

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Филиал ТИУ в г. Тобольске

Кафедра электроэнергетики

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ЧАСТЬ 2. РАСЧЕТЫ ОБМОТОК И МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Методические указания для выполнения курсовых проектов
для студентов направления подготовки 13.03.02 -
Электроэнергетика и электротехника, всех форм обучения

Составители: О.А. Бузинов, *Г.В. Иванов*

Тюмень
ТИУ
2016

Электрические машины: метод.указ. для выполнения курсовых проектов по дисциплине «Электрические машины» для студентов направления подготовки 13.03.02 -Электроэнергетика и электротехника, всех форм обучения / сост. Ф.А. Бузинов, Г.В. Иванов; Тюменский индустриальный университет. – 1-е изд. – Тюмень: Издательский центр БИК, ТИУ, 2016.– 40с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры электроэнергетики

«19» апреля 2016 года, протокол № 10.

Аннотация

Методические указания по дисциплине «Электрические машины» предназначены для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Данная дисциплина изучается в двух семестрах.

Данные методические указания предназначены для выполнения курсовых проектов по дисциплине «Электрические машины».

1 РАСЧЁТ ОБМОТОК

1.1 Общие вопросы расчёта обмоток

В соответствии с результатами расчетов, выполненных в первой части методических указаний [1], проводится расчет алюминиевых обмоток. Если по результатам расчетов алюминиевые обмотки не обеспечат требуемых параметров, то расчет повторяется для обмоток из медного провода после внесения корректировки в расчет основных размеров трансформатора.

Большое значение при выборе типа обмоток и расчёте их параметров имеет плотность тока в проводах обмоток: от неё зависят размеры, масса обмоток, основные потери в них.

Другим важным показателем при расчете обмоток и выборе их конструкции является плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности $-q$, т.е. потери в обмотке, отнесенные к единице площади охлаждаемой поверхности. По величине q решается вопрос выполнения межслойных масляных каналов. Для каждого типа обмоток установлены допустимые значения $q_{\text{доп}}$, используя которые можно определить максимальный радиальный размер металла обмотки $A_{\text{доп}}$ между охлаждаемыми поверхностями.

Исходя из рекомендаций [1, таблица 2.6], для условий задания на проектирование в качестве вариантов могут быть рассмотрены для обмоток НН:

- цилиндрическая многослойная из прямоугольного провода;
- цилиндрическая многослойная из алюминиевой ленты;

для обмоток ВН:

- цилиндрическая многослойная из прямоугольного провода;
- цилиндрическая многослойная из круглого провода.

1.2 Расчёт обмоток НН

Расчёт обмоток начинается с обмотки НН, располагаемой у большинства трансформаторов между стержнем и обмоткой ВН. Поэтому эту обмотку считают первой и все параметры и размеры обмотки НН и её элементов обозначают индексом «1»: $U_{\phi НН} = U_{\phi 1}$, $I_{\phi НН} = I_{\phi 1}$ и т.д.

Порядок расчёта.

1) Число витков фазной обмотки

$$w'_1 = \frac{U_{\phi 1}}{u'_B} . \quad (1)$$

Полученное значение w_1 округляется до ближайшего целого числа чётного или нечётного. Это значение считается требуемым числом витков фазной обмотки W_1 .

2) Определяются уточнённые (изменённые в результате округления w_1) значения напряжения одного витка и индукции в стержне

$$u_B = \frac{U_{\phi 1}}{w_1}; \quad (2)$$

$$B_c = \frac{u_B}{4,44 \cdot f_1 \cdot W_c}. \quad (3)$$

3) Средняя плотность тока в обмотках, обеспечивающая получение заданных потерь короткого замыкания, определяется по выражениям:
для медных обмоток

$$J_{CP} = 0,746 \cdot K_D \frac{P_{KH} \cdot u_B}{S_H d_{12}} 10^{-2}; \quad (4)$$

для алюминиевых

$$J_{CP} = 0,463 \cdot K_D \frac{P_{KH} \cdot u_B}{S_H d_{12}} 10^{-2}, \quad (5)$$

где J_{CP} — коэффициент отношения основных потерь к полным потерям в трансформаторе: значения K_D можно принять из таблицы 1.1.

Таблица 1.1

Значения K_D для трехфазных трансформаторов

Номинальная мощность трансформатора, кВ·А	До 100	160 – 630	1000 – 6300
K_D	0,97	0,96 – 0,93	0,93 – 0,85

Сверить рассчитанное значение J_{CP} (с целью исключить ошибки в расчете) можно по данным таблицы 1.2. Из этой таблицы также выбирается J_{CP} , если потери короткого замыкания не заданы.

Таблица 1.2

Средняя плотность тока в обмотках J_{cp} (МА/м²) для масляных трансформаторов с потерями короткого замыкания по ГОСТ

Номинальная мощность трансформатора, кВ·А	25 – 40	63 – 630	1000 – 6300
Медь	1,8 – 2,2	2,2 – 3,5	2,2 – 3,5
Алюминий	1,1 – 1,8	1,2 – 2,5	1,5 – 2,6

4) Ориентировочное сечение витка, м²(мм²)

$$S'_{B1} = \frac{I_{\Phi 1}}{J_{cp}}. \quad (6)$$

Умножением полученного результата на 10^6 значение сечения витка переводим в мм².

Дальнейший ход расчёта зависит от типа выбранной обмотки.

1.2.1 Расчёт цилиндрической обмотки из прямоугольного провода

В цилиндрической обмотке витки (по высоте обмотки) плотно прилегают друг к другу. При этом в зависимости от величины тока витки могут выполняться одним или несколькими параллельными проводами. Укладка провода может быть осуществлена плашмя или на ребро. Для обеспечения нормального охлаждения каждый слой обмотки хотя бы с одной стороны должен омываться маслом.

Применяемые прямоугольные провода для масляных трансформаторов имеют изоляцию класса нагревостойкости А, выполняемую лентами кабельной бумаги, и маркируются: медные - ПБ, алюминиевые - АПБ. Электрическая прочность кабельной бумаги достаточна для межвитковой изоляции, а изоляция между слоями, кроме того, обеспечивается либо масляным охлаждающим каналом, либо двумя слоями электроизоляционного картона толщиной 0,5 мм.

Вопрос выбора того или другого вида межслойной изоляции решается путём определения плотности теплового потока на поверхности охлаждения обмотки по результатам сравнения её с допустимой.

На рисунке 1.1 изображена цилиндрическая двухслойная обмотка, выполненная двумя параллельными проводами прямоугольного сечения.

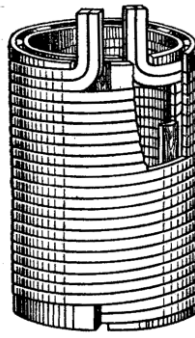


Рис. 1.1. Двухслойная цилиндрическая обмотка из провода прямоугольного сечения

Продолжение расчёта цилиндрической обмотки из прямоугольного провода следует проводить в следующей последовательности:

5) Допустимый радиальный размер металла обмотки НН между охлаждаемыми маслом поверхностями, м

$$A_{1, \text{доп}} = \frac{q_{1, \text{доп}} \cdot K_{\text{зк}}}{1,72 \cdot J_{\text{ср}}^2 \cdot 10^{-8}}, \quad (7)$$

где $q_{1, \text{доп}}$ - допустимая плотность теплового потока; для цилиндрических обмоток НН из прямоугольного алюминиевого провода $q_{1, \text{доп}} = (600 \div 800) \text{ Вт/м}^2$; из медного - $q_{1, \text{доп}} = (800 \div 1000) \text{ Вт/м}^2$;

$K_{\text{зк}}$ - коэффициент, учитывающий закрытие охлаждающего канала рейками и изоляционными материалами; для цилиндрических обмоток $K_{\text{зк}} = 0,75 \div 0,8$.

6) По полученным значениям $\Pi'_{\text{в1}}$ и $A_{1, \text{доп}}$ по сортаменту обмоточного провода для трансформаторов (приложение Б) подбираются подходящие провода, число параллельных проводов $n_{\text{в1}}$ и способ намотки с соблюдением следующих правил:

а) суммарное сечение параллельных проводов должно быть примерно равно $\Pi'_{\text{в1}}$;

б) с целью упростить намотку обмотки на станке и получить компактное ее размещение на магнитопроводе желательно применять наиболее крупные сечения проводов;

в) способ намотки (плашмя или на ребро) выбирается, исходя из значений $A_{1, \text{доп}}$ и размеров провода без изоляции: необходимо, чтобы получаемый размер металла одного слоя (при намотке на ребро) или двух слоев (при намотке плашмя) был примерно равен $A_{1, \text{доп}}$.

г) число параллельных проводов $n_{\text{в1}}$ должно быть не более 4 – 6 при намотке плашмя и не более 6 – 8 при намотке на ребро;

д) все провода должны иметь одинаковые размеры поперечного сечения;

е) при $U_{исп} = 5 - 85$ кВ использовать прямоугольный провод с толщиной изоляции на две стороны $2\delta = 0,45 (0,50)$ мм;

ж) радиальные размеры всех параллельных проводов витка должны быть равны между собой;

з) при намотке на ребро отношение радиального размера к осевому должно быть не менее 1,3 и не более 3.

