

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 3. РАСЧЕТЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ 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.– 32с.

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 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ И РАСЧЁТ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Вследствие потерь в обмотках и в стали магнитной системы эти элементы нагреваются и передают тепло через трансформаторное масло стенкам бака и радиаторов, с наружных поверхностей которых через излучение и конвекцию идёт отдача тепла окружающему воздуху. В установленном режиме всё выделяющееся тепло передаётся в окружающую среду.

Тепловой расчёт трансформатора проводится после завершения электромагнитного и механического расчётов его обмоток и магнитной системы. При правильном выборе электромагнитных нагрузок, распределении и выборе размеров охлаждающих масляных каналов внутренние температуры обмоток и магнитной системы оказываются не выше допустимых значений. Поэтому тепловой расчёт сводится к определению перепадов температур внутри обмоток и на их поверхностях.

Конструкция бака трансформатора зависит от того теплового потока, который должен быть отведён с поверхности бака в окружающий воздух, а также определяется требованиями механической прочности. При тепловом расчёте бака сначала рассчитывается допустимое среднее превышение температуры стенки бака над окружающим воздухом, затем по требуемой теплоотдаче определяется его охлаждающая поверхность, подбираются конструктивные элементы (их размеры и число), образующие эти поверхности. Далее проводится поверочный расчёт превышения температуры стенок бака и масла над окружающим воздухом. Если при этом получаются превышения температуры, отличающиеся от допустимых, то производится корректировка охлаждающей поверхности путём увеличения или уменьшения числа или размеров конструктивных элементов.

1.1 Поверочный тепловой расчёт обмоток

Полный внутренний перепад температуры в многослойных обмотках из круглого провода без горизонтальных охлаждающих каналов

$$\Theta_o = \frac{p \cdot a_i^2}{8 \cdot \lambda_{cp}}, \quad (1)$$

где p — потери, выделяющиеся в 1 м³ общего объёма обмотки:
для обмотки из медного провода

$$p_M = 1,68 \cdot \frac{J^2 \cdot d^2}{(d' + \delta_{MC}) \cdot d'} \cdot 10^{-8}, \quad (2)$$

для обмотки из алюминиевого провода

$$p_A = 2,71 \cdot \frac{J^2 \cdot d^2}{(d' + \delta_{MC}) \cdot d'} \cdot 10^{-8}. \quad (3)$$

В этих формулах d , d' и δ_{MC} выражены в м, J - в А/м²;

a_i – радиальный размер соответствующей обмотки, м; при наличии в обмотке осевого охлаждающего канала размер a_i равен ширине наиболее широкой из катушек обмотки;

λ_{CP} – средняя теплопроводность обмотки

$$\lambda_{CP} = \frac{\lambda \cdot \lambda_{MC} \cdot (d' + \delta_{MC})}{\lambda \cdot \delta_{MC} + \lambda_{MC} \cdot d'}; \quad (4)$$

λ – средняя условная теплопроводность обмотки без учёта межслойной изоляции

$$\lambda = \frac{\lambda_{ИЗ}}{0,7 \cdot \sqrt{\frac{d' - d}{d}}}; \quad (5)$$

$\lambda_{ИЗ}$ – теплопроводность материала изоляции витков (таблица 1.1);

λ_{MC} – теплопроводность междуслойной изоляции (таблица 1.1).

Удельные теплопроводности изоляционных материалов приведены в таблице 1.1.

Если обмотка из круглого провода намотана непосредственно на изоляционном цилиндре и имеет только одну открытую поверхность охлаждения, то полный внутренний перепад температуры в ней определяется по выражению

$$\Theta_o = 0,28 \cdot \frac{p \cdot a_i^2}{\lambda_{CP}}. \quad (6)$$

Среднее значение внутреннего перепада температуры в обмотке

$$\Theta_{o.CP} = \frac{2}{3} \Theta_o. \quad (7)$$

Таблица 1.1

Удельные теплопроводности изоляционных и других материалов

Материалы	λ , Вт/(м·°С)
Бумага кабельная сухая	0,12
Бумага кабельная в масле	0,17
Электроизоляционный картон	0,17
Лакоткани электроизоляционные	0,25
Гетинакс	0,17-0,175
Текстолит	0,146-0,162
Стеклотекстолит	0,178-0,182
Масло при отсутствии конвекции	0,1
Медь	390
Алюминий	226

Внутренний перепад температуры в многослойных обмотках из прямоугольного провода рассчитывается по следующим формулам:

$$p_M = \frac{2,14 \cdot J^2 \cdot a \cdot b}{(a' + \delta_{MC}) \cdot b'} \cdot 10^{-8} \quad (8)$$

или

$$p_A = \frac{3,44 \cdot J^2 \cdot a \cdot b}{(a' + \delta_{MC}) \cdot b'} \cdot 10^{-8}; \quad (9)$$

$$\lambda = \lambda_{из} \cdot \frac{b \cdot a'}{2 \cdot \delta \cdot b'}; \quad (10)$$

$$\lambda_{CP} = \frac{\lambda \cdot \lambda_{MC} \cdot (a' + \delta_{MC})}{\lambda \cdot \delta_{MC} + \lambda_{MC} \cdot a'}; \quad (11)$$

$$\Theta_o = \frac{p \cdot a_i^2}{8 \cdot \lambda_{CP}} \quad \text{или} \quad \Theta_o = 0,28 \cdot \frac{p \cdot a_i^2}{8 \cdot \lambda_{CP}}; \quad (12)$$

$$\Theta_{o,CP} = \frac{2}{3} \cdot \Theta_o, \quad (13)$$

где a и a' — размеры провода без изоляции и с изоляцией в направлении движения тепла (м);

b и b' — то же, но в направлении перпендикулярном движению тепла (м).

Перепад температуры на поверхности цилиндрических обмоток из круглого или прямоугольного провода или алюминиевой ленты

$$Q_{O.M} = 0,285 \cdot q^{0,6} \quad (14)$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой масла

$$Q_{O.M.CP} = \Theta_{O.CP} + \Theta_{O.M} \cdot \quad (15)$$

$\Theta_{O.M.CP}$ определяются для каждой обмотки, если они выполняются без осевых охлаждающих каналов, или катушки, если обмотки разделены осевыми охлаждающими каналами на катушки.

1.2 Тепловой расчёт бака

Бак трансформатора должен иметь хорошую теплоотдачу, быть механически прочным, простым в изготовлении, иметь малые габариты. Тип бака выбирается по мощности трансформатора (таблица 1.2).

Таблица 1.2
Типы баков силовых масляных трансформаторов

Тип бака	Вид охлаждения	Пределы применения по мощности, кВ·А
Бак с гладкими стенками	м	до 25-40
Бак с вваренными охлаждающими гнутыми трубами (трубчатый)	м	от 40-63 до 1600
Бак с навесными радиаторами с прямыми трубами	м	от 100 до 6300
Бак с навесными радиаторами с гнутыми трубами	м	от 2500 до 10000

Примечание - При современных технологиях изготовления более технологичными являются баки с навесными радиаторами с прямыми трубами.

