

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич  
Должность: ректор  
Дата подписания: 08.10.2022 20:38:31  
Уникальный программный ключ:  
9ba7d3e34c012eba476b13d064c527819f37e7304f3774d166f7c9e57660f66

## МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра электроснабжения

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
О.Г. Локтионова  
« 30 » 10 2022 г.



## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Методические указания по курсовому проектированию  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Курск 2022

УДК 621.313

Составитель А.С. Чернышев

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение»

А.С. Романченко

**Электрические машины:** методические указания по курсовому проектированию для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / Юго-Зап.. гос. ун-т; сост.: А.С. Чернышев. Курск, 2022. – 32 с. –Библиогр.: с.32.

Содержат сведения по выполнению курсового проекта по дисциплине «Электрические машины».

Методические указания соответствуют требованиям программы для направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
Предназначены для студентов всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . . . . . Формат 60x84 1/16.

Усл.печ.л. . . . . Уч.–изд.л . . . . . Тираж 100 экз. Заказ *2040* Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г.Курск, ул.50 лет Октября, 94

## ВВЕДЕНИЕ

Курсовой проект выполняется в пятом семестре (очное отделение).

Тема: расчет силового трансформатора для ПС .....

Объем пояснительной записки – 20-30 листов. Объем графического материала 1 лист формата А1.

### Примерный график выполнения курсового проекта

| № п/п | Этап работы  | № недели | Готовность % |
|-------|--|----------|--------------|
| 1     | Определение основных электрических величин                       | 1-2      | 2            |
| 2     | Расчет основных размеров трансформатора                          | 3-4      | 10           |
| 3     | Расчет обмоток   | 5-8      | 20           |
| 4     | Определение параметров короткого замыкания и механических усилий | 8-9      | 30           |
| 5     | Окончательный расчет магнитной системы                           | 10-11    | 60           |
| 6     | Тепловой расчет трансформатора                                   | 12-13    | 80           |
| 7     | Оформление курсового проекта                                     | 14-15    | 90           |
| 8     | Защита проекта   | 16-17    | 100          |

Пояснительная записка состоит из бланка задания, реферата, текста по главам (разделам) и списка использованной литературы.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1. Мощность одной фазы

$$S_{\phi} = \frac{S_H}{m}, \text{кВА}$$

2. Мощность на один стержень

$$S' = \frac{S_H}{n_c}, \text{кВА}$$

где  $n_c$  - число активных (несущих обмотки) стержней трансформатора.  
Для нормальных силовых масляных трехфазных трансформаторов

$$m = n_c = 3$$

3. Фазное напряжение ВН:

для соединения в звезду

$$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}, \text{В}$$

для соединения в треугольник

$$U_{1\phi} = U_1, \text{В}$$

4. Фазное напряжение НН:

для соединения в звезду

$$U_{2\phi} = \frac{U_2}{\sqrt{3}}, \text{В}$$

для соединения в треугольник

$$U_{2\phi} = U_2, \text{В}$$

5. Номинальный ток высокого напряжения /ВН/

$$I_1 = \frac{S_H * 10^3}{\sqrt{3} * U_1}, \text{А}$$

6. Номинальный ток низкого напряжения/НН/

$$I_2 = \frac{S_H * 10^3}{\sqrt{3} * U_2}, \text{А}$$

7. Номинальный фазный ток ВН:

для соединения обмоток в звезду

$$I_{1\phi} = I_1, \text{А}$$

для соединения обмоток в треугольник

$$I_{1\phi} = \frac{I_1}{\sqrt{3}}, \text{А}$$

8. Номинальный фазный ток НН:

для соединения обмоток в звезду

$$I_{2\phi} = I_2, \text{А}$$

для соединения обмоток в треугольник

$$I_{2\phi} = \frac{I_2}{\sqrt{3}}, A$$

9. Испытательные напряжения обмоток:

для обмотки ВН –  $U_{1\text{исп}}$ , кВ;

для обмотки НН –  $U_{2\text{исп}}$ , кВ;

в зависимости от класса изоляции и рабочего напряжения выбираются по табл. 4-1, 4-2, 4-5 работы [1].

10. Заданная величина активной составляющей напряжения короткого замыкания

$$U_A = \frac{r_K * I_H}{U_H} * 100 = \frac{P_K}{10 * S_H} \%$$

где  $P_K$  принимается в ваттах,  $S_H$  – в киловольтамперах.

11. Заданное значение реактивной составляющей напряжения короткого замыкания

$$U_P = \sqrt{U_K^2 - U_A^2} \% ,$$

где  $U_K$  – напряжение короткого замыкания трансформатора.

#### РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА

Главные размеры трансформатора называются диаметр стержня  $d$ , высота обмотки  $l$  и средний диаметр канала рассеяния  $d_{f,2}$  (рис. 4).

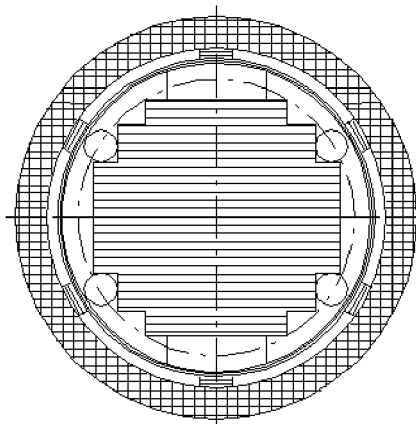


Рис. 1. Запрессовка трехступенчатого стержня путем расклинивания с жестким цилиндром

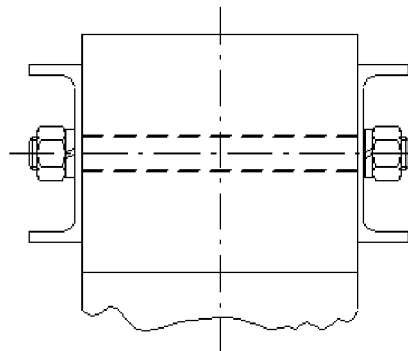


Рис. 2. Запрессовка ярма несущими балками

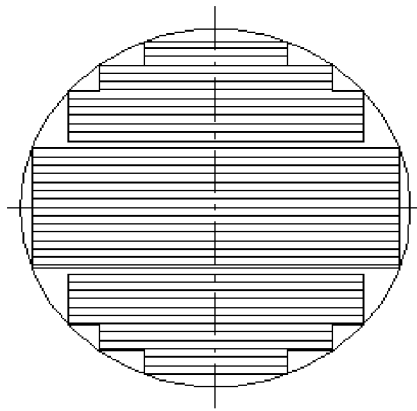


Рис. 3. Четырехступенчатый стержень с двумя продольными охлаждающими каналами

## 12. Выбор конструкции сердечников стержневых трансформаторов

Поперечное сечение стержня обычно выполняется в виде ступенчатой фигуры, вписанной в окружность (рис.1), для наибольшего заполнения стальной поперечного сечения окружности диаметром  $d$ , а также для получения наиболее технологичных цилиндрических обмоток. Число ступеней в сечении стержня определяется в зависимости от мощности трансформатора по табл.2-2 работы [1]. Число ступеней стержня считается по числу углов в одной четверти круга (рис.3).