Подобранные размеры провода витка записываются по форме:

$$n_{B1} \times \frac{a \times b}{a' \times b'}, \quad (8)$$

где n_{B1} - число параллельных проводов;

$a \times b$ - размеры провода без изоляции;

$a' \times b'$ - размеры провода с изоляцией.

7) Полное сечение витка из n_{B1} параллельных проводов, мм^2

$$\Pi_{B1} = n_{B1} \cdot \Pi_1'' \cdot 10^{-6}, \quad (9)$$

где Π_1'' - сечение одного провода, мм^2 (из приложения Б).

8) Полученная плотность тока, МА/м^2

$$J_1 = \frac{I_{\Phi 1} \cdot 10^{-6}}{\Pi_{B1}}, \quad (10)$$

9) Осевой размер витка, м

$$h_{B1} = n_{B1} \cdot b' \cdot 10^{-3}, \quad (11)$$

где b' - осевой размер провода с изоляцией; при намотке на ребро b' заменить на a' .

10) Число витков обмотки в одном слое

$$w_{cл1} = \frac{l_1 - (0,005 \div 0,015)}{h_{B1}} - 1, \quad (12)$$

где l_1 - расчетная высота обмотки НН; $l_1 = l'$;

$(0,005 \div 0,015)$ м – увеличение осевого размера из-за неплотности намотки.

11) Необходимое число слоев обмотки

$$n_{cl1} = \frac{w_1}{w_{cl1}}. \quad (13)$$

Полученное значение округляется до ближайшего большего.

12) Радиальный размер металла обмотки, м

$$A_1 = a \cdot n_{cl1} \cdot 10^{-3}, \quad (14)$$

где a – радиальный размер провода без изоляции; при намотке на ребро вместо размера a в формулу проставляется размер b .

Если $A_1 \leq A_{1доп}$, то охлаждающий осевой канал в обмотке не предусматривается. В противном случае обмотку необходимо разделить на катушки с радиальным размером металла в каждой $A'_1 \leq A_{1доп}$, а между катушками выполнить осевой охлаждающий масляный канал.

13) Радиальный размер a_{11} осевого охлаждающего канала выбирается по условиям изоляции ($a_{11} \geq 4$ мм при $U_{\phi 1} \leq 1$ кВ) и проверяется по условиям отвода тепла по таблице 1.3; принимается наибольшее значение, определённое по этим условиям.

Таблица 1.3

Минимальная ширина охлаждающих каналов в обмотках масляных трансформаторов

Вертикальные каналы			Горизонтальные каналы		
Длина канала, мм	Обмотка – обмотка, мм	Обмотка – цилиндр, мм	Обмотка – стержень, мм	Длина канала, мм	Обмотка – обмотка, мм
До 300	4-5	4	4-5	До 40	4
300-500	5-6	5	5-6	40-60	5
500-1000	6-8	5-6	6-8	60-70	6
1000-1500	8-10	6-8	8-10	70-80	7

14) Изоляция между слоями обмотки при плотной намотке выполняется двумя слоями кабельной бумаги толщиной по 0,12мм, при неплотной – двумя слоями электроизоляционного картона толщиной по 0,5мм.

15) Радиальный размер обмотки, выполненной с одним или более охлаждающим каналом

$$a_1 = [a' n_{\text{сл } 1} + n_K a_{11} + \Delta_H (n_{\text{сл } 1} - 1)] \cdot 10^{-3}, \quad (15)$$

где Δ_n - толщина межслойной изоляции;

n_K - число охлаждающих каналов.

16) Внутренний диаметр обмотки

$$D'_1 = d_H + 2 \cdot a_{01} \cdot 10^{-3}, \quad (16)$$

где a_{01} - ширина канала между обмоткой НН и стержнем; определяется по условию изоляции обмотки из таблицы 2.7.

17) Наружный диаметр обмотки

$$D''_1 = D'_1 + 2 \cdot a_1. \quad (17)$$

18) Полная охлаждаемая поверхность обмоток НН всего трансформатора: обмотки выполнены с одним и более охлаждающим каналом

$$\Pi_{01} = 2 n_K \cdot c \cdot \kappa_{\text{жк}} \cdot \pi \cdot (D'_1 + D''_1) \cdot l_1. \quad (18)$$

19) Масса металла обмотки

$$G_{01} = 8,47 \cdot 10^{-3} \cdot c \cdot D_{\text{ср}} \cdot w_1 \Pi_{01} = 8,47 \cdot 10^{-3} \cdot c \cdot \frac{D'_1 + D''_1}{2} w_1 \Pi_{01}. \quad (19)$$

1.2.2 Расчёт цилиндрической многослойной обмотки из алюминиевой ленты

Эта обмотка выполняется из неизолированной отоженной ленты из алюминия А5 или А6 шириной, равной высоте обмотки. Каждый слой обмотки состоит из одного витка. Изоляция между витками создается одним или лучше двумя слоями кабельной бумаги, ширина полосы которой на 16-24 мм больше ширины ленты. Для создания жёсткой торцевой изоляции на краях полосы бумаги приклеивается буртик – полоска электроизоляционного картона толщиной, равной толщине ленты, и шириной 8-12 мм. Отводы от обмотки выполняются шинами, надёжно привариваемые к концам ленты. Толщина ленты от 0,2 до 3 мм, ширина от 40 до 1000 мм.

Обмотки этого типа обладают высокой теплопроводностью в осевом и радиальном направлениях, имеют более равномерное распределение температуры по высоте и ширине по сравнению с обмотками из

изолированного провода. Поэтому значения $q_{доп}$ для них выше и составляет $1000 \div 1200 \text{ Вт/м}^2$.

После определения w_1 , $J_{ср}$ и Π'_{B1} , уточнения значений u_B , B_c (п. 1.2) расчёт обмотки выполняется в следующем порядке:

5) Определяется ориентировочно ширина ленты, мм

$$b'_л = l_1 - (16 \div 24) \text{ .} \quad (20)$$

и округляется с точностью до 10 мм; получим стандартную ширину ленты $b_л$.

6) Определяется ориентировочно толщина ленты

$$\Delta'_л = \frac{\Pi'_{B1}}{b_л} \text{ .} \quad (21)$$

и округляется с точностью до 0,1 мм; получим стандартную толщину ленты $\Delta_л$.

7) Рассчитывается сечение витка (площадь сечения ленты), м^2

$$\Pi_{B1} = \Pi_л = b_л \cdot \Delta_л \cdot 10^{-6} \text{ .} \quad (22)$$

8) Плотность тока в ленте, МА/м^2

$$J_1 = \frac{I_{\phi 1} \cdot 10^{-6}}{\Pi_{B1}} \text{ .} \quad (23)$$

9) Определяется допустимый радиальный размер металла обмотки, м

$$A_{1доп} \leq \frac{q_{1доп} \cdot \kappa_{зк}}{1,72 \cdot J_1^2 \cdot 10^{-8}} \text{ .} \quad (24)$$

10) Рассчитывается предельное число витков, помещаемое в этот размер

$$w_{лр} = \frac{A_{1доп}}{\Delta_л \cdot 10^{-3}} \text{ .} \quad (25)$$

Чаще $w_{лр} < w_1$. Тогда обмотку необходимо делить на катушки с числом витков в каждой, меньшим $w_{лр}$, а между катушками выполнять осевой охлаждающий канал шириной a_{11} . Если w_1 – число нечётное, то в первую катушку (по отношению к сердечнику магнитопровода) следует

поместить число витков, меньшее половины, так как она имеет несколько худшие условия охлаждения. Если w_1 – число чётное, то в обе катушки можно уложить одинаковое число витков.

11) Радиальные размеры катушек. Если витки обмотки находятся в двух катушках, то

$$a_1' = (\Delta_{II} \cdot w_1' + \Delta_{II} \cdot (w_1' - 1)) \cdot 10^{-3}; \quad (26)$$

$$a_1'' = (\Delta_{II} \cdot w_1'' + \Delta_{II} \cdot (w_1'' - 1)) \cdot 10^{-3}, \quad (27)$$

где Δ_{II} – толщина межвитковой изоляции; при выполнении изоляции двумя слоями кабельной бумаги К-120 – $\Delta_{II} = 2 \times 0,12$ мм;

w_1' и w_1'' – числа витков в катушках.

12) Радиальный размер a_{11} осевого охлаждающего канала определяется по п. 1.2.1.

13) Радиальный размер обмотки НН без охлаждающих каналов

$$a_1 = (\Delta_{II} \cdot w_1 + \Delta_{II} \cdot (w_1 - 1)) \cdot 10^{-3}. \quad (28)$$

с одним охлаждающим каналом

$$a_1 = a_1' + a_1'' + a_{11}. \quad (29)$$

14) Диаметры обмотки, м
внутренний:

$$D_1' = d_{II} + 2 \cdot a_{01} \cdot 10^{-3}, \quad (30)$$

внешний:

$$D_1'' = D_1' + 2 \cdot a_1. \quad (31)$$

15) Масса металла обмотки

$$G_{01} = 8,47 \cdot 10^{-3} \cdot c \cdot D_{CP} \cdot w_1 \Pi_{\epsilon 1} = 8,47 \cdot 10^{-3} \cdot c \cdot \frac{D_1' + D_1''}{2} w_1 \Pi_{\epsilon 1}. \quad (32)$$

16) Полная охлаждающая поверхность обмотки НН всего трансформатора: обмотки выполнены с одним и более охлаждающим каналом

$$\Pi_{01} = 2n_K \cdot c \cdot \kappa_{ж} \cdot \pi \cdot (D_1' + D_1'') \cdot l_1. \quad (33)$$

На основе сравнения результатов расчета вариантов обмоток НН по массогабаритным показателям (размеры и масса металла) с учетом преимуществ и недостатков выбирается лучший вариант, который и будет рассматриваться в дальнейших расчетах.

