторов общего применения, используются обычно (при напряжениях обмоток до 500 В) провода марки ПЭЛ и ПЭВ-1; при больших диаметрах проводов, порядка 2 мм и более, употребляют провода марок ПСД и ПСДК.

При требованиях большей надёжности (для специальной аппаратуры) и при напряжениях обмоток свыше 500 В применяются провода марки ПЭВ-2.

По окончательно выбранным сечениям проводов определяют уточненные значения плотности тока в обмотках:

$$j_1 = \frac{I_1}{q_1}, \text{ А/мм}^2; j_2 = \frac{I_2}{q_2}, \text{ А/мм}^2; j_3 = \frac{I_3}{q_3}, \text{ А/мм}^2.$$

## **7. Определение площади окна, необходимой для размещения обмоток трансформатора**

Площадь окна, необходимая для размещения всех обмоток трансформатора равна:

$$Q_{ok}' = \frac{q_1 \cdot W_1 + q_2 \cdot W_2 + q_3 \cdot W_3}{100 \cdot K_{ok}}, \text{ см}^2.$$

Чтобы обмотки могли быть размещены в окне выбранного ранее сердечника, должно быть  $Q_{ok}' > Q_{ok}'$ .

При выполнении этого условия можно считать выбор размеров сердечника предварительно законченным. Если же окажется, что обмотки не размещаются в окне (при предельно допустимой величине  $K_{ок}$ ), то надо либо уменьшать диаметры проводов, увеличив плотность тока, либо увеличить индукцию, т.е. уменьшить число витков, или при необходимости выбрать другой сердечник. В последнем случае при использовании нормализованных сердечников надо взять сердечник с большей площадью окна, а при произвольном выборе сердечника - увеличить сечение окна, изменив величину  $x$  или  $z$ .

## **8. Укладка обмоток на стержнях и проверка размещения их в окне выбранного сердечника**

При расположении обмоток надо иметь в виду следующие соображения: маломощные трансформаторы, как правило, не включаются на параллельную работу, поэтому напряжение короткого замыкания не является одной из исходных величин, определяющих расчёт, как в мощных трансформаторах. Его величина определяет падение напряжения трансформатора при нагрузке, которое в данном случае должно быть учтено для окончательного выбора числа витков обмотки (см. пункт 15).

В маломощных трансформаторах потоки рассеяния весьма незначительны вследствие малых расстояний между обмотками, поэтому индуктивные сопротивления обмоток при частоте 50 Гц малы и их влияние на величину падения напряжения при нагрузке

трансформатора тоже мало. Следовательно, нет необходимости при расположении обмоток исходить из требования получения наименьшей индуктивности.

Таким образом, при выборе относительного расположения обмоток следует исходить из конструктивных соображений и вопроса стоимости. Так, с точки зрения меньшей стоимости целесообразно обмотку с наиболее тонким проводом расположить на стержне первой, т.к. при этом средняя длина витка этой обмотки будет наименьшей, т.е. масса меди её при данном числе витков будет наименьшей. Следовательно, расходы на медь окажутся меньшими, т.к. стоимость килограмма провода тем выше, чем меньше его диаметр.

Исходя из конструктивных соображений, например, если какая-либо обмотка имеет несколько отводов, целесообразно расположить её последней (по отношению к стержню), т.е. снаружи и т.п.

Укладка обмоток производится следующим образом.

Длина каркаса (или гильзы) делается обычно на 1 мм короче высоты окна  $h$ ; расстояние от обмотки до ярма по условиям электрической прочности должно быть в маломощных трансформаторах при напряжении до 1000 В не менее 2-4 мм.

Таким образом, размер каждой обмотки по высоте окна равен  $h-2\cdot\epsilon_1$ , где расстояние от обмотки до ярма  $\epsilon_1 = 2-4$  мм (рис. 2). Этим величинам при размещении обмотки на каркасе соответствует толщина щёчки каркаса 1,5 - 3,5 мм.

Несмотря на то, что при массовом изготовлении катушек намотка производится на станках, всё же неизбежна некоторая неплотность укладки витков. Эта неплотность учитывается коэффициентом укладки  $K_u$ , значение которого приведено в таблице 8.

Число витков первичной обмотки в одном слое  $W_1$  равно:

$$W_{c1} = \frac{h - 2 \cdot \varepsilon_1}{K_{y1} \cdot d_{u,1}},$$

где  $K_{y1}$  - коэффициент укладки первичной обмотки.

Если число не целое, то оно округляется до ближайшего, меньшего целого числа.

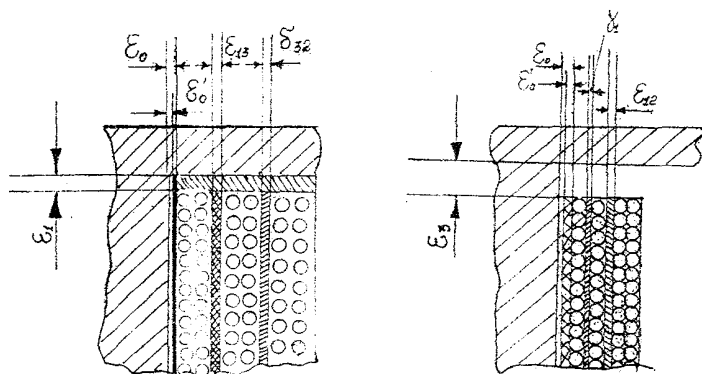


Рис. 2. Расположение обмотки: а – на каркасе (штампованном), б – на гильзе.

Число слоёв первичной обмотки  $m_1$  трансформатора бронзового типа и однокатушечного трансформатора стержневого типа равно

$$m_1 = \frac{W_1}{W_{c1}}.$$

Полученное значение  $m_1$  округляется до ближайшего большего целого числа.

В двухкатушечном стержневом трансформаторе первичную обмотку делят на две равные части, расположенные на двух стержнях, поэтому для трансформатора этого типа

$$m_1 = \frac{W_1}{2 \cdot W_{c1}}.$$

Каждую вторичную обмотку его также желательно с точки зрения равномерного тепловой

нагрузки, делить на две полуобмотки, размещённые на двух стержнях.

Толщина первичной обмотки

$$\delta_1 = K_{y1} \cdot m_1 \cdot d_{uz1} + (m_1 - 1) \cdot \gamma_1 \text{ (мм)},$$

где  $\gamma_1$  - толщина изоляционной прокладки между двумя соседними слоями первичной обмотки.

Слоевая изоляция предназначена для исключения возможности замыкания между витками соседних слоёв при повреждении изоляции провода.

Практически её следует применять, если напряжение между слоями превышает 50 В. Напряжение между двумя слоями превышает 50 В. Напряжение между двумя первичной обмотки равно:

$$U_{c1} = 2 \cdot W_{c1} \cdot l_w,$$

где  $l_w$  - э.д.с., приходящаяся на один виток (см. п.5).

В качестве слоевой изоляции можно использовать изоляционную бумагу следующих типов и толщин: при проводе диаметром ( $d_{uz}$ ) менее 0,1 мм - конденсаторную бумагу толщиной 0,01 мм; при проводах с диаметром: ( $d_{uz}$ ) от 0,1 до 0,5 мм - телефонную бумагу толщиной 0,05 мм; и соответственно при проводах с диаметром более 0,5 мм - кабельную бумагу толщиной 0,12 мм (см. Приложение 9).

Таблица 8

Коэффициент укладки  $K_y$

Диаметр провода с изоляцией $d_{uz}$ , мм	Коэффициент укладки $K_y$			
	менее 0,12	0,3	0,8	1,5
$K_y$	1,15	1,13	1,12	1,1

Число витков вторичной обмотки в одном слое

$$W_{c2} = (h - 2 \cdot \varepsilon_1) (K_{y2} \cdot d_{uz2}),$$

где  $K_{y2}$  - коэффициент укладки для вторичной обмотки.

Число слоев вторичной обмотки  $m_2$  трансформатора броневого типа равно:

$$m_2 = \frac{W_2}{W_{c2}}$$

Округление, числа витков и числа слоев вторичной до целых чисел производится в соответствии с указаниями, сделанными для первичной обмотки. Если вторичная обмотка двухкатушечного трансформатора располагается двумя равными частями на обоих стержнях, то

$$m_2 = \frac{W_2}{2 \cdot W_{c2}}$$

Если же данная вторичная обмотка целиком располагается на одном стержне, то определение величины  $m_2$  производится как для броневого трансформатора.

Толщина вторичной обмотки

$$\delta_2 = K_{y2} \cdot m_2 \cdot d_{ис2} + (m_2 - 1) \cdot \gamma_2 \text{ (мм)},$$

Во вторичной обмотке применяется изоляционная прокладка между слоями толщиной  $\gamma_2$  в случае, если напряжение между двумя слоями  $U_{c2} > 50$  В.

$$U_{c2} = 2 \cdot W_{c2}, \text{ (В)}.$$

Таким же образом определяется толщина остальных вторичных обмоток.

Радиальный размер катушки, т.е. толщина катушки прямоугольной формы (рис. 3) с учётом всей изоляции определяется из выражения

$$\delta_{кат} = K_{выт} \cdot (\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3 + \delta_{30}), \text{ мм},$$

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ , мм – толщина соответствующих обмоток;

$\delta_{12}, \delta_{23}, \delta_{13}$ , мм – межобмоточная изоляция (порядок индексов зависит от взаимного расположения обмоток (см. п.9)) В маломощных трансформаторах с напряжением до 1000 В она обычно выполняется из изоляционной бумаги, намотанной в несколько слоёв\*. При этом общая толщина этой изоляции приблизительно равна 0,2 - 0,3 мм. Межобмоточная изоляция может также выполняться из лакоткани или электрокартона, например, марки ЭВТ толщиной 0,2 – 0,4 мм (Приложение 9).

$\varepsilon_{30}$  (мм) - толщина изоляции поверх крайней (n-ой) обмотки. Обычно она выполняется из изоляционной бумаги или электрокартона и имеет толщину такого же порядка, как и межобмоточная изоляция.

Радиальный размер круглой катушки определяется из выражения:

$$\delta_{кат} = (\varepsilon_0 + \varepsilon_2 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3 + \delta_{30}) \text{ мм},$$

где  $\varepsilon_2 = (D_0 - a)/2$  - зазор между стержнем и катушкой (см. рис. 3).

Теперь следует определить, укладывается ли катушка в окне сердечника.

Для этого надо найти величину  $\varepsilon_3$ , которая в броневом трансформаторе определяется расстояние между катушкой и ярмом (боковой частью его), в стержневом двухкатушечном трансформаторе - расстояние от катушки до второго стержня. Для броневого трансформатора и стержневого однокатушечного трансформатора  $\varepsilon_3 = c - \delta_{кат}$ , для двухкатушечного трансформатора  $\varepsilon_3 = 2 \cdot \delta_{кат}$ .

Обычно  $\varepsilon_3 = 3,5$  мм. Наименьшее допускаемое значение величины  $\varepsilon_3$  равно  $0,5 \div 1$  мм. Если полученная величина зазора  $\varepsilon_3$  менее указанной минимальной величины, то катушка укладывается в окне сердечника, и, тем самым, выбор сердечника следует считать окончательно законченным.

В противном случае надо выполнить другой вариант расчёта в соответствии с указаниями п. 7.

### 9. Определение средней длины витка обмоток

Для определения массы меди обмоток надо иметь величину средней длины витка каждой обмотки.

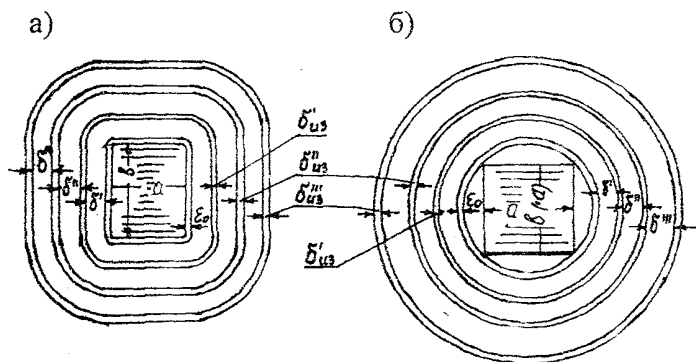


Рис. 4. Формы катушек: а – прямоугольная; б – круглая  
длины витков рассчитываются так:

а) средняя длина витка для обмотки, помещённой первой равна

$$l'_w = 2 \cdot \left( a + b + 4 \cdot \varepsilon_0 + \frac{\pi \cdot \delta'}{2} \right), \text{ см};$$



Для прямоугольных катушек (рис. 4а) средние б) для обмотки, уложенной поверх предыдущей, средняя длина витка равна

$$l_{W}^{II} = 2 \cdot (a + b + 4\varepsilon_0 + \pi \cdot (\delta^I + \delta_{uz}^I + \frac{\delta^{II}}{2})), \text{ см};$$

в) для следующей обмотки, т.е. уложенной третьей от поверхности стержня, длина витка равна

$$l_{W}^{III} = 2 \cdot (a + b + 4\varepsilon_0 + \pi \cdot (\delta^I + \delta^{II} + \delta_{uz}^I + \delta_{uz}^{II} + \frac{\delta^{III}}{2})), \text{ см};$$

Для круглых катушек (рис. 4б) средние длины витков находят так:

а) для обмотки, помещённой первой равна:

$$l_{W}^I = \pi \cdot (a\sqrt{2} + 2\varepsilon_0 + \delta^I), \text{ см};$$

б) для обмотки, уложенной поверх предыдущей, средняя длина витка равна:

$$l_{W}^{II} = \pi \cdot (a\sqrt{2} + 2\varepsilon_0 + 2\delta^I + \delta_{uz}^I + \delta^{II}), \text{ см};$$

в) для следующей обмотки, т.е. уложенной третьей от поверхности стержня, длина витка равна:

$$l_{W}^{III} = 2 \cdot (a\sqrt{2} + 2\varepsilon_0 + 2\delta^I + 2\delta^{II} + 2\delta_{uz}^I + 2\delta_{uz}^{II} + 2\delta^{III}), \text{ см};$$

В этих выражениях обозначения соответствуют рис. 4:

$\delta_{uz}^I, \delta_{uz}^{II}, \delta_{uz}^{III}$  - толщины межобмоточной изоляции, выбранной в соответствии с предыдущим;

$\delta^I, \delta^{II}, \delta^{III}$  - толщины обмоток, расположенных как указано на рисунке.