Форма поперечного сечения ярма обычно выбирается более простой, чем поперечное сечение стержня (рис. 2). Активное сечение ярма принимают равным сечению стержня или для уменьшения потерь и тока холостого хода берут на 5-15% больше сечения стержня.

Конструкция ярма и стержня сердечника, собранного из пластин, должна обеспечивать достаточную жесткость и отсутствие вибрации листов при работе. Эти условия удовлетворяются, если сердечник запрессовывается при напряжении сжатия между листами, равном 3-4 кг/см<sup>2</sup>. Для ярма такая сила сжатия обеспечивается запрессовкой между двумя прессующими ярмовыми балками (рис. 2 и прилож.2) Для стержней различного диаметра способ запрессовки выбирается по табл. 2-3 работы [1].

Охлаждение маслом магнитопровода со стержнем, диаметр которого больше 35 см, не обеспечивается теплоотдачей с наружной поверхности стержня. При  $d \geq 35$  см применяют внутренние охлаждающие каналы. Размеры и число продольных каналов могут быть выбраны из табл. 2-4 [1]. Продольные по отношению к листам каналы в стержне продолжаются в ярме.

## 13. Выбор марки стали и вида междулистовой изоляции

Сердечник трансформатора шихтуется из листовой электротехнической стали следующих марок холодной прокатки – 3404, 3405, 3406, 3407 и 3408. Трансформаторная листовая сталь выпускается в основном толщиной 0,5 и 0,35 мм.

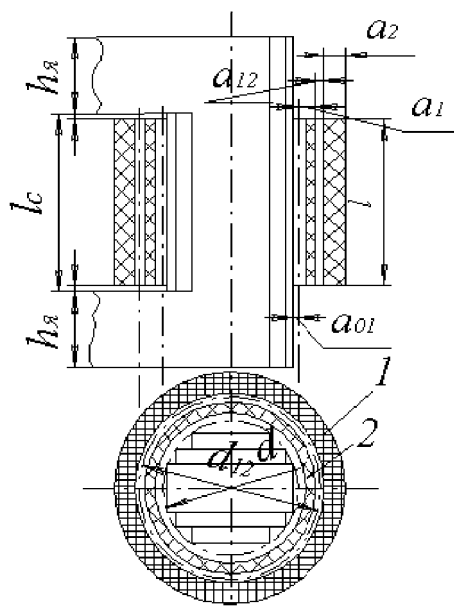


Рис. 4. Основные размеры трансформатора:

1 – обмотка ВН;

2 – обмотка НН

Междулистовой изоляцией может служить бумага или лаковое покрытие. Односторонняя оклейка листов стали бумагой толщиной 0,33 мм обеспечивает надежную электрическую изоляцию между листами сердечника. Такая оклейка дешевле лаковой. Однако двухсторонняя лаковая изоляция механически прочнее, имеет большую теплопроводность, выдерживает более высокую температуру и имеет меньшую толщину.

14. Общий коэффициент заполнения сталью  $K_C = K_{КР} - K_3$ , где  $K_{КР}$  - коэффициент заполнения площади круга площадью ступенчатой фигуры;  $K_3$  - коэффициент заполнения площади ступенчатой фигуры сталью, учитывающий толщину изоляционного слоя и неплотность запрессовки листов. Значения  $K_{КР}$  и  $K_3$  выбираются из табл. 2-1, 2-6 [1].

15. Выбор индукции в стержне  $B_C$ . Рекомендуемые значения индукции в стержне  $B_C$  для различных марок стали приведены в табл. 2-9 [1].

16. Диаметр стержня  $d$ . Трансформатор может быть выполнен при различных соотношениях между числом витков обмотки  $W$  и диаметром стержня  $d$ .

По методике, предложенной П.М. Тихомировым, критерием экономичности по выбору оптимальных главных размеров трансформатора является коэффициент  $\beta$ , равный отношению средней длины витка двух обмоток трансформатора к их высоте

$$\beta = \frac{\pi * d_{12}}{l}$$

Оптимальные значения коэффициента  $\beta$  выбираются по табл. 12-1 работа [1].

Определение диаметра стержня

$$d = 16 \sqrt[4]{\frac{\beta \alpha_p K_R S'}{f U_p B_c^2 K_c^2}}, \text{ см}$$

где  $K_R = 0,95$ ;

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}, \text{ см (рис. 4);}$$

$a_{12}$  - ширина канала рассеяния;

$a_1$  - ширина обмотки НН;

$a_2$  - ширина обмотки ВН.

Минимальная ширина канала рассеяния  $a_{12}$  выбирается (табл. 4-5; 4-15 [П]) из условия электрической прочности изоляции по испытательному напряжению обмотки ВН.

Радиальные размеры обмоток НН и ВН могут быть предварительно рассчитаны по формуле  $\frac{a_1 + a_2}{3} = K \sqrt[4]{S'}$ , см но не должны быть меньше 1,2 см. Значение  $K$  в этой формуле для  $S'$  от 15 до 100 КВА следует брать равным 0,5, для  $S'$  выше 100 КВА - равным 0,4.

Окончательные размеры  $a_1$  и  $a_2$  устанавливаются после расчета и выбора соответствующих обмоток.

17. Средний диаметр канала рассеяния:

$$d_{12} = d + 2a_{01} + 2a_1 + a_{12}, \text{ см.}$$

Размер канала  $a_{01}$  (см. рис 4) определяют по табл. 4-4 [1]. Ширина обмотки НН предварительно может быть рассчитана по опытной формуле

$$a_1 \cong K \sqrt[4]{S'} \text{ см (принимается не менее 1,3 см)}$$

Коэффициент  $K$  в этой формуле может иметь следующие значения:

для трансформаторов с напряжением до 35 кВ  $K \approx 0,55$ ;

для трансформаторов с напряжением ВН 110 кВ  $K \approx 0,45$ .

18. Высота (осевой размер) обмотки

$$l = \frac{\pi d_{12}}{\beta}, \text{ см}$$

19. Активное сечение стержня (чистое сечение стали)

$$P_c = K_c \frac{\pi d^2}{4}, \text{ см}^2$$

20. Электродвижущая сила одного витка

$$U_B = 4,44 f B_c P_c 10^{-4}, \text{ В/Вит}$$

21. Число витков в обмотке НН

$$W_2 = \frac{U_{2\Phi}}{U_B}.$$

Значение  $W_2$  округляют до целого числа и уточняют ЭДС витка.