1.3 Расчёт обмоток ВН

При выборе типа обмотки ВН необходимо обязательно учитывать удобство выполнения ответвлений для регулирования напряжения. В диапазоне мощностей задания при многослойных цилиндрических обмотках используются схемы рисунка 1.2.

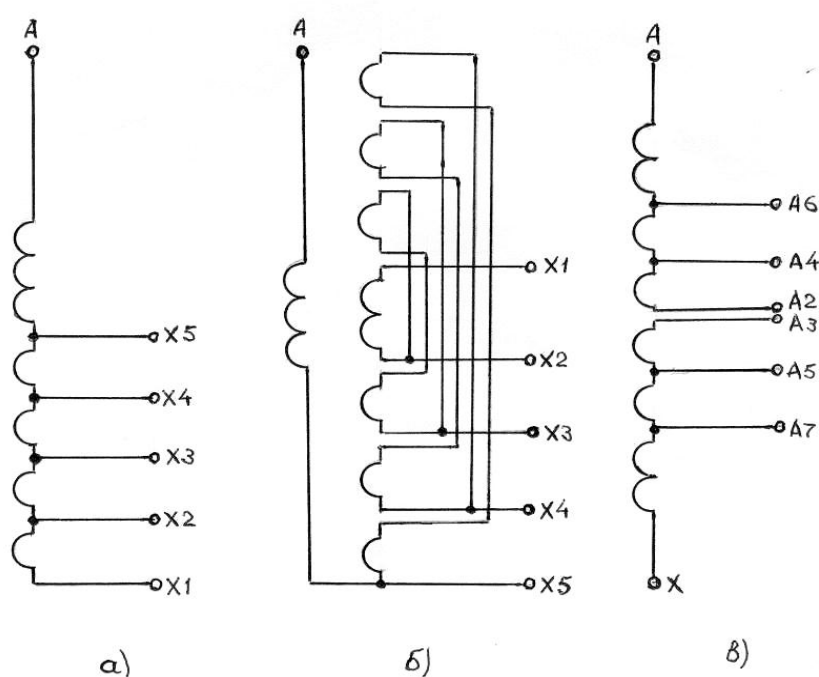


Рис. 1.2. Схемы выполнения ответвлений в обмотках ВН

Намотка регулировочных витков производится тем же проводом и с тем же направлением намотки, что и основных витков обмотки. В цилиндрических обмотках регулировочные витки располагаются в наружном слое обмоток. С целью снижения механических сил, возникающих в обмотках при коротком замыкании, отключаемые витки должны располагаться симметрично относительно середины высоты обмотки. Схема рисунка 1.2а не обеспечивает этого требования, и поэтому её использование ограничивается трансформаторами мощностью до 160 кВ·А. Схема рисунка 1.2б применима для трансформаторов мощностью от 250 кВ·А. При схемах соединений обмоток в треугольник использование

схем рисунков 1.2а и 1.2б усложняется из-за необходимости использовать сложный переключатель ответвлений. Поэтому предпочтительной является схема рисунка 1.2в с расположением регулировочных витков в середине обмоток ВН.

Обмотка ВН располагается по отношению к стержню после обмотки НН. Поэтому обмотку ВН считают второй и все параметры этой обмотки и её элементов обозначают индексом «2»: $U_{\Phi BH} = U_{\Phi 2}$; $I_{\Phi BH} = I_{\Phi 2}$ и т.д.

Порядок расчёта:

1) Определяется число витков, необходимое для получения номинального напряжения

$$w_{H2} = w_1 \cdot \frac{U_{\Phi 2}}{U_{\Phi 1}}. \quad (34)$$

2) Рассчитывается число витков на одной ступени регулирования напряжения: при соединении фазных обмоток ВН в звезду

$$w_p = \frac{\Delta U}{u_B \cdot \sqrt{3}}; \quad (35)$$

при соединении фазных обмоток ВН в треугольник

$$w_p = \frac{\Delta U}{u_B}, \quad (36)$$

где ΔU – напряжение на одной ступени регулирования (разность напряжений двух соседних ответвлений). Если ступень регулирования

составляет 2,5%, то $\Delta U = 2,5 \cdot \frac{U_{\Phi 2}}{100}$.

3) Определяются числа витков обмотки на ответвлениях:

- на верхних ступенях регулирования

$$w_2 = w_{H2} + 2w_p; \quad (37)$$

$$w_2 = w_{H2} + w_p, \quad (38)$$

- на основной ступени напряжения

$$w_2 = w_{H2}. \quad (39)$$

- на нижних ступенях регулирования

$$w_2 = w_{H2} - w_p; \quad (40)$$

$$w_2 = w_{H2} - 2w_p. \quad (41)$$

4) Ориентировочная плотность тока, МА/м²

$$J'_2 \approx 2 \cdot J_{CP} - J_1. \quad (42)$$

5) Ориентировочное сечение витка, м² (мм²)

$$\Pi'_{B2} = \frac{I_{\Phi 2} \cdot 10^{-6}}{J'_2}. \quad (43)$$

Умножением полученного результата на 10⁶ переводим значение в мм².

1.3.1 Расчёт цилиндрической многослойной обмотки из прямоугольного провода

Продолжается в следующем порядке:

6) По Π'_{B2} выбирается из приложения Б провод марки АПБ сечением $\Pi_{B2} \geq \Pi'_{B2}$ с толщиной изоляции на обе стороны $2\delta = 0,45 (0,50)$ мм и записывается его обозначение по форме, приведённой в п. 1.2.1.

7) Плотность тока (уточнённое значение), МА/м²

$$J_2 = \frac{I_{\Phi 2} \cdot 10^{-6}}{\Pi_{B2}}. \quad (44)$$

8) Осевой размер обмотки, м

$$l_2 = l_1. \quad (45)$$

9) Осевой размер витка h_{b2} , число витков в слое w_{cl2} определяются по формулам п.1.2.1.

10) Необходимое число слоёв в обмотке (округляется до ближайшего большего числа)

$$n_{cl2} = \frac{w_2}{w_{cl2}}, \quad (46)$$

где w_2 – число витков обмотки на верхней ступени регулирования

$$w_2 = w_{H2} + 2w_p, \quad (47)$$

11) Рабочее напряжение двух слоёв

$$U_{\text{мсл}} = 2 \cdot w_{\text{сл } 2} \cdot u_{\text{в}} \cdot \quad (48)$$

По $U_{\text{мсл}}$ из таблицы 1.4 выбирается число слоёв и общая толщина кабельной бумаги в изоляции между двумя слоями обмотки.

Таблица 1.4

Нормальная междуслойная изоляция в многослойных цилиндрических обмотках

Суммарное рабочее напряжение двух слоёв обмотки, В	Число слоёв кабельной бумаги × на толщину листов, мм	Выступ межслойной изоляции на торцах обмотки (на одну сторону), мм
До 1000	2 × 0,12	10
от 1001 до 2000	3 × 0,12	16
от 2001 до 3000	4 × 0,12	16
от 3001 до 4000	5 × 0,12	16

Примечание. Данные таблицы использовать для трансформаторов мощностью до 630 кВ·А включительно. При мощности от 1000 кВ·А межслойную изоляцию принимать по таблице 1.4, но не менее 4 × 0,12 мм, а выступ изоляции не менее 20 мм.

12) Общий радиальный размер металла в обмотке ВН, м

$$A_2 = a \cdot n_{\text{сл } 2} \cdot 10^{-3}, \quad (49)$$

где a – радиальный размер провода без изоляции.

13) Допустимый по плотности теплового потока радиальный размер металла обмотки, м

$$A_{2 \text{ доп}} = \frac{\kappa_{\text{зк}} \cdot q_{2 \text{ доп}}}{1,72 \cdot J_2^2 \cdot 10^{-8}}, \quad (50)$$

где $q_{2 \text{ доп}}$ – допустимое значение плотности теплового потока на поверхности; для цилиндрической обмотки из алюминиевого провода $q_{2 \text{ доп}} = (700 \div 900) \text{ Вт/м}^2$.

Если $A_2 > A_{2\text{ доп}}$, то обмотку необходимо разделить на концентрические катушки так, чтобы радиальный размер каждой из катушек был меньше или равным $A_{2\text{ доп}}$. Между катушками устраиваются охлаждающие осевые масляные каналы, ширина которых a_{22} по условиям охлаждения выбирается по таблице 1.3. Этот размер необходимо проверить по уровню изоляции: при суммарном напряжении двух слоёв $U_{\text{мсл}} < 1$ кВ достаточную межслойную изоляцию обеспечит канал шириной не менее 4 мм, при $U_{\text{мсл}} = 1 \div 6$ кВ – масляный канал шириной 6-8 мм и два слоя из картона толщиной 1 мм.

14) Определяются числа слоёв обмотки в каждой катушке. При их неравенстве большее число слоёв должны иметь наружные катушки.

15) По таблице 1.5 оценивается размер добавочных потерь в обмотке.

