

ГОУ ВПО УГТУ-УПИ

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА**

Методические указания к курсовому проектированию  
для студентов дневной формы обучения  
специальности 18.05 – Электротехнологические установки и системы

Екатеринбург      2004 г.

УДК 621.314.212.045.001

Составители В.С.Проскуряков, С.В.Соболев, В.Н.Удинцев, М.В.Юрченко

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА: Методические указания к курсовому проектированию.

Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004 г.

Методические указания содержат рекомендации по выполнению второго этапа проектирования трехфазного силового масляного трансформатора. Даны рекомендации по выбору типа обмоток, приведена методика расчета и выбора обмоточного провода для различных типов обмоток. Описаны особенности расчета параметров короткого замыкания и оценки теплового состояния трансформатора. В приложении приведены необходимые справочные сведения. Методические указания предназначены для курсового проектирования студентов третьего курса специальности 1805 - Электротехнологические установки и системы.

Рис.13 . Табл.11 .

Подготовлено кафедрой электротехники и электротехнологических систем.



Уральский государственный  
технический университет, 2004

## Введение

Проектирование обмоток трансформатора выполняется после выбора главных размеров трансформатора. Задачи, решаемые на этом этапе:

1. Выбор типа обмоток.
2. Расчет и выбор обмоточного провода и определение размеров обмоток.
3. Расчет параметров короткого замыкания и оценка теплового состояния и механической прочности обмоток.

Проектирование обмоток трансформатора осуществляется с учетом производственных и эксплуатационных требований, предъявляемых к ним.

Производственные требования сводятся к оптимизации затрат материалов и труда на производство трансформатора. Это обеспечивается выбором рационального типа обмотки, материала обмоточного провода, компактным размещением и распределением витков и катушек чтобы ограничить расход обмоточного провода и обеспечить наилучшее заполнение окна магнитопровода.

К эксплуатационным требованиям относятся механическая прочность при воздействии сил короткого замыкания и ограниченный нагрев обмоток в номинальном режиме работы.

Механическая прочность обеспечивается рациональным расположением витков и катушек так, чтобы ограничить возникающие электромагнитные усилия.

Для достижения необходимой нагревостойкости следует обеспечить эффективную теплоотдачу от обмотки в охлаждающую среду путем создания развитой охлаждающей поверхности и выбором рациональной плотности тока. Требование эффективной теплоотдачи ограничивает размер обмотки между двумя охлаждающими поверхностями.

Критерием эффективности теплоотдачи обмотки являются потери в обмотке, отнесенные к площади охлаждающей поверхности (плотность теплового потока,  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>). На рис. П.1 приведены зависимости предельно допустимого размера обмотки от плотности тока, обеспечивающего заданную плотность теплового потока. Эти кривые позволяют проводить предварительную оценку теплового состояния обмотки на стадии выбора обмоточного провода.

## 1. Выбор типа обмоток

Выбор типа первичной и вторичной обмоток трансформатора производится с учетом требований, предъявляемых к обмоткам. Рекомендации по выбору типа обмоток сведены в таблице. Основные критерии для выбора типа обмоток следующие:

1. Мощность трансформатора ( $S$ , кВА).
2. Ток фазы обмотки ( $I_{\phi}$ , А).
3. Номинальное напряжение ( $U_{\text{ном}}$ , кВ).
4. Сечение витка обмотки ( $\Pi$ , мм<sup>2</sup>).

Основные свойства и пределы применимости обмоток разных типов

Тип обмотки	Применение	Основные достоинства	Основные недостатки	Диапазон значений критериев выбора (ориентировочно)				Число параллельных проводов в витке
				Мощность трансформатора, S, кВА	Ток на стержень, I, А	Линейное напряжение, U, кВ	Сечение витка, П, мм <sup>2</sup>	
Цилиндрическая одно- и двухслойная из прямоугольного провода	НН (ВН)	Технологичность, Хорошее охлаждение	Малая механическая прочность	До 630	10-800	До 6	5-300	1-8
Цилиндрическая многослойная из прямоугольного провода	ВН (НН)	Технологичность, Хорошее заполнение окна магнитопровода	Меньшая поверхность охлаждения (по сравнению с обмотками, имеющими радиальные каналы)	630 - 80000	10-1200	10 ; 35	5-500	1-8

Цилиндрическая многослойная из круглого провода	ВН (НН)	Технологичность	Ухудшение теплоотдачи и уменьшение механической прочности при большой мощности	До 630	0,3-130	До 35	0,1 - 50,0 (До 30,0)*	1-2 (1-3)*
Винтовая одно- и многоходовая	НН	Механическая прочность, надежная изоляция, хорошее охлаждение	Высокая стоимость по сравнению с цилиндрической обмоткой	100 и выше	200 и более	До 35	75 и более	4-16
Непрерывная катушечная (спиральная)	ВН (НН)	Электрическая и механическая прочность, хорошее охлаждение	Повышенная сложность технологии (необходимость перекладки катушек)	100 и выше (180 и выше)*	10 и более (17 и более)*	До 220	5 и более	1-5

Первые три параметра определены техническим заданием либо предыдущим этапом проектирования (выбор главных размеров).

Сечение витка обмотки предварительно может быть определено следующим образом:

$$П = \frac{I_{\phi}}{\Delta_{cp}}, \quad (1)$$

где  $I_{\phi}$  - ток фазы обмотки, А,

$\Delta_{cp}$  – средняя плотность тока обмоток (А/мм<sup>2</sup>), которая предварительно определяется соотношением:

$$\text{для медной обмотки} \quad \Delta_{cp} = 0,746 \cdot 10^4 k_{\partial} \frac{P_k u_{\partial}}{S d_{12}}, \quad (2)$$

$$\text{для алюминиевой обмотки} \quad \Delta_{cp} = 0,463 \cdot 10^4 k_{\partial} \frac{P_k u_{\partial}}{S d_{12}}. \quad (3)$$

Здесь  $P_k$  (кВт) и  $S$  (кВА) - мощность короткого замыкания и полная мощность трансформатора, заданные в техническом задании;

$d_{12}$  – средний диаметр обмоток (мм), определяемый на этапе расчета главных размеров;

$k_{\partial}$  - коэффициент, учитывающий наличие добавочных потерь и приближенно определяемый полной мощностью трансформатора по табл.П.1;

$u_{\partial}$  - ЭДС одного витка обмоток (В), определяемая соотношением

$$u_{\partial} = 4,44 \cdot 10^{-6} f B_c П_c, \quad (4)$$

где  $B_c$  - индукция в стержне магнитопровода (Тл), определяемая маркой стали при расчете главных размеров;

$П_c$  – сечение стержня магнитопровода (мм<sup>2</sup>), определяемое диаметром ( $d$ , мм)

$$\Pi_c = \frac{\pi d^2}{4} k_{кр} . \quad (5)$$

Полученные критерии позволяют выбрать тип обмоток (первичной и вторичной) по табл.1.