Для расчета размеров бака необходимо определить следующие изоляционные расстояния и размеры (рисунок 1.1):

s_1 – изоляционное расстояние от изолированного отвода обмотки ВН до собственной обмотки (по таблице 1.4);

s_2 – изоляционное расстояние от изолированного отвода обмотки ВН до стенки бака (по таблице 1.3);

d_2 – диаметр изолированного отвода обмотки ВН: при классах напряжения 10 и 35 кВ при мощности трансформатора до 10000 кВ·А $d_2 = 20$ мм, а при больших мощностях $d_2 = 25$ мм;

s_3 – изоляционное расстояние от отвода обмотки НН до обмотки ВН (таблица 1.4);

s_4 – изоляционное расстояние от отвода обмотки НН до стенки бака (по таблице 1.3);

d_1 – диаметр изолированного отвода от обмотки НН, равный d_1 , или размер неизолированного отвода НН (шины), равный 10-15 мм.

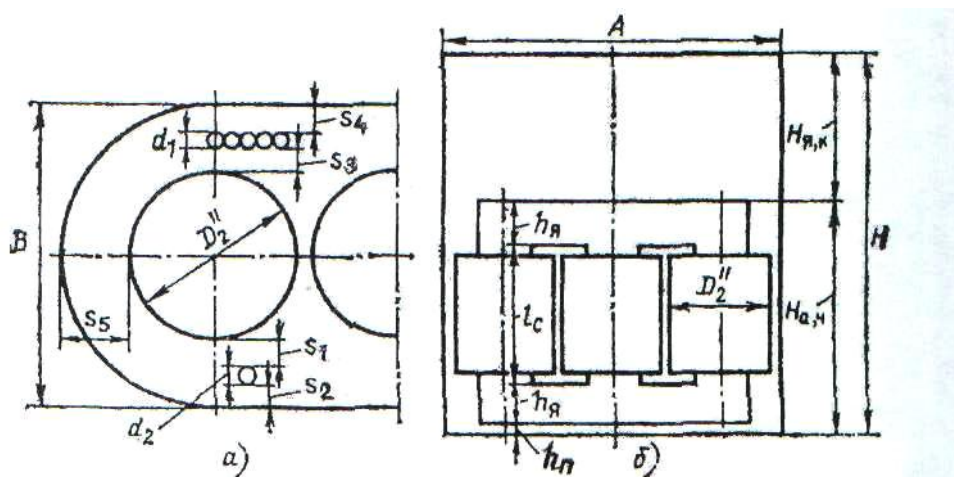


Рис. 1.1. Основные размеры бака

Минимальная ширина бака

$$B = D_2'' + (s_1 + s_2 + d_2 + s_3 + s_4 + d_1) \cdot 10^{-3} \quad (16)$$

Минимальная длина бака трехфазных трансформаторов классов напряжений 6, 10 и 35 кВ

$$A = 2 \cdot C + D_2'' + 2 \cdot s_5 \cdot 10^{-3}, \quad (17)$$

где s_5 – расстояние от обмотки ВН до стенки бака; при испытательных напряжениях до 85 кВ s_5 может быть принят таким же, как и расстояние от неизолированного отвода обмотки до обмотки ВН (таблица 1.4), т. е. $s_5 = s_1$; чаще принимают

$$s_5 = s_1 + d_2 + s_2. \quad (18)$$

Внутренние размеры бака B и A , рассчитанные по вышеперечисленным формулам, обычно оказываются достаточными и по условиям теплоотдачи.

Таблица 1.3

Минимально допустимые расстояния от отводов дозаземлённых частей

Испытательное напряжение отвода, кВ	Толщина изоляции на одну сторону, мм	Диаметр отвода, мм	Расстояние от гладкой стенки бака или собственной обмотки, мм
До 25	0	<6	25
	0	>6	22
	2	—	20
35	0	<6	33
	0	>6	28
	2	—	20
45	0	<6	42
	0	>6	37
	2	—	25
55	0	<6	50
	0	>6	45
	2	—	32
85	2	—	50
	4	—	40
	6	—	35

Примечания:

а) Для отводов с $U_{\text{исп}} \leq 35$ кВ используется медный или алюминиевый провод, изолированный кабельной бумагой или бумажно-бакелитовыми трубками.

б) При рабочем напряжении отвода до 1 кВ провод (шина) отвода собственной изоляции не имеет.

Глубина бака определяется высотой активной части и минимальным расстоянием от верхнего ярма до крышки бака, необходимым для размещения внутренних частей проходных изоляторов, отводов и переключателей

$$H = H_{\text{А.Ч}} + H_{\text{Я.К}}, \quad (19)$$

где $H_{\text{А.Ч}}$ — высота активной части

$$H_{\text{А.Ч}} = l_c + 2 \cdot h_{\text{Я}} + h_{\text{П}} \cdot 10^{-3}, \quad (20)$$

где $h_{\text{П}}$ — толщина подкладки под нижнее ярмо; $h_{\text{П}} = 30 \div 50$ мм;

$H_{\text{Я.К}}$ — расстояние от верхнего ярма магнитопровода до крышки бака; выбирается из таблицы 1.5.

Таблица 1.4

Минимально допустимые изоляционные расстояния ототводов до обмотки

Испытательное напряжение, кВ		Толщина изоляции на одну сторону, мм	Минимальное расчётное расстояние до основных катушек, мм
обмотки	отвода		
До 25	До 25	0	25
		2	20
35	До 35	0	33
		2	20
55	До 35	0	50
		2	30
85	До 35	0	90
		2	50

Таблица 1.5

Минимальное расстояние от ярма до крышки бака

Класснапряжения трансформатора, кВ	Минимальное расстояние, м
6,10	0,16
20	0,30
35	0,40

Для получения нужной поверхности охлаждения в диапазоне мощностей задания целесообразно использовать радиаторы с прямыми трубами (рисунок 1.2). Радиаторы этого типа могут крепиться приваркой патрубков коллектора к стенке бака (у трансформаторов мощностью 100-250 кВ·А) или с помощью разъёмного соединения на фланцах (у трансформаторов мощностью 100-6300 кВ·А)

В любом случае для установки радиаторов необходимая глубина бака

$$H_B = A_p + C_1 + C_2, \quad (21)$$

где A_p – расстояние между осями патрубков радиатора (таблица 1.6);
 C_1 и C_2 – расстояние осей фланцев радиатора от нижнего и верхнего срезов стенки бака (таблица 1.6, примечание 2).

Должно быть $H \geq H_B$. В противном случае необходимо принять $H \geq H_B$.

Навесные радиаторы с прямыми трубами круглого или овального сечения выпускаются с одним рядом труб – 7 труб в ряду или двумя

рядами – 10 труб в ряду. Установка радиатора на баке трансформатора показана на рисунке 1.2.

Для радиаторов с одним рядом труб $B_p = 354$ мм, $C_p = 158$ мм; с двумя рядами труб $B_p = 505$ мм, $C_p = 253$ мм. Данные трубчатых радиаторов с прямыми трубами приведены в таблице 1.6.

Превышение средней температуры масла над температурой окружающей среды для наиболее нагретой обмотки или катушки

$$\Theta_{M.B} = \Theta_{O.B.ДОП} - \Theta_{O.M.СР}, \quad (22)$$

где $\Theta_{O.B.ДОП}$ – длительное допустимое среднее превышение температуры обмоток над воздухом при номинальной нагрузке; для обмоток масляных трансформаторов по ГОСТ 11677-85 $\Theta_{O.B.ДОП} = 65^\circ \text{C}$.