22. Уточнение ЭДС одного витка:



$$U_B = \frac{U_{2\Phi}}{W_2}, B/Вит$$

где  $W_2$  - число витков обмотки НН, округленное до целого.

23. Уточнение индукции в стержне:

$$B_c = \frac{U_B 10^4}{4,44 f \Pi_c}, Тл$$

Здесь  $U_B$  - уточненное значение ЭДС одного витка.

Выбор конструкции изоляции и минимально допустимых изоляционных расстояний

Конструкция изоляции и допустимые расстояния выбираются одновременно с выбором конструкции обмоток их расчетом.

Выбор главной изоляции обмоток (изоляция заземленных частей и между обмотками). Основные размеры изоляционных деталей с учетом производственных допусков и минимально допустимые изоляционные расстояния могут быть выбраны для обмотки НН по табл. 4-4 [1], а для обмотки ВН по табл. 4-5 [1].

Выбор витковой изоляции. Изоляцией между витками обычно служит собственная изоляция проводника. Марка и толщина изоляции провода для различных значений  $U_{исп}$  могут быть выбраны по табл. 4-6 [1].

Выбор междуслойной изоляции зависит от принятой конструкции обмотки. В многослойных цилиндрических обмотках из круглого провода размеры междуслойной изоляции выбираются по табл. 4-7 [1]. В двухслойной цилиндрической обмотке из прямоугольного провода междуслойная изоляция обычно выполняется из электротехнического картона (табл. 4-8 [1]).

При этом для механической прочности желательно выбирать два слоя картона толщиной не менее 0,5 мм каждый.

Выбор междукатушечной изоляции. Изоляцией между катушками могут служить угловые (рис. 5, а) и простые (рис. 5, в) шайбы или радиальные масляные каналы (рис. 6).

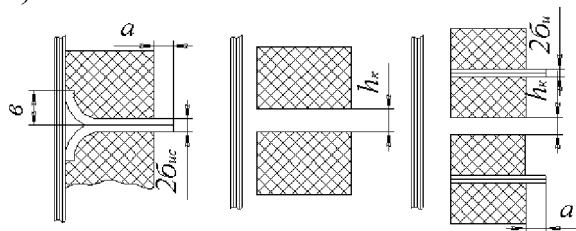


Рис. 5. Варианты конструкции междукатушечной изоляции:

$b_{ис} - 0,5$  мм,  $a \geq 6$  мм,  $b = 6 \div 8$  мм, а – круглый провод, б, в – прямоугольный провод

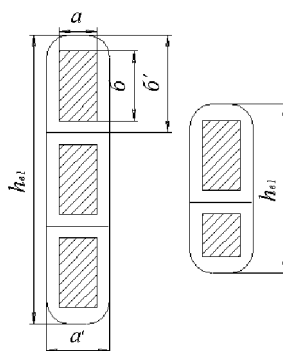


Рис. 6. Определение радиальных размеров двухслойной обмотки НН  
 Изоляционные расстояния отводов выбираются по данным табл. 4-11, 4-12, 4-13, 4-14 [1].

Выбор изоляции вводов /проходных изоляторов/:  $U_{исп}, \text{кВ}$  до 25 55 55 85

Минимально допустимые изоляционные расстояния, см:

между вводами равных обмоток и от линейного до нулевого ввода 9,0 15,5 20,0 35,0

между линейными вводами одной обмотки от ввода до расширителя 8,5 12,0 19,0 30,5

или до выхлопной трубы 11,0 14,0 21,5 54,0

от ввода до крана, оправы термометра и т.д. 9,0 15,5 20,0 32,0

Минимальное расстояние между фарфоровыми частями вводов должно быть не меньше одной трети расстояния между линейными вводами.

### ВЫБОР И РАСЧЕТ ОБМОТОК

Конструкция обмотки должна обеспечивать достаточную электрическую прочность, механическую прочность, нагревостойкость.

В тех случаях, когда можно применить два различных типа обмотки, следует отдавать предпочтение типу более простому и дешевому.

24. Предварительно значение средней плотности тока

$$\Delta_{ср} = 0,745 K_{д} \frac{P_{к} U_{в}}{S d_{12}}, \text{А/мм}^2$$

где коэффициент  $K_{д}$  учитывает наличие добавочных потерь в обмотках, в отводах, в стенках бака и т.д. и может быть определен из табл. 3-6 [1].

Полученное значение  $\Delta_{ср}$  следует сверить с приведенными в работе [1] практически применяемыми плотностями токов /табл.5-7/.

Плотность тока в каждой из обмоток может отличаться от среднего значения не более чем на  $0,1\Delta_{ср}$ , причем желательно для обмотки НН - в меньшую сторону, а для обмотки ВН - в большую.

25. Ориентировочное сечение витка:

обмотки ВН

$$P_1 = \frac{I_{1\phi}}{\Delta_{ср}} \text{мм}^2$$

обмотки НН

$$P_2 = \frac{I_{2\phi}}{\Delta_{cp}} \text{ мм}^2$$

26. После определения средней плотности тока и ориентировочного определения сечения витка для каждой из обмоток можно выбрать тип обмоток НН и ВН по табл. 5-8 [1].

Расчет обмоток НН должен сопровождаться соответствующими эскизами отдельных частей и всей обмотки.

*Расчет цилиндрических обмоток из прямоугольного провода*

Число слоев обмотки обычно равно двум. Для трансформаторов мощностью на один стержень до 3-10 кВА и в отдельных случаях для более мощных обмотка может быть намотана в один слой.