## 2. Расчет обмоток и выбор обмоточного провода

Число витков в фазе первичной обмотки

$$w_1 = \frac{U_{\phi 1}}{u_e} . \quad (6)$$

Полученное по ( 6 ) значение  $w_1$  округляется до ближайшего целого числа. При этом корректируется ЭДС одного витка и индукция в стержне

$$u_e = \frac{U_{\phi 1}}{w_1} , \quad (7)$$

$$B_c = \frac{u_e}{4,44 \cdot 10^{-6} f \Pi_c} . \quad (8)$$

Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = w_1 \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 1}} . \quad (9)$$

Дальнейший расчет определяется выбранным типом обмоток (первичной и вторичной). Ниже приведена методика расчета обмоток разных типов.



## 2.1. Цилиндрическая одно- и двухслойная обмотка из прямоугольного провода

Однослойная обмотка используется в качестве обмотки низкого напряжения (иногда высокого напряжения) при мощности трансформатора до 18 кВА. При большей мощности используется двухслойная обмотка.

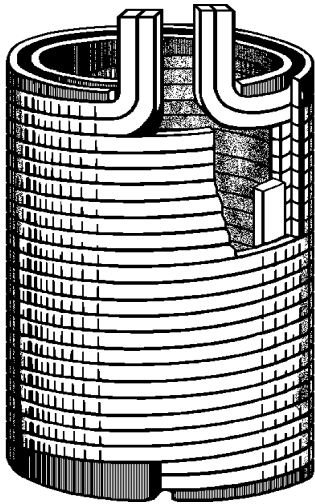


Рис.1. Цилиндрическая двухслойная обмотка

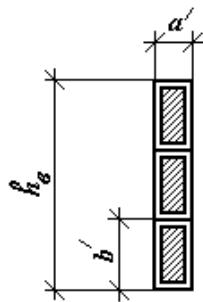


Рис.2. Сечение витка обмотки

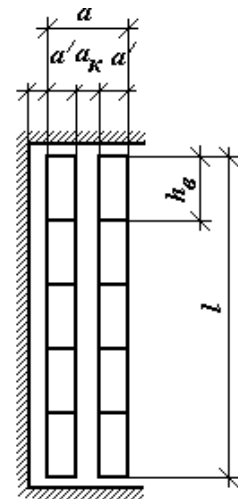


Рис.3. Размеры двухслойной цилиндрической обмотки с осевым каналом

Число витков в слое обмотки

$$w_{сл} = \frac{w}{n_{сл}}, \quad (10)$$

где  $n_{сл}$  – число слоев обмотки (1 или 2).

Ориентировочный осевой размер витка (мм)

$$h_в = \frac{l}{(w_{сл} + 1)}, \quad (11)$$

где  $l$  – высота обмотки (мм), предварительно определенная на этапе выбора главных размеров.

По полученным значениям  $\Pi$  и  $h_в$  выбирается провод из сортамента обмоточного провода по табл.П.5.

При невозможности выбора одного провода выбирается несколько параллельных проводов. При этом число параллельных проводов при намотке плашмя не более 6, при намотке на ребро не более 8 (предпочтительна намотка провода плашмя). Суммарное сечение параллельных проводов равно сечению витка.

Для обеспечения эффективной теплоотдачи радиальный размер провода (между двумя охлаждающими каналами) не должен превышать предельного значения, определяемого допустимой плотностью теплового потока ( $q$ , Вт/м<sup>2</sup>) по рис. П.1. Для масляных трансформаторов  $q = 1200 - 1500$  Вт/м<sup>2</sup>.

Размеры выбранного провода записываются в следующем виде:

$$\text{Марка провода} \times \text{число параллельных проводов} \times \frac{\text{размеры провода без изоляции}}{\text{размеры провода в изоляции}}$$

Полное сечение витка из  $n_v$  параллельных проводов

$$П = П' n_v, \quad (12)$$

где  $П'$  - сечение одного провода (мм<sup>2</sup>).

Уточненная плотность тока

$$\Delta = \frac{I\phi}{П}. \quad (13)$$

Осевой размер витка

$$h_v = b' n_v, \quad (14)$$

где  $b'$  - осевой размер провода в изоляции (мм).

Осевой размер обмотки

$$l = h_v (w_{сл} + 1). \quad (15)$$

Радиальный размер обмотки (мм):

$$a = a' n_{сл} + a_k (n_{сл} - 1), \quad (16)$$

где  $a'$  - радиальный размер провода в изоляции (мм),

$a_k$  – радиальный размер канала между двумя слоями, который выбирается

по условиям охлаждения в соответствии с рекомендациями табл.П.2.  
Поверхность охлаждения обмотки трех фаз (ориентировочно) ( $\text{м}^2$ ):

$$P_o = 2sn_{\text{сл}}k\pi d_{12}(l + a') \cdot 10^{-6}, \quad (17)$$

где  $k$  – учитывает закрытие части поверхности обмотки рейками и другими изоляционными деталями.

## 2.2. Многослойная цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода

Обмотка этого типа может применяться в качестве обмотки высокого напряжения (в некоторых случаях низкого напряжения) в масляных трансформаторах класса напряжения 10 и 35 кВ мощностью свыше 1000 кВА.

По сечению витка ( $\text{П}$ ,  $\text{мм}^2$ ) выбирается провод из сортамента обмоточного провода по табл.П.5 (в один провод или несколько параллельных проводов). Размеры выбранного провода записываются в следующем виде:

Марка провода  $\times$  число параллельных проводов  $\times \frac{\text{размеры провода без изоляции}}{\text{размеры провода в изоляции}}$ .