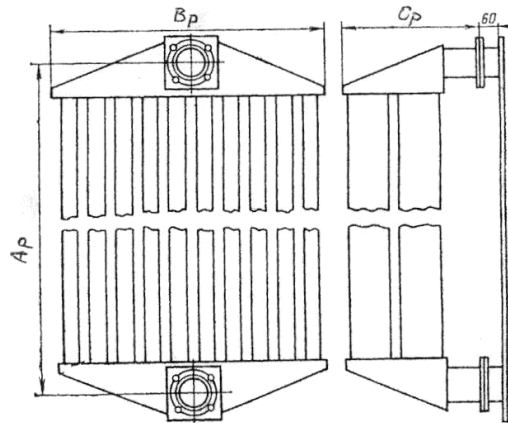


Рис. 1.2. Трубчатый радиатор с прямыми трубами

Максимальное превышение температуры стенки бака над температурой окружающей среды (пренебрегая перепадом температуры между маслом и стенкой бака)

$$\gamma \cdot \Theta_{B.B} \leq 60^\circ \text{C}, \quad (23)$$

где γ – коэффициент, равный отношению максимального и среднего превышений температуры масла; можно применять $\gamma=1,2$;

$\Theta_{B.B}$ – среднее превышение температуры стенки бака над воздухом

$$\Theta_{B.B} \approx \Theta_{M.B}; \quad (24)$$

60°C – превышение температуры верхних слоёв масла над воздухом для трансформаторов герметичных или с расширителем.

Если приведённое выше неравенство не соблюдается, то следует принять

$$1, 2 \cdot \Theta_{Б.Б} = 60^{\circ} C ; \quad (25)$$

$$\Theta_{Б.Б} = \Theta_{М.Б} = 50^{\circ} C . \quad (26)$$

Таблица 1.6

Основные данные трубчатых радиаторов с прямыми трубами

Размер A_p , мм	Поверхность $\Pi_{к.тр}$, м ²	Масса, кг		Размер A_p , мм	Поверхность $\Pi_{к.тр}$, м ²	Масса, кг	
		Стали	масла			стали	масла
С одним рядом труб				1400 1615 1800 2000 2200 2400	4,333 4,961 5,613 6,253 6,893 7,533	53,94 67,14 73,94 81,98 89,18 95,68	46 53 57 64 72 78
710	0,746	12,9	8,5				
900	0,958	15,35	10,9				
С двумя рядами труб							
710	2,135	34,14	24				
900	2,733	41,14	30				
1150	3,533	50,14	38				

Примечания:

а) $P_{к.тр}$ – поверхность конвекции труб; $P_{к.к}$ – поверхность конвекции двух коллекторов: $P_{к.к} = 0,15$ м² при одном ряде труб; $P_{к.к} = 0,34$ м² при двух рядах труб; $P_{к.р}$ – поверхность конвекции радиатора; $P_{к.р} = P_{к.тр} + P_{к.к}$.

б) Минимальные расстояния осей фланцев радиатора от нижнего и верхнего срезов стенки бака: $C_1 = 0,085$ м; $C_2 = 0,10$ м.

По выбранным размерам бака рассчитывается поверхность гладких стенок бака при овальном его сечении в плане

$$P_{к.гл} = H \cdot [2 \cdot (A - B) + \pi \cdot B] \quad (27)$$

Поверхность излучения бака с навесными радиаторами (ориентировочно)

$$P_{и} \approx \kappa_{и} \cdot P_{к.гл} , \quad (28)$$

где κ_H – коэффициент, учитывающий отношение поверхности излучения к поверхности гладкой части бака; для бака с навесными радиаторами $\kappa_H = 1,5 \div 2$.

Необходимая поверхность конвекции для получения найденного выше значения среднего превышения температуры наружных стенок бака над температурой воздуха $\Theta_{Б.В}$ (ориентировочно)

$$\Pi'_K = \frac{1,05 \cdot (P_{KH} + P_{OH})}{2,5 \cdot \Theta_{Б.В}^{1,25}} - 1,12 \cdot \Pi_H \quad (29)$$

Эта поверхность должна быть обеспечена элементами системы охлаждения масляного трансформатора (стенками бака, крышкой и навесными радиаторами), т. е. должно быть выполнено условие

$$(\Pi_{K.ГЛ} + \Pi_{K.КР} + n_P \cdot \Pi_{K.Р \text{ ПРИВ}}) \geq \Pi'_K, \quad (30)$$

где $\Pi_{K.КР}$ – поверхность конвекции крышки бака

$$\Pi_{K.КР} = 0,5 \cdot \left[(A - B) \cdot (B + 0,16) + \pi \cdot \frac{(B + 0,16)^2}{4} \right], \quad (31)$$

0,5 – коэффициент, учитывающий закрытие поверхности крышки вводами и арматурой;

0,16 – удвоенная ширина верхней рамы бака;

n_P – число навесных радиаторов;

$\Pi_{K.Р \text{ ПРИВ}}$ – приведенная поверхность конвекции радиатора

$$\Pi_{K.Р \text{ ПРИВ}} = \kappa_{Ф.Р} \cdot \Pi_{K.Р}, \quad (32)$$

где $\kappa_{Ф.Р}$ – коэффициент, учитывающий улучшение теплоотдачи конвекцией навесного радиатора по сравнению с гладкой стенкой (коэффициент приведения поверхности конвекции радиатора к поверхности конвекции гладкой стенки); для радиаторов с прямыми трубами (рисунок 1.2) $\kappa_{Ф.Р} = 1,26$.

Необходимое число радиаторов (предварительно)

$$n'_P \geq \frac{\Pi'_K - \Pi_{K.ГЛ} - \Pi_{K.КР}}{\Pi_{K.Р \text{ ПРИВ}}} \quad (33)$$

Значение n'_p округляется до ближайшего целого числа с учётом схемы расположения радиаторов на баке. В результате округления получаем n_p .

Уточнённое значение поверхности конвекции бака (изменённое в результате округления n_p)

$$\Pi_K = \Pi_{K,ГЛ} + \Pi_{K,КР} + n_p \cdot \Pi_{K,Р} \quad \text{ПРИВ} \quad (34)$$

Уточнённое среднее превышение температуры стенки бака над температурой окружающего воздуха

$$\Theta_{Б.В.} = \left[\frac{\gamma_{\Pi} \cdot (P_{KH} + P_{OH})}{2,8 \cdot \Pi_H + 2,5 \cdot \Pi_K} \right]^{0,8}, \quad (35)$$

где $\gamma_{\Pi} = 1,05 \div 1,10$.

Среднее превышение температуры масла вблизи стенки над температурой стенки бака для трансформатора с естественным масляным охлаждением

$$\Theta_{М.Б.} \approx 0,165 \cdot \left[\frac{\kappa \cdot (P_{KH} + P_{OH})}{\sum \Pi_K} \right]^{0,6}, \quad (36)$$

где $\sum \Pi_K = \Pi_{K,ГЛ} + \Pi_{K,КР}$.