27. Число витков в слое:

для однослойной обмотки

$$W_{cп1} = W_1$$

для двухслойной обмотки

$$W_{cп2} = \frac{W_1}{2}$$

28. Определяется предварительный осевой размер (высота) витка  $h_{B1}$  по рис.6:

$$h_{B1} = \frac{l_1}{W_{cп1} + 1}, \text{ см}$$

29. По полученным значениям  $P_1$  и  $h_{B1}$  из сортамента обмоточной меди для трансформаторов (табл. 5-2 [1]) подбираются подходящие провода с соблюдением следующих правил:

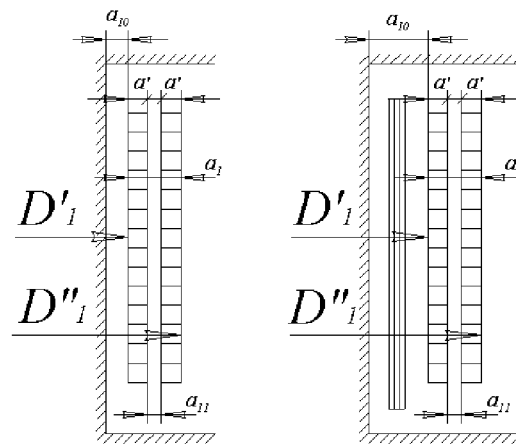


Рис. 7. Определение высоты витка

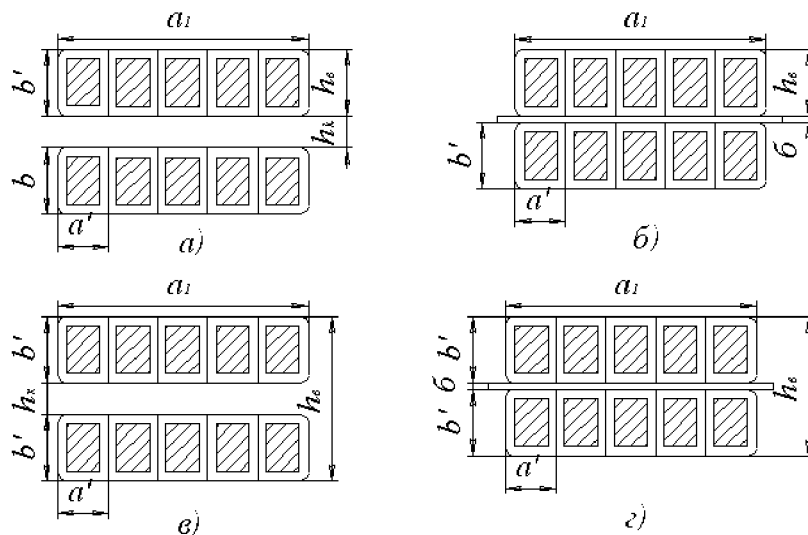


Рис. 8. Определение размеров витка винтовой обмотки

А. число параллельных проводов  $h_{B1}$ , из которых образуется виток, не должно превышать четырех;

Б. число различных размеров проводов - не более двух;

В. радиальные размеры всех параллельных проводов витка равны между собой;

Г. при намотке на ребро отношение радиального размера провода к осевому его размеру - не менее 1,3 и не более трех.

Размеры провода записываются так: число параллельных проводов  $X$

$$\frac{\text{размеры\_голового\_провода}}{\text{размеры\_провода\_в\_изоляции}} \text{ или } n_{B1} \times \frac{a \times b}{a' \times b'}$$

Причем

$$a' = a + \delta, \quad b' = b + \delta,$$

где  $\delta$  - толщина изоляции на две стороны, мм (выбирается из табл. 5-2, а [1]) (рис. 7).

30. Полное сечение витка, состоящего из  $n_{B1}$  параллельных проводов:

$$P_1 = \sum_1^{n_{B1}} P'_1$$

где  $P'_1$  - сечение одного провода, найденное из табл. 5-2а [1], мм

31. Уточненная плотность тока, используемая в дальнейших расчетах обмотки НН,

$$\Delta_1 = \frac{I_{1\phi}}{P_1}, \text{ A/мм}^2$$

32. Окончательная ширина (радиальный размер) обмотки по рис.7:

для однослойной обмотки  $a_1 = a'$ , см;

для двухслойной обмотки  $a_1 = 2a' + a_{11}$ , см,

где  $a_{11}$  - ширина осевого масляного канала между слоями (табл. 1)

| Длина канала<br>/высота/ обмотки,<br>см | Размеры каналов, см  |                              |                              |
|---|----------------------|------------------------------|------------------------------|
|   | Между обмотка-<br>ми | Между обмоткой<br>и цилиндр. | Между обмоткой<br>и стержнем |
|   |                      |                              |                              |

|         |         |         |         |
|---------|---------|---------|---------|
| 30      | 0,4-0,5 | 0,4     | 0,4-0,5 |
| 30-50   | 0,5-0,6 | 0,5     | 0,5-0,6 |
| 50-100  | 0,6-0,8 | 0,5-0,6 | 0,6-0,8 |
| 100-150 | 0,8-1,0 | 0,6-0,8 | 0,8-1,0 |

В обмотке без канала между слоями вместо значения ширины канала следует подставить в формулу значение толщины междуслойной изоляции. В этих обмотках, по соображениям механической прочности, в качестве междуслойной изоляции рекомендуется брать два слоя картона толщиной не менее 0,5 мм каждый.

33. Окончательная высота /осевой размер/ обмотки НН:

$$l_1 = h_{B1}(W_{стп} + 1) + (0,5 \div 1,5), \text{ см}$$

где  $h_{B1}$  - высота одного витка по рис. 6.

34. Внутренний диаметр обмотки НН:

$$D'_1 = d + 2a_{01}, \text{ см}$$

Ширина канала  $a_{01}$  определяется из условий изоляции и в зависимости от способа запрессовки стержня (табл. 4-4 [1]).

35. Наружный диаметр обмотки НН:

$$D''_1 = D'_1 + 2a_1, \text{ см}$$

36. Охлаждаемая поверхность обмотки.

Однослойная обмотка и двухслойная обмотка без охлаждающего канала имеют две охлаждаемые поверхности (внутреннюю и наружную). Полная охлаждаемая поверхность обмотки НН в этом случае

$$P_{01} = CK\pi(D'_1 + D''_1)l_1 * 10^{-4}, \text{ м}^2,$$

где  $C$  - число активных стержней;

двухслойная обмотка с каналом между слоями имеет четыре охлаждаемые поверхности:

$$P_{01} = 2CK\pi(D'_1 + D''_1)l_1 * 10^{-4}, \text{ м}^2.$$

Коэффициент  $K$  учитывает величину закрытия поверхности обмотки рейками и другими изоляционными деталями и может быть принят равным 0,75.

*При расчете обмотки ВН следует учитывать необходимость выполнения в обмотке отпаек для регулирования напряжения.*

На входных катушках с двух концов фазы выполняется усиленная изоляция. Расчет и конструирование обмотки ВН следует сопровождать соответствующими эскизами.

37. Число витков обмотки ВН для средней ступени номинального напряжения

$$W_2 = W_1 \frac{U_{2\phi}}{U_{1\phi}}.$$

38. Число витков для регулирования напряжения  $W_p = 0,05W_2$ . Значения  $W_2$  и  $W_p$  округляют до ближайшего целого числа.

39. Число витков обмотки на ответвлениях:

верхняя ступень напряжения  $W_2 + W_P$ ,

средняя ступень напряжения  $W_2$ ,

нижняя ступень напряжения  $W_2 - W_P$ .