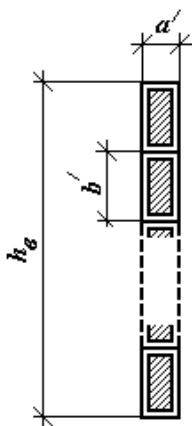


Рис.4. Сечение витка цилиндрической обмотки

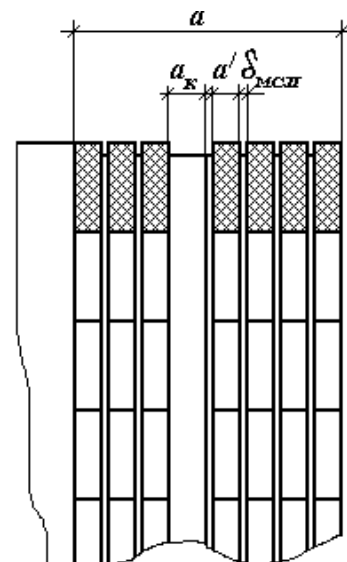


Рис.5. Многослойная цилиндрическая обмотка ( $n_{\text{сл}} = 7$ ,  $n = 2$ )

Высота витка 
$$h_{\text{в}} = n_{\text{в}} b', \quad (18)$$

где  $b'$  - размер провода в изоляции в осевом направлении (мм),

$n_{\text{в}}$  – число параллельных проводов в витке.

Число витков в слое

$$w_{\text{сл}} = \frac{l}{h_{\text{в}}} - 1, \quad (19)$$

где  $l$  – высота обмотки (мм), предварительно определенная на этапе выбора главных размеров.

Полученное значение  $w_{\text{сл}}$  округляется до целого числа.

Число слоев обмотки

$$n_{\text{сл}} = \frac{w}{w_{\text{сл}}} \quad (20)$$

округляется до большего целого числа.

Уточненный осевой размер обмотки (мм):

$$l = h_{\text{в}} w_{\text{сл}}. \quad (21)$$

Для расчета радиального размера обмотки необходим выбор междуслойной изоляции, которая определяется напряжением двух слоев

$$U_{\text{мсл}} = 2w_{\text{сл}}u_{\text{в}}. \quad (22)$$

По табл.П.3. выбирается число слоев и общая толщина ( $\delta_{\text{мсл}}$ ) для междуслойной изоляции.

Радиальный размер обмотки с учетом междуслойной изоляции (мм)

$$a = a' n_{\text{сл}} + \delta_{\text{мсл}} (n_{\text{сл}} - 1), \quad (23)$$

где  $a'$  - радиальный размер провода в изоляции (мм).

Этот размер не должен превышать предельного значения (между двумя охлаждающими каналами) по допустимой плотности теплового потока, определяемого по рис.П.1 (для масляного трансформатора  $q=1200-1500$  Вт/м<sup>2</sup>).

Если размер (а) превышает предельное значение, то обмотка делится на 2 (или более) катушки с осевым каналом между ними (см. рис.5). Ширина канала  $a_k = 0,01 l$ , но не менее 5 мм. При этом радиальный размер обмотки увеличивается на ширину канала (или каналов):

$$a = a' n_{сл} + \delta_{мсл} (n_{сл} - 1) + a_k (n - 1), \quad (24)$$

где  $n$  – число катушек.

Поверхность охлаждения обмотки (м<sup>2</sup>)

$$P_o = 2cn\pi d_{12} \left( l + \frac{a}{n} \right) k \cdot 10^{-6}, \quad (25)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий закрытие части обмотки рейками и другими

изоляционными деталями ( $k = 0,75$ ).

Полное сечение витка из  $n_v$  параллельных проводов

$$P = P' n_v, \quad (26)$$

где  $P'$  - сечение выбранного провода, мм<sup>2</sup>.

Уточненная плотность тока

$$\Delta = \frac{I\phi}{P}. \quad (27)$$

### 2.3. Цилиндрическая многослойная обмотка из круглого провода

Обмотка такого типа используется в качестве обмотки высокого напряжения в масляных трансформаторах класса напряжения до 35 кВ мощностью до 630 кВА.

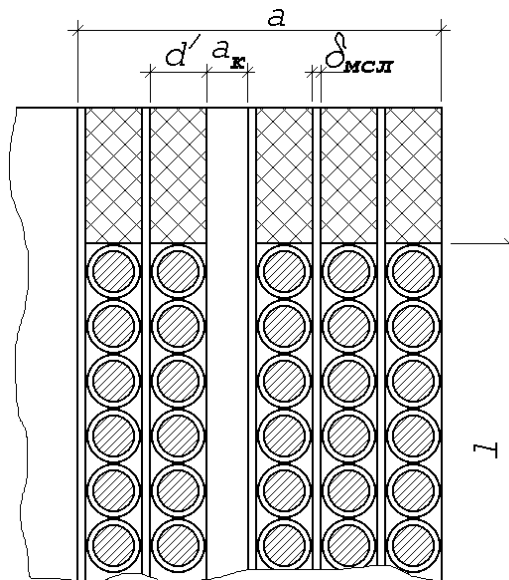
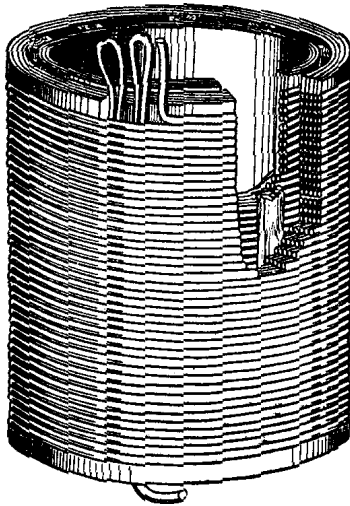


Рис.6. Цилиндрическая обмотка из круглого провода

Рис.7. Размеры цилиндрической обмотки из круглого провода  
( $n_{сл} = 5$ ,  $n = 2$ )

По ориентировочному сечению витка подбирается провод (в некоторых случаях 2-3 одинаковых параллельных провода) из сортамента обмоточного провода по табл.П.5.

Размеры выбранного провода записываются в следующем виде:

$$\text{Марка провода} \times \text{число параллельных проводов} \times \frac{\text{диаметр провода без изоляции}}{\text{диаметр провода в изоляции}}$$

Число витков в слое

$$w_{сл} = \frac{l}{n_{\text{в}} - d'} - 1, \quad (28)$$

где  $l$  – высота обмотки (мм), предварительно определенная на этапе выбора главных размеров;  $d'$  - диаметр провода в изоляции (мм).