Таблица 1.5

Предельные радиальные размеры провода a (мм) цилиндрических обмоток из алюминиевого провода прямоугольного сечения, создающие добавочные потери до 5, 10, 15 и 20%

Число слоёв обмотки	Добавочные потери до			
	5%	10%	15%	20%
1	11,8	13,2	15,0	16,0
2	8,0	10,0	10,6	11,8
3	6,7	8,0	8,5	9,5
4	5,6	6,7	7,5	8,0
5	5,0	6,0	6,7	7,5
6	4,75	5,6	6,0	6,7
7	4,5	5,0	5,6	6,0
8	4,0	4,75	5,6	5,6
9	3,75	4,5	5,0	5,6
10	3,75	4,5	5,0	5,6

16) Радиальный размер обмотки, м

$$a_2 = (a' \cdot n_{\text{сл } 2} + \delta_{\text{мсл}} \cdot (n_{\text{сл } 2} - 1) + a_{22} \cdot n_K) \cdot 10^{-3}, \quad (51)$$

где $\delta_{\text{мсл}}$ – толщина междуслойной изоляции по табл. 1.4;

a_{22} – принятая ширина охлаждающего канала.

17) Внутренний диаметр обмотки, м

$$D'_2 = D''_1 + 2 \cdot a_{12}, \quad (52)$$

где a_{12} – размер осевого канала между обмотками НН и ВН и толщина изоляционного цилиндра; выбирается по $U_{исп}$ обмотки ВН (указано в первой части методических указаний, таблица 2.8).

18) Наружный диаметр обмотки

$$D_2'' = D_2' + 2 \cdot a_2 \cdot \quad (53)$$

19) Полная поверхность охлаждения обмоток ВН всего трансформатора: обмотки выполнены с одним или более охлаждающим каналом

$$\Pi_{02} = 2 n_K \cdot c \cdot \kappa_{3K} \cdot \pi \cdot (D_2' + D_2'') \cdot l_2 \cdot \quad (54)$$

20. Масса металла обмотки

$$G_{02} = 8,47 \cdot 10^{-3} \cdot c \cdot \frac{D_2' + D_2''}{2} w_2 \Pi_{02} \cdot \quad (55)$$

1.3.2 Расчёт многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода

Многослойная цилиндрическая обмотка из провода круглого сечения показана на рисунке 1.3.

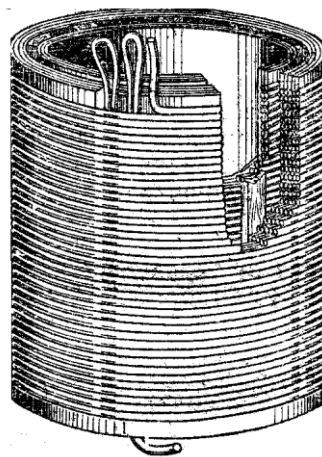


Рис. 1.3. Многослойная цилиндрическая обмотка из провода круглого сечения

После выполнения п.1 – п.5, общих для расчета обмотки ВН, эта обмотка далее рассчитывается в следующей последовательности:

6) По ориентировочному сечению витка Π'_{B2} и сортаменту обмоточного провода для трансформаторов (приложение А) подбирается

провод подходящего сечения или в редких случаях два параллельных одинаковых провода.

Выбранные размеры провода записываются следующим образом:

$$\text{Марка провода} \times n_{B2} \times \frac{d_2}{d'_2}, \quad (56)$$

где n_{B2} — число параллельных проводов;

d_2 — диаметр провода без изоляции;

d'_2 — диаметр изолированного провода:

$d'_2 = d_2 + 2\delta$;

2δ — размер двухсторонней изоляции; для провода круглого сечения при $U_{исп} = 5 \div 85$ кВ $2\delta = 0,30 (0,40)$ мм.

7) Полное сечение витка, м²

$$\Pi_{B2} = n_{B2} \cdot \Pi''_2 \cdot 10^{-6}, \quad (57)$$

где Π''_2 — сечение одного провода (из приложения Б).

8) Плотность тока

$$J_2 = \frac{I_{\Phi 2} \cdot 10^{-6}}{\Pi_{B2}}. \quad (58)$$

9) Осевой размер витка, м

$$h_{B2} = n_{B2} \cdot d'_2 \cdot 10^{-3}. \quad (59)$$

10) Число витков в слое

$$w_{cl2} = \frac{l_2}{h_{B2}} - 1. \quad (60)$$

11) Число слоёв в обмотке (n_{cl2} округляется до ближайшего большего числа)

$$n_{cl2} = \frac{w_2}{w_{cl2}}; \quad (61)$$

$$w_2 = w_{2H} + 2w_P. \quad (62)$$

12) Рабочее напряжение двух слоёв

$$U_{\text{МСП}} = 2 \cdot w_{\text{СП} 2} \cdot u_{\text{В}} \cdot \quad (63)$$

13) По $U_{\text{МСП}}$ из таблицы 1.4 выбирается число слоёв и общая толщина кабельной бумаги в изоляции между слоями обмотки.

14) Общий радиальный размер металла обмотки, м

$$A_2 = d_2 \cdot n_{\text{СП} 2} \cdot 10^{-3} \cdot \quad (64)$$

15) Допустимый по плотности теплового потока радиальный размер металла обмотки, м

$$A_{2 \text{ доп}} = \frac{\kappa_{\text{ЗК}} \cdot q_{2 \text{ доп}}}{1,72 \cdot J_2^2 \cdot 10^{-8}} \cdot \quad (65)$$

16) При $A_2 > A_{2 \text{ доп}}$ обмотку ВН необходимо разделить на концентрические катушки с осевым масляным каналом между ними. В большинстве случаев число катушек две.

17) Минимальная ширина масляного канала a_{22} определяется по таблице 1.3 и проверяется по уровню изоляции (п. 1.2.1).

18) Радиальный размер обмотки

$$a_2 = (d_2' \cdot n_{\text{СП} 2} + \delta_{\text{МСП}} \cdot (n_{\text{СП} 2} - 1) + a_{22} \cdot n_{\text{К}}) \cdot 10^{-3} \cdot \quad (66)$$

19) Минимальный радиальный размер a_{12} осевого канала между обмотками НН и ВН определяется по 1.3.1.

20) Внутренний диаметр обмотки

$$D_2' = D_1'' + 2 \cdot a_{12} \cdot \quad (67)$$

21) Наружный диаметр обмотки

$$D_2'' = D_2' + 2 \cdot a_2 \cdot \quad (68)$$

22) Поверхность охлаждения обмоток трансформатора: обмотки выполнены с одним и более охлаждающим каналом

$$P_{02} = 2 n_{\text{К}} \cdot c \cdot \kappa_{\text{ЗК}} \cdot \pi \cdot (D_2' + D_2'') \cdot l_2 \cdot \quad (69)$$

23) Масса металла обмотки

$$G_{02} = 8,47 \cdot 10^{-3} \cdot c \cdot \frac{D_2' + D_2''}{2} w_2 \Pi_{B_2} . \quad (70)$$

По результатам сравнения вариантов принимается обмотка ВН.

Как показывает практика, для трансформаторов мощностью до 160 кВА лучшие массо – габаритные показатели имеют цилиндрические обмотки ВН из круглого провода, а для трансформаторов большей мощности - цилиндрические обмотки ВН из прямоугольного провода.

2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Для определения параметров трансформатора искусственно создаётся режим короткого замыкания – режим, когда обмотка НН замкнута накоротко, а к обмотке ВН подводится такое пониженное напряжение U_{KH} , при котором токи в обмотках имеют номинальные значения.

2.1 Определение потерь короткого замыкания

Потери в режиме искусственного короткого замыкания P_{KH} имеют следующие составляющие:

- 1) $P_{OCH\ 1}$ и $P_{OCH\ 2}$ – основные потери соответственно в обмотках НН и ВН, вызванные номинальным рабочим током в этих обмотках;
- 2) $P_{Д1}$ и $P_{Д2}$ – добавочные потери в обмотках НН и ВН, т.е. потери от вихревых токов, наведённых полем рассеяния обмоток;
- 3) $P_{OTB\ 1}$ и $P_{OTB\ 2}$ – основные потери в отводах от обмоток;
- 4) $P_{OTB\ .Д1}$ и $P_{OTB\ .Д2}$ – добавочные потери в отводах, вызванные полями рассеяния отводов;
- 5) P_{δ} – потери в стенках бака и других металлических элементах трансформатора, вызванные полями рассеяния обмоток и отводов;

$$P_{KH} = P_{OCH\ 1} + P_{Д1} + P_{OTB\ 1} + P_{OTB\ .Д1} + P_{OCH\ 2} + P_{Д2} + P_{OTB\ 2} + P_{OTB\ .Д2} + P_{\delta}. \quad (71)$$

Обычно добавочные потери учитывают увеличением основных потерь путём умножения последних на коэффициент учёта добавочных потерь $\kappa_{ДП} > 1$, т.е. $P_{OCH} + P_{Д} = \kappa_{ДП} \cdot P_{OCH}$, тогда

$$P_{KH} = \kappa_{ДП1} \cdot P_{OCH\ 1} + \kappa_{ДП.OTB1} \cdot P_{OTB\ 1} + \kappa_{ДП2} \cdot P_{OCH\ 2} + \kappa_{ДП.OTB2} \cdot P_{OTB\ 2} + P_{\delta}. \quad (72)$$

Основные потери рассчитываются по формулам:
в обмотке из медного провода

$$P_{OCH} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot J^2 \cdot G_o, \quad (73)$$

в обмотке из алюминиевого провода

$$P_{OCH} = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot J^2 \cdot G_o, \quad (74)$$

где J – плотность тока в проводах обмотки;

G_o – масса металла обмотки.