Если толщина межобмоточной изоляции выбрана одинаковой, т.е.  $\delta_{uz}^I = \delta_{uz}^{II} = \delta_{uz}^{III}$ , то выражения п. 9б и 9в соответственно упрощаются.

Обозначения рис. 4 и принятые ранее обозначения имеют соответствие, определяемое порядком расположения обмоток. Так, если, например, решено третью обмотку (т.е. вторичную с индексом «3») поместить поверх первой на стержне, а первичную обмотку поместить поверх неё, то указанные в вышеприведённых выражениях и на рисунках обозначения будут соответствовать:

$l_{W3} = l'_W; \delta_3 = \delta^I; l_{W1} = l''_W; \delta_1 = \delta^{II}; l_{W2} = l'''_W;$   
 где  $l_{W1}, l_{W2}, l_{W3}$  - средние длины витков первичной, вторичной и третьей обмоток трансформатора.

### 10. Масса меди обмоток

Масса меди отдельных обмоток находится по формулам:

$$M_{M1} = 8,9 \cdot W_1 \cdot l_{W1} \cdot q_1 \cdot 10^{-5} \text{ (кг)};$$

$$M_{M2} = 8,9 \cdot W_2 \cdot l_{W2} \cdot q_2 \cdot 10^{-5} \text{ (кг)};$$

$$M_{M3} = 8,9 \cdot W_3 \cdot l_{W3} \cdot q_3 \cdot 10^{-5} \text{ (кг)}.$$

Здесь длины витков – в сантиметрах, сечения – в квадратных миллиметрах, удельная масса меди –  $\gamma_M = 8,9 \text{ г/см}^3$ .

Общая масса меди равна:

$$M_M = M_{M1} + M_{M2} + M_{M3} \text{ (кг)}.$$

### 11. Масса стали сердечников

При пластинчатых сердечниках масса стали их равна:

а) в броневом трансформаторе

$$M_{cc} = \gamma_c \cdot h \cdot Q_c \cdot 10^{-3} \text{ (кг)}.$$

Масса ярём  $M_{с\text{я}} = 2 \cdot \gamma_c \cdot (h + l_{\text{я}}) \cdot Q_{\text{я}} \cdot 10^{-3}$  (кг).

б) в стержневом трансформаторе

Масса стержней  $M_{с\text{с}} = 2 \cdot \gamma_c \cdot h \cdot Q_c \cdot 10^{-3}$  (кг).

Масса ярём  $M_{с\text{я}} = 2 \cdot \gamma_c \cdot l_{\text{я}} \cdot Q_{\text{я}} \cdot 10^{-3}$  (кг),

где  $\gamma_c$  – удельная масса стали, равная  $7,8 \text{ г/см}^3$  для стали марок 1511, 1512; для стали марок 1513, 1514 –  $7,65 \text{ г/см}^3$ , для холоднокатанных сталей марок 3411 – 3414 –  $\gamma_c = 7,65 \text{ г/см}^3$ ;

$h$  – высота окна сердечника (см);

$Q_{\text{я}}$  – геометрическое сечение ярёма

$$Q_{\text{я}} = \frac{h_{\text{я}}}{a} \text{ (см}^2\text{);}$$

$h_{\text{я}}$  – длина ярёма (см) (см. рис 5).

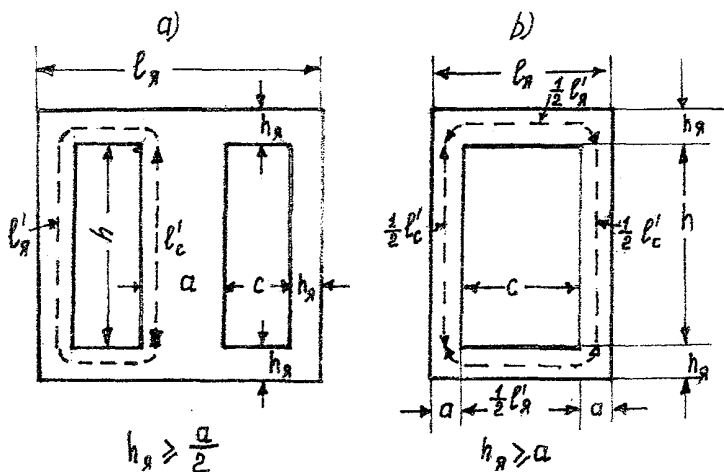


Рис. 5. Пластинчатые сердечники:

а) броневой (с Ш-образными пластинами); б) стержневой (с Г-образными пластинами)

В броневом трансформаторе:

$$l_{\text{я}} = a + 2 \cdot c + 2 \cdot h_{\text{я}} \text{ (см);}$$

В стержневом трансформаторе:

$$l_{\text{с}} = 2 \cdot a + c \text{ (см);}$$

Полная масса сердечника:

$$M_{\text{с}} = M_{\text{сст}} + M_{\text{сн}} \text{ (кг)}$$

При ленточных сердечниках масса стали их равна:

$$M_{\text{с}} = \gamma_{\text{с}} \cdot K_{\text{с}} \cdot l_{\text{с}} \cdot Q_{\text{с}} \cdot 10^{-3} \text{ (кг)},$$

$l_{\text{с}}$  - средняя длина магнитной силовой линии (см).

В броне́вом сердечнике:

$$l_{\text{с}} = 2 \cdot (h + c) + \pi \frac{a}{2} \text{ (см)},$$

В стержневом сердечнике:

$$l_{\text{с}} = 2 \cdot (h + c) + \pi \cdot a \text{ (см) (см. рис.6).}$$

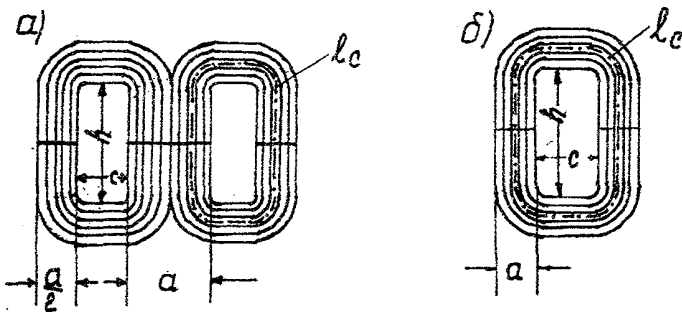


Рис. 6. Ленточные сердечники (разъёмные):

а - броне́вой, б - стержневой .

## 12. Потери в меди обмоток

Потери в меди обмоток трансформатора можно найти так:

В первичной обмотке:

$$P_{\text{м1}} = 2,4 \cdot j_1^2 \cdot M_{\text{м1}} \text{ (Вт);}$$

во вторичных обмотках:

$$P_{\text{м2}} = 2,4 \cdot j_2^2 \cdot M_{\text{м2}} \text{ (Вт);}$$

$$P_{\text{м3}} = 2,4 \cdot j_3^2 \cdot M_{\text{м3}} \text{ (Вт);}$$

где  $j_1, j_2, j_3$  - плотности тока ( $\text{А/мм}^2$ ) в каждой обмотке.

$M_{m1}, M_{m2}, M_{m3}$  - масса меди каждой из обмоток.

Температура обмоток принята равной  $75^\circ\text{C}$  при окружающей температуре  $20^\circ\text{C}$ .

Суммарные потери в меди равны:

$$P_m = P_{m1} + P_{m2} + P_{m3} \text{ (Вт).}$$

### 13. Потери в стали сердечника

При пластинчатых сердечниках потери в стали: стержней

$$P_c = P_{1,0/50} \cdot B_c^2 \left( \frac{f}{50} \right)^{1,3} \cdot M_{cc} \text{ (Вт);}$$

ярем

$$P_{cz} = P_{1,0/50} \cdot B_z^2 \left( \frac{f}{50} \right)^{1,3} \cdot M_{cz} \text{ (Вт);}$$

где  $P_{1,0/50}$  ( $\text{Вт/кг}$ ) - удельные потери в стали при индукции 1,0 Тл (10000 Гс) и частоте 50 Гц; они зависят от марки стали, толщины листа (величина удельных потерь приведена в приложении 4).

$B_c$  (Тл) - см. п.5;

$B_y$  (Тл) - индукция (амплитудное значение в ярме; для броневых трансформатора  $B_y = B_c \frac{a}{2 \cdot h_y}$ , для

стержневого трансформатора  $B_y = B_c \frac{a}{h_y}$ ;

$f$  (Гц) - частота питающей сети, т.е. частота перемагничивания.

Приведённая формула пригодна для расчёта при частоте  $f = 10 \div 100$  Гц. Величина массы  $M_{cc}$  и  $M_{cy}$  в этих выражениях должны быть в кг.

Суммарные потери в стали сердечника:

$$P_c = P_{cc} + P_{cy} \text{ (Вт).}$$

При частоте 400 Гц потери в стали:  
стержней

$$P_c = P_{1,0/400} \cdot B_c^2 \cdot M_{cc} \text{ (Вт);}$$

ярём

$$P_{cc} = P_{1,0/400} \cdot B_c^2 \cdot M_{cc} \text{ (Вт);}$$

где  $P_{1,0/400}$  (Вт/кГ<sup>2</sup>) - удельные потери в стали при индукции 1,0 Тл и частоте 400 Гц; величина их определяется по таблице приложения 6).

При ленточных разёмных сердечниках их холоднокатаной стали потери в стали сердечника можно определить так:

$$P_c = P_{1,5/50} \cdot \left( \frac{B_c}{1,5} \right)^2 \cdot M_c \text{ (Вт) при } f = 50 \text{ Гц;}$$

$$P_c = P_{y0,400} \cdot M_c \text{ (Вт) при } f = 400 \text{ Гц;}$$

где  $P_{1,5/50}$  (Вт/кГ<sup>2</sup>) - удельные потери в стали при индукции 1,5 Тл (15000 Гс) и частоте 50 Гц; они даны в таблице приложения 6;

$P_{y0,400}$  (Вт/кГ<sup>2</sup>) - удельные потери в стали при частоте 400 Гц и индукции  $B_c$  (см. приложение 6).

Свойства разёмных ленточных сердечников из холоднокатаной стали зависят не только от марки стали, её толщины, частоты, но и от технологии изготовления (и притом весьма существенно от последнего фактора). В разёмных ленточных сердечниках удельные потери больше, чем в замкнутых сердечниках и в исходном материале, из которого они изготовлены; в разёмных сердечниках увеличивается несколько и удельная намагничивающая сила. Для оценки величины удельных потерь и напряжённости магнитного поля принято эти сердечники классифицировать (вне зависимости от марки и толщины ленты) по группам качества – I, II, III, IV. Группа I обладает наилучшими свойствами, группа IV - наихудшими.

Сердечники трансформаторов, предназначенных для общего применения, обычно изготавливаются из групп III, IV, а для трансформаторов специального назначения применяются группы I – III. Усовершенствование технологии изготовления даст возможность исключить из употребления группы III, IV и шире применять группу II.

#### 14. Определение тока холостого хода

Ток холостого хода трансформатора

$$I_0 = \sqrt{I_{0\mu}^2 + I_{0a}^2}, \text{ А,}$$

где  $I_{0\mu}$  – намагничивающий ток или реактивная составляющая тока холостого хода;

$I_{0a}$  – активная составляющая тока холостого хода.

Величина находится по закону полного тока.

При пластинчатых сердечниках

$$I_{0\mu} = \frac{1}{W_1} \cdot \left[ \left( \frac{H_c \cdot l_c^1 + H_{\text{я}} \cdot l_{\text{я}}^1}{\sqrt{2} \cdot K_{\text{иск}}} \right) + \frac{0,8 \cdot B_c \cdot n \cdot \delta_z}{\sqrt{2}} \right], \text{ А,}$$

где  $H_c$  и  $H_{\text{я}}$  – напряжённость магнитного поля (А/см) в стержне и ярме; они определяются по кривым намагничивания (приложение 8) в соответствии с величинами  $B_c$  и  $B_{\text{я}}$  для выбранной марки стали;

$n$  – число зазоров (стыков) на пути магнитной силовой линии. Для броневого трансформатора  $n = 2$ , для стержневого трансформатора с использованием П-образных пластин или Г-образных пластин  $n = 2$ , а для стержневого трансформатора, собранного из четырёх полос (пластин) внахлёстку  $n = 4$ .