40. Предварительная плотность тока в обмотке ВН

$$\Delta_2 \approx 2\Delta_{CP} - \Delta_1, A/mm^2.$$

41. Предварительное сечение витков обмотки ВН

$$P_2 = \frac{I_{2\Phi}}{\Delta_2}, mm^2$$

Расчет многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода

42. По предварительному сечению  $P_2$  из сортамента провода для трансформаторов (табл. 5-2в [1]) подбирается провод подходящего сечения или два-три параллельных провода диаметром  $d_2$  без изоляции и  $d'_2$  в изоляции, причем  $d'_2 = d_2 + \delta$ , где  $\delta$  толщина изоляции на две стороны.

Размеры подобного провода записываются следующим образом:

марка провода

$$n_{B2} \times \frac{d_2}{d'_2},$$

где  $n_{B2}$  - число параллельных проводов.

43. Полное сечение витка

$$P_2 = n_{B2} P'_2, mm^2,$$

где  $P'_2$  - сечение одного провода.

44. Уточненная плотность тока обмотки ВН, применяемая в дальнейших расчетах,

$$\Delta_2 = \frac{I_{2\Phi}}{P_2}, a/mm^2$$

45. Число витков в слое

$$W_{Cл2} = \frac{l_2}{n_{B2} * d'_2} - 1$$

Как правило, обмотки НН и ВН для удобства крепления выполняются одинаковой высоты, т.е.  $l_1 = l_2 = l$ .

46. Число слоев в обмотке

$$n_{Cл2} = \frac{W_2 + W_P}{W_{Cл2}}$$

Величина  $n_{Cл2}$  определяется до ближайшего большего числа. Число витков в последнем слое может отличаться от числа витков предыдущих слоев.

47. Число витков в слоях:

$$(n_{Cл2} - 1) * W_{Cл2} + W_{ПОСЛ.СЛОЯ} = W_2 + W_P$$

48. По условиям охлаждения обмотка ВН в большинстве случаев выполняется в виде двух концентрических катушек с осевым масляным каналом между ними. Число слоев внутренней катушки должно составлять не бо-

лее 1/3-2/5 от общего числа слоев. Масляный канал образуется с помощью реек.

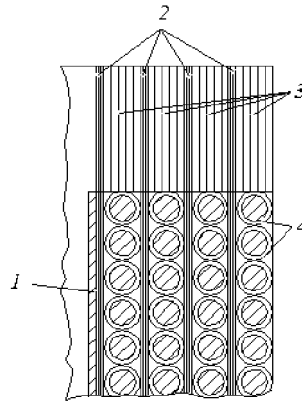


Рис. 9. Изоляция торцевой части многослойной цилиндрической обмотки: 1 – экран, 2 – междуслойная изоляция, 3 – бортики из электрокартона, 4 – витковая изоляция

49. Рабочее напряжение между первыми витками двух соседних слоев:

$$U_{М.сл.} = 2W_{СП2} U_B, B$$

По напряжению двух слоев (рис. 9) определяют /табл.4-7 [1] /:

толщину междуслойной изоляции  $\delta_{М.сл.}$  ;

выступ изоляции за высоту обмотки.

Расположение катушек на стержне и размеры радиальных каналов представлены на рис. 10.

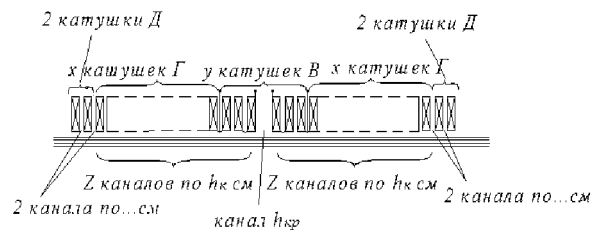


Рис. 10. Схема определения осевых размеров обмотки

50. По испытательному напряжению  $U_{ИСП.}$  обмотки ВН и мощности трансформатора  $S$  из табл. 4-5 [1] находят:

а/ размеры канала между обмотками ВН и НН  $a_{12}, см$ ;

б/ толщину цилиндра между обмотками  $\delta_{12}, см$ ;

в/ величину выступа цилиндра за высоту обмотки  $l_{Ц2}, см$ ;

г/ минимальное расстояние между обмотками ВН соседних стержней  $a_{22}, см$ ;

д/ толщину междуфазной перегородки  $\delta_{22}, см$

е/ расстояние обмотки ВН от ярма  $l_{02}, см$ ;

51. Радиальный размер обмотки:

для одной катушки без масляного канала

$$a_2 = d'_2 n_{СП2} + \delta_{М.сл.} (n_{СП2} - 1), см$$

для двух катушек с масляным каналом между ними

$$a_2 = d'_2 n_{СП2} + \delta_{М.сл.} (n_{СП2} - 1) + a'_{22}, см$$

где  $a_{22}$  - ширина масляного канала между катушками.

52. Внутренний диаметр обмотки

$$D'_2 = d''_1 + 2a_{12}, \text{ см}$$

53. Наружный диаметр обмотки

$$D''_2 = D'_2 + 2a_2, \text{ см}$$

54. Расстояние между осями стержней

$$C = D''_2 + a_{22}, \text{ см}$$

Размер C обычно округляется до 1,0 или 0,5

55. Поверхность охлаждения обмотки:

а/ одна катушка, намотанная непосредственно на изоляционный цилиндр, имеет одну наружную поверхность охлаждения

$$P_{o2} = c k \pi D''_2 l_2 * 10^{-4}, \text{ м}^2 \quad (k=1);$$

б/ одна катушка, намотанная на рейки на цилиндре, имеет две поверхности охлаждения

$$P_{o2} = c k \pi (D'_2 + D''_2) l_2 * 10^{-4}, \text{ м}^2 \quad (k=0,88)$$

в/ две катушки с осевым каналом между ними / внутренняя катушка намотана непосредственно на цилиндре/ имеют три поверхности охлаждения

$$P_{o2} = 1,5 c k \pi (D'_2 + D''_2) l_2 * 10^{-4}, \text{ м}^2 \quad (k=0,83)$$

г/ то же, но внутренняя катушка намотана на рейки на цилиндре

$$P_{o2} = 2 c k \pi (D'_2 + D''_2) l_2 * 10^{-4}, \text{ м}^2 \quad (k=0,8)$$

В формулах коэффициент K учитывает величину закрытия поверхности обмотки изоляционными деталями.

56. Вес меди обмотки НН:

$$G_{M1} = C W_1 \pi \frac{D'_1 + D''_1}{2} \gamma_M P_1, \text{ Кг}$$

57. Вес меди обмотки ВН:

$$G_{M2} = C W_2 \pi \frac{D'_2 + D''_2}{2} \gamma_M P_2 * 10^{-5}, \text{ Кг}$$

В этих формулах:

$\gamma_M$  - удельный вес проводникового материала, кг/дм<sup>3</sup>;

P - сечение витка, мм<sup>2</sup>;

D - диаметры обмоток, см.