Средний коэффициент учета добавочных потерь при частоте 50Гц для обмоток:

из медного прямоугольного провода

$$\kappa_{дп} = 1 + 0,095 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 \cdot a^4 \cdot n^2; \quad (75)$$

из медного круглого провода

$$\kappa_{дп} = 1 + 0,044 \cdot 10^{-8} \cdot t_1^2 \cdot d^4 \cdot n^2; \quad (76)$$

из алюминиевого прямоугольного провода

$$\kappa_{дп} = 1 + 0,037 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 \cdot a^4 \cdot n^2; \quad (77)$$

из алюминиевого круглого провода

$$\kappa_{дп} = 1 + 0,017 \cdot 10^{-8} \cdot t_1^2 \cdot d^4 \cdot n^2, \quad (78)$$

где a – размер металла прямоугольного проводника в направлении, перпендикулярном линиям магнитной индукции поля рассеяния (в направлении радиуса обмотки);

n – число проводников обмотки в том же направлении; $n = n_{сл}$;

$t = \frac{bm}{l} \kappa_p$ – для прямоугольного провода;

$t_1 = \frac{dm}{l} \kappa_p$ – для круглого провода;

b – размер металла проводника в направлении, параллельном линиям магнитной индукции поля рассеяния (по оси обмотки);

m – число проводников обмотки в том же направлении;

d – диаметр круглого проводника (без изоляции);

l – общий размер в направлении, параллельном линиям магнитной индукции поля рассеяния (высота обмотки).

Размеры a , b , d и l в вышеприведенных формулах должны быть выражены в метрах.

При расчёте $\kappa_{дп}$ однослойных обмоток во второе слагаемое формул следует ввести коэффициент 0,8.

Расчёт основных потерь в отводах сводится к определению длины отводов и массы металла в них.

Обычно сечение отвода принимается равным сечению витка обмотки, и поэтому плотность тока в проводниках отвода равна плотности тока в проводах обмотки.

Основные потери в отводах, выполненных медным проводом

$$P_{\text{отв}} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot J^2 \cdot G_{\text{отв}} ; \quad (79)$$

выполненных алюминиевым проводом

$$P_{\text{отв}} = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot J^2 \cdot G_{\text{отв}} , \quad (80)$$

где $G_{\text{отв}}$ — масса металла проводов отводов соответствующей обмотки

$$G_{\text{отв}} = l_{\text{отв}} \cdot \Pi_{\text{отв}} \cdot \gamma , \quad (81)$$

где $l_{\text{отв}}$ — общая длина проводов отводов обмотки:
при соединении фазных обмоток в звезду $l_{\text{отв}} \approx 7,5 \cdot l$, в треугольник — $l_{\text{отв}} \approx 14 \cdot l$;

$\Pi_{\text{отв}}$ — сечение отвода, м^2 ;

γ — плотность металла отвода (для меди $\gamma_{\text{м}} = 8900 \text{ кг/м}^3$, для алюминия $\gamma_{\text{а}} = 2700 \text{ кг/м}^3$).

В силовых трансформаторах общего назначения $(P_{\text{отв}1} + P_{\text{отв}2}) \leq 0,08 \cdot P_{\text{кн}}$, а $(P_{\text{отв.д}1} + P_{\text{отв.д}2}) \leq 0,05 \cdot (P_{\text{отв}1} + P_{\text{отв}2})$. Поэтому, как правило, добавочные потери в отводах не учитываются.

При рациональной конструкции трансформатора потери в его ферромагнитных конструктивных элементах составляют незначительную долю $P_{\text{кн}}$, и их можно определить по приближенной формуле (Вт)

$$P_{\text{б}} \approx 10 \cdot \kappa_{\text{п}} \cdot S_{\text{н}} , \quad (82)$$

где $\kappa_{\text{п}}$ — коэффициент, значение которого принимается по таблице 2.1

Таблица 2.1

Значение коэффициента $\kappa_{\text{п}}$

Мощность трансформатора, кВ·А	До 1000	1000-4000
$\kappa_{\text{п}}$	0,015-0,02	0,025-0,04

Полные потери короткого замыкания

$$P_{KH} = \kappa_{ДП1} \cdot P_{ОСН1} + P_{ОТВ1} + \kappa_{ДП2} \cdot P_{ОСН2} + P_{ОТВ2} + P_{\delta} \quad (83)$$

Отношением $(P_{KH} / P_{KH.ЗД}) \cdot 100$ сравниваются фактические расчетные потери короткого замыкания с заданными: расчётные потери короткого замыкания не должны отличаться более, чем на $\pm 5\%$. В противном случае необходимо ввести корректировки в размеры элементов трансформатора, от которых зависит величина P_{KH} , и расчёт потерь короткого замыкания повторить.

2.2 Расчёт номинального напряжения короткого замыкания

Расчетная активная составляющая номинального напряжения короткого замыкания в процентах от номинального напряжения определяется по выражению

$$U_A^* = \frac{P_{KH}}{10 \cdot S_H} \quad (84)$$

Расчетная реактивная составляющая номинального напряжения короткого замыкания в процентах номинального напряжения

$$U_P^* = \frac{0,79 \cdot f_1 \cdot S' \cdot \beta \cdot a_P \cdot K_P}{u_B^2}, \quad (85)$$

где a_P — уточнённые значения ширины приведенного канала рассеяния

$$a_P = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}, \quad (86)$$

где a_1 , a_2 , a_{12} — реальные размеры рассчитанных обмоток трансформатора;

$$\kappa_P = 1 - \delta \cdot (1 - e^{-1/\delta}); \quad (87)$$

$$\delta = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi \cdot l}. \quad (88)$$

Расчётное номинальное напряжение короткого замыкания в процентах от номинального напряжения

$$U_{KH}^* = \sqrt{U_A^{*2} + U_P^{*2}}. \quad (89)$$

Определяется отношение $(U_{KH}^* / U_{KH.Зад}^*) \cdot 100$.

Отклонение расчетного значения U_{KH}^* от заданного не должно быть бóльшим $\pm 5\%$. В противном случае нужно изменить U_{KH}^* : изменение U_{KH}^* в нужном направлении может быть достигнуто за счёт изменения величины U_P^* . Небольшие изменения U_P^* могут быть получены путём увеличения или уменьшения осевого размера обмоток l при соответствующем уменьшении или увеличении радиальных размеров обмоток a_1 и a_2 .

Значительное изменение U_P^* достигается изменением напряжения одного витка U_B за счёт изменения диаметра стержня магнитной системы d или индукции B_C в нём. Изменять изоляционное расстояние a_{12} для изменения U_P^* не рекомендуется.

2.3 Определение механических сил в обмотках и нагрева обмоток при коротком замыкании

Короткое замыкание трансформатора при рабочих напряжениях является аварийным режимом, так как сопровождается многократным увеличением токов в обмотках по сравнению с их номинальными значениями, повышенным нагревом обмоток и ударными механическими силами, действующими на обмотки и их части.

2.3.1 Проверка обмоток на механическую прочность при коротком замыкании

Эта проверка включает:

- 1) определение наибольшего установившегося и наибольшего ударного тока короткого замыкания;
- 2) определение механических сил между обмотками и их частями;
- 3) определение механических напряжений в изоляционных опорных и межкатушечных конструкциях и в проводах обмоток.

Действующее значение установившегося тока короткого замыкания с учётом сопротивления питающей сети для основного ответвления обмотки определяется по выражению (согласно ГОСТ 11677-85)

$$I_{K.Y} = \frac{100 \cdot I_\phi}{U_{KH}^* \cdot \left(1 + \frac{100 \cdot S_H}{U_{KH} \cdot S_K} \right)}, \quad (90)$$

где I_ϕ — номинальный фазный ток соответствующей обмотки;

s_H – номинальная мощность трансформатора, МВ·А;
 s_K – мощность короткого замыкания электрической сети, МВ·А; s_K принимается из таблицы 2.2.

Таблица 2.2

Мощности короткого замыкания электрической сети

Класс напряжения обмотки ВН, кВ	6-10	35	110
Мощность короткого замыкания электрической сети (s_K), МВ·А	500	2500	15000

Действующее значение наибольшего установившегося тока короткого замыкания для трансформаторов мощностью менее 1МВ·А можно определить также по упрощенной формуле

$$I_{K.Y} = I_{\Phi} \cdot \frac{100}{U_{KH}}. \quad (91)$$

В начальный момент вследствие наличия апериодической составляющей ток короткого замыкания может значительно превысить установившийся ток. Это наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания – ударный ток короткого замыкания

$$i_{K \text{ MAX}} = \sqrt{2} \cdot \kappa_{MAX} \cdot I_{K.Y}, \quad (92)$$

где κ_{MAX} – коэффициент, учитывающий максимально возможную апериодическую составляющую тока короткого замыкания

$$\kappa_{MAX} = 1 + e^{-\pi u_A / u_P}. \quad (93)$$

При расчёте и конструировании трансформаторов необходимо учитывать электромагнитные силы, возникающие между обмотками и их частями при коротком замыкании трансформатора. Эти силы могут вызвать разрушение обмотки, деформацию или обрыв витков, разрушение опорных конструкций.