$\delta_z$  – величина эквивалентного воздушного зазора; при сборке внахлёстку (в переплёт) можно принять

$$\delta_z = 0,004 \text{ см;}$$

$l_c^1$  – длина (см) магнитной линии в стержне или

стержнях трансформатора; в броневом трансформаторе (см. рис. 5)  $l_c^I = h$ , в стержневом трансформаторе  $l_c^I = 2 \cdot h$ ;

$l_y^I$  - длина (см) средней магнитной линии в ярмах трансформатора; она может быть определена по эскизу (см. рис. 5) или приближённо по формуле  $l_y^I \approx h + 2 \cdot c + a + 2 \cdot h_y$  в броневом трансформаторе; а в стержневом трансформаторе  $l_y^I \approx 2 \cdot c + 4 \cdot a$ ;

$K_{иск}$  - коэффициент, учитывающий наличие в намагничивающем токе высших гармоник; его величина принимается по данным таблицы Приложения 7.

Если величина  $B_c$  и  $B_y$  не равны по величине, то можно принять для  $K_{иск}$  среднее значение, полученное исходя из соответствующих величин индукций.

При ленточных сердечниках намагничивающий ток  $I_{0\mu}$  определяется по формуле:

$$I_{0\mu} = \frac{1}{W_1} \cdot \left[ \left( \frac{H_c \cdot l_c}{\sqrt{2} \cdot K_{иск}} \right) + \frac{1,2 \cdot B_c \cdot \delta \cdot 10^4}{\sqrt{2}} \right], \text{ A,}$$

где  $H_c$  - напряжённость (амплитудное значение) магнитного поля (А/см) в сердечнике, определяемое в соответствии с величиной индукции  $B_c$  в сердечнике по кривой намагничивания для данной марки стали (приложение 5);

$l_c$  - средняя длина (см) магнитной линии в сердечнике (рис. 5) в п.10.

$\delta$  - односторонний зазор в месте стыка; для замкнутых ленточных сердечников  $\delta = 0$ , для разъёмных ленточных сердечников можно принять  $\delta = 0,0015$  см.

Активная составляющая тока холостого хода  $I_{0a}$  определяется наличием потерь в стали сердечника, а также потерями в меди первичной обмотки трансформатора от тока холостого хода. Последние очень



малы по сравнению с потерями в стали, поэтому

$$I_{0a} = \frac{P_0}{U_1}.$$

При частоте 50 Гц величина  $I_{0a}$  мала по сравнению с намагничивающим током  $I_{0\mu}$ . Поэтому в этом случае при приближённых расчётах ею можно пренебречь и считать  $I_0 = I_{0\mu}$ .

Полученное значение тока холостого хода в процентах по отношению к току номинальному первичной обмотки

$$I_{0\%} = \frac{I_0}{I_1} \cdot 100\%$$

должно быть приблизительно в пределах 30÷50 % при частоте 50 Гц; и примерно в пределах 5÷30 % при частоте 400 Гц.

Если полученная величина относительного тока холостого хода  $I_{0\%}$  значительно отличается от указанных пределов, то следует изменить величину индукции в сердечнике – при превышении  $I_{0\%}$  - уменьшить её, а при малом значении  $I_{0\%}$  - увеличить её. При этом возможно окажется необходимым выбрать другой сердечник.

Если величина  $I_{0\%}$  получается надлежащей, то производится дальнейший расчёт трансформатора. При этом надо иметь в виду, что полученная величина  $I_{0\mu}$  должна приблизительно равняться исходной, первоначально принятой при расчёте; если же полученное значение  $I_{0\mu}$  значительно отличается от предварительно принятого, то следует произвести корректировку этой величины и определить уточнённую величину  $I_1$ , исходя из полученного значения  $I_{0\mu}$ , которую и следует ввести в расчёт.

### 15. Сопротивление обмоток, падение напряжения в них и напряжение короткого замыкания

Активные сопротивления обмоток трансформатора можно определить так:

$$r_1 = \frac{P_{M1}}{I_1^2}, \text{ Ом}; \quad r_2 = \frac{P_{M2}}{I_2^2}, \text{ Ом}; \quad r_3 = \frac{P_{M3}}{I_3^2}, \text{ Ом};$$

Относительное активное падение напряжения в первичной обмотке при номинальной нагрузке всех вторичных обмоток в процентах:

$$U_{a1\%} = \frac{I_1 \cdot r_1}{U_1} \cdot 100\%.$$

Относительные активные падения напряжения во вторичных обмотках в процентах по отношению к первичному напряжению:

$$U_{a2\%} = \frac{I_2 \cdot r_2 \cdot \frac{W_1}{W_2}}{U_1} \cdot 100\%;$$

$$U_{a3\%} = \frac{I_2 \cdot r_3 \cdot \frac{W_1}{W_3}}{U_1} \cdot 100\%.$$

Активное сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора, приведенное к первичной обмотке:

$$r_k = r_1 + r_2^1 = r_1 + r_2 \cdot \frac{W_1}{W_2}, \text{ Ом}.$$

Если трансформатор имеет несколько вторичных обмоток, то параметры его определяются как для каждой обмотки, так и для пар обмоток - первичной и какой - либо вторичной обмотки, например,  $r_{k12}$  означает активное сопротивление короткого замыкания при работе пары обмоток - первичной обмотки «1» и вторичной обмотки с индексом «2».

Активные сопротивления короткого замыкания пар обмоток многообмоточного трансформатора, приведенные к первичной обмотке, равны:

$$r_{k12} = r_1 + r_2' = r_1 + r_2 \cdot \frac{W_1}{W_2}, \text{ Ом};$$

$$r_{k13} = r_1 + r_3' = r_1 + r_3 \cdot \frac{W_1}{W_2}, \text{ Ом}.$$

Индуктивные сопротивления обмоток при  $f = 50$  Гц для маломощных трансформаторов малы, поэтому их величиной пренебрегаем и считаем, что полное сопротивление обмоток равно их активному сопротивлению:

$$r_k = z_k.$$

При этом допущении для пар обмоток многообмоточного трансформатора величины напряжений короткого замыкания соответственно равны:

$$U_{\kappa 12\%} = \frac{I_1 \cdot r_{12}}{U_1} \cdot 100\%;$$

$$U_{\kappa 13\%} = \frac{I_1 \cdot r_{13}}{U_1} \cdot 100\%$$

Величину напряжения короткого замыкания требуется знать в тех случаях, когда рассчитываемый трансформатор может быть применен для параллельной работы.

## 16. Изменение напряжения при нагрузке

Для окончательного уточнения числа витков обмоток надо определить изменение напряжения при номинальной нагрузке, получаемое по расчёту.

Величина изменение напряжения в маломощных трансформаторах может быть определена по формулам:

$$\Delta U_{12\%} = U_{a1\%} \cdot \cos \varphi_1 + U_{a2\%} \cdot \cos \varphi_2 + U_{p1\%}^{1,2} \cdot \sin \varphi_1 + U_{p2\%}^* \cdot \sin \varphi_2$$

$$\Delta U_{13\%} = U_{a1\%} \cdot \cos \varphi_1 + U_{a3\%} \cdot \cos \varphi_3 + U_{p1\%}^{1.3} \cdot \sin \varphi_1 + U_{p3\%}^* \sin \varphi_3$$

В маломощных трансформаторах при частоте 50 Гц определение изменения напряжения можно производить без учета слагаемых, в которых содержатся индуктивные напряжения обмоток.

В результате выполненного расчёта следует определить фактическую величину напряжения на зажимах вторичных обмоток при номинальной нагрузке:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{W_2}{W_1} \cdot \frac{1 - \Delta U_{12\%}}{100}, \text{ В};$$

$$U_3 = U_1 \cdot \frac{W_3}{W_1} \cdot \frac{1 - \Delta U_{13\%}}{100}, \text{ В}.$$

Теперь, в случае необходимости следует уточнить число витков: так, если полученное напряжение на зажимах какой-либо вторичной обмотки значительно отличается от заданного, то следует изменить число витков в ней. При уменьшенной величине напряжения против заданного - соответственно увеличить число витков, и, наоборот, уменьшить его соответственно, если полученное напряжение превышает номинальное.

### 17. Коэффициент полезного действия

К. п. д. трансформатора при номинальной нагрузке равен:

$$\eta = \frac{P_{II}}{P_{II} + P_c + P_m} = 1 - \frac{P_{II} + P_m}{P_{II} + P_c + P_m}$$

где  $P_{II}$  - суммарная активная мощность вторичных обмоток (см.п.2).

Если полученная величина  $\eta$  значительно отличается от величины, принятой предварительно в на-

чале расчёта (более чем на 5-7%), то следует произвести уточнение расчёта - найти уточнённую величину тока  $I_1$ , при полученной величине к.п.д., и соответственно скорректировать все величины в последующих этапах расчёта, связанные с током  $I_1$ , не меняя сечение провода первичной обмотки.

После этих уточнений полученные в итоге расчёта величины будут практически близки к номинальным.

Если полученная после уточнения величина тока  $I_1$  намного больше исходной и, как следствие, плотность тока оказывается значительно увеличенной, то следует произвести замену провода для первичной обмотки, увеличив сечение его и произвести соответствующий, перерасчёт.

При частичной нагрузке к. п. д., маломощного трансформатора можно определить по формуле, где учтено небольшое изменение потерь в стали при изменении нагрузки (за счёт некоторого изменения э.д. с., а следовательно, потока и магнитной индукции), а также учтено изменение потерь в меди, обмоток вследствие изменения нагрузки. Величина потерь от намагничивающего тока принята неизменной.

$$\eta = \frac{\gamma \cdot P_{II}}{\gamma \cdot P_{II} + p_c \cdot \left(1 + \frac{\Delta U_{\%}}{200} - \gamma \cdot \frac{\Delta U_{\%}}{200}\right)^2 + \gamma^2 \cdot (p_m - I_{0\mu}^2 \cdot r_1) + I_{0\mu}^2 \cdot r_1}$$

где  $\gamma$  - коэффициент нагрузки, определяющий отношение данной нагрузки к номинальной, т.е. отношение данных величин токов вторичных обмоток к их номинальным значениям при номинальных значениях коэффициента мощности;

$p_c$ , Вт - определенные выше полные потери в стали сердечника;

$p_m$ , Вт - суммарные потери в меди обмоток при номинальной нагрузке;

$I_{0m}$ , А - намагничивающий ток, полученный на основании расчёта;

U% - полученное по расчёту среднее значение величины изменения напряжения при номинальной нагрузке для трансформатора с двумя вторичными обмотками:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U_{12\%} + \Delta U_{13\%}}{2}.$$

Расчёт к. п. д. следует про извести при номинальной  $\gamma$  нагрузке ( $\gamma = 1$ ) и при половинной нагрузке ( $\gamma = 0,5$ ).

## 18. Проверка трансформаторов на нагрев

Нагрев трансформатора при заданном режиме работы зависит от величины потерь в нём и его теплоотдачи. Различают режимы работы: продолжительный, повторно-кратковременный и кратковременный. В данном расчёте принято, что трансформатор предназначен для продолжительного режима работы.

В маломощных трансформаторах определяют обычно перегрев (превышение температуры) обмоток, т.е. перегрев катушек  $\Delta t_k$  над температурой окружающей среды. Перегрев сердечника не имеет столь существенного значения для работы этих трансформаторов, т.к. изоляция, применяемая в сердечниках, является достаточно термостойкой.

В маломощных трансформаторах вследствие их малых габаритов обмотки и сердечник не изолированы друг от друга в тепловом отношении и между ними имеется тепловой обмен. Поэтому перегрев катушек определяется с учётом потерь в сердечнике и его охлаждающей поверхности.

$$\Delta\tau_k = \frac{P_m + P_c}{\alpha_k \cdot \Pi_k \cdot (1 + \beta \cdot \sqrt{v})}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $P_m$  - суммарные потери в меди обмоток, Вт;

$P_c$  - суммарные потери в стали сердечника, Вт;

$\Pi_k$  - поверхность охлаждения - наружная открытая поверхность сердечника,  $\text{см}^2$ ;

$\alpha_k$  - коэффициент теплоотдачи катушки,  $\text{Вт}/\text{см}^2, \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Коэффициент  $\alpha_k$  определяет отдачу тепла или пропорциональный ему мощности с  $1 \text{ см}^2$  охлаждающей поверхности при превышении температуры этой поверхности над температурой окружающей среды на  $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

В маломощных трансформаторах с естественным (воздушным) охлаждением, т.е. в сухих трансформаторах, величина  $\alpha_k$  зависит от многих факторов, а именно: от мощности трансформаторов, типа сердечника, частоты, пропитки, марки изоляции, сорта стали и др.

Величину  $\alpha_k$  можно определять по кривым, изображенным на рис. 7 и рис. 8.

Открытая поверхность охлаждения катушки определяется следующим образом:

при катушке прямоугольной формы (рис. 9)

$$\Pi_k = 2 \cdot h \cdot (a + \pi \cdot c) + (2 \cdot a + \pi \cdot c), \text{ см}^2;$$

при круглой катушке (возможной при квадратном сечении стержня,  $b = a$ )

$$\Pi_k = (\pi \cdot D_{нар} - 2 \cdot a) \cdot h + \pi \cdot D_{нар}^2 / 2 - a \cdot (\pi \cdot a + 4 \cdot c), \text{ см}^2;$$

где наружный диаметр катушки

$$D_{нар} = a \cdot \sqrt{2} + 2 \cdot c, \text{ см.}$$

Открытая поверхность охлаждения сердечника  $\Pi_c$  рассчитывается по следующим формулам:

в трансформаторах с пластинчатым сердечником и нормальным ярмом (рис. 7):

$$П_c = 2 \cdot a \cdot (2 \cdot a + 2 \cdot c + h) + 2 \cdot v \cdot (3 \cdot a + 2 \cdot c + h), \text{ см}^2;$$

в трансформаторах с пластинчатым сердечником и уширенным ярмом

$$П_c = 8 \cdot h_{я} \cdot (c + v + h_{я}) + 4 \cdot h_{я} \cdot (a + h) + 2 \cdot v \cdot (a + 2 \cdot c + h), \text{ см}^2;$$

где  $h_{я}$ , см - ширина ярма (см. рис. 5)

Температура обмотки (катушки)

$$\tau_k = \Delta \tau_k + \tau_0, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $\tau_k$  - температура окружающей среды, которая для обычных условий может быть принята в пределах 35-50 °С.