Число витков в слое округляется до целого.

Число слоев в обмотке

$$n_{сл} = \frac{w}{w_{сл}} \quad (29)$$

округляется до большего целого.

Уточненный осевой размер обмотки (мм)

$$l = w_{сл} d' n_{сл}. \quad (30)$$

Для расчета радиального размера обмотки необходим выбор междуслойной изоляции, которая определяется напряжением двух слоев

$$U_{мсл} = 2w_{сл} u_{\text{в}}. \quad (31)$$

По табл.П.3 выбирается число слоев и общая толщина ( $\delta_{мсл}$ ) междуслойной изоляции.

Радиальный размер обмотки с учетом междуслойной изоляции (мм)

$$a = d' n_{сл} + \delta_{мсл} (n_{сл} - 1). \quad (32)$$

Этот размер ( $a$ ) не должен превышать предельного значения (между двумя охлаждающими каналами) по допустимой плотности теплового потока, определяемого по рис.П.1. (Для масляного трансформатора  $q=1200-1500$  Вт/м<sup>2</sup>).

Если размер ( $a$ ) превышает предельное значение, то обмотка делится на 2 (или более) катушки с осевым каналом между ними (см. рис.7). Ширина канала  $a_{\text{к}} = 0,01 l$ , но не менее 5 мм. При этом радиальный размер обмотки увеличивается на ширину канала (или каналов)

$$a = a' n_{сл} + \delta_{мсл} (n_{сл} - 1) + a_k (n - 1), \quad (33)$$

где  $n$  – число катушек.

Поверхность охлаждения обмотки ( $m^2$ )

$$P_o = 2cn\pi d_{12} \left( l + \frac{a}{n} \right) k \cdot 10^{-6}, \quad (34)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий закрытие части обмотки рейками и другими изоляционными деталями ( $k = 0,75$ ).

Полное сечение витка из  $n_v$  параллельных проводов

$$P = P' n_v, \quad (35)$$

где  $P'$  - сечение выбранного провода ( $mm^2$ ).

Уточненная плотность тока

$$\Delta = \frac{I\phi}{P}. \quad (36)$$

#### 2.4. Винтовая одно- и многоходовая обмотка

Винтовая обмотка используется в качестве обмотки низкого напряжения в масляных трансформаторах класса напряжения до 35 кВ мощностью 100 кВА и выше.

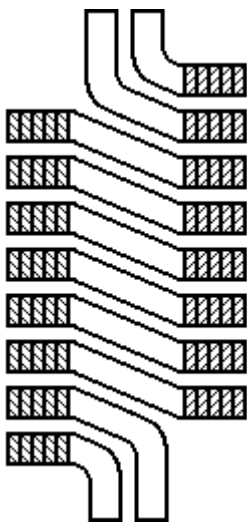


Рис.8. Винтовая двухходовая обмотка



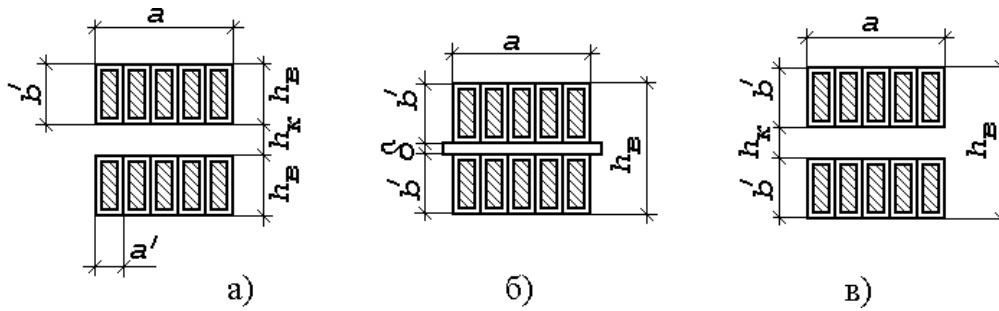


Рис.9. Сечение витка винтовой обмотки:

а)–одноходовая, б)–двухходовая, в)–двухходовая с радиальным каналом между ходами

Высота витка (осевой размер)

$$h_v = \frac{l}{w+1} - h_k, \quad (37)$$

где  $l$  – высота обмотки (мм), предварительно определенная на этапе выбора главных размеров;

$h_k$  – высота масляного охлаждающего канала между витками (мм).

Высота канала определяется радиальным размером обмотки, но не менее 4 мм.

Высота витка определяет осевой размер провода в изоляции. По высоте витка и сечению витка выбирается обмоточный провод (или несколько параллельных проводов) из сортамента по табл.П.5. При невозможности выбрать провод (когда высота витка превышает максимальный размер провода в сортаменте) следует применить двухходовую (многоходовую) обмотку. При этом ориентировочный осевой размер провода

$$b' = \frac{h_v - (n_x - 1)\delta}{n_x}, \quad (38)$$

где  $n_x$  - число ходов,

$\delta$  - толщина прокладки между ходами ( $\delta = 1,0 - 1,5$  мм).

Рекомендуемое число параллельных проводов ( $n_b$ ) для одноходовой обмотки – четыре, для двухходовой обмотки – восемь.

Размеры выбранного провода записываются в следующем виде:

$$\text{Марка провода} \times \text{число параллельных проводов} \times \frac{\text{размеры провода без изоляции}}{\text{размеры провода в изоляции}}.$$

Окончательно осевой размер витка (высота витка) (мм)

$$h_{\text{в}} = b' n_x + \delta(n_x - 1). \quad (39)$$

Полученная высота витка не должна превышать предельного размера (между двумя охлаждающими каналами) при допустимой плотности теплового потока, определяемого по рис.П.1. Допустимая плотность теплового потока для масляных трансформаторов  $q = 1200-1500 \text{ Вт/м}^2$ . Если это условие не выполняется, необходимо формировать охлаждающие каналы между ходами. При этом осевой размер витка увеличивается на ширину каналов ( $h_k$ )

$$h_{\text{в}} = b' n_x + h_k(n_x - 1). \quad (40)$$

Осевой размер обмотки (мм)

$$l = h_{\text{в}}(w + 1) + h_k w. \quad (41)$$

Радиальный размер обмотки (мм)

$$a = a' \frac{n_{\text{в}}}{n_x}, \quad (42)$$

где  $a'$  - радиальный размер выбранного провода (мм).