58. Общий вес меди обмоток

$$G_M = G_{M1} + G_{M2}, \text{ Кг}$$

59. Коэффициент добавочных потерь  $K_o = 1,0$

60. Электрические потери в обмотке НН с учетом добавочных потерь:

$$P_{M1} = 2,4 K_{o1} \Delta_1^2 G_{M1}, \text{ Вт.}$$

61. Электрические потери в обмотке ВН с учетом добавочных потерь:

$$P_{M2} = 2,4 K_{o2} \Delta_2^2 G_{M1}, \text{ Вт.}$$

62. Потери в обмотке НН, отнесенные к единице охлаждаемой поверхности (плотность теплового потока),



$$q_1 = \frac{P_{M1}}{\Pi_{01}}, \text{Вт/м}^2$$

63. Плотность теплового потока обмотки ВН

$$q_2 = \frac{P_{M2}}{\Pi_{02}}, \text{Вт/м}^2$$

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИХ УСИЛИЙ

Определение потерь короткого замыкания

Потери короткого замыкания в трансформаторе складываются из электрических потерь в обмотках, из добавочных потерь в обмотках и отводах, а также из потерь в стенках бака и других металлических элементах конструкции, вызванных потоком рассеяния обмоток и отводов.

Не следует допускать отклонения расчетных потерь короткого замыкания от заданных более чем на + 5%.

По условиям нагрева обмоток НН и ВН полученные значения должны находиться в пределах 1000-1200 Вт/м<sup>2</sup>.

Предельные значения  $q$  не должны превышать 1300-1500 Вт/м<sup>2</sup>. Если плотность теплового потока какой-либо обмотки выше этих значений, необходимо снизить ее увеличив поверхность охлаждения.

Электрические потери в отводах. На рис.11 изображены наиболее употребительные практические схемы соединения обмоток трансформатора в звезду и в треугольник. По рис. 11,а выполняют обычно схемы соединения всех обмоток ВН, а по рис.11,б - схемы соединения обмоток НН в звезду. Схемы соединения в треугольник для обмоток НН, в зависимости от расположения начал и концов обмоток, могут выполняться по рис. 11,в или г.

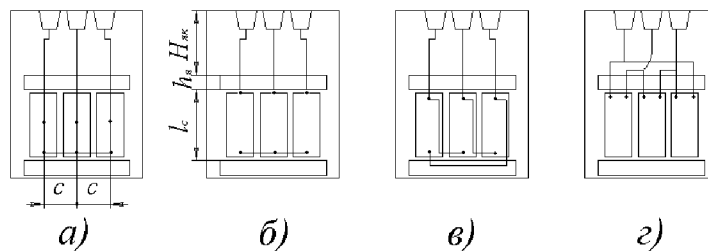


Рис. 11. К определению длины отводов

64. Общая длина отводов для соединения:

а) по рис. 11,а  $l_{отв.2} \approx 2C + 3\left(\frac{l_c}{2} + d + l_2\right)$ , см;

б) по рис. 11,б  $l_{отв.2} \approx 2C + 3(d + l_1)$ , см;

в) по рис. 11,в  $l_{отв.1} \approx 4C + 3l_c + 5.2(d + l_1)$ ;

г) по рис. 11,г  $l_{отв.1} \approx 4C + 6d + 5.2l_1$ , см.

В этих формулах  $C$  - расстояние между осями соседних стержней,  $l_c$  - высота стержня,  $l_1$  и  $l_2$  - высота обмоток,  $d$  - диаметр стержня.

65. Вес меди отводов НН:

$$G_{отв.1} = l_{отв.1} \Pi_{отв.1} \gamma_M 10^{-5}, \text{ кг,}$$

где  $l_{отв.1}$  - в сантиметрах, а сечение отвода  $\Pi_{отв.1}$  - в мм<sup>2</sup>;  $\Pi_{отв.1}$  может быть принято равным сечению витка обмотки НН.

66. Потери в отводах обмотки НН

$$P_{отв.1} = 2.4\Delta_1^2 G_{отв.1}, \text{ вт.}$$

67. Вес меди отводов ВН

$$G_{отв.2} = l_{отв.2} \Pi_{отв.2} \gamma_M 10^{-5}, \text{ кг.}$$

68. Потери в отводах обмотки ВН

$$P_{отв.2} = 2.4\Delta_2^2 G_{отв.2}, \text{ вт.}$$

В нормальных силовых трансформаторах потери в отводах составляют, как правило, не более 5-8% от потерь короткого замыкания.

Потери в стенках бака и других стальных деталях. Поток рассеяния частично замыкается через стенки бака, а также через стальные детали - прессующие балки, ярма, стяжные шпильки и т.д.

69. Минимальные размеры бака в плане (рис. 12):

а) минимальная длина

$$A = 2C + D_2'' + 2S_5, \text{ см;}$$

б) минимальная ширина

$$B = D_2'' + S_1 + S_2 + d_1 + S_3 + S_4 + d_2, \text{ см.}$$

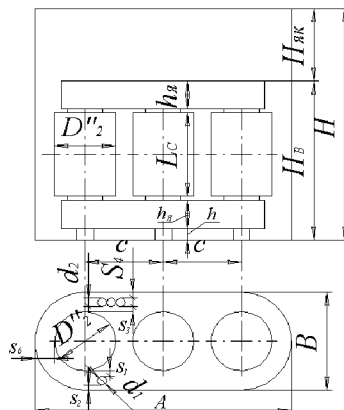


Рис. 12. Основные размеры бака

В этих формулах изоляционные расстояния (см. рис. 12):

$S_1$  - от обмотки ВН до отвода НН;

$S_2$  - от отвода НН до стенки бака;

$d_1$  - диаметр отвода НН;

$S_3 = S_1$  - от обмотки ВН до отвода ВН;

$S_4$  - от отвода ВН до стенки бака;

$d_2$  - диаметр отвода ВН;

$S_5$  - от обмотки ВН до стенки бака /по длине бака/.

70. Ориентировочно потери в стенках бака и других стальных деталях определяются по формуле

$$P_\delta = \frac{kU_p^2 \Phi^2 l^3 \left(\frac{f}{50}\right) 10^{-12}}{P_\delta [l + 2(R - r_{12})]^2}, \text{ вт,}$$

где  $\Phi = B_c \Pi_c$  - поток одного стержня, вт;

$l$  - высота обмотки, см;

$P_\delta$  - периметр гладкого бака, см;

$R$  - средний размер бака, см;

$r_{12}$  - средний размер канала рассеяния, см; причем

$$r_{12} = \frac{d_{12}}{2} \text{ см}, R = \frac{A + B - 2C}{4} \text{ см.}$$

В трехфазном трансформаторе при  $U_p < 10,5\%$  коэффициент  $K=2,2$ , а при  $U_p > 10,5\%$   $K=1,5$ .