Продольное поле рассеяния обмоток (линии его индукции направлены параллельно оси обмоток) вызывает радиальные силы.

Суммарная радиальная сила, действующая на наружную обмотку и стремящаяся растянуть её

$$F_p = 0,628 \cdot (i_{K2.MAX} w_{2H})^2 \cdot \beta \cdot \kappa_p \cdot 10^{-6}, \quad (94)$$

где $i_{2.KMAX}$ — ударный ток короткого замыкания в обмотке ВН;

w_{2H} — число витков обмотки ВН на основной ступени.

Такая же сила, но противоположно направленная, действует на обмотку НН, стремясь сжать её. Обе силы равномерно распределены по окружности обеих обмоток (рисунок 2.1).

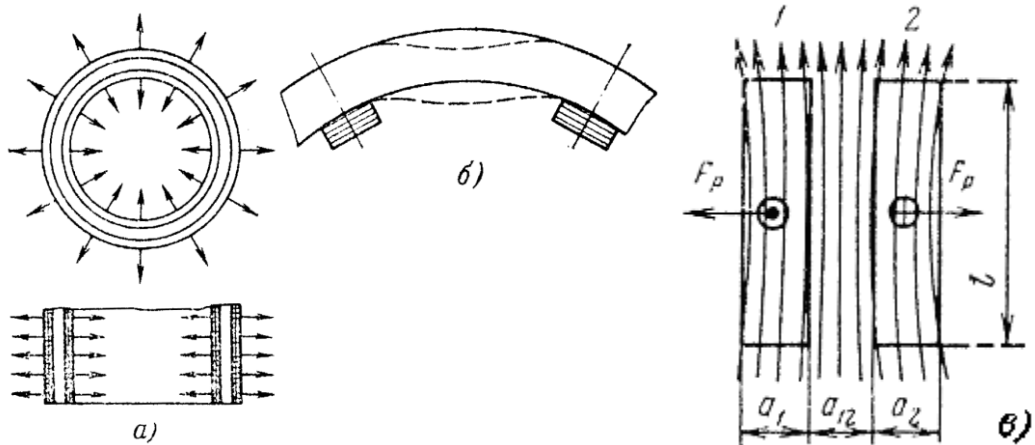


Рис. 2.1. Действие радиальных сил на concentric обмотки:
а) распределение сил; б) деформации внутренней обмотки;
в) продольное и поперечное поля в concentric обмотке

Для оценки механической прочности обмотки определяются напряжения сжатия во внутренней обмотке (обмотке НН) и напряжения растяжения в наружной обмотке (обмотке ВН), возникающие под воздействием радиальных сил.

Среднее сжимающее напряжение в проводе обмотки НН

$$\sigma_{сж} = \frac{F_p \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \pi \cdot w_1 \cdot \Pi_{B1}}. \quad (95)$$

Среднее растягивающее напряжение в проводе обмотки ВН

$$\sigma_p = \frac{F_p \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \pi \cdot w_{2H} \cdot \Pi_{B2}} \quad (96)$$

Для обеспечения стойкости обмоток необходимо выполнение условий:

- для медных обмоток (МПа)

$$\sigma_{сж} \leq 30 ; \quad (97)$$

$$\sigma_p \leq 30 ; \quad (98)$$

- для алюминиевых обмоток (МПа)

$$\sigma_{сж} \leq 15 ; \quad (99)$$

$$\sigma_p \leq 15 . \quad (100)$$

Поперечное поле рассеяния (линии его индукции расходятся радиально) вызывают осевые силы, сжимающие обмотки в осевом направлении. Для обмоток с плотным прилеганием витков (многослойные цилиндрические или из алюминиевой ленты) осевая сила может быть рассчитана по формуле

$$F_{oc} = 7,5 \cdot d_{12} \cdot \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right) \cdot (i_{K.MAX} \cdot w)^2 \cdot \frac{1}{l^2} \cdot \kappa_{oc} \cdot 10^{-6} , \quad (101)$$

где κ_{oc} – коэффициент осевой силы (Δ_1 определяется из таблицы 2.3).

$$\kappa_{oc} = \Delta_1 \cdot \kappa_{01} + \Delta_2 \cdot \kappa_{02} ; \quad (102)$$

$$\kappa_{01} = 0,33 - 1,15 \cdot \left(\frac{a_0}{l} \right) ; \quad (103)$$

$$a_0 = a_{12} + a_1 + a_2 . \quad (104)$$

Таблица 2.3

Значения Δ_1

Мощность трансформатора, кВ·А	Тип обмотки НН	Δ_1 , %
25-100	двуслойная и многослойная цилиндрическая	$\frac{1,0}{l}$
160-1000		$\frac{1,5}{l}$

$$\Delta_2 = \frac{100}{n_{сч 2}}. \quad (105)$$

Для обмоток с регулировочными витками, симметрично расположенными относительно середины высоты обмоток на каждой ступени (рисунок 3.2б), $\kappa_{02} = 0$. Если ответвления выполнены по схеме, изображенной на рисунке 3.2а, и внешний слой обмотки ВН содержит около 50% витков слоя, и эти витки расположены в верхней или нижней половине обмотки, то κ_{02} определяется из таблицы 2.4

Таблица 2.4

Значения κ_{02}

a_{12} , м	0,01	0,02	0,03 – 0,06
Медь	0,034	0,030	0,026 – 0,025
Алюминий	0,06	0,05	0,04 – 0,03

Осевые силы действуют на обе обмотки: в верхней половине обмотки они направлены вниз, а в нижней – вверх. Наибольшее значение осевой силы в середине высоты обмотки НН.

Сжимающее напряжение

$$\sigma_{сж} = \frac{F_{ос}}{\pi \cdot D_{1CP} \cdot a_1} \quad (106)$$

где a_1 – суммарный радиальный размер металла обмотки НН; при намотке плашмя $a_1 = a \cdot n_{сч 1}$.

Для трансформаторов мощностью до 6300 кВ·А необходимо выполнение условия: $\sigma_{сж} \leq 18 \div 20$ МПа.

Расчёт температуры обмоток при коротком замыкании проводится для установившегося тока короткого замыкания, предполагая, что вследствие быстротечности процесса всё выделяющееся тепло идёт на нагрев обмоток.

Температура обмоток через время t_K после возникновения короткого замыкания:

- для медных обмоток

$$\vartheta_K = \frac{670 \cdot t_K}{12,5 \cdot [U_{KH}^* / (J \cdot 10^{-6})]^2 - t_K} + \vartheta_H; \quad (107)$$

- для алюминиевых обмоток

$$\vartheta_K = \frac{670 \cdot t_K}{5,5 \cdot [U_{KH}^* / (J \cdot 10^{-6})]^2 - t_K} + \vartheta_H, \quad (108)$$

где t_K – наибольшая продолжительность короткого замыкания на выводах масляного трансформатора; при коротком замыкании на сторонах с номинальным напряжением 35 кВ и ниже принимается $t_K = 4c$;

ϑ_H – начальная температура обмотки; принимается $\vartheta_H = 90^\circ\text{C}$.

Предельно допустимые температуры при коротком замыкании приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Предельно допустимые температуры обмоток при коротком замыкании масляных трансформаторов

Металл обмоток	Медь	Алюминий
Класс изоляции	A	A
Допустимая температура, °C	250	200

2.4 Способы снижения сил в обмотках при коротком замыкании

При проектировании трансформаторов принимаются меры для ограничения возможных радиальных и осевых сил, возникающих при коротких замыканиях, и для увеличения механической прочности обмоток:

1) ограничение токов короткого замыкания за счёт увеличения номинального напряжения короткого замыкания; за счёт этой меры снижаются как радиальные, так и осевые силы;

2) для уменьшения осевых сил необходимо выдерживать осевые размеры обмоток одинаковыми, располагать регулировочные витки равномерно по высоте обмотки ВН или в середине её высоты;

3) для повышения механической стойкости обмоток при воздействии токов короткого замыкания применяется прессовка обмоток при помощи стальных разрезных или пластиковых неразрезных колец; прессующие кольца рекомендуется устанавливать в трансформаторах с ПБВ мощностью более 630 кВ·А, с РПН мощностью 1000-6300 кВ·А;

4) большое значение для создания механической прочности имеет технология изготовления обмоток; плотность намотки в радиальном и осевом направлениях обеспечивается натяжением провода при намотке, путем опрессовки силами, близкими по величине к осевым силам при коротком замыкании.

3 ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ РАСЧЁТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

При окончательном расчёте магнитной системы, выполняемом после полного расчёта обмоток и параметров короткого замыкания, определяются: число ступеней в сечении стержня и ярма, размеры пакетов - ширина пластин и толщина пакетов, полные и активные сечения стержня и ярма, высота стержня, расстояние между осями стержней, масса стали стержней, ярм и углов магнитной системы, полная масса магнитной системы трансформатора, потери и ток холостого хода трансформатора.

Выбор числа и размеров пакетов в сечении стержня плоской магнитной системы должен быть сделан так, чтобы площадь ступенчатой фигуры его поперечного сечения, вписанного в окружность, была максимально возможной. В таблицах 3.1 и 3.2 приведены рациональные числа ступеней и размеры пакетов для нормализованных диаметров стержня, рекомендуемые по опыту проектирования магнитных систем трансформаторов.