Поверхность охлаждения обмотки с прокладкой между ходами ( $\text{м}^2$ )

$$P_o = 2cw(b' n_x + \delta(n_x - 1) + a) \pi d_{12} k \cdot 10^{-6}. \quad (43)$$

Поверхность охлаждения обмотки с каналами между ходами ( $\text{м}^2$ )

$$\Pi_o = 2cw(b' + a)n_x \pi d_{12} k \cdot 10^{-6}, \quad (44)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий закрытие части обмотки рейками и другими изоляционными деталями ( $k = 0,75$ ).

Полное сечение витка из  $n_b$  параллельных проводов

$$\Pi = \Pi' n_b, \quad (45)$$

где  $\Pi'$  - сечение выбранного провода ( $\text{мм}^2$ ).

Уточненная плотность тока

$$\Delta = \frac{I\phi}{\Pi}. \quad (46)$$

### 2.5. Непрерывная катушечная (спиральная) обмотка

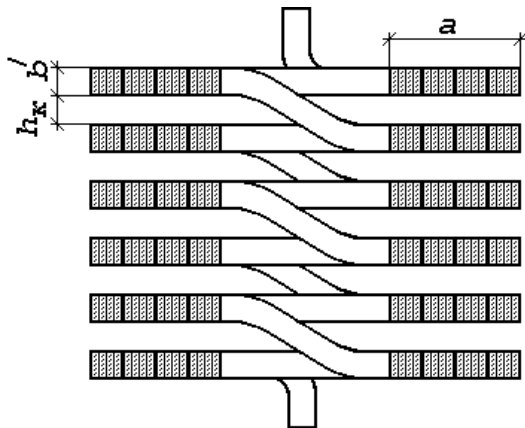


Рис.10. Спиральная обмотка

Спиральная обмотка используется в качестве обмотки высокого (иногда низкого) напряжения в масляных трансформаторах мощностью более 100 кВА класса напряжения до 220 кВ.

По ориентировочному сечению витка подбирается обмоточный провод из сортамента (табл.П.5) и число параллельных проводов. Для получения наиболее компактной обмотки следует выбирать более крупные сечения с большим размером  $b'$  и меньшим числом параллельных проводов.

При этом необходимо учитывать, что по условиям теплоотвода осевой размер провода ( $b'$ ) между двумя охлаждающими каналами не должен превышать предельное значение, определяемое допустимой плотностью теплового потока по рис.П.1. Допустимая плотность теплового потока для масляных трансформаторов  $q = 1200 - 1500 \text{ Вт/м}^2$ . Если осевой размер выбранного провода существенно меньше предельного значения (в два и более раз), следует применить сдвоенные катушки. При этом между отдельными катушками в паре прокладываются изоляционные шайбы толщиной  $\delta_{ш}$ , а между парами катушек формируется радиальный охлаждающий канал высотой  $h_k$  (рис.11).

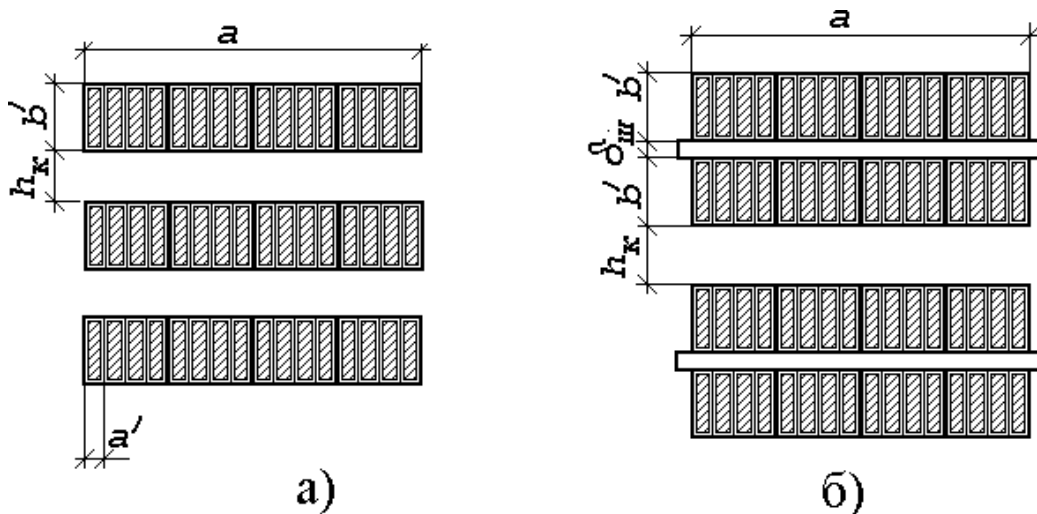


Рис.11. Сечение спиральной обмотки (а – с каналами между всеми катушками, б – со сдвоенными катушками)

Число катушек обмотки с каналами между всеми катушками

$$n_{кат} = \frac{l + h_k}{b' + h_k} \quad (47)$$

Число катушек обмотки с каналами между парами катушек

$$n_{кат} = \frac{2(l + h_k)}{2b' + h_k + \delta_{ш}} \quad (48)$$

где  $l$  – высота обмотки (мм), предварительно определенная на этапе выбора главных размеров;

$h_k$  – осевой размер канала (мм).

Осевой размер масляного канала зависит от рабочего напряжения одной катушки ( $U_{кат}$ ) и определяется соотношением

$$h_k = 0,006 \cdot U_{кат}, \quad (49)$$

но не может быть меньше 4 мм.

Толщина изоляционных шайб между катушками в паре  $\delta_{ш}=1$  мм (две шайбы по 0,5 мм).

Для удобства выполнения отводов от обмотки число катушек должно быть четным. В противном случае следует повторить выбор провода из сортамента с другим соотношением размеров либо незначительно скорректировать высоту обмотки.