71. Полный вес обмоток

$$G_M = G_{M1} + G_{M2} + G_{OTB.1} + G_{OTB.2}.$$

*Напряжение короткого замыкания*

72. При расчете трансформатора не допускается отклонение напряжения короткого замыкания более чем на  $\pm 5\%$ .

В тех случаях, когда полученное значение  $U_K$  отклоняется на большую величину, приведение  $U_K$  к норме лучше всего осуществлять корректировкой  $a_p$  / за счет изменения канала рассеяния  $a_{12}$  / или высоты обмотки  $l$ . Более значительное изменение  $U_p$  достигается изменением числа витков.

В этом случае необходимо сделать новый расчет трансформатора.

73. Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$U_A = \frac{P_K}{10S_H} \%,$$

где  $S$  - полная мощность трансформатора, кВА.

74. Реактивная составляющая

$$U_p = \frac{7,92 f S' \beta a_p K_p 10^{-3}}{U_B^2} \%,$$

здесь

$$\beta = \frac{\pi d_{12}}{l}, a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}, \text{ см};$$

$$K_p = 1 - \sigma(1 - e^{-1/\sigma}), \sigma = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi}.$$

75 Напряжение короткого замыкания трансформатора

$$U_K = \sqrt{U_A^2 + U_p^2} \%$$

Отклонение  $U_K$  от заданной величины не должно превышать  $\pm 5\%$ .

## ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Уточнение геометрических размеров магнитопровода.

76. Размеры пакетов стержня выбираются по табл. 8-2 работы [1] в зависимости от диаметра  $d$  и количества пакетов  $n$ .

77. Поперечное сечение каждого пакета стержня:

$$P_\Pi = a_\Pi b_\Pi, \text{ см}^2$$

78. Полное сечение ступенчатой фигуры стержня

$$P_{\phi.C} = \sum P_\Pi, \text{ см}^2$$

79. Активное сечение стержня

$$P_c = K_3 P_{\phi, c}, \text{ см}^2$$

80. Полное сечение ярма /предварительно/

$$P_{\phi, я} = (1,05 \div 1,15) P_{\phi, c}, \text{ см}^2$$

81. Ширина ярма:

для магнитопровода без охлаждающих каналов

$$b_{я} = \sum b_{\Pi}, \text{ см};$$

для магнитопровода с охлаждающими каналами

$$b_{я} = \sum b_{\Pi} + n_k b_k, \text{ см.}$$

$n_k$  - число продольных каналов,  $b_k$  - ширина канала.

82. Высота ярма при прямоугольном сечении:

для магнитопроводов без охлаждающих каналов

$$h_{я} = \frac{P_{\phi, я}}{b_{я}}, \text{ см},$$

для магнитопровода с охлаждающими каналами

$$h_{я} = \frac{P_{\phi, я}}{b_{я} - n_k b_k}, \text{ см.}$$

83. Уточненное полное сечение прямоугольного ярма

$$P_{\phi, я} = h_{я} \sum b_n, \text{ см}^2$$

84. Активное сечение прямоугольного ярма

$$P_{я} = K_3 P_{\phi, я}, \text{ см}^2$$

85. Длина стержня

$$l_c = l + 2l_0, \text{ см},$$

$l_0$  - расстояние от обмотки до верхнего или нижнего ярма (табл. 4-5, 4-7

[1])

86. Вес стали в стержнях

$$G_c = C P_c l_c 7,6 * 10^{-3}, \text{ кг}, \text{ где } C - \text{ число стержней}$$

87. Вес стали в ярмах:

вес частей ярм, заключенных между осями крайних стержней

$$G'_{я} = 2(c-1) C P_{я} 7,6 * 10^{-3}, \text{ кг},$$

где  $C$  - расстояние между осями соседних стержней;

вес стали в угловых частях ярма

$$G''_{я} = 2 P_c h_{я} 7,6 * 10^{-3}, \text{ кг.}$$

Формулы справедливы только для ярма прямоугольного сечения. Для ступенчатого ярма вес угловых частей определяют отдельно по пакетам.

88. Полный вес стали в двух ярмах

$$G_{я} = G'_{я} + G''_{я}, \text{ кг.}$$

89. Полный вес стали трансформатора

$$G_{ст} = G_{я} + G_c, \text{ кг.}$$

Потери холостого хода

90. Уточненное значение индукции в стержне

$$B_c = \frac{U_B * 10^{-4}}{4,44 f \Pi_c}, \text{ Тл.}$$

91. Уточненное значение индукции в ярме

$$B_{я} = \frac{\Pi_c}{\Pi_{я}} B_c, \text{ Тл.}$$

92. Удельные потери в стали  $p_c$  и  $p_{я}$  определяют соответственно, индукциям  $B_c$  и  $B_{я}$  и марке стали по табл. 8-3, 8-4 [1].

93. Потери холостого хода

$$p_x = K_o (p_c G_c + p_{я} G_{я}), \text{ Вт,}$$

где  $K_o = 1,0-1,15$  - коэффициент добавочных потерь (§ 8-2 [1]).

94. Активная составляющая тока холостого хода

$$i_{oA} = \frac{P_x}{10 S_H} \%.$$

95. Удельную намагничивающую мощность для стержня  $q_c$ , для ярма  $q_{я}$  и для зазоров  $q_3$ /по  $B_c$ /определяют по табл. 8-8, 8-9 [1].

96. Намагничивающая мощность трансформатора при холостом ходе

$$Q_x = q_c G_c + q_{я} G_{я} + n_3 q_3 \Pi_c, \text{ В*А,}$$

где  $n_3$  - число воздушных зазоров /стыков/ в магнитопроводе.

97. Индуктивная составляющая тока холостого хода трансформатора

$$i_{o\mu} = \frac{Q_x}{10 S_H} \%$$

98. Полный ток холостого хода трансформатора

$$i_0 = \sqrt{i_{oA}^2 + i_{o\mu}^2} \%$$

Отклонение расчетной величины от заданной не должно превышать + 30%.

КПД и падение напряжения при нагрузке

99. КПД от коэффициента загрузки

$$\eta = 1 - \frac{p_x + \beta^2 p_K}{\beta S_H \cos \varphi_2 + p_x + \beta^2 p_K}$$

где  $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}} = \frac{S_2}{S_{2H}}$  - коэффициент загрузки трансформатора.