Превышение температуры масла в верхних слоях над температурой окружающего воздуха

$$\Theta_{М.В.В} = \gamma \cdot (\Theta_{Б.В} + \Theta_{М.Б}) \quad (37)$$

Превышение температуры обмоток над температурой окружающего воздуха рассчитывается для обмоток ВН и НН отдельно по формуле

$$\Theta_{О.В} = \Theta_{О,СР} + \Theta_{О,М} + \Theta_{М.Б} + \Theta_{Б.В} \quad (38)$$

Превышение температуры обмоток и температуры масла в верхних слоях над температурой окружающего воздуха не должны быть больше допустимых ГОСТ для масляных трансформаторов (65°C и 60°C соответственно). При получении более высоких значений $\Theta_{О.В}$ или $\Theta_{М.В.В}$ следует увеличить поверхность охлаждения бака. Если значения $\Theta_{О.В}$ и $\Theta_{М.В.В}$ меньше нормы более, чем на 5°C, то поверхность охлаждения бака следует уменьшить.

2 ПРИМЕР ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА

Конструктивные данные трансформатора:

- обмотка НН выполнена из алюминиевой ленты;
- $a = a' = \Delta_{\text{л}} = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- $b = b' = l_{\text{л}} = 0,61 \text{ м}$;
- число витков обмотки НН $w_1 = 21$; обмотка разделена на две катушки с охлаждающим каналом между ними;
- число витков катушек $w_1' = 10$ витков, $w_1'' = 11$ витков;
- размеры катушек $a_1' = 0,94 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $a_1'' = 1,03 \cdot 10^{-2} \text{ м}$;
- плотность тока в обмотках НН $J_1 = 2,13 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$;
- толщина межслойной изоляции $\delta_{\text{мсл}} = 0,24 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- обмотка ВН выполнена прямоугольным алюминиевым проводом с размерами сечения:
 - $a = 2,65 \text{ мм}$; $a' = 3,15 \text{ мм}$;
 - $b = 4,0 \text{ мм}$; $b' = 4,5 \text{ мм}$;
- число витков на основной ступени $w_{2\text{Н}} = 909$; обмотка разделена на три концентрические катушки с числом витков $w_2' = w_2'' = 310$ витков; $w_2''' = 389$ витков; размеры катушек $a_2' = a_2'' = 6,78 \text{ мм}$, $a_2''' = 10,41 \text{ мм}$, число охлаждающих каналов 2;
- толщина межслойной изоляции $\delta_{\text{мсл}} = 0,48 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- плотность тока в обмотках ВН $J_2 = 2,08 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$;
- высота обмоток $l_1 = l_2 = 0,616 \text{ м}$;
- диаметры обмоток НН $D_1' = 0,222 \text{ м}$, $D_1'' = 0,272 \text{ м}$;
- диаметры обмоток ВН $D_2' = 0,292 \text{ м}$, $D_2'' = 0,392 \text{ м}$;
- испытательные напряжения обмоток НН 5 кВ, обмоток ВН 35кВ (напряжения $U_{\text{ВН}} / U_{\text{НН}} = 10 / 0,4 \text{ кВ}$);
- основные потери в обмотках $P_{\text{ОСН1}} = 3255 \text{ Вт}$, $P_{\text{ОСН2}} = 4326 \text{ Вт}$, коэффициенты учета добавочных потерь $K_{\text{ДП1}} = 1,00035$; $K_{\text{ДП2}} = 1,0059$;
- длины стержней магнитопровода $l_{\text{с}} = 0,676 \text{ м}$;
- расстояние между стержнями магнитопровода $c = 0,405 \text{ м}$;
- высота ярма $h_{\text{я}} = 200 \text{ мм}$;
- номинальные потери короткого замыкания $P_{\text{КН}} = 8055 \text{ Вт}$;
- потери холостого хода $P_{\text{ОН}} = 1747 \text{ Вт}$.

2.1 Поверочный тепловой расчет обмоток

1) Потери, выделяющиеся в 1 м^3 объема обмотки НН из алюминиевой ленты

$$P_{A1} = \frac{3,44 J_1^2 \cdot a \cdot b}{(a' + \delta_{MCL}) \cdot b'} \cdot 10^{-8}; \quad (39)$$

$$a = a' = \Delta_{\text{л}} = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$b = b' = l_{\text{л}} = 0,61 \text{ м};$$

$$\delta_{MCL} = 0,24 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

$$P_{A1} = \frac{3,44 \cdot (2,13 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,61}{(0,7 \cdot 10^{-3} + 0,24 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,61} \cdot 10^{-8} = 116222 \text{ Вт/м}^3.$$

2) Средняя теплопроводность обмотки НН

$$\lambda_{CP1} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_{MCL} (a' + \delta_{MCL})}{\lambda_1 \cdot \delta_{MCL} + \lambda_{MCL} \cdot a'}; \quad (40)$$

так как лента не имеет изоляции, то средняя теплопроводность обмотки без учета междуслойной изоляции равна теплопроводности алюминия $\lambda_1 = 226 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$.

$\lambda_{MCL} = 0,17 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$ — теплопроводность междуслойной изоляции (кабельная бумага в масле) (таблица 1.1);

$$\lambda_{CP1} = \frac{226 \cdot 0,17 \cdot (0,7 \cdot 10^{-3} + 0,24 \cdot 10^{-3})}{226 \cdot 0,24 \cdot 10^{-3} + 0,17 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3}} = 0,66 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}.$$

3) Полный внутренний перепад температуры в катушках обмотки НН

$$\Theta'_{O1} = \frac{P_{A1} \cdot a_1'^2}{8 \cdot \lambda_{CP1}} = \frac{116222 \cdot (0,94 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 0,66} = 1,94 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (41)$$

$$\Theta''_{O1} = \frac{P_{A1} \cdot a_1''^2}{8 \cdot \lambda_{CP1}} = \frac{116222 \cdot (1,03 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 0,66} = 2,33 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4) Средний внутренний перепад температуры в катушках обмотки НН

$$\Theta'_{O1.CP} = \frac{2}{3} \Theta'_{O1} = \frac{2}{3} \cdot 1,94 = 1,29 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (42)$$

$$\Theta''_{O1.CP} = \frac{2}{3} \Theta''_{O1} = \frac{2}{3} \cdot 2,33 = 1,55 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

5) Потери, выделяющиеся 1 м³ объема обмотки ВН из прямоугольного алюминиевого провода

$$P_{A2} = \frac{3,44 J_2^2 \cdot a \cdot b}{(a' + \delta_{MCL}) \cdot b'} \cdot 10^{-8}; \quad (43)$$

$$a = 2,65 \cdot 10^{-3} \text{ М};$$

$$a' = 3,15 \cdot 10^{-3} \text{ М};$$

$$b = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ М};$$

$$b' = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ М};$$

$$P_{A2} = \frac{3,44 \cdot (2,08 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,65 \cdot 10^{-3} \cdot 4,0 \cdot 10^{-3}}{(3,15 \cdot 10^{-3} + 0,48 \cdot 10^{-3}) \cdot 4,5 \cdot 10^{-3}} = 96576 \text{ Вт/М}^3$$

6) Средняя теплопроводность обмотки ВН

$$\lambda_{CP2} = \frac{\lambda_2 \cdot \lambda_{MCL} (a' + \delta_{MCL})}{\lambda_2 \cdot \delta_{MCL} + \lambda_{MCL} \cdot a'}; \quad (44)$$

$$\lambda_2 = \lambda_{H3} \cdot \frac{ba'}{2\delta b'} = 0,17 \frac{4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 3,15 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 4,5 \cdot 10^{-3}} = 0,95 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)};$$

$$\lambda_{CP2} = \frac{0,95 \cdot 0,17 \cdot (3,15 \cdot 10^{-3} + 0,48 \cdot 10^{-3})}{0,95 \cdot 0,48 \cdot 10^{-3} + 0,17 \cdot 3,15 \cdot 10^{-3}} = 0,59 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}.$$