Величина  $\tau_k$  не должна превосходить допустимую величину. При применении изоляции класса А должно быть  $\tau_k < 105 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Если полученная величина окажется больше допустимой, то следует произвести необходимые изменения в расчёте - уменьшить плотность тока, заменить сердечник и др.

Если задание предусматривает проектирование трансформатора минимальной массы, то можно изменить изоляцию проводов и другую применяемую изоляцию, выбрав её соответственно классу Е (см. Стандарты на изоляционные материалы), допускающую температуру 120°С или, применить изоляцию с ещё большей допустимой температурой.



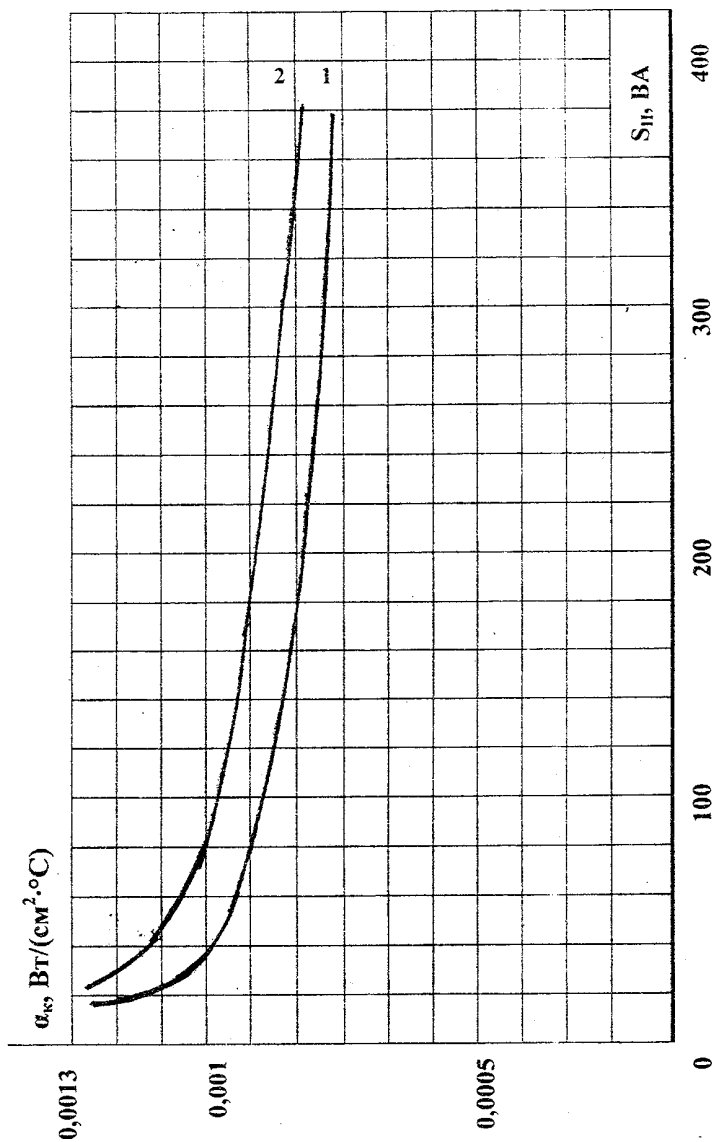


Рис. 7. Значения  $\alpha_k$  для трансформаторов броневого типа с пластинчатым сердечником из горячекатаной стали: 1 – при частоте 50 Гц; 2 - при частоте 400 Гц (сталь 1514 толщ. 0,2 мм).

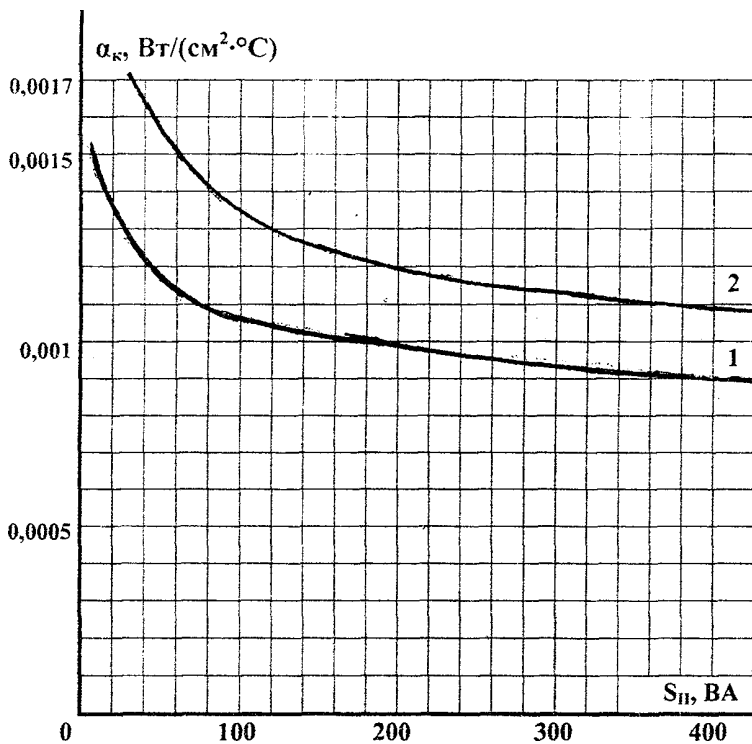


Рис. 8. Значения  $\alpha_k$  для трансформаторов стержневого типа с ленточным сердечником из холоднокатанной стали: 1 – при частоте 50 Гц; 2 – при частоте 400 Гц.

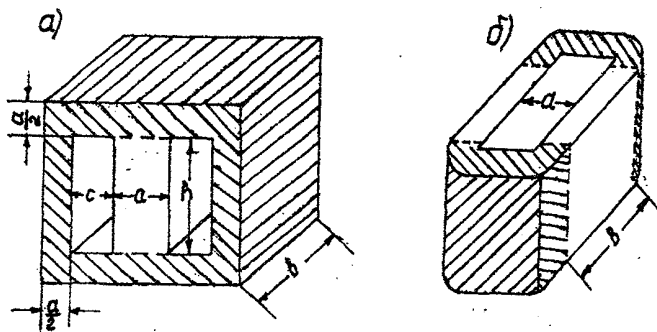


Рис. 9. Расчётная поверхность охлаждения.

## 19. Сводные данные расчёта

На основании выполненного проекта составить сводные данные:

масса стали сердечника  $M_c, кг$ ;

масса меди обмоток  $M_m, кг$ ;

удельный расход стали,  $M_c/S_{II}, кг/кВт$ ;

удельный расход меди  $M_m/S_{II}, кг/кВт$ ;

отношение массы стали, к массе меди  $M_c/M_m$ ;

потери в стали сердечника  $p_c, Вт$ ;

потери в меди обмоток  $p_m, Вт$ ;

отношение потерь в меди к потерям в стали  $p_m/p_c$ ;

к.п.д. трансформатора при номинальной нагрузке  $\eta$ ;

превышение температуры обмоток над температурой окружающей среды  $\tau_k, ^\circ C$ ;

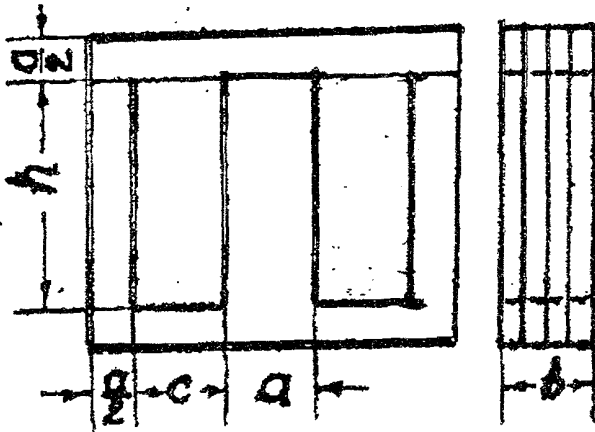
намагничивающий ток в процентах (по отношению к первичному току)  $I_{0ц}, \%$ ;

относительное изменение напряжения при номинальной нагрузке (среднее значение)  $\Delta U, \%$ .

Удельный расход материалов (стали, меди) зависит от многих факторов и колеблется для маломощных трансформаторов в значительных пределах.

Удельный расход стали (при рекомендуемых выше значениях индукции) зависит от мощности трансформатора, частоты, марки стали, конструкции сердечника, его геометрии (т.е. соотношения основных размеров) допустимого превышения температуры и других факторов.

Удельный расход меди приблизительно в 1,2 - 1,6 раз меньше удельного расхода стали.

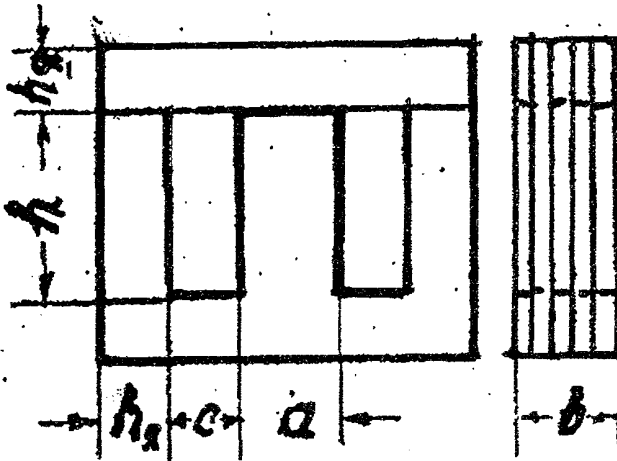


Типовые броневые пластинчатые сердечники Ш  
(по нормам ГО. 666. 000)

Обозначение сердечника	Основные размеры, мм				Справочные величины		
	a	b	c	h	$Q_c,$ см <sup>2</sup>	$Q_{ок},$ см <sup>2</sup>	$Q_c \cdot Q_{ок},$ см <sup>4</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
Ш9Х9	9	9	9	22,5	0,81	2,02	1,63
12		12			1,08		2,16
Ш12Х10		10			1,2		4,32
12		12			1,44		5,19
16	12	16	12	30	1,92	3,6	6,9
20		20			2,4		8,65
25		25			3		10,8
32		32			3,84		13,8
Ш16Х10		10			1,6		10,24
12		12			1,92		12,3
16	16	16	16	40	2,56	6,4	16,4
20		20			3,2		20,5
25		25			4		25,6
32		32			5,12		32,7
40		40			6,4		41

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

1	2	3	4	5	6	7	8
Ш120X12		12			2,4		24
16		16			3,2		32
20	20	20	20	50	4	10	40
25		25			5		50
32		32			6,4		64
40		40			8		80
50		50			10		100
Ш125X16		16			4		62,5
20		20			5		78
25	25	25	25	62,5	6,25	15,6	97,5
32		32			8		125
40		40			10		156
50		50			12,5		195
64		64			16		250
Ш132X20		20			6,4		164
25		25			8		204,8
32	32	32	32	80	10,24	25,6	262
40		40			12,8		328
50		50			16		410
64		64			20,48		525
80		80			25,6		656
Ш140X25		25			10		400
32		32			12,8		512
40	40	40	40	100	16	40	640
50		50			20		800
64		64			25,6		1024
80		80			32		1280
100		100			40		1600

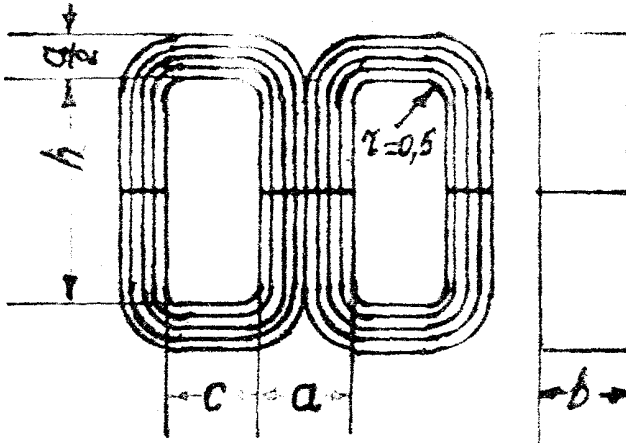


Типовые броневые пластинчатые сердечники ШУ с уширенным ярмом (по НИО. 010. 005)