Например, для $d_H = 0,16$ м и $d_H = 0,25$ м пакеты в половине сечений стержней и ярм имеют следующие размеры:

№ пакета	Стержень, мм	Ярмо, мм
$d_H = 0,16$ М		
1	155x20	155x20
2	135x23	135x23
3	120x10	120x10
4	105x7	105x7
5	85x7	85x14
6	55x7	-
$d_H = 0,25$ М		
1	240x35	240x35
2	220x24	220x24
3	200x16	200x16
4	180x12	180x12
5	155x11	155x11
6	140x6	140x17
7	120x6	-
8	100x5	-

Таблица 3.1

Размеры пакетов для магнитных систем без прессующих пластин с прессовкой стержня
расклиниванием с обмоткой

Диаметр стержня d_n , мм	n_c	K_{KP}	n_y	a_y	Размеры пакетов $a_n \times b_n$, мм, в стержне					
0,130	6	0,918	5	65	125×18	110×16	100×8	80×9	65×5	40×6
0,140	6	0,919	5	65	135×19	120×17	105×10	85×9	65×7	40×5
0,150	6	0,915	5	85	145×19	135×13	120×13	105×9	85×8	55×7
0,160	6	0,913	5	85	155×20	135×23	120×10	105×7	85×7	55×7
0,170	6	0,927	5	85	160×28	145×17	130×10	110×10	85×8	50×8
0,180	6	0,915	5	95	175×21	155×25	135×13	120×8	95×9	65×8

a_n - ширина пластин;

b_n - толщина пакетов;

n_c , n_y - число ступеней в сечении стержня и ярма.

Крайний наружный пакет ярма имеет ширину a_y и толщину, равную сумме толщин двух или трех крайних пакетов стержня.

Таблица 3.2

Размеры пакетов для магнитных систем без прессующих пластин с прессовкой стержней
бандажами из стеклоленты

Диаметр стержня d_H , м	Стержень		Ярмо		Размеры пакетов $a_{II} \times b_{II}$, мм, в стержне							
	n_C	κ_{KP}	$n_{Я}$	$a_{Я}$								
0,19	7	0,927	5	115	180×30	165×17	145×14	130×8	115×7	100×5	75×7	-
0,20	7	0,918	5	120	195×22	175×26	155×15	135×11	120×6	105×5	75×7	-
0,21	7	0,922	5	130	200×32	180×22	160×14	145×8	130×6	110×8	90×6	-
0,22	8	0,929	6	120	215×23	195×28	175×15	155×12	135×9	120×5	105×4	75×7
0,23	8	0,933	6	130	220×34	205×19	185×16	165×12	145×9	130×5	115×5	90×6
0,24	8	0,927	6	135	230×34	215×19	195×17	175×12	155×9	135×8	120×5	95×6
0,25	8	0,929	6	140	240×35	220×24	200×16	180×12	155×11	140×6	120×6	100×5
0,26	8	0,924	6	155	250×35	230×25	215×13	195×13	175×10	155×8	120×9	105×6
0,27	8	0,930	6	155	260×36	240×25	215×20	195×13	170×11	155×5	135×7	105×8
0,28	8	0,927	6	175	270×37	250×26	230×17	215×9	195×11	175×9	135×13	105×7
0,29	8	0,927	6	165	280×37	260×27	235×21	210×15	180×13	165×6	145×6	115×8
0,30	8	0,930	6	175	295×28	270×37	250×18	230×13	215×8	175×18	135×12	105×6

a_{II} - ширина пластин;

b_{II} - толщина пакетов;

n_C , $n_{Я}$ - число ступеней в сечении стержня и ярма.

Крайний наружный пакет ярма имеет ширину $a_{Я}$ и толщину, равную сумме толщин двух или трех крайних пакетов стержня.

Следует обратить внимание, что число ступеней в сечении ярм $n_{я}$ меньше, чем в сечении стержней n_c для $d_H = 0,16$ м на 1, для $d_H = 0,25$ м на 2. Но наружные пакеты ярм имеют толщину, равную сумме толщин для $d_H = 0,16$ м двух, а для $d_H = 0,25$ м трех крайних пакетов стержней.

Полные площади ступенчатых фигур поперечных сечений стержня $\Pi_{\phi.c}$ и ярма $\Pi_{\phi.я}$ для плоских шихтованных магнитных систем и объемы одного угла магнитной системы V_y приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Площади сечений стержня $\Pi_{\phi.c}$ и ярма $\Pi_{\phi.я}$ объемы угла V_y плоской шихтованной магнитной системы при размерах пакетов по таблицам 3.1 и 3.2

d_H , м	$\Pi_{\phi.c}$, см ²	$\Pi_{\phi.я}$, см ²	V_y , см ³	d_H , м	$\Pi_{\phi.c}$, см ²	$\Pi_{\phi.я}$, см ²	V_y , см ³
0,13	121,9	124,9	1299	0,22	353,0	360,5	6460
0,14	141,5	144,0	1620	0,23	387,7	394,0	7482
0,15	161,7	165,9	2040	0,24	419,3	425,6	8428
0,16	183,5	188,3	1470	0,25	456,2	462,6	9532
0,17	208,5	214,1	2908	0,26	490,6	507,1	10746
0,18	232,8	237,6	3452	0,27	532,6	543,4	12018
0,19	262,8	267,3	4118	0,28	570,9	591,1	13738
0,20	288,4	296,2	4811	0,29	612,4	622,8	14858
0,21	319,2	327,2	5680	0,30	657,2	675,2	16556

Активное сечение стержня

$$\Pi_c = \kappa_3 \cdot \Pi_{\phi.c} \quad (109)$$

Активное сечение ярма

$$\Pi_{я} = \kappa_3 \cdot \Pi_{\phi.я} \quad (110)$$

Объем стали угла магнитной системы

$$V_{y.ст} = \kappa_3 \cdot V_y \quad (111)$$

Длина стержня

$$l_c = l + (l'_0 + l''_0) \cdot 10^{-3}, \quad (112)$$

где l'_0 и l''_0 - расстояния от обмотки соответственно до верхнего и нижнего ярма; при отсутствии прессующих колец (в трансформаторах с $S_H < 1000$ кВ·А) $l'_0 = l''_0 = l_{02}$ [часть первая методических указаний, таблица 2.8]; при наличии колец (для трансформаторов мощностью 1000-6300 кВ·А) расстояние до верхнего ярма увеличивается на 45 мм.

Расстояние между осями соседних стержней

$$C' = D_2'' + a_{22} \cdot 10^{-3}. \quad (113)$$

Размер a_{22} определяется по таблице 2.8, представленной в первой части методических указаний.

Полученное значение C' округляется с точностью до 0,005м.

Получаем размер C .

Масса стали в стержнях и ярмах плоской шихтованной магнитной системы определяется суммированием масс прямых участков и углов. Плотность холоднокатаной стали $\gamma_{CT} = 7650$ кг/м³.

Масса стали угла при многоступенчатой форме сечения

$$G_y = V_{y,CT} \cdot \gamma_{CT} \cdot 10^{-6}. \quad (114)$$

Масса стали ярм

$$G_{я} = G'_{я} + G''_{я}, \quad (115)$$

где

$$G'_{я} = 2 \cdot (c - 1) \cdot C \cdot \Pi_{я} \cdot \gamma_{CT}, \quad (116)$$

$$G''_{я} = 2 \cdot G_y. \quad (117)$$

Масса стали стержней

$$G_C = G'_C + G''_C, \quad (118)$$

где

$$G'_C = c \cdot \Pi_C \cdot l_C \cdot \gamma_{CT}, \quad (119)$$

$$G''_C = c \cdot (\Pi_C \cdot a_{1я} \cdot \gamma_{CT} \cdot 10^{-3} - G_y), \quad (120)$$

где $a_{1я}$ – ширина пластин среднего пакета ярма.

Полная масса стали магнитной системы

$$G_{CT} = G_C + G_{я}. \quad (121)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Копылов, И.П.** Электрические машины[Текст]: учебник для студентов электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов/ И.П.Копылов. – Изд.5-е, стереотип. – М.: Высшая школа, 2006.-607с.

2. **Тихомиров, П.М.** Расчет трансформаторов[Текст]: учебное пособие для студентов электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов/П.М.Тихомиров – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Альянс, 2013. – 527с.

3. **Бузинов, О.А.** Расчет трехфазных масляных трансформаторов. Часть 1. Общие вопросы. Предварительные расчеты элементов трансформаторов [Текст]: методические указания для выполнения курсовых проектов /О.А. Бузинов, Г.В. Иванов – 1-е изд. – Тюмень: Издательский центр БИК, ТюмГНГУ, 2016.– 30с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

4. **Копылов, И.П.** Проектирование электрических машин[Текст]: В 2 кн. Книга 1 / И.П.Копылов. –М.: Энергоатомиздат, 2003.-496 с.

5. **Кацман, М.М.** Справочник по электрическим машинам[Текст]: учебное пособие для студентов образоват. учреждений средн. проф. образования / М.М. Кацман.– М.: Academia, 2006.- 480с.