Задаваясь  $\beta = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$  при  $\cos \varphi_2 = \text{const}$  построим зависимость  $\eta = f(\beta)$

100. Максимальный КПД трансформатора

$$\eta_M = 1 - \frac{p_x + \beta_{опт}^2 p_K}{\beta_{опт} S_H \cos \varphi_2 + p_x + \beta^2 p_K}$$

Где  $\beta_{опт} = \sqrt{\frac{p_x}{p_K}}$ .

101. Зависимость вторичного напряжения от нагрузки

$$U_2 = U_{2H} \left(1 - \frac{\Delta U\%}{100}\right), \text{ В}$$

Где

$$\Delta U\% \cong \beta(U_A \cos \varphi_2 + U_P \sin \varphi_2),$$

Или

$$\Delta U\% = \beta U_K \cos(\varphi_2 - \varphi_K), \quad \varphi_K = \arctg \frac{U_P}{U_A}$$

## ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА

Схема теплового расчета и расчета охлаждающей системы включает:

- а) поверочный тепловой расчет обмоток;
- б) расчет охлаждающей системы (бака),
- в) окончательное определение превышений температуры обмоток и масла над температурой воздуха;
- г) определение веса масла и размеров расширителя.

Поверочный тепловой расчет обмоток

Методика поверочного расчета обмоток зависит от их конструкции. Рассмотрим двухслойную цилиндрическую обмотку из прямоугольного провода и многослойную цилиндрическую обмотку из круглого провода.

Обмотка двухслойная цилиндрическая из прямоугольного провода.

102. Внутренний перепад температуры обмоток

$$Q_0 = \frac{q \delta}{\lambda_{из}} 10^{-4}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $\delta$  - односторонняя толщина изоляции, см; при наличии общей изоляции катушки величину  $\delta$  следует определять как суммарную толщину изоляции провода и катушки на одну сторону;  $q$  - плотность теплового потока Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda_{из}$  - теплопроводность изоляции провода, Вт/см<sup>°C</sup>, применяется в зависимости от материала изоляции.

105. Перепад температуры между поверхностью обмотки и маслом

$$\theta_{OM} = 0,285q^{0,6}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

104. Превышение температуры обмотки над средней температурой масла:

$$\theta_{0-Mcp} = \theta_0 + \theta_{0-M}.$$

Многослойная цилиндрическая обмотка из круглого провода без горизонтальных каналов (рис. 13).

105. Удельные потери обмотки определяются как потери в меди, отнесенные к 1 см<sup>3</sup> общего объема обмотки:

$$p = 1,68 \frac{\Delta^2 d^2}{(d' + \delta_{M.C}) d'} 10^{-2}, \text{ Вт/ см}^3$$

где  $\Delta$  - плотность тока в обмотке, А/мм<sup>2</sup>, значения  $d, d'$  приняты в сантиметрах (рис. 14).

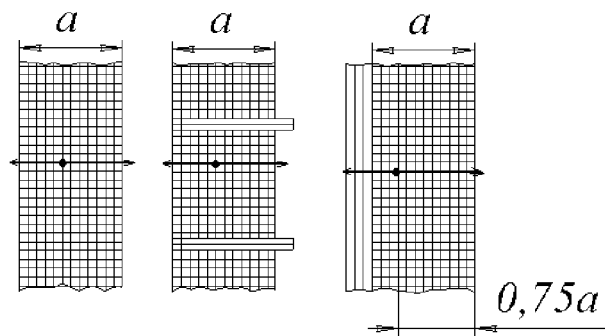


Рис. 13. Теплопередача внутри многослойной обмотки из круглого провода

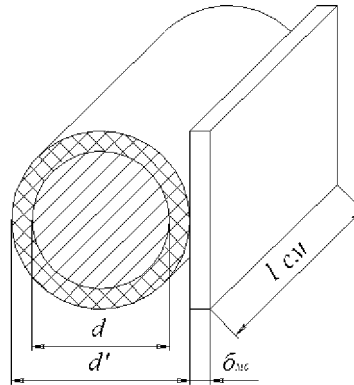


Рис. 14. Часть обмотки с междуслойной изоляцией из круглого провода

Условная теплопроводность обмотки, без учета междуслойной изоляции,

$$\lambda = \frac{\lambda_{из}}{0,7\alpha^{0,55}}, \text{ Вт/см}^\circ\text{С},$$

где  $\lambda_{из}$  - теплопроводность изоляции провода. Обычно изоляцией служит кабельная бумага, пропитанная лаком и погруженная в масло, тогда

$$\lambda_{из} = 0,0017, \text{ Вт/см}^\circ\text{С}; \quad d = \frac{d' - d}{d}, \text{ см}$$

Средняя теплопроводность обмотки, приведенная к случаю равномерного распределения витковой и междуслойной изоляции

$$\lambda_{ср} = \frac{\lambda \lambda_{МС} (d' + \delta_{МС})}{\lambda_{сМС} + \lambda_{МС} d'} \text{ Вт/см}^\circ\text{С},$$

где  $\lambda_{МС}$  - теплопроводность междуслойной изоляции.

Полный перепад температуры внутри обмотки

$$\theta_0 = \frac{pd^2}{8\lambda_{ср}}, \text{ }^\circ\text{С}.$$

где  $d$  - полная односторонняя толщина обмотки (см. рис. 13). Средний перепад температуры по обмотке  $\theta_{ср} = \frac{2}{3}\theta_0, \text{ }^\circ\text{С}$

106. Перепад температуры между поверхностью обмотки и маслом

$$\theta_{0М} = 0,285q^{0,6}, \text{ }^\circ\text{С}.$$

При наличии каналов в катушечной обмотке из круглого провода (рис. 15) полный внутренний перепад определяется по формуле:

$$\theta_0 = \frac{Pa^2}{6(\lambda_x + \lambda_y \frac{a^2}{\sigma^2})}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Теплопроводности по осям определяются:  $\lambda_x$  - по формуле для  $\lambda_{CP}$ ,  $\lambda_y$  - формуле для  $\lambda$  (см.п.102).

107. Среднее превышение температуры обмотки над средней температурой масла:

$$\theta_{0-MCO} = \theta_{0CP} + \theta_{0M}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

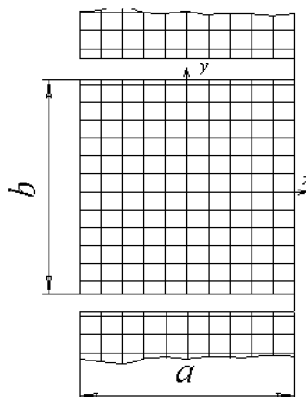


Рис. 15. Катушечная обмотка из круглого провода с каналами