Обозначение сердечника	Основные размеры, мм					Справочные величины		
	a	b	c	h	h <sub>я</sub>	Q <sub>с</sub> , см <sup>2</sup>	Q <sub>ок</sub> , см <sup>2</sup>	Q <sub>с</sub> ·Q <sub>ок</sub> , см <sup>4</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ШУ10Х10		10				1		1,17
15	10	15	6,5	18	6,5	1,5	1,17	1,75
20		20				2		2,34
ШУ12Х12		12				1,44		2,54
18	12	18	8	22	8	2,16	1,76	3,8
24		24				2,88		5,07
ШУ14Х14		14				1,96		4,41
21	14	21	9	25	9	2,94	2,25	6,62
28		28				3,92		8,82
ШУ16Х16		16				2,56		7,16
24	16	24	10	28	10	3,84	2,8	10,75
32		32				5,12		14,32

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ШУ19Х19		19				3,61		14,5
28	19	28	12	33,5	12	5,32	4,02	21,4
38		38				7,22		29
ШУ22Х22		22				4,84		26,4
33	22	33	14	39	14	7,26	5,46	39,6
44		44				9,68		52,8
ШУ26Х26		22				6,76		54
36	26	33	17	47	17	10,14	7,99	81
52		44				13,52		108
ШУ30Х30		30				9		90
45	30	45	19	53	19	13,5	10	135
60		60				18		180
ШУ35Х35		35				12,25		165,8
52	35	52	22	61,5	22	18,2	13,53	246
70		70				24,5		331,6



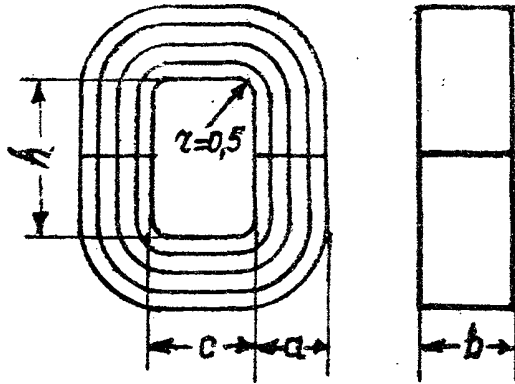
Типовые броневиые ленточные сердечники ШЛ

Обозначение сердечника	Основные размеры, мм				Справочные величины		
	a	b	c	h	$Q_{с2}$ см <sup>2</sup>	$Q_{ок2}$ см <sup>2</sup>	$Q_{с} \cdot Q_{ок2}$ см <sup>4</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
ШЛ10Х10		10			1,0		2,5
12,5	10	12,5	10	25	1,25	2,5	3,12
16		16			1,6		4
20		20			2,0		5
ШЛ12Х12,5		12,5			1,5		5,4
16	12	16	12	30	1,92	3,6	6,9
20		20			2,4		8,64
25		25			3,0		10,8
ШЛ16Х16		16			2,56		16,4
20	16	20	16	40	3,2	6,4	20,45
25		25			4,0		25,6
32		32			5,12		32,8



ПРИЛОЖЕНИЕ 3

1	2	3	4	5	6	7	8
ШЛ20Х20		20			4,0		40
25	20	25	20	50	5,0	10	50
32		32			6,4		64
40		40			8,0		80
ШЛ25Х25		25			6,25		97,6
32	25	32	25	62,5	8,0	15,62	125
40		40			10,0		156,2
50		50			12,5		195,2
ШЛ40Х40		40			16,0		640
50	40	50	40	100	20,0	40	800
64		64			25,6		1024
80		80			32,0		1280



Типовые броневые ленточные сердечники ПЛ

Обозначение сердечника	Основные размеры, мм				Справочные величины		
	a	b	c	h	$Q_{с,}$ см <sup>2</sup>	$Q_{ок,}$ см <sup>2</sup>	$Q_{с} \cdot Q_{ок,}$ см <sup>4</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
ПЛ10Х20				20		2,5	3,12
25	10	12,5	12,5	25	1,25	3,12	3,9
32				32		4	5
40				40		5	6,25
ПЛ12,5Х30				30		6	18,72
40	12,5	25	20	40	3,12	8	25
50				50		10	31,2
60				60		12	37,44
ПЛ16Х40				40		10	51,2
50	16	32	25	50	5,12	12,5	64
65				65		16,25	83,2
80				80		20	102,4

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

1	2	3	4	5	6	7	8
ПЛ20Х50				50		16	128
60	20	40	32	60	8,0	19,2	153,6
80				80		25,6	204,8
100				100		32	256
ПЛ25Х65				65		26	325
32	25	50	40	80	12,5	32	400
40				100		40	500
50				120		48	600
ПЛ32Х80				80		40	819
100	32	64	50	100	20,48	50	1024
130				130		65	1331
160				160		80	1638

Таблица 1

## Основные характеристики некоторых обмоточных проводов

Марки проводов	Наименование и изоляция провода	Номер ГОСТ	Класс нагревостойкости	Размеры провода (по диаметру), мм	Пробивное напряжение изоляции (не менее), В		Рекомендуемая область применения
					при минимальном размере	при максимальном размере	
ПЭЛ	Провод эмалированный лакостойкий. Лакостойкая масляная эмаль.	2773-51	A	0,05-2,44	300	1250	При отсутствии повышенных требований по надёжности и при требовании малой стоимости (бытовая аппаратура)
ПЭЛУ	Провод эмалированный лакостойкий с утолщённой изоляцией.	«	A	0,05-2,44	450	1600	
ПЭВ-1	Провод изолированный высокопрочной эмалью в один слой. Эмаль винифлекс.	7262-54	E	0,05-2,44	350	1400	При несколько повышенных требованиях по надёжности.
	Провод изолированный высокопрочной эмалью в два слоя. Эмаль винифлекс.	«	E	0,05-2,44	450	2000	
ПЭВ-2	Провод эмалированный лакостойкой эмалью и одним слоем обмотки из натурального шёлка.	6324-52	A	0,05-2,1	250	1000	При требовании повышенной механической прочности и отсутствии требований по дешевизне.
ПЭЛШО	Провод эмалированный лакостойкой эмалью и одним слоем обмотки из шёлка капрон.	«	A	0,05-2,1	250	1000	
ПЭЛШКО	Провод изолированный двумя слоями хлопчатобумаж-	«	A	0,2-5,2	250	1000	При использовании больших сечений и отсутствии повышен-

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Таблица 2

Номинальный $d$ провода, мм	Сечение провода расчётное (без изоляции), мм <sup>2</sup>	Минимальный $d$ провода с изоляцией, мм					
		ПЭН	ПЭЛУ	ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭЛШКО	ПЭД
1	2	3	4	5	6	7	8
0,05	0,00196	0,065	0,075	-	-	0,13	-
0,06	0,00283	0,075	0,085	0,085	0,09	0,14	-
0,07	0,00385	0,85	0,095	0,095	0,10	0,15	-
0,08	0,00503	0,095	0,105	0,105	0,11	0,16	-
0,09	0,00636	0,105	0,115	0,115	0,12	0,17	-
0,10	0,00785	0,120	0,135	0,125	0,13	0,18	-
0,11	0,00950	0,130	0,145	0,135	0,14	0,19	-
0,12	0,01131	0,140	0,155	0,145	0,15	0,20	-
0,13	0,01327	0,150	0,165	0,155	0,16	0,21	-
0,14	0,01539	0,160	0,175	0,165	0,17	0,22	-
0,15	0,01767	0,170	0,185	0,18	0,19	0,23	-
0,16	0,02011	0,180	0,195	0,18	0,20	0,24	-
0,17	0,02270	0,190	0,205	0,20	0,21	0,25	-
0,18	0,02545	0,200	0,215	0,21	0,22	0,26	-
0,19	0,02835	0,210	0,225	0,22	0,23	0,27	-
0,2	0,03142	0,225	0,24	0,23	0,24	0,30	0,40
0,21	0,03464	0,235	0,25	0,24	0,25	0,31	0,41
0,23	0,04155	0,255	0,27	0,27	0,28	0,33	0,43
0,25	0,04909	0,275	0,29	0,29	0,30	0,36	0,45
0,27	0,05726	0,31	0,33	0,31	0,32	0,38	0,50
0,29	0,06605	0,33	0,35	0,33	0,34	0,40	0,52
0,31	0,07548	0,35	0,37	0,35	0,36	0,43	0,54
0,33	0,08553	0,37	0,39	0,37	0,38	0,45	0,56
0,35	0,09621	0,39	0,41	0,39	0,41	0,47	0,58
0,38	0,1134	0,42	0,44	0,42	0,44	0,50	0,61

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8
0,41	0,1320	0,45	0,47	0,46	0,47	0,53	0,64
0,44	0,1521	0,49	0,51	0,48	0,50	0,56	0,67
0,47	0,1735	0,52	0,54	0,51	0,53	0,59	0,70
0,49	0,1886	0,54	0,56	0,53	0,55	0,61	0,72
0,51	0,2043	0,56	0,58	0,56	0,58	0,64	0,74
0,53	0,2206	0,58	0,60	0,58	0,60	0,66	0,76
0,55	0,2376	0,60	0,62	0,60	0,62	0,68	0,78
0,57	0,2552	0,62	0,64	0,62	0,64	0,70	0,80
0,59	0,2734	0,64	0,69	0,64	0,66	0,72	0,82
0,62	0,3019	0,67	0,72	0,67	0,69	0,75	0,85
0,64	0,3217	0,69	0,74	0,69	0,72	0,77	0,87
0,67	0,3526	0,72	0,78	0,72	0,74	0,80	0,90
0,69	0,3739	0,74	0,80	0,74	0,77	0,82	0,92
0,72	0,4072	0,78	0,83	0,77	0,80	0,86	0,96
0,74	0,4301	0,80	0,86	0,80	0,83	0,88	0,98
0,77	0,4657	0,83	0,89	0,83	0,86	0,91	1,01
0,80	0,5027	0,86	0,92	0,86	0,89	0,94	1,04
0,83	0,5411	0,89	0,96	0,89	0,92	0,97	1,07
0,86	0,5809	0,92	0,99	0,92	0,96	1,00	1,10
0,90	0,6382	0,96	1,02	0,96	0,99	1,04	1,14
0,93	0,6793	0,99	1,05	0,99	1,02	1,07	1,17
0,96	0,7238	1,02	1,10	1,02	1,08	1,10	1,20
1,00	0,7854	1,07	1,15	1,05	1,12	1,15	1,29
1,04	0,8495	1,12	1,19	1,10	1,16	1,20	1,33
1,08	0,9161	1,16	1,23	1,15	1,20	1,24	1,37
1,12	0,9862	1,20	1,27	1,19	1,24	1,28	1,44
1,16	1,057	1,24	1,29	1,24	1,27	1,32	1,45
1,20	1,31	1,28	1,31	1,28	1,31	1,36	1,49
1,25	1,227	1,33	1,36	1,33	1,36	1,41	1,54
1,30	1,327	1,38	1,41	1,38	1,41	1,46	1,59
1,35	1,431	1,43	1,46	1,43	1,46	1,51	1,64
1,40	1,539	1,48	1,51	1,48	1,51	1,56	1,69
1,45	1,651	1,53	1,56	1,53	1,56	1,61	1,74
1,50	1,767	1,58	1,61	1,58	1,61	1,68	1,79

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8
1,56	1,911	1,64	1,67	1,64	1,67	1,74	1,85
1,62	2,061	1,71	1,74	1,70	1,73	1,80	1,91
1,68	2,217	1,77	1,80	1,76	1,79	1,86	1,98
1,74	2,378	1,83	1,86	1,82	1,85	1,92	2,04
1,81	2,573	1,90	1,93	1,90	1,93	1,99	2,11
1,88	2,776	1,97	2,00	1,97	2,00	2,06	2,18
1,95	2,987	2,04	2,07	2,04	2,07	2,13	2,25
2,02	3,205	2,12	2,15	2,11	2,14	2,20	2,32
2,10	3,464	2,20	2,23	2,20	2,23	2,28	2,40
2,16	4,012	2,36	2,39	2,36	2,39	-	2,62
2,21	4,676	2,54	2,57	2,54	2,57	-	2,80

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Магнитные свойства и удельные потери различных марок горячей-катаной и холоднокатаной электротехнической стали

Марка стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция в Тл, при напряжённости магнитного поля, А/см					Удельные потери, Вт/кг		
		B <sub>10</sub>	B <sub>25</sub>	B <sub>50</sub>	B <sub>100</sub>	B <sub>300</sub>	P <sub>1,0/50</sub>	P <sub>1,5/50</sub>	P <sub>1,7/50</sub>
1511	0,5	1,3	1,45	1,55	1,56	1,62	1,55	3,5	-
1512	0,35	1,28	1,43	1,4	1,57	1,66	1,4	3,1	-
1513	0,5	1,25	1,42	1,2	1,57	1,70	1,2	2,3	-
3411	0,5	1,75	1,8	1,85	1,92	2,00	1,1	2,45	2,3
3412	0,35	1,78	1,83	1,90	1,94	2,00	0,95	2,1	2,1
3413	0,5	1,8	1,85	1,92	1,97	2,00	0,8	1,75	1,9
3414	0,5	1,82	1,88	1,93	2,00	2,00	0,5	1,1	1,6

Магнитные свойства и удельные потери горячекатаной электро-технической стали марки 1514

Марка стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция в Тл, при напряжённости магнитного поля, А/см			Удельные потери, Вт/кг	
		B <sub>5</sub>	B <sub>10</sub>	B <sub>15</sub>	P <sub>0,75/400</sub>	P <sub>1,0/400</sub>
1514	0,35	1,21	1,3	1,44	10,7	19
	0,2	1,2	1,29	1,42	7,2	12,5
	0,1	1,19	1,28	1,4	6	10,3