СОДЕРЖАНИЕ

1	РАСЧЕТ ОБМОТОК	3
1.1	Общие вопросы расчета обмоток	3
1.2	Расчет обмоток НН	3
1.2.1	Расчет цилиндрической обмотки из прямоугольного провода	5
1.2.2	Расчет цилиндрической многослойной обмотки из алюминиевой ленты	9
1.3	Расчет обмоток ВН	12
1.3.1	Расчет цилиндрической многослойной обмотки из прямоугольного провода	14
1.3.2	Расчет многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода	17
2	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ	21
2.1	Определение потерь короткого замыкания	21
2.2	Расчет номинального напряжения короткого замыкания	24
2.3	Определение механических сил в обмотках и нагрева обмоток при коротком замыкании	25
2.3.1	Проверка обмоток на механическую прочность при коротком замыкании	25
2.4	Способы снижения сил в обмотках при коротком замыкании	30
3	ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ	31
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	36
	ПРИЛОЖЕНИЯ	37
	Приложение А (обязательное) Номинальные размеры и сечения круглого медного и алюминиевого прямоугольного обмоточного провода марок ПБ и АПБ.	38
	Приложение Б (обязательное) Номинальные размеры и сечения медного и алюминиевого прямоугольного обмоточного провода марок ПБ и АПБ.	39

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Номинальные размеры и сечения
круглого медного и алюминиевого обмоточного провода

Диаметр, мм	Сечение, мм ²	Диаметр, мм	Сечение, мм ²
Провод ПБ		4,00	12,55
1,18	1,094	4,10	13,2
1,25	1,23	4,25	14,2
Провод ПБ, АПБ		4,50	15,9
1,32	1,37	4,75	17,7
1,40	1,51	5,00	19,63
1,50	1,77	5,20	21,22
1,60	2,015	Провод АПБ	
1,70	2,27	5,30	22,06
1,80	2,545	6,00	28,26
1,90	2,805	8,00	50,24
2,00	3,14	Примечания: 1. Провод марок ПБ и АПБ всех диаметров выпускается с толщиной изоляции на 2 стороны $2\delta = 0,30 (0,40) ; 0,72 (0,82) ; 0,96 (1,06) ; 1,20 (1,30) ;$ провод диаметром от 2,24 мм и выше – также с изоляцией 1,68 (1,83) и 1,92 (2,07), а провод диаметром от 3,75 мм и выше – также с изоляцией 2,88 (3,08) ; 4,08 (4,33) и 5,76 (6,11) мм. 2. Без скобок указана номинальная толщина изоляции. Размеры катушек считать по толщине изоляции, указанной в скобках.	
2,12	3,53		
2,24	3,94		
2,36	4,375		
2,50	4,91		
2,65	5,515		
2,80	6,16		
3,0	7,07		
3,15	7,795		
3,35	8,81		
3,55	9,895		
3,75	11,05		

Приложение Б

Номинальные размеры и сечения медного и алюминиевого прямоугольного обмоточного провода марок ПБ и АПБ

$\frac{a}{b}$	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12	2,24	2,36	2,50	2,65	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
3,75	5,04	-	5,79	-	6,39	-	7,14	-	8,04	-	8,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,0	5,39	5,79	6,19	6,44	6,84	7,24	7,64	8,12	8,60	8,89	9,45	10,1	10,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,25	5,74	-	6,59	-	7,29	-	8,14	-	9,16	-	10,1	-	11,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,50	6,09	6,54	6,99	7,29	7,74	8,19	8,64	9,18	9,72	10,1	10,7	11,4	12,1	13,0	13,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,75	6,44	-	7,39	-	8,19	-	9,14	-	10,3	-	11,3	-	12,8	-	14,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5,0	6,79	7,29	7,79	8,14	8,64	9,14	9,64	10,2	10,8	11,3	12,0	12,7	13,5	14,5	15,2	16,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5,30	7,21	-	8,27	-	9,18	-	10,2	-	11,5	-	12,7	-	14,3	-	16,2	-	18,3	-	-	-	-	-	-	-	-
5,60	7,63	8,19	8,75	9,16	9,72	10,3	10,8	11,5	12,2	12,7	13,5	14,3	15,1	16,3	17,1	18,2	19,3	20,1	21,5	-	-	-	-	-	-
6,0	8,19	-	9,39	-	10,4	-	11,6	-	13,1	-	14,5	-	16,3	-	18,4	-	20,8	-	23,1	-	-	-	-	-	-
6,30	8,61	9,24	9,87	10,4	11,0	11,6	12,2	13,0	13,8	14,3	15,2	16,2	17,1	18,4	19,3	20,6	21,8	22,8	24,3	25,9	27,5	-	-	-	-
6,70	9,17	-	10,5	-	11,7	-	13,0	-	14,7	-	16,2	-	18,2	-	20,6	-	23,2	-	25,9	-	29,3	-	-	-	-
7,10	9,73	10,4	11,2	11,7	12,4	13,1	13,8	14,7	15,5	16,2	17,2	18,3	19,3	20,8	21,8	23,2	24,7	25,8	27,5	29,3	31,1	32,9	34,6	-	-
7,50	10,3	-	11,8	-	13,1	-	14,6	-	16,4	-	18,2	-	20,5	-	23,1	-	26,1	-	29,1	-	32,9	-	36,6	-	-
8,0	11,0	11,8	12,6	13,2	14,0	14,8	15,6	16,6	17,6	18,3	19,5	20,7	21,9	23,5	24,7	26,3	27,9	29,1	31,1	33,1	35,1	37,1	39,2	41,5	43,9
8,50	11,7	-	13,4	-	14,9	-	16,6	-	18,7	-	20,7	-	23,3	-	26,2	-	29,6	-	33,1	-	37,4	-	41,6	-	46,7
9,00	12,4	13,3	14,2	14,9	15,8	16,7	17,6	18,7	19,8	20,7	22,0	23,3	24,7	26,5	27,8	29,6	31,4	32,9	35,1	37,4	39,6	41,9	44,1	46,8	49,5
9,50	13,1	-	15,0	-	16,7	-	18,6	-	20,9	-	23,2	-	26,1	-	29,4	-	33,2	-	37,1	-	41,9	-	46,6	-	52,1
10,00	13,8	14,8	15,8	16,6	17,6	18,6	19,6	20,8	22,0	23,1	24,5	26,0	27,5	29,5	31,0	33,0	35,0	36,6	39,1	41,6	44,1	46,6	49,1	52,1	55,1
10,60	14,6	-	16,8	-	18,7	-	20,8	-	23,4	-	26,0	-	29,1	-	32,8	-	37,1	-	41,5	-	46,8	-	52,1	-	58,5
11,20	15,5	16,6	17,7	18,7	19,8	20,9	22,0	23,4	24,7	25,9	27,5	29,1	30,8	33,1	34,7	37,0	39,2	41,4	43,9	46,7	49,5	52,3	55,1	58,5	61,9
11,80	-	-	18,7	-	20,9	-	23,2	-	26,1	-	29,0	-	32,5	-	36,6	-	41,3	-	46,3	-	52,2	-	58,1	-	65,2
12,50	-	18,5	19,8	20,9	22,1	23,4	24,6	26,1	27,6	29,0	30,7	32,6	34,5	37,0	38,8	41,3	43,8	46,0	49,1	52,3	55,4	58,5	61,6	65,4	69,1
13,20	-	-	-	-	23,4	-	26,0	-	29,2	-	32,5	-	36,4	-	41,0	-	46,3	-	51,9	-	58,5	-	65,1	-	73,1
14,00	-	-	-	-	24,8	26,2	27,6	29,3	31,0	32,5	34,5	36,6	38,7	41,5	43,6	46,4	49,2	52,0	55,1	58,6	62,1	65,6	69,1	73,3	77,5
15,00	-	-	-	-	-	-	29,6	-	33,2	-	37,0	-	41,5	-	46,7	-	52,7	-	59,1	-	66,6	-	74,1	-	83,1
16,00	-	-	-	-	-	-	31,6	33,6	35,5	37,2	39,5	41,9	44,3	47,5	49,9	53,1	56,3	59,1	63,1	67,1	71,1	75,1	79,1	83,9	88,7
17,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47,2	-	53,2	-	59,4	-	67,1	-	75,6	-	84,1	-	94,3
18,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	53,1	55,8	59,4	63,0	66,6	71,1	75,6	80,1	84,6	89,1	94,5	99,9

Примечания:

а) Медный провод ПБ – все размеры таблицы, за исключением $\epsilon = 17$ и $\epsilon = 18$ мм;

б) Алюминиевый провод АПБ – все размеры таблицы вправо и вверх от жирной черты;

в) Провод марки ПБ и АПБ – выпускается с толщиной изоляции на обе стороны $2\delta = 0,45 (0,50)$; $0,55 (0,62)$; $0,72 (0,82)$; $0,96 (1,06)$; $1,20 (1,35)$. Вне скобок указана номинальная толщина изоляции, размеры катушек считать по толщине изоляции, указанной в скобках.

Учебное издание

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ЧАСТЬ 2. РАСЧЕТЫ ОБМОТОК И МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Методические указания для выполнения курсовых проектов

Составители

БУЗИНОВ Олег Анатольевич

ИВАНОВ Геннадий Викторович

Редактор *В.К. Бородина*

Компьютерная верстка *Т.И. Роцин*

Подписано в печать . Формат 60х90 1/16. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 30 экз. Заказ № .

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.