7) Полный внутренний перепад температуры в катушках обмотки ВН

$$\begin{aligned} \Theta_{O2}' = \Theta_{O2}'' &= \frac{P_{A2} \cdot a_2'^2}{8 \cdot \lambda_{CP2}} = \frac{P_{A2} [n_{CL}' a' \cdot 10^{-3} + \delta_{MCL} (n_{CL}' - 1) \cdot 10^{-3}]^2}{8 \cdot \lambda_{CP2}} = \\ &= \frac{96576 [2 \cdot 3,15 \cdot 10^{-3} + 0,48 \cdot (2 - 1) \cdot 10^{-3}]^2}{8 \cdot 0,59} = 0,94^\circ\text{C}; \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \Theta_{O2}''' &= \frac{P_{A2} \cdot a_2''^2}{8 \cdot \lambda_{CP2}} = \frac{P_{A2} [n_{CL}''' a' \cdot 10^{-3} + \delta_{MCL} (n_{CL}''' - 1) \cdot 10^{-3}]^2}{8 \cdot \lambda_{CP2}} = \\ &= \frac{96576 [3 \cdot 3,15 \cdot 10^{-3} + 0,48 \cdot (3 - 1) \cdot 10^{-3}]^2}{8 \cdot 0,59} = 2,22^\circ\text{C}; \end{aligned} \quad (46)$$

8) Средний внутренний перепад температуры в катушках обмотки ВН

$$\Theta_{O2,CP}' = \Theta_{O2,CP}'' = \frac{2}{3} \Theta_{O2}' = \frac{2}{3} \cdot 0,94 = 0,63^\circ\text{C}; \quad (47)$$

$$\Theta_{O2,CP}''' = \frac{2}{3} \Theta_{O2}''' = \frac{2}{3} \cdot 2,22 = 1,48^\circ\text{C}.$$

9) Перепад температуры на поверхности обмоток НН

$$\Theta_{O1.M} = 0,285 q_1^{0,6}; \quad (48)$$

$$q_1 = \frac{K_{ДП1} \cdot P_{ОСН1}}{\Pi_{ОХЛ1}}; \quad (49)$$

$$\Pi_{ОХЛ1} = 2c \cdot \kappa_{3K} \pi (D_1' + D_1'') l_1 = 2 \cdot 3 \cdot 0,75 \cdot 3,14 \cdot (0,222 + 0,272) \cdot 0,616 = 4,3 \text{ м}^2;$$

$$q_1 = \frac{1,00035 \cdot 3255}{4,3} = 757 \text{ Вт/м}^2;$$

$$\Theta_{O1.M} = 0,285 \cdot 757^{0,6} = 15,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

10) Перепад температуры на поверхности обмоток ВН

$$\Theta_{O2.M} = 0,285 q_2^{0,6}; \quad (50)$$

$$q_2 = \frac{K_{ДП2} \cdot P_{ОСН2}}{\Pi_{ОХЛ2}}; \quad (51)$$

$$\Pi_{ОХЛ2} = 4c \cdot \kappa_{3K} \pi (D_2' + D_2'') l_2 = 4 \cdot 3 \cdot 0,75 \cdot 3,14 \cdot (0,296 + 0,392) \cdot 0,616 = 8,98 \text{ м}^2;$$

$$q_2 = \frac{1,0059 \cdot 4326}{8,98} = 485 \text{ Вт/м}^2;$$

$$\Theta_{O2.M} = 0,285 \cdot 485^{0,6} = 11,65 \text{ }^\circ\text{C}.$$

11) Среднее превышение температуры обмоток НН над температурой масла

$$\Theta_{O1.M.CP} = \Theta_{O1.CP}'' + \Theta_{O1.M} = 1,55 + 15,2 = 16,75 \text{ }^\circ\text{C} \quad (52)$$

12) Среднее превышение температуры обмоток ВН над температурой масла

$$\Theta_{O2.M.CP} = \Theta_{O2.CP}''' + \Theta_{O2.M} = 1,48 + 11,65 = 13,13 \text{ }^\circ\text{C} \quad (53)$$

2.2 Расчет системы охлаждения трансформатора

Выбираем конструкцию - гладкий бак с навесными радиаторами с прямыми трубами, как наиболее технологичную при современных технологиях изготовления.

1) Минимальная ширина бака трансформатора по условию изоляции отводов от наружной обмотки ВН и от стенок бака (рисунок 1.1).

$$B_{мин} = D_2'' + (S_1 + S_2 + d_2 + S_3 + S_4 + d) \cdot 10^{-3}; \quad (54)$$

$S_1 = 33$ мм при $U_{исп} = 35$ кВ и при собственной изоляции отвода (таблица 1.4);

$S_2 = 33$ мм при $U_{исп} = 35$ кВ и при собственной изоляции отвода диаметром менее 6 мм (таблица 1.3);

$d_2 = 20$ мм при классе напряжения 10 кВ трансформаторов мощностью до 10000 кВ · А [2];

$S_3 = 33$ мм при $U_{исп} = 35$ кВ и без собственной изоляции отвода обмотки НН (таблица 1.4);

$S_4 = 25$ мм при $U_{исп} = 5$ кВ и без собственной изоляции (таблица 1.3);

$d_1 = 15$ мм;

$$B_{мин} = 0,392 + (33 + 33 + 20 + 33 + 25 + 15) \cdot 10^{-3} = 0,551 \text{ м.}$$

Принимаем $B = 0,56$ м.

2) Минимальная длина бака трансформатора

$$A_{мин} = 2C + D_2'' + 2S_5 \cdot 10^{-3}; \quad (55)$$

$$S_5 = S_1 + d_2 + S_2 = 33 + 20 + 33 = 86 \text{ мм}; \quad (56)$$

$$A_{мин} = 2 \cdot 0,405 + 0,392 + 2 \cdot 86 \cdot 10^{-3} = 1,374 \text{ м} \quad (57)$$

Принимаем $A = 1,4$ м.

3) Глубина бака (предварительно)

$$H' = H_{А.Ч} + H_{Я.К}; \quad (58)$$

$$H_{А.Ч} = l_c + (2h_{Я} + h_{П}) \cdot 10^{-3}; \quad (59)$$

Принимаем $h_{П} = 40$ мм.

$$H_{A.Ч} = 0,676 + (2 \cdot 200 + 40) \cdot 10^{-3} = 1,116 \text{ М};$$

$$H_{Я.К} = 0,16 \text{ М (таблица 1.5);}$$

$$H' = 1,116 + 0,16 = 1,276 \text{ М.}$$

4) Принимаем к установке радиаторы (рисунок 1.2) с размером по осям фланцев крепления $A_p = 1150 \text{ мм (1,15 м)}$.

Необходимая для установки этих радиаторов высота бака трансформатора

$$H_B = A_p + C_1 + C_2 \quad (60)$$

$$C_1 = 0,085 \text{ М}; C_2 = 0,10 \text{ М (таблица 1.6, примечание 2);}$$

$$H_B = 1,15 + 0,085 + 0,10 = 1,335 \text{ М.}$$

$$H_B = 1,335 \text{ М} > H' = 1,276 \text{ М.}$$

Поэтому окончательно принимаем $H = 1,4 \text{ М}$.