Магнитные свойства и удельные потери холоднокатаной электро-технической стали марок 3411, 3412, 3413

Марки стали	Номинальная толщина ленты, мм	Магнитная индукция в Тл, при напряжённости магнитного поля, А/см						Удельные потери, Вт/кг	
		B <sub>0,4</sub>	B <sub>0,8</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>10</sub>	B <sub>25</sub>	P <sub>1,0/400</sub>	P <sub>1,5/400</sub>
		не менее						не более	
3411	0,15	0,5	0,8	1,1	1,3	1,45	1,7	10	23
3411	0,10	0,45	0,75	1,1	1,25	1,45	1,7	10	22
3411	0,08	0,4	0,75	1,1	1,25	1,45	1,7	10	22
3411	0,05	0,4	0,75	1,1	1,25	1,45	1,7	10	21
3412	0,15	0,6	0,95	1,25	1,4	1,55	1,75	9	20
3412	0,10	0,6	0,9	1,25	1,35	1,55	1,75	8,5	19
3412	0,08	0,55	0,9	1,25	1,35	1,55	1,75	8,5	19
3412	0,05	0,55	0,9	1,25	1,35	1,55	1,75	8,5	19
3413	0,15	0,8	1,1	1,4	1,55	1,69	1,82	8	19
3413	0,10	0,8	1,05	1,4	1,5	1,65	1,82	7,5	17
3413	0,08	0,8	1,05	1,4	1,5	1,65	1,82	7,5	17
3413	0,05	0,8	1,05	1,4	1,5	1,65	1,82	7,5	16



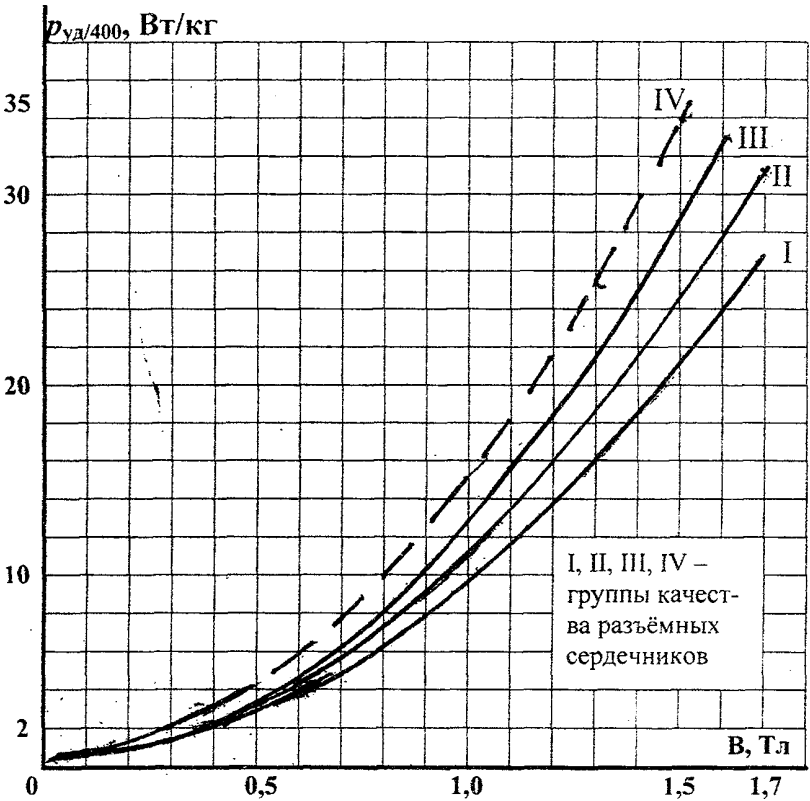
## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

В таблицах *Приложения 6* – обозначено:

- $B_2$  – магнитная индукция (амплитудное значение) при напряжённости магнитного поля 2 А/см;
- $B_4$  – магнитная индукция (амплитудное значение) при напряжённости магнитного поля 4 А/см;
- $B_5$  – магнитная индукция (амплитудное значение) при напряжённости магнитного поля 5 А/см;
- $B_{10}$  – магнитная индукция (амплитудное значение) при напряжённости магнитного поля 10 А/см;
- $B_{25}$  – магнитная индукция (амплитудное значение) при напряжённости магнитного поля 25 А/см и т.д.;
- $p_{1,0/50}$  – удельные потери при индукции (амплитудном значении) 1,0 Тл и частоте 50 Гц;
- $p_{1,5/50}$  – удельные потери при индукции (амплитудном значении) 1,5 Тл и частоте 50 Гц;
- $p_{1,7/50}$  – удельные потери при индукции (амплитудном значении) 1,7 Тл и частоте 50 Гц;
- $p_{0,75/400}$  – удельные потери при индукции (амплитудном значении) 0,75 Тл и частоте 400 Гц;
- $p_{1,0/400}$  – удельные потери при индукции (амплитудном значении) 1,0 Тл и частоте 400 Гц;
- $p_{1,5/400}$  – удельные потери при индукции (амплитудном значении) 1,5 Тл и частоте 400 Гц;

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Зависимость удельных потерь от индукции для ленточных сердечников из холоднокатаной стали (толщиной 0,08 – 0,15 мм) при частоте 400 Гц\*



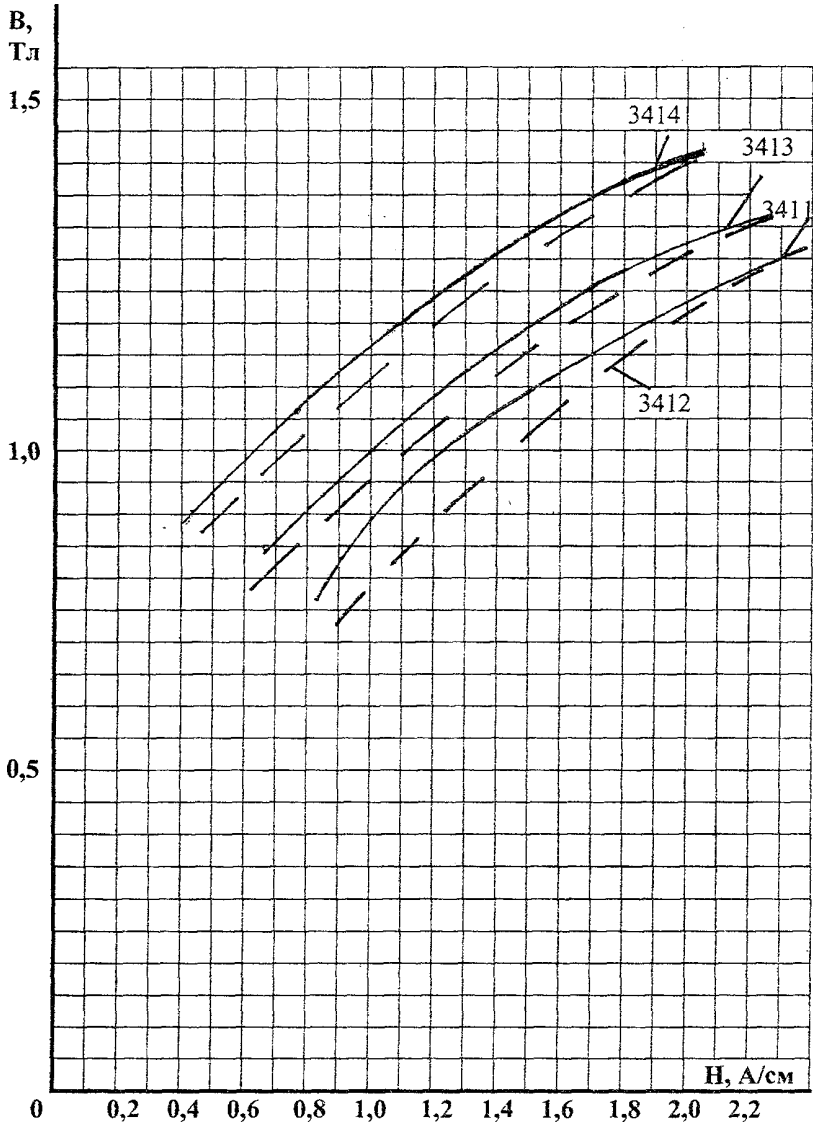
\*Для сердечников массой менее 70 г удельные потери увеличиваются в 1,2 – 1,3 раза по отношению к значению, получаемому от кривых.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Таблица значений коэффициента  $K_{иск}$

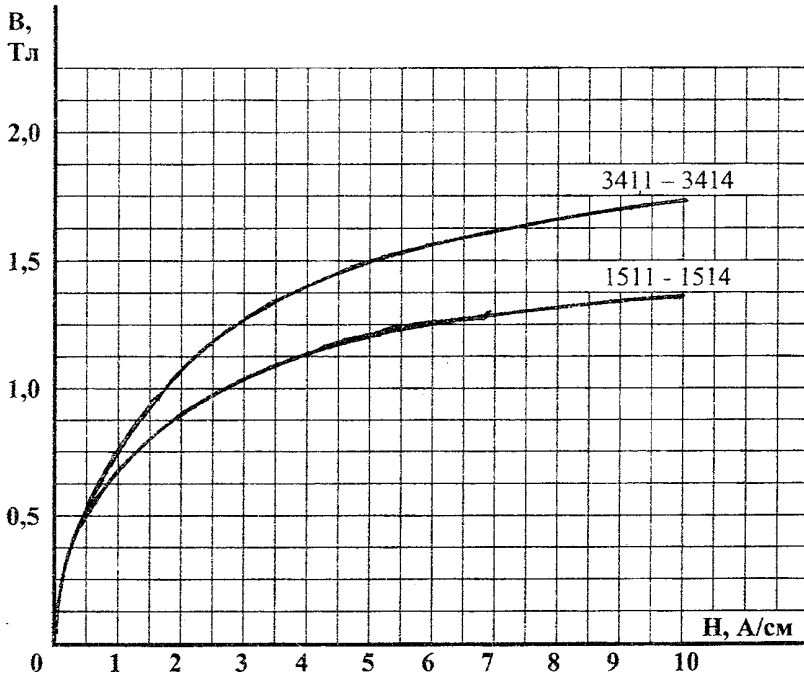
Индукция, Тл (амплитудное значение)	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
Горячекатаная сталь	1,24	1,31	1,38	1,46	1,51	1,56	-	-	-
Холоднокатаная сталь	1,14	1,19	1,26	1,33	1,38	1,41	1,44	1,53	1,61

Кривые намагничивания разных марок  
электротехнической стали



ПРИЛОЖЕНИЕ 86

Кривые намагничивания разных марок  
электротехнической стали



**Бумага конденсаторная марки КОН**

Плотность 1,0 г/см <sup>3</sup>	Толщина, мм	0,007	0,008	0,009	0,01	0,011	0,012	0,013	0,015	0,022	0,03
	Пробивное напряжение, В	300	320	330	350	370	390	410	430	490	590
Плотность 1,17 – 1,25 г/см <sup>3</sup>	Толщина, мм	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,01	0,012	0,015	0,022	0,03
	Пробивное напряжение, В	240	260	280	310	330	370	430	450	560	620