Размеры выбранного провода записываются в виде

$$\text{Марка провода} \times \text{число параллельных проводов} \times \frac{\text{размеры провода без изоляции}}{\text{размеры провода в изоляции}}.$$

Высота обмотки с каналами между всеми катушками

$$l = b' n_{кат} + h_k (n_{кат} - 1) k. \quad (50)$$

Высота обмотки со сдвоенными катушками

$$l = b' n_{кат} + \left( h_k \left( \frac{n_{кат}}{2} - 1 \right) + \delta_{ш} \frac{n_{кат}}{2} \right) k. \quad (51)$$

Коэффициент  $k$  учитывает усадку изоляции после сушки и опрессовки ( $k = 0,94-0,96$ ).

$$\text{Число витков в катушке} \quad w_k = \frac{w}{n_{кат}}. \quad (52)$$

$$\text{Радиальный размер обмотки} \quad a = a' n_{\phi} w_k, \quad (53)$$

где  $a'$  - радиальный размер провода (мм);

$n_B$  – число параллельных проводов в витке;

$w_K$  – число витков в катушке, дополненное до ближайшего большего целого числа.

Поверхность охлаждения обмотки ( $m^2$ ):

с каналами между всеми катушками

$$P_o = 2c(b' + a)\pi d_{12} n_{кам} k \cdot 10^{-6} ; \quad (54)$$

со сдвоенными катушками

$$P_o = c(2b' + a)\pi d_{12} n_{кам} k \cdot 10^{-6} . \quad (55)$$

Полное сечение витка из  $n_B$  параллельных проводов

$$P = P' n_B , \quad (56)$$

где  $P'$  - сечение выбранного провода ( $mm^2$ ).

Уточненная плотность тока

$$\Delta = \frac{I\phi}{P} . \quad (57)$$

## 2.6. Окончательные размеры обмоток

Внутренний диаметр обмотки низкого напряжения

$$D_1' = d + 2a_{01} . \quad (58)$$

Наружный диаметр обмотки низкого напряжения

$$D_1'' = D_1' + 2a_1 . \quad (59)$$

Внутренний диаметр обмотки высокого напряжения

$$D_2' = D_1'' + 2a_{12} . \quad (60)$$

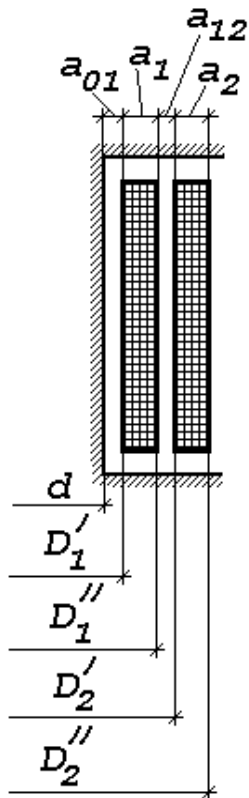


Рис.12. Размеры обмоток

Наружный диаметр обмотки высокого напряжения

$$D_2'' = D_2' + 2a_2, \quad (61)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  – толщина (радиальный размер) обмоток, рассчитанные ранее (мм),

$a_{01}$  – изоляционное расстояние (ширина охлаждающего канала) между обмоткой НН и стержнем магнитопровода (мм),

$a_{12}$  – изоляционное расстояние (ширина охлаждающего канала) между обмотками НН и ВН.

Изоляционные расстояния  $a_{01}$  и  $a_{12}$  определяются напряжением обмоток по табл. П.4.

### 3. Расчет параметров короткого замыкания

Потери в обмотке ( $P_{обм}$ , Вт) определяются плотностью тока и массой обмоточного провода

$$P_{обм} = k\Delta^2 G_{обм} k_{доп} , \quad (62)$$

где  $\Delta$  - уточненная плотность тока в обмотке (А/мм<sup>2</sup>);

$k$  – коэффициент, учитывающий плотность и электропроводность материала обмотки (для медного провода  $k=2,4$  , для алюминиевого провода  $k=12,75$ );

$k_{доп}$  – коэффициент, учитывающий дополнительные потери в обмотке (приближенно можно принять  $k_{доп} = 1,09$  ).

Масса обмотки (кг) определяется соотношением:

$$\text{для медного провода} \quad G_{обм} = 28cD_{ср} w \Pi 10^{-6}; \quad (63)$$

$$\text{для алюминиевого провода} \quad G_{обм} = 8,47cD_{ср} w \Pi 10^{-6}. \quad (64)$$

Формула ( 62 ) позволяет рассчитать потери как в первичной , так и во вторичной обмотке ( $P_{обм.1}$  и  $P_{обм.2}$ ), подставляя соответствующие параметры.

Общие потери короткого замыкания (Вт)

$$P_k = (P_{обм.1} + P_{обм.2}) k_{отв} , \quad (65)$$

где  $k_{отв}$  – учитывает потери в отводах обмоток, в стенках бака, других элементах конструкции от потоков рассеяния (ориентировочно можно принять  $k_{отв}=1,1$ ).

Для оценки теплового состояния трансформатора рассчитывается плотность теплового потока каждой обмотки:



$$q_1 = P_{обм.1} / \Pi_{o1} , \quad (66)$$

$$q_2 = P_{обм.2} / \Pi_{o2} , \quad (67)$$

где  $\Pi_{o1}$  и  $\Pi_{o2}$  – поверхности охлаждения первичной и вторичной обмоток.

Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_a = \frac{P_k}{10S} . \quad (68)$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_p = \frac{2,64 f S \beta a_p k_p}{u_E^2} 10^{-4} . \quad (69)$$

Здесь ширина приведенного канала рассеяния ( $a_p$ ) и параметр  $\beta$  определяются реальными размерами спроектированной обмотки:

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} , \quad (70)$$

$$\beta = \frac{\pi d_{12}}{l} . \quad (71)$$

Коэффициент  $k_p$  учитывает реальное распределение потоков рассеяния ( $k_p = 0,93-0,98$ ).

Полное напряжение короткого замыкания

$$u_k = \sqrt{u_a^2 + u_p^2} . \quad (72)$$

Основные параметры спроектированных обмоток трансформатора рекомендуется свести в таблицу по форме табл.П.6.