5) Периметр сечения бака

$$P = 2(A - B) + \pi B = 2(1,4 - 0,56) + 3,14 \cdot 0,56 = 3,44 \text{ М} \quad (61)$$

6) Поверхность гладкого бака

$$P_{К.ГЛ} = P \cdot H = 3,44 \cdot 1,4 = 4,82 \text{ М}^2 \quad (62)$$

7) Поверхность излучения (приближенно)

$$P_{II} \approx \kappa_{II} \cdot P_{К.ГЛ} \quad (63)$$

Принимаем $\kappa_{II} = 1,75$ [2];

$$P_{II} \approx 1,75 \cdot 4,82 = 8,43 \text{ М}^2.$$

8) Допустимое превышение средней температуры масла над температурой окружающего воздуха

$$\Theta_{М.В} = \Theta_{О.В.ДОП} - \Theta_{О1.М.СР}, \quad (64)$$

где $\Theta_{О.В.ДОП}$ - длительно-допустимое среднее превышение температуры обмоток над воздухом; по ГОСТ 11677-85 для масляных трансформаторов $\Theta_{О.В.ДОП} = 65^\circ\text{C}$;

$$\Theta_{М.В} = 65 - 16,75 = 48,25^\circ\text{C} .$$

9) Превышение температуры в верхних слоях масла над температурой воздуха
для трансформаторов герметичных и с расширителем

$$\Theta_{M.B.B} = 1,2 \Theta_{M.B} = 1,2 \cdot 48,25 = 57,9^\circ C < 60^\circ \quad (65)$$

Примем среднее превышение температуры наружной стенки бака над температурой воздуха

$$\Theta_{B.B} \approx \Theta_{M.B} = 48,25^\circ C \quad (66)$$

10) Необходимая поверхность конвекции для получения этого значения $\Theta_{B.B}$

$$\Pi_K' = \frac{1,05(P_{KH} + P_{OH})}{2,5 \Theta_{B.B}^{1,25}} - 1,12 \Pi_H = \frac{1,05(8055 + 1747)}{2,5 \cdot 48,25^{1,25}} - 1,12 \cdot 8,43 = 22,93 \text{ м}^2 \quad (67)$$

11) Потребное число радиаторов (предварительно)

$$n_p' = \frac{\Pi_K' - \Pi_{K.ГЛ} - \Pi_{K.КР}}{\Pi_{K.Р.ПРИВ}} \quad (68)$$

$$\Pi_{K.КР} = 0,5 \left[(A - B) \cdot (B + 0,16) + \pi \frac{(B + 0,16)^2}{4} \right]; \quad (69)$$

0,5 – коэффициент, учитывающий закрытие поверхности крышки выводами и арматурой;

0,16 – удвоенная ширина верхней рамы бака.

$$\Pi_{K.КР} = 0,5 \left[(1,4 - 0,56) \cdot (0,56 + 0,16) + 3,14 \frac{(0,56 + 0,16)^2}{4} \right] = 0,5 \text{ м}^2.$$

$$\Pi_{K.КР.ПРИВ} = \kappa_{\Phi.Р} \Pi_{K.Р}, \quad (70)$$

где $\kappa_{\Phi.Р}$ - коэффициент приведения поверхности конвекции радиатора к поверхности конвекции гладкой стенки; $\kappa_{\Phi.Р} = 1,26$ для радиаторов с прямыми трубами;

$\Pi_{K.Р}$ - поверхность конвекции радиатора (таблица 1.6, примечание 1)

$$\Pi_{K.Р} = 3,533 + 0,34 = 3,873 \text{ м}^2;$$

$$\Pi_{K.КР.ПРИВ} = 1,26 \cdot 3,873 = 4,88 \text{ м}^2;$$

$$n_p' = \frac{22,93 - 4,82 - 0,5}{4,88} = 3,6$$

Принимаем $n_p = 4$.

12) Уточненное значение поверхности конвекции бака

$$\Pi_K = \Pi_{K.ГЛ} + \Pi_{K.КР} + n_p \cdot \Pi_{K.Р.ПРИБ} = 4,82 + 0,5 + 4 \cdot 4,88 = 24,84 \text{ м}^2 \quad (71)$$

13) Уточненное среднее превышение температуры стенки бака над температурой окружающего воздуха

$$\Theta_{Б.Б} = \left[\frac{1,05 \cdot (P_{KH} + P_{OH})}{2,8 \Pi_H + 2,5 \Pi_K} \right]^{0,8} = \left[\frac{1,05 \cdot (8055 + 1747)}{2,8 \cdot 8,43 + 2,5 \cdot 24,84} \right]^{0,8} = 46,1^\circ C. \quad (72)$$

14) Среднее превышение температуры масла над температурой стенок бака:

для трансформаторов с естественным масляным охлаждением

$$\Theta_{М.Б} = 0,165 \left[\frac{1,05(P_{KH} + P_{OH})}{\sum \Pi_K} \right]^{0,6}; \quad (73)$$

$$\sum \Pi_K = \Pi_{K.ГЛ} + \Pi_{K.КР} + n_p \cdot \Pi_{K.ТР} = 4,82 + 0,5 + 4 \cdot 3,533 = 19,45 \text{ м}^2; \quad (74)$$

$$\Theta_{М.Б} = 0,165 \left[\frac{1,05 \cdot (8055 + 1747)}{19,45} \right]^{0,6} = 7,1^\circ C; \quad (75)$$

15) Превышение температуры масла в верхних слоях над температурой окружающего воздуха

$$\Theta_{М.Б.Б} = 1,2 \cdot (\Theta_{Б.Б} + \Theta_{М.Б}) = 1,2 \cdot (46,1 + 7,1) = 63,84^\circ C; \quad (76)$$

$$\Theta_{М.Б.Б} = 63,84^\circ C > 60^\circ C. \quad (77)$$

Поэтому принимаем к установке радиаторы с размером между фланцами крепления $A_p = 1400 \text{ мм}$ (1,4 м) и расчет системы охлаждения подкорректируем:

- $H_B = 1,4 + 0,085 + 0,10 = 1,585 \text{ м}$; принимаем $H = 1,6 \text{ м}$;
- $\Pi_{K.ГЛ} = 3,44 \cdot 1,6 = 5,5 \text{ м}^2$;
- $\Pi_H = 1,75 \cdot 5,5 = 9,6 \text{ м}^2$;
- $\Pi_{K.Р} = 4,333 + 0,34 = 4,673 \text{ м}^2$;

$$\begin{aligned}
& - \Pi_{K.P.ПРИВ} = 1,26 \cdot 4,673 = 5,89 \text{ М}^2; \\
& - \Pi_K = 5,5 + 0,5 + 4 \cdot 5,89 = 29,56 \text{ М}^2; \\
& - \Theta_{Б.Б} = \left[\frac{1,05 \cdot (8055 + 1747)}{2,8 \cdot 9,6 + 2,5 \cdot 29,56} \right]^{0,8} = 40,5^\circ\text{C}; \\
& - \sum \Pi_K = 5,5 + 0,5 + 4 \cdot 4,333 = 23,33 \text{ М}^2; \\
& - \Theta_{М.Б} = 0,165 \cdot \left[\frac{1,05 \cdot (8055 + 1747)}{23,33} \right]^{0,6} = 6,4^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$\Theta_{М.Б.Б} = 1,2 \cdot (\Theta_{Б.Б} + \Theta_{М.Б}) = 1,2 \cdot (40,5 + 6,4) = 56,3^\circ\text{C} < 60^\circ\text{C}. \quad (78)$$

16) Превышение температуры обмоток над температурой окружающего воздуха (рассчитываемой для наиболее нагреваемой катушки)

$$\Theta_{О.Б} = \Theta_{О1.CP}^{II} + \Theta_{О1.M} + \Theta_{М.Б} + \Theta_{Б.Б} = 1,55 + 15,2 + 6,4 + 40,5 = 63,65^\circ\text{C} < 65^\circ\text{C}. \quad (79)$$

Так как $\Theta_{О.Б}$ и $\Theta_{М.Б.Б}$ не превышают и близки к нормируемым значениям (соответственно 65°C и 60°C), то считаем результаты расчета удовлетворительными, а принятую систему охлаждения приемлемой.