**Бумага кабельная**

Марки: К – 080, толщина 0,08 мм

К – 120, толщина 0,12 мм

К – 170, толщина 0,17 мм

**Бумага телефонная**

Марки: КТ – 04, толщина 0,04 мм

КТ – 05, толщина 0,05 мм

**Бумага электроизоляционная намоточная**

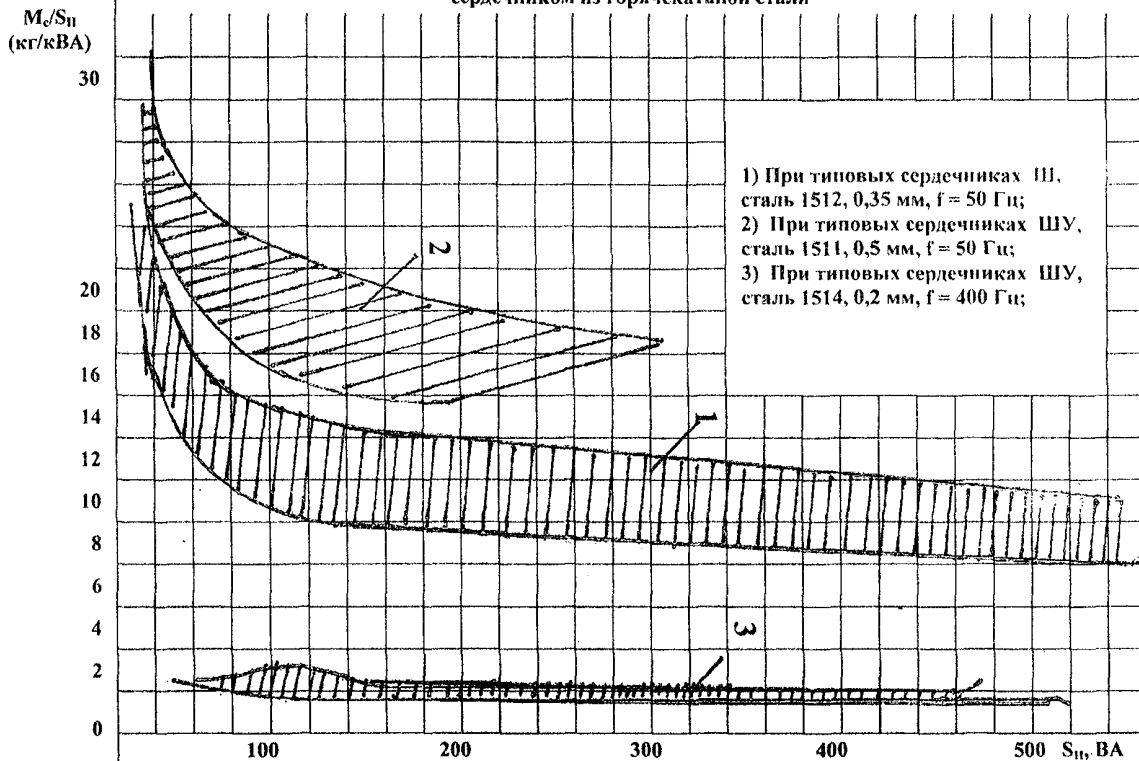
Марки: ЭН – 50, толщина 0,05 мм

ЭН – 70, толщина 0,07 мм

**Картон электроизоляционный выпускается следующих толщин, мм**

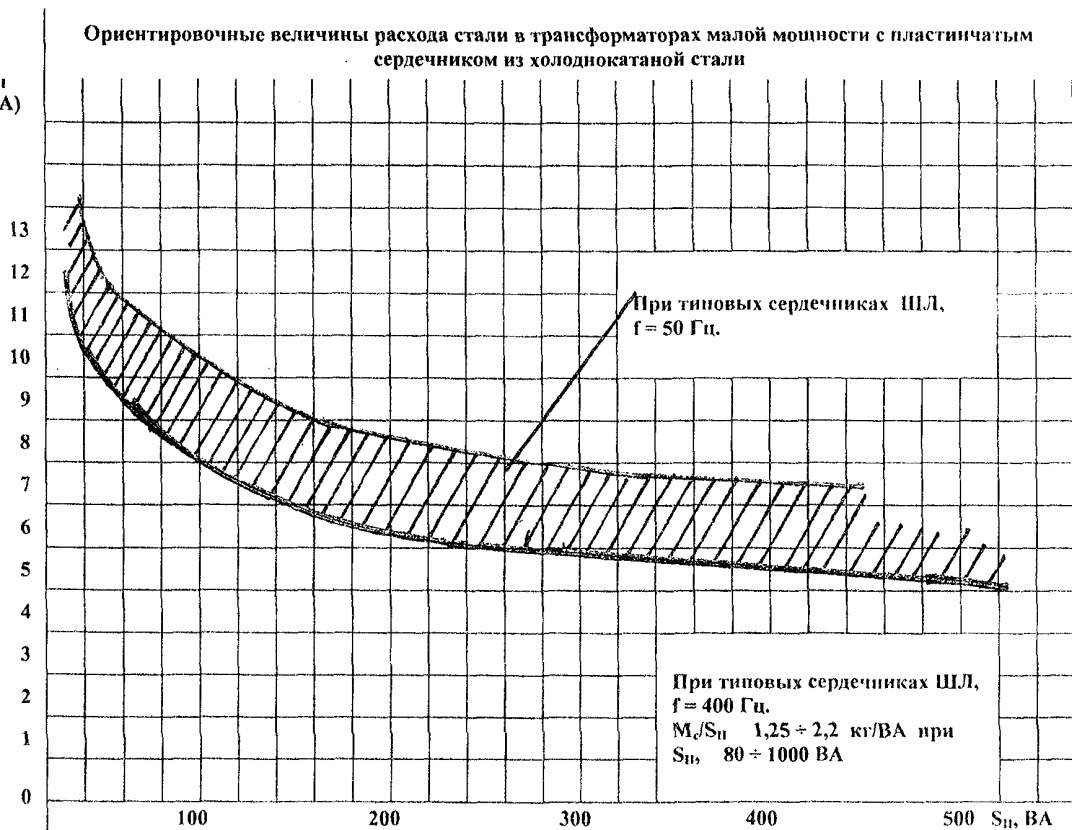
ЭВГ	0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4
ЭВП	0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3
ЭВТ	0,10; 0,15; 0,2; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45
Рулонный	0,10; 0,15; 0,2; 0,25; 0,30; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6
Листовой	1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0; 2,5; 3,0

Ориентировочные величины расхода стали в трансформаторах малой мощности с пластинчатым сердечником из горячекатаной стали



Ориентировочные величины расхода стали в трансформаторах малой мощности с пластинчатым сердечником из холоднокатаной стали

$M_c/S_{II}$   
(кг/кВА)





### **Конструкция сердечников.**

По конфигурации маломощные трансформаторы могут выполняться броневыми, стержневыми и тороидальными (рис. 1).

Трансформаторы стержневого типа могут выполняться с двумя катушками (рис. 1e) или с одной катушкой (рис. 1f). В двухкатушечном стержневом трансформаторе на каждом стержне, как правило, размещают, как правило, половинное число витков первичной и вторичной обмоток. На тороидальных сердечниках обмотки располагаются обычно по всей окружности сердечника. Сечение стержней выполняется квадратным или прямоугольным.

По конструктивному исполнению сердечники маломощных трансформаторов выполняются двух типов: пластинчатые и ленточные.

#### Пластинчатые сердечники.

Пластинчатые (или шихтованные) сердечники (рис.2) набирают из отдельных пластин. Материалом для них служит листовая электротехническая сталь, обычно легированная – для уменьшения потерь на вихревые токи.

Пластины сердечника большей частью штампуются, но в некоторых случаях они нарезаются с помощью ножниц. После штамповки или резки магнитные свойства материала ухудшаются вследствие появления механического наклёпа вдоль линии штамповки или резки. Для снятия наклёпа производят отжиг пластин, который происходит при температуре 80 -100 °С в течение 3 -4 часов.

Если отжиг не производить, то в результате механической обработки увеличатся удельные потери и уменьшится магнитная проницаемость стали.

После отжига пластины лакируются, т.е. покрываются тонким слоем изоляционного лака.

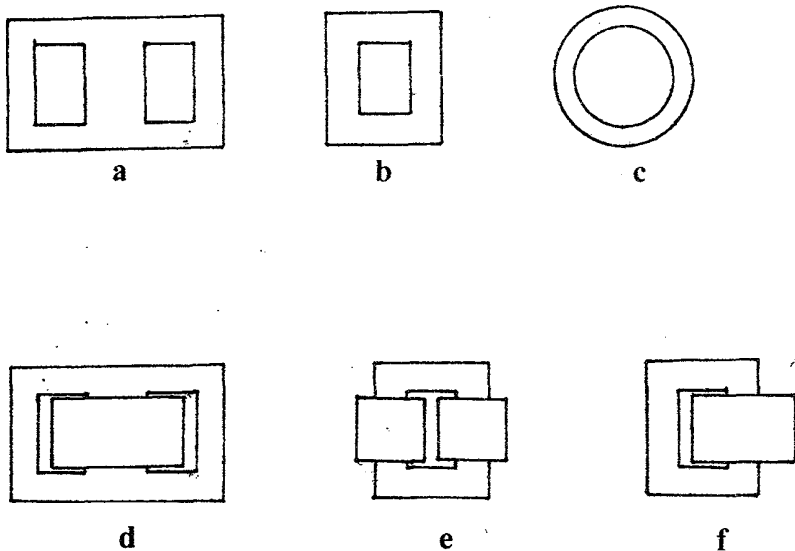


Рис. 1

- a** – сердечник бронзового типа,
- b** - сердечник стержневого типа,
- c** - тороидальный сердечник,
- d** - трансформатор бронзового типа,
- e** - трансформатор стержневого типа с двумя катушками,
- f** - трансформатор стержневого типа с одной катушкой.

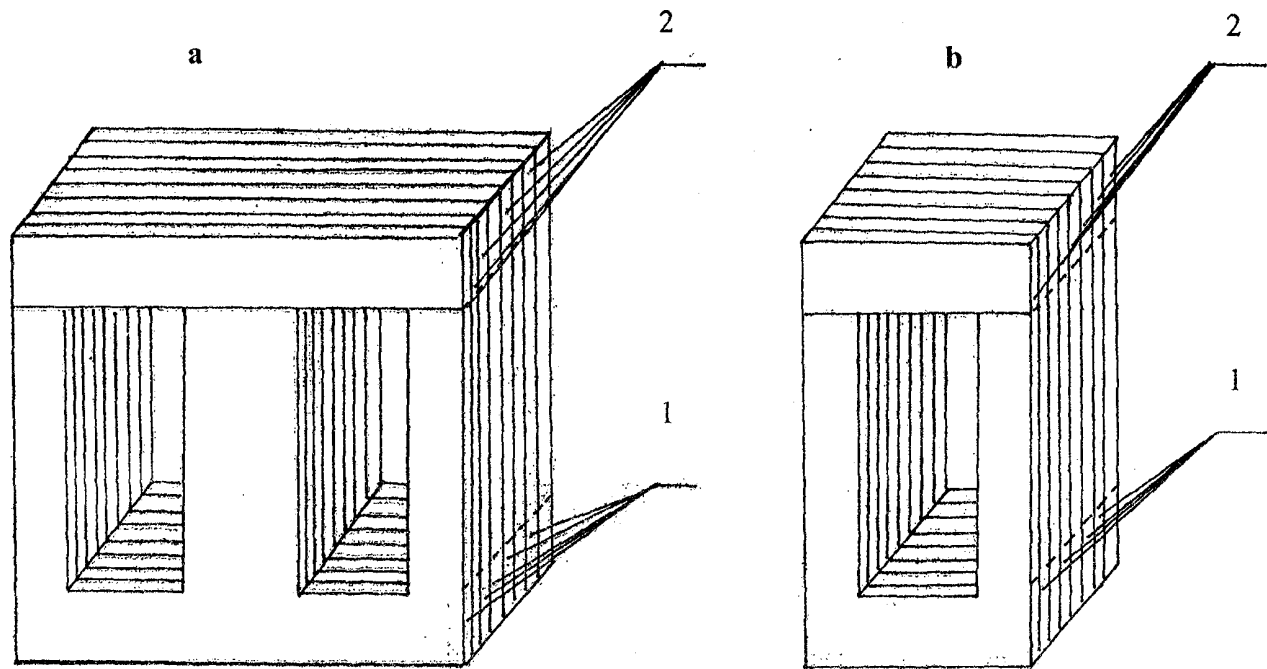


Рис. 2.  
Пластинчатые сердечники:  
а) броневой;  
б) стержневой.

Формы пластин, из которых собираются броневые и стержневые трансформаторы, могут быть различного вида. Выбор формы пластин зависит от конфигурации сердечника и должен обеспечить простоту заготовки, наименьшее число стыков и наиболее экономный раскрой стандартных листов электротехнической стали.

Для броневых трансформаторов применяются стандартные Ш-образные пластины (рис. 3а).

Размеры этих пластин стандартизованы.

В маломощных трансформаторах со стержневыми сердечниками применяют пластины, дающие наименьшее число стыков (два стыка).

На рис. 3б, рис. 3с и рис. 3д показаны П-образные и Г-образные пластины.

Если сердечник броневых трансформатора собран из Ш-образных пластин, выполненных так, что ширина яра равна половине ширины стержня, то его называют сердечником с нормальным ярмом; в этом случае магнитная индукция в стержне и ярме одинаковая.

Если же пластины сделаны так, что ширина яра больше половины ширины стержня, то Ш-образный сердечник, набранный из таких пластин, называется сердечником с уширенным ярмом; следовательно, в таком сердечнике индукция в ярме меньше индукции в стержне.

Применение пластин с уширенным ярмом даёт уменьшение индукции в ярме против таковой в стержне обычно на 15 – 20% и, следовательно, даёт возможность уменьшить намагничивающий ток.

Броневые и стержневые маломощные трансформаторы собираются посредством шихтовки пластин сердечника в предварительно изготовленную катушку. Для уменьшения магнитного сопротивления сборка сердечника из штампованных пластин производится вперекрышку;

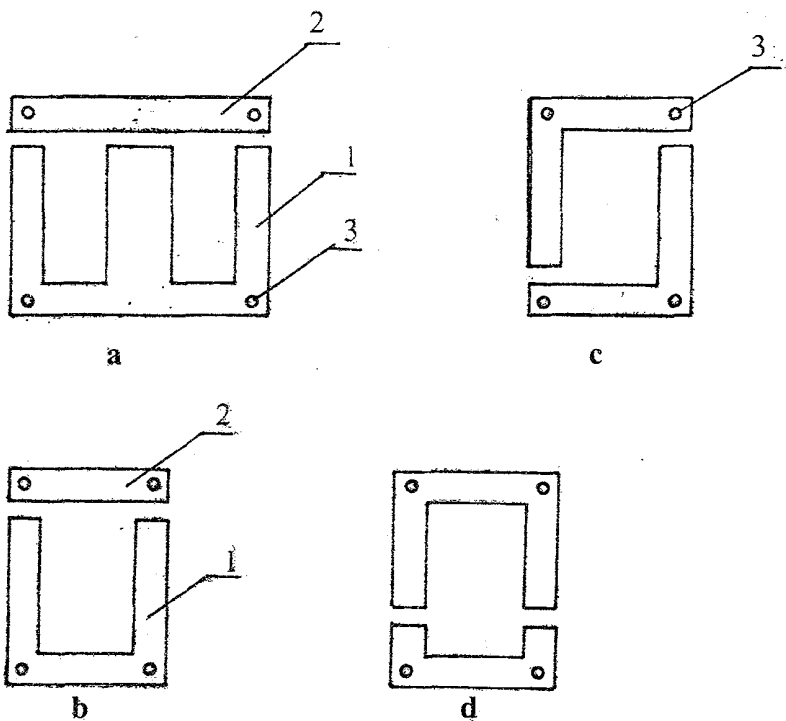


Рис. 3.