## Приложение

**Справочные данные и рекомендуемые значения параметров для проектирования обмоток трансформатора**

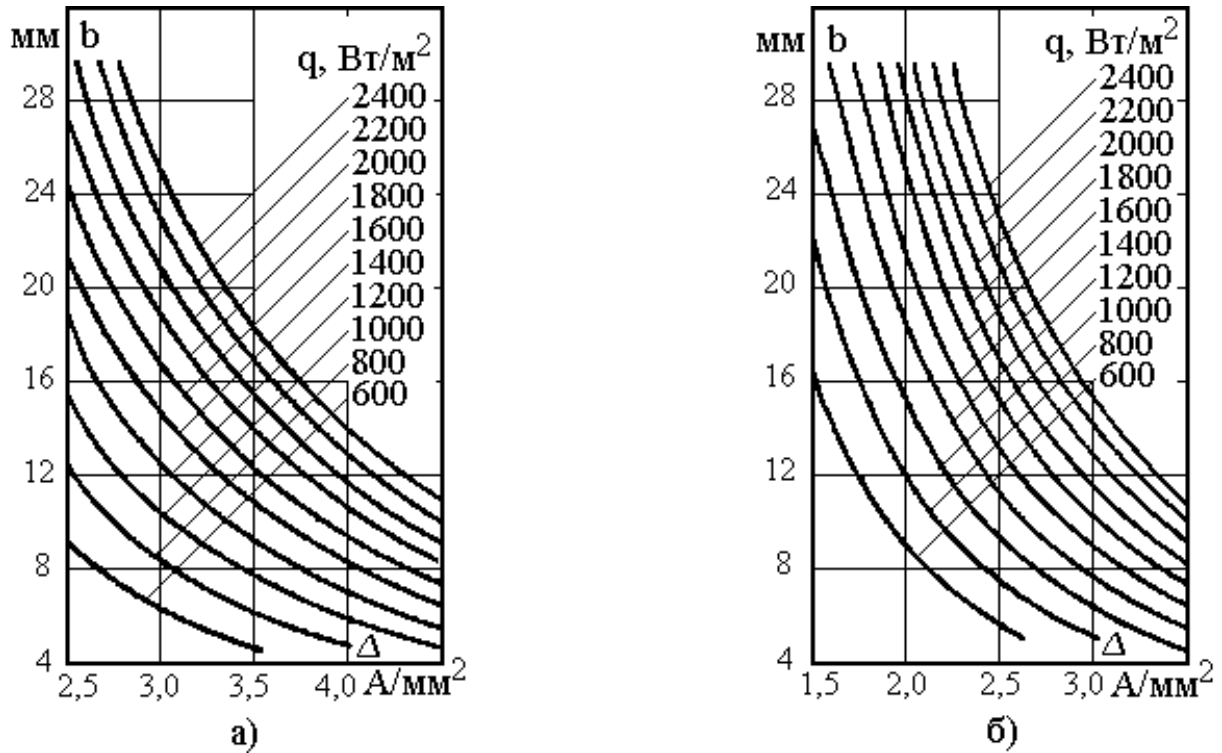


Рис.П.1. Предельный размер обмотки между двумя охлаждающими каналами: а) – для медной обмотки, б) – для алюминиевой обмотки.

Табл.П.1

Коэффициент  $k_d$  учета добавочных потерь в формуле (2) и (3) .

Мощность трансформатора, S, кВА	До 35	35 - 110	110 - 2000	2000-5000	5000-20000
$k_d$	0,99	0,99-0,97	0,95-0,90	0,90-0,89	0,88-0,75

Табл.П.2

Минимальные размеры охлаждающих осевых каналов в обмотках

Длина канала (высота обмотки), мм	Ширина канала, мм		
	Между обмотками	Между обмоткой и цилиндром	Между обмоткой и стержнем
До 300	4 - 5	4	4 - 5
300 - 500	5 - 6	5	5 - 6
500 - 1000	6 - 8	5 - 6	6 - 8
1000 - 1500	8 - 10	6 - 8	8 - 10

Табл.П.3а

Междуслойная изоляция в многослойной цилиндрической обмотке из круглого провода

Рабочее напряжение двух слоев, В	Число слоев кабельной бумаги толщиной 0,12 мм	Выступ междуслойной изоляции (на одну сторону), мм
До 1000	2	10
1000 - 2000	3	16
2000 - 3000	4	16
3000 - 3500	5	16
3500 - 4000	6	22
4000 - 4500	7	22
4500 - 5000	8	22
5000 - 5500	9	22

Табл.П.36

Междуслойная изоляция в многослойной цилиндрической обмотке из прямоугольного провода

Рабочее напряжение двух слоев, В	Количество слоев изоляции	Толщина листов, мм	Материал
До 150	2	0,06	Телефонная бумага
150 – 200	1	0,2	Кабельная бумага или картон
200 - 300	2 1	0,2 0,5	Кабельная бумага или картон

Табл.П.4а

Минимально допустимые изоляционные расстояния для обмотки низкого напряжения

Мощность трансформатора, S , кВА	Испытательное напряжение, $U_{1 \text{ исп}}$ , кВ	Обмотка низкого напряжения от стержня, $a_{01}$ , мм	Обмотка низкого напряжения от ярма, $l_{01}$ , мм
25 - 250	5	4	15
400 - 630	5	5	**
1000 - 2500	5	15	**
630 - 1600	18, 25, 35	15	**
2500 - 6300	18, 25, 35	17,5	**
630 и более	45	20	**
630 и более	55	23	**
Все мощности	85	30	**

Примечание. \*\* Принимается равным  $l_{02}$  по табл.П.4б

Табл.П.46

Минимально допустимые изоляционные расстояния для обмотки  
высокого напряжения

Мощность трансформатора, S , кВА	Испытательное напряжение, U <sub>2 исп</sub> , кВ	Между обмотками высокого и низкого напряжения, a <sub>12</sub> , мм	Между обмотками высокого напряжения, a <sub>22</sub> , мм	Обмотка высокого напряжения от ярма, l <sub>02</sub> , мм
25 - 100	18, 25, 35	9	8	20
160 - 630	18, 25, 35	9	10	30
1000 - 6300	18, 25, 35	20	18	50
630 и более	45	20	18	50
630 и более	55	20	20	50
160 - 630	85	27	20	75
1000 - 6300	85	27	30	75
10000 и более	85	30	30	80