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ ОСНОВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Масса металла проводов обмоток НН и ВН (G_{01} и G_{02}) определена при расчете обмоток.

При расчете массы провода с изоляцией можно пользоваться формулами

$$G'_{01} = \kappa_y \cdot G_{01}; \quad (80)$$

$$G'_{02} = \kappa_y \cdot G_{02}, \quad (81)$$

где G'_{01} , G'_{02} – масса провода обмоток НН и ВН с учётом изоляции;

κ_y – коэффициент увеличения массы изолированного провода по сравнению с неизолированным. Значение κ_y выбирается из таблиц 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1

Коэффициенты увеличения массы круглых обмоточных проводов марок ПБ и АПБ с толщиной изоляции на две стороны $2\delta = 0,30$ (0,40) мм

Диаметр провода, мм	1,18	1,25	1,32 1,40	1,50	1,60 1,70	1,80 1,90	2,00 - 2,24	2,36 - 3,00	3,15- 3,55	3,75 - 5,30	8,00
κ_y для ПБ	1,06	1,055	1,05	1,045	1,04	1,035	1,03	1,025	1,02	1,015	1,01
κ_y для АПБ	1,2	1,18	1,65	1,15	1,13	1,12	1,10	1,08	1,07	1,05	1,03 3

Таблица 3.2

Коэффициенты увеличения массы прямоугольных обмоточных проводов марок ПБ и АПБ с толщиной изоляции на две стороны $2\delta = 0,45$ (0,50) мм

Марка провода	а, мм b, мм	1,40-1,80	1,90-2,65	2,80-3,75	4,00-5,60
ПБ	3,75 – 7,50	1,035	1,03	1,025	1,02
	8,0 – 18,0	1,025	1,02	1,02	1,015
АПБ	3,75 – 7,50	1,12	1,10	1,08	1,07
	8,0 – 18,0	1,08	1,07	1,07	1,05

Масса стали магнитной системы G_{CT} определяется по формулам, представленным во второй части данных методических указаний.

Масса конструктивной стали остова (прессующие балки, шпильки и др.)

$$G_{K.CT.O} = 0,1 \cdot (G'_{01} + G'_{02} + G_{CT}) \quad (82)$$

Масса картона в изоляции обмоток при классах напряжения трансформаторов 6,10 и 35 кВ
- с медными обмотками

$$G_{КАРТ} = (0,12 \div 0,15) \cdot (G'_{01} + G'_{02}), \quad (83)$$

- с алюминиевыми обмотками

$$G_{КАРТ} = (0,29 \div 0,36) \cdot (G'_{01} + G'_{02}). \quad (84)$$

Масса активной части – остова с обмотками и отводами

$$G_{А.Ч} = 1,2 \cdot (G'_{01} + G'_{02} + G_{СТ} + G_{К.СТ.О} + G_{КАРТ}) \quad (85)$$

Масса бака

$$G_B = 1,1 \cdot (П_{К.ГЛ} \cdot \Delta_{СТ} + П_{К.КР} \cdot \Delta_{КР} + П_{ДН} \cdot \Delta_{ДН}) \cdot \gamma_{СТ} + n_P G_P, \quad (86)$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий массу усиливающих элементов;

$\Delta_{СТ}$ – толщина стенки бака, м, (таблица 3.3);

$\Delta_{КР}$ – толщина крышки, м, (таблица 3.3);

$П_{ДН}$ – поверхность дна;

$\Delta_{ДН}$ – толщина дна, м, (таблица 3.3);

G_P - масса стали радиатора (таблица 1.6).

Таблица 3.3

Толщины стенки, крышки и дна трансформаторов

Мощность трансформатора, кВ·А	25÷100	160÷630	1000÷1600
Толщина стенки, мм	2	3	4
Толщина крышки, мм	3÷4	6÷8	8÷10
Толщина дна, мм	4	4÷6	6÷8

Объем масла в баке

$$V_{М.Б} = V_B - V_{А.Ч}, \quad (87)$$

где V_B – объем бака

$$V_B = \left[(A - B) \cdot B + \frac{\pi B^2}{4} \right] \cdot H, \quad (88)$$

где $V_{A,q}$ – объем, занимаемый активной частью.

$$V_{A,q} \approx \frac{G_{A,q}}{\gamma_{A,q}}, \quad (89)$$

где $\gamma_{A,q}$ – средняя плотность активной части; для трансформаторов с медными обмотками $\gamma_{A,q} = 5500 \div 6000 \text{ кг/м}^3$, с алюминиевыми – $\gamma_{A,q} = 5000 \div 5500 \text{ кг/м}^3$.

Масса масла в баке

$$G_{M.B} = \gamma_{M.CЛ} \cdot V_{M.B}, \quad (90)$$

где $\gamma_{M.CЛ} = 900 \text{ кг/м}^3$ плотность трансформаторного масла.

Масса масла в радиаторах

$$G_{M.P} = n_P \cdot G'_{M.P}, \quad (91)$$

где $G'_{M.P}$ - масса масла в одном радиаторе (таблица 1.6).

Объем расширителя обычно рассчитывается на 0,1 общего объема масла в баке и радиаторах. Поэтому с учетом неполного заполнения расширителя общая масса масла в трансформаторе

$$G_M = 1,05 \cdot (G_{M.B} + G_{M.P}), \quad (92)$$

где 1,05 – коэффициент, учитывающий массу масла в расширителе.
Полная масса трансформатора, залитого маслом

$$G_{полн} = G_{A,q} + G_B + G_M \quad (93)$$

Полученные массу активной части и полную массу трансформатора сравнить с каталожными (приложение А).

4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

В графической части курсового проекта необходимо показать чертеж общего вида разработанного трансформатора в трех проекциях с необходимыми разрезами и сечениями. Размеры основных элементов принять из расчетов или из справочной литературы, а также из рекомендаций, изложенных в этом разделе. При выполнении чертежа использовать стандартные масштабы.

Чертеж общего вида трансформатора выполняется на листе формата А1 в трех проекциях. В правом нижнем углу чертежа располагают основную надпись и спецификацию.

На главном и боковом видах бак разрезан по стенкам и дну, что позволяет показать выемную часть трансформатора, которая включает в себя активную часть и переключатель с приводом, установленным на крышке бака.