**а** – Пластины броневое сердечника:

- 1) Ш-образная пластина;
- 2) замыкающая пластина;
- 3) отверстия под шпильки.

**б** - Пластины стержневого сердечника

- 1) П-образная пластина;
- 2) замыкающая пластина;

**с** – Г-образные пластины стержневого сердечника

**д** – П-образные пластины стержневого сердечника

при таком способе сборки места стыков чередуются, т.е. каждый стык перекрывается пластиной (сквозной) следующего ряда (см. рис.3а).

Пластины, образующие сердечник, т.е. магнитную систему трансформатора, должны быть хорошо скреплены между собой для получения прочной конструкции.

Если какие-либо детали плохо затянуты, то может иметь место «гудение» трансформатора, причиной которого является механические колебания таких деталей магнитнопровода под влиянием периодического изменения магнитного потока с частотой питающей сети.

Стяжка отдельных пластин в единой пакет, образующий сердечник трансформатора, может производиться следующими способами:

- 1) посредством шпилек, пропускаемых через отверстия в пластинах, с применением скоб или накладок (рис. 4), либо специальных штампованных крышек или конструктивных уголков; применение специальных крышек (рис. 5) обеспечивает защиту обмоток трансформатора от механических повреждений;
- 2) посредством запрессовки пластин в специальную обойму (рис. 6), имеющую ушки с отверстиями для крепления трансформатора на месте установки.

Стяжные накладки, уголки и т.п. также используются одновременно для крепления трансформатора на месте его установки.

Скобы, накладки и другие крепёжные элементы могут изготавливаться из различных материалов – стали, латуни и др.; наиболее значительное применение имеет для этих целей полосовая сталь толщиной 1-2 мм.

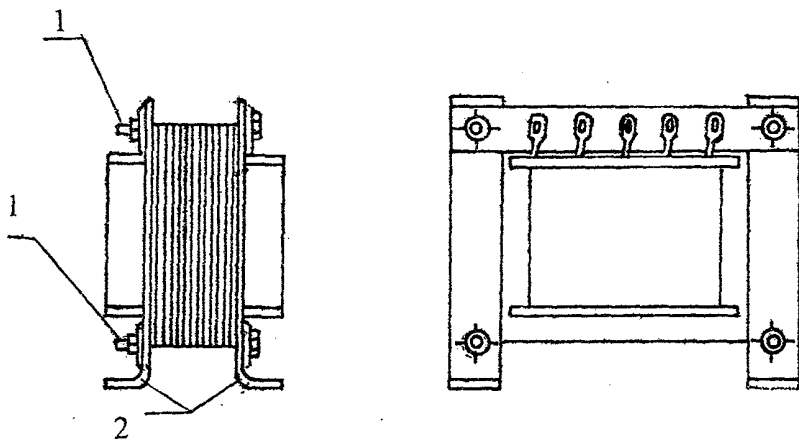


Рис. 4.

Трансформатор с сердечником стянутым шпильками (1) с применением скоб (2).

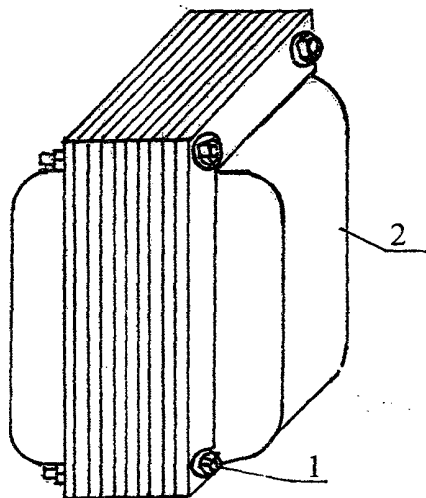


Рис. 5.

Трансформатор с сердечником стянутым шпильками (1) с применением штампованных крышек (2).

Во избежание увеличения потерь в трансформаторах стяжные шпильки, обоймы должны быть изолированы от сердечника изоляционной бумагой или тонким прессшпаном. В некоторых случаях необходима изоляция от сердечника также и накладок, а также других деталей крепления.

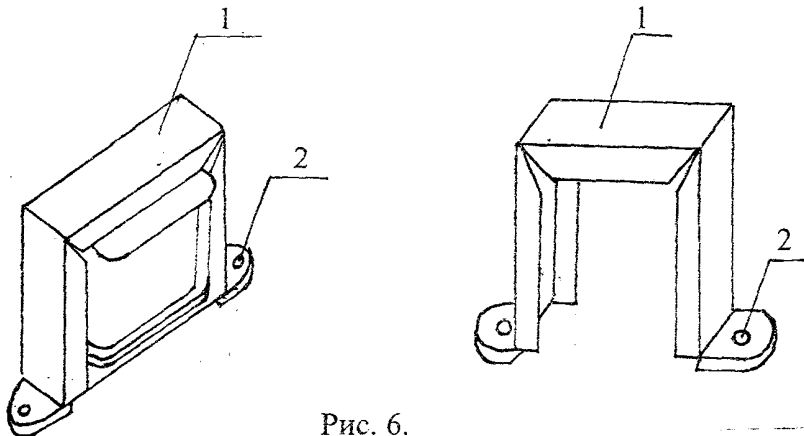


Рис. 6.

Трансформатор с сердечником, запрессованным в обойму (1), 2 – отверстия для крепления

#### Ленточные сердечники.

В последние годы в практике начали всё шире применять маломощные трансформаторы с ленточными сердечниками, которые изготавливаются из узкой и небольшой толщины ленты электротехнической стали или специального сплава.

Перед изготовлением сердечника лента покрывается слоем склеивающе-изоляционного состава. Это обеспечивает уменьшение вихревых токов, а также монолитность сердечника.

При изготовлении ленточных сердечников также производится их отжиг при температуре 850-950 °С, имеющий целью восстановление магнитных свойств материала, ухудшаемых при механической обработке его (снятие заусениц, резка и др.).



Для получения надлежащей механической прочности служит выполняемая дополнительная пропитка сердечника склеивающим составом, которая осуществляется после отжига.

В принципе возможно выполнение замкнутых ленточных броневых, стержневых и тороидальных сердечников (рис. 7) посредством навивки ленты на соответствующих металлических оправах.

Положительным качеством замкнутых ленточных сердечников является отсутствие стыков, следствием чего будет малое магнитное сопротивление потоку, замыкающемуся вдоль лент сердечника. Однако большим недостатком таких сердечников является трудность сочленения сердечника и катушек, так как надо либо вматывать в сердечник катушку, либо вматывать непрерывный ленточный сердечник в готовую катушку, что неудобно с точки зрения технологии.

Поэтому в практике применяются разъемные броневые и разъемные стержневые сердечники (рис. 8), собираемые в стык из половин, называемых С-образными или U-образными сердечниками.

Полусердечники или С-образные сердечники могут быть изготовлены либо посредством резки замкнутых сердечников на две половины, либо непосредственным изготовлением каждой половины отдельно; наибольшее применение имеет первый способ.

Для уменьшения магнитного сопротивления стыков поверхности сердечников в месте стыка подвергают механической обработке, т.е. шлифуют торцы, а также склеивают их специальной ферромагнитной пастой; последнее увеличивает и механическую прочность сердечника.

Следует отметить, что наименьшее ухудшение магнитных свойств материала, т.е. увеличение удельных

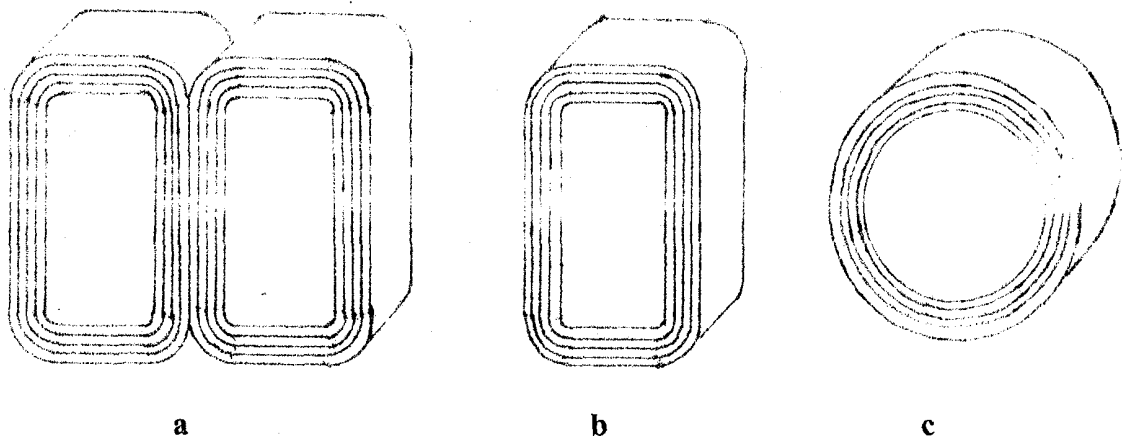
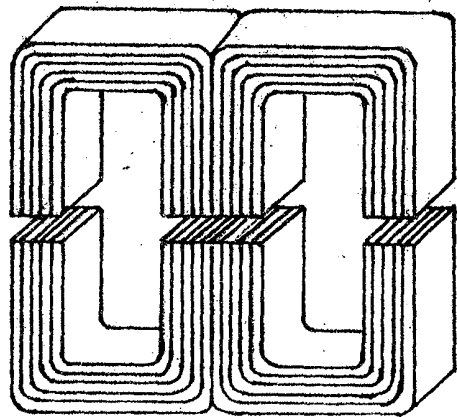
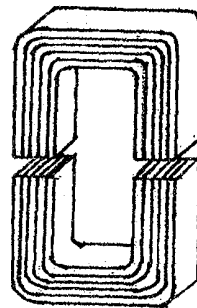


Рис. 7.  
Замкнутые ленточные сердечники:  
а – броневой; б – стержневой; с – тороидальный.



а



б

Рис. 8.  
Разъёмные ленточные сердечники:  
а – броневой; б – стержневой.

потерь и требуемой намагничивающей силы, в результате резки, достигается при применении абразивных кругов – корундовых, а ещё лучше алмазных.

При разъёмных ленточных сердечниках сборка трансформаторов упрощается: в готовые катушки, изготовляемые отдельно, вставляются при сборке половины сердечников (полусердечники), которые затем стягиваются с помощью металлических лент (бандажей) или планок. Стяжные ленты охватывают полусердечники; они скрепляются винтами, обеспечивающими необходимый натяг. Во многих случаях стяжные конструктивные элементы связаны с основанием, с помощью которого трансформатор крепится на месте установки.

Большей частью стяжные ленты выполняются из стали толщиной  $0,2 \div 0,6$  мм.

Тороидальные ленточные сердечники (рис. 8) обычно выполняются замкнутыми, т.е. неразъёмными. Поэтому отпадает необходимость в стяжных элементах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басова Б.К. «Руководство по курсовому проектированию маломощных трансформаторов». М.: МИИТ, 1970.
2. Ермолин В.П., Ваганов А.П. «Расчёт маломощных трансформаторов». М.: Госэнергоиздат, 1957.
3. Глущенко М.Д., Реморов А.А., Смазнов П.П., Соломатин В.В. «Проектирование трансформаторов для питания устройств автоматики, телемеханики и микропроцессорных систем». Выпуск 1. М.: МИИТ. 2001.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1. Основное расчётное уравнение и особенности расчёта маломощных трансформаторов.....	4
2. Определение токов в обмотках трансформатора .....	9
3. Выбор электромагнитных нагрузок – магнитной индукции и плотности тока .....	11
4. Определение основных размеров сердечника .....	14
5. Определение числа витков обмоток .....	21
6. Определение сечения и диаметра проводов обмоток .....	24
7. Определение площади окна, необходимой для размещения обмоток трансформатора .....	25
8. Укладка обмоток на стержнях и проверка размещения их в окне выбранного сердечника .....	26
9. Определение средней длины витка обмоток .....	32
10. Масса меди обмоток .....	34
11. Масса стали сердечника .....	34
12. Потери в меди обмоток .....	36
13. Потери в стали сердечника .....	37
14. Определение тока холостого хода .....	39
15. Сопротивление обмоток, падение напряжения в них и напряжение короткого замыкания .....	42
16. Изменение напряжения при нагрузке .....	43
17. Коэффициент полезного действия .....	44
18. Проверка трансформатора на нагрев .....	46
19. Сводные данные расчёта .....	51
Приложения .....	52
Список литературы .....	85

Учебно-методическое издание

**Глущенко Михаил Дмитриевич**  
**Васильев Евгений Васильевич**  
**Реморов Андрей Алексеевич**  
**Смазнов Пётр Петрович**

Проектирование трансформаторов для питания устройств автоматике, телемеханики, и микропроцессорных систем.

Методические указания к курсовому проектированию по дисциплине «Электрические машины» для студентов специальности «Автоматика, телемеханика и связь».

---

Подписано к печати – **24.12.04.**      Формат 60×84/16

Усл. Печ. Л. – **5,5.**      Заказ № **852.**

Изд. № **128-04.**      Тираж 100 экз.

Цена – **38 руб. 50 коп.**

---

127994, Москва,  
ул. Образцова, 15  
Типография МИИТа