Табл.П.5а

Размеры и сечения круглого медного провода марки ПЭЛБО и ПБ

Провод ПЭЛБО (провод эмалированный с хлопчатобумажной оплеткой)			Провод ПБ (провод, изолированный бумагой)		
Диаметр провода, мм	Сечение провода, мм <sup>2</sup>	Толщина изоляции, мм	Диаметр провода, мм	Сечение провода, мм <sup>2</sup>	Толщина изоляции, мм
0,20	0,0314	0,125	1,25	1,23	0,30
0,29	0,0661	0,155	1,30	1,33	0,30
0,31	0,0755	0,160	1,35	1,43	0,30
0,35	0,0962	0,160	1,45	1,65	0,30
0,38	0,1134	0,160	1,50	1,77	0,30
0,41	0,132	0,165	1,56	1,91	0,30

0,51	0,204	0,170	1,68	2,22	0,30
0,55	0,238	0,170	1,74	2,38	0,30
0,59	0,273	0,170	1,81	2,57	0,30
0,64	0,322	0,170	1,88	2,78	0,30
0,69	0,374	0,170	1,95	2,99	0,30
0,74	0,430	0,180	2,10	3,46	0,30
0,80	0,503	0,180	2,26	4,01	0,30
0,86	0,581	0,180	2,44	4,68	0,30
0,93	0,679	0,180	2,63	5,43	0,30
1,00	0,785	0,210	2,83	6,29	0,30
1,08	0,916	0,210	3,05	7,31	0,30
1,12	0,985	0,210	3,28	8,45	0,30
1,16	1,06	0,210	3,53	9,79	0,30

Примечание. Толщина изоляции указана на две стороны.

Табл.П.56

## Размеры и сечения прямоугольного медного провода (Марка ПББО)

b, мм	Сечения, мм <sup>2</sup> , при a, мм																
	1,35	1,56	1,68	1,81	2,1	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,8	4,4	4,7	5,1	5,5
3,8		5,72															
4,4	5,73	6,65		7,75	8,76		10,2		12,0		13,9		15,1				
5,1	6,68	7,75	8,36	9,02	10,2		11,9		13,9		16,2		18,9	21,5			
5,5									15,1				20,4				
5,9	5,76	8,99	9,7	10,5	11,9		13,9		16,2		18,9		21,9			29,2	
6,4		9,77		11,4	12,9		15,1		17,6	19,0	20,5		23,8	27,3		31,7	
6,9		10,6	11,4	12,3	14,0		16,3		19,0		22,1		25,7	29,5		34,3	
7,4									20,4	22,1							
8,0		12,3	13,2	14,4	16,3	17,6	19,0	20,5	22,1	23,9	25,7		29,9	34,3		39,9	43,1
8,6															39,5		
9,3		14,3		16,6	19,0		22,2	24,0	25,8	27,9	30,0		34,8	40,0		46,5	
10,0							23,9	25,8			32,3		37,5	43,1		50,1	54,1
10,8				19,3	22,2		25,9		30,1		34,9	37,6	40,5	46,6		54,2	58,5
11,6													43,6			58,3	
12,5					25,8		30,0		34,9	37,6	40,5	43,6	47,0			62,9	

Примечание. Толщина изоляции на две стороны: нормальная 0,5 мм, усиленная 1,0 ; 1,4 ; 2,0 мм

Табл.П.5в

## Размеры и сечения прямоугольного алюминиевого провода (Марка АПБ)

b, мм	Сечения, мм <sup>2</sup> , при a, мм																
	1,8	2,00	2,24	2,50	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60
4,00	6,84	7,64	8,60	9,45	10,65												
4,50	7,74	8,64	9,72	10,70	12,05	12,95	13,63										
5,00	8,64	9,64	10,84	11,95	13,45	14,45	15,20	16,20	17,20								
5,60	9,72	10,84	12,18	13,45	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33	20,14	21,54						
6,30	10,98	12,24	13,75	15,20	17,09	18,35	19,30	20,56	21,82	22,77	24,34	25,92	27,49				
7,10	12,42	13,84	15,54	17,20	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64		
8,00	14,04	15,64	17,56	19,45	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85	29,14	31,14	33,14	35,14	37,11	39,24	41,54	43,94
9,00	15,84	17,64	19,80	21,95	24,65	26,45	27,80	29,60	31,40	32,89	35,14	37,39	39,64	41,84	44,14	46,84	49,54
10,00	17,64	19,64	22,04	24,45	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,60	18,72	20,84	23,38	25,95	29,13		32,84		37,08		41,54		46,84		52,14		58,50
11,20			24,73	27,45	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21	41,14	43,94	46,74	49,54	52,34	55,14	58,50	61,86
11,80			26,07	28,95	32,49		36,72		41,34		46,34		52,24		58,14		65,22
12,50			27,64	30,70	34,45	36,95	38,83	41,33	44,83	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14
13,20				32,45	36,41		41,03		46,31		51,94		58,54		65,14		73,06
14,00				34,45	38,65	41,45	43,55	46,35	49,15	51,95	55,14	58,64	62,14	65,64	69,14	73,34	77,54
15,00				36,95	41,45		46,70		52,70		59,14		66,64		74,14		83,14
16,00					44,25	47,45	49,85	53,05	56,25	59,14	63,14	67,14	71,14	75,14	79,14	83,94	88,74
17,00					47,05		53,00		59,80		67,14		75,64		84,14		94,34
18,00						53,45	56,15	59,75	63,35	66,64	71,14	75,64	80,14	84,64	89,14	94,54	99,94

Примечание. Толщина изоляции на две стороны : нормальная 0,50 мм ; усиленная 1,06 ; 1,50 ; 2,07 мм



## Основные параметры обмоток

Параметр	Обмотка НН	Обмотка ВН
Тип обмотки		
Число витков обмотки		
Количество катушек		
Число витков в катушке		
Число витков в слое		
Провод (марка, размеры), мм		
Сечение провода, мм <sup>2</sup>		
Сечение витка, мм <sup>2</sup>		
Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>		
Осевой размер обмотки, мм		
Радиальный размер обмотки, мм		
Диаметр обмотки ,мм : наружный внутренний		
Масса провода , кг		
Потери в обмотке, Вт		
Плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>		

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

Составители Проскуряков Валерий Степанович  
Соболев Сергей Владимирович  
Удинцев Владимир Николаевич  
Юрченко Михаил Валентинович

Редактор Н.П.Кубышенко

---

---

Издательство УГТУ  
620002, Екатеринбург, Мира, 19