Активная часть состоит из магнитопровода, обмоток, отводов и деталей их крепления и выводов обмоток. Сверху бак закрывается крышкой, притягиваемой к верхней его раме болтами с гайками и шайбами через прокладку из маслоупорной резины.

К дну бака приваривается тележка, на которую опирается трансформатор и которая обеспечивает его перемещение на катках в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Тележки имеют колею (расстояние между осями симметрии по ширине катков), равную 660 мм у трансформаторов мощностью 160÷630 кВ·А, 1070 мм - мощностью 1000 и 1600 кВ·А.

Сверху на крышке размещены выводы обмоток НН, обмоток ВН, нулевой вывод обмоток НН.

Переменные размеры конструкции выводов для различных напряжений и токов приведены в таблице 4.1.

Минимальное расстояние в воздухе между токоведущими частями (колпаками) вводов, а также от них до заземленных частей трансформаторов должны составлять: при напряжении ввода до 3 кВ 60 мм; 6 кВ - 80 мм; 10 кВ - 110 мм.

Изоляторы вводов трансформаторов наружной установки на напряжении 6 и 10 кВ имеют две «юбки», а до 3 кВ - одну.

Расширитель расположен на крышке бака трансформатора и соединен с баком специальным трубопроводом. Объем расширителя примерно наполовину заполнен трансформаторным маслом.

Вспомогательная арматура включает в себя плоские краны для заливки масла (на крышке бака), его слива (в нижней части боковой стенки), демонтажа газового реле (в расщепке трубопровода, соединяющего расширитель с баком), отключения радиаторов или съемного фильтра

(между фланцами бака и радиаторов или фильтра), кран специальной конструкции на боковой стенке бака для взятия пробы масла из бака, фильтр для непрерывной очистки масла, болт заземления и пробку слива остатков масла из бака.

Вместо плоских кранов для заливки и слива масла могут применяться вентили.

Таблица 4.1

Основные размеры, напряжения и токи выводов

Напряжение, кВ	Ток, А	Размеры, мм					
		d	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
До1	100	M8	60	28	50	44	-
	250	M12	60	28	50	44	-
	400	M16	85	45	70	52	-
	360	M20	85	45	70	52	-
	1000	M27	110	56	90	76	-
	1600	M33	125	70	105	80	-
	2000	M42	125	70	105	80	-
3,6,10	250	M12	65	30	130	52	125
	400	M16	84	44	140	62	145
	360	M20	84	44	140	62	145
	1000	M27	104	60	155	98	180
	1600	M33	126	82	185	114	200
	2000	M42	126	82	185	114	200

К контрольным и защитным устройствам относятся ртутный термометр, устанавливаемый на крышке трансформаторов мощностью до 1000 кВ·А для контроля температуры масла в верхней части бака, газовое реле, расположенное в расщелке трубопровода, соединяющего расширитель с баком, и предохранительная труба, предназначенное для защиты трансформатора от внутренних повреждений и необходимая для предотвращения разрыва бака трансформатора.

В трансформаторах мощностью 1000 кВ·А и выше для контроля температуры масла вместо термометра применяется термометрический сигнализатор с датчиком.

В современных трансформаторах для изменения коэффициента трансформации применяются переключатели следующих типов:

1) трехфазный нулевой переключатель типа ПТО 6÷35/65, предназначенный для использования в цепи обмоток, соединенных в «звезду» с регулировочными ответвлениями в конце каждой фазы, т.е. у нейтрали звезды. Применяется в трансформаторах с многослойной цилиндрической обмоткой ВН из круглого или прямоугольного провода с

напряжением от 6 до 35 кВ и номинальным фазным током до 65 А включительно.

2) переключатель трехфазный реечный типа ПТР 6÷35/160 на ток 160А, предназначен для использования в цепи обмоток, регулировочные ответвления которых располагаются в середине обмоток. Токоведущие части этого переключателя должны иметь изоляцию от заземленных частей и между фазами на половину номинального напряжения. Поэтому габариты переключателя ПТР при соизмеримых параметрах получаются большими, чем ПТО, неподвижные части которого соединены с отпайками, расположенными вблизи нулевой точки «звезды» и имеющими напряжение не больше 10% номинального.

3) переключатель однофазный барабанный типа Пб применяется при токах, превышающих 160 А. При этом каждая фаза обмотки ВН имеет свой переключатель с отдельным приводом. Предназначен для переключения ответвлений, располагаемых в середине обмоток.

Расширителями снабжаются трансформаторы мощностью 25 кВ·А и выше. Расширитель представляет собой стальной цилиндрический сосуд, объемом около 10% объема масла в баке и радиаторах.

Нормализованные значения размеров расширителя приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Нормализованные значения размеров расширителей

Размеры, мм				Объем расширителя, м ³	Масса заливаемого масла, кг
D	L	S	D1		
250	415	1,4	25	0,02	8
	510			0,025	11
	650			0,032	14
	810			0,04	17
310	660	1,4	25	0,05	21
	800			0,06	25
	1060			0,08	34
	1320			0,1	43
470	720	1,4	50	0,125	54
	920			0,16	69
	1150			0,2	86
	1440			0,25	107
	1870			0,32	138

Примечание - Расширитель выбирается по требуемому объему или массе масла в нем.

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.

4. **Бузинов, О.А.** Расчет трехфазных масляных трансформаторов. Часть 2. Расчеты обмоток и магнитных систем трансформаторов [Текст]: методические указания для выполнения курсовых проектов /О.А. Бузинов, Г.В. Иванов – 1-е изд. – Тюмень: Издательский центр БИК, ТюмГНГУ, 2016.– 40с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

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

6. **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	ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ И РАСЧЕТ СИСТЕМ	3
1.1	Поверочный тепловой расчёт обмоток	3
1.2	Тепловой расчёт бака	6
2	ПРИМЕР ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА	14
2.1	Поверочный тепловой расчет обмоток	14
2.2	Расчет системы охлаждения трансформатора	18
3	ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ ОСНОВНЫХ МАТЕРИАЛОВ	23
4	РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ	26
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	29
	ПРИЛОЖЕНИЯ	31
	Приложение А. Основные массо-габаритные данные серийно выпускаемых двухобмоточных трехфазных масляных трансформаторов.	31

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПриложениеА

Основные массо-габаритные данные серийно выпускаемых двухобмоточных трехфазных масляных трансформаторов

Марка	Номинальная мощность, $S_H, \text{кВ} \cdot \text{А}$	Сочетание напряжений $U_{BH} / U_{HH}, \text{кВ}$	Габаритные размеры, м			Масса, т	
			длина	ширина	высота	активной части	полная с маслом
ТМ 100	100	6; 10 / 0,4;	1,2	0,8	1,47	0,35	0,67
ТМ 160	160	6; 10 / 0,4; 0,69	1,21	0,92	1,58	0,40	0,97
ТМ 250	250	6; 10 / 0,4; 0,69	1,26	1,04	1,72	0,64	1,30
ТМ 400	400	6; 10 / 0,4; 0,69	1,40	1,08	1,90	0,89	2,2
ТМ 630	630	6; 10 / 0,4; 0,69	1,75	1,27	2,15	1,14	3,00
ТМ 1000	1000	6; 10 / 0,4; 0,69	2,70	1,75	3,0	1,98	5,00

Учебное издание

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ЧАСТЬ 3. РАСЧЕТЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ 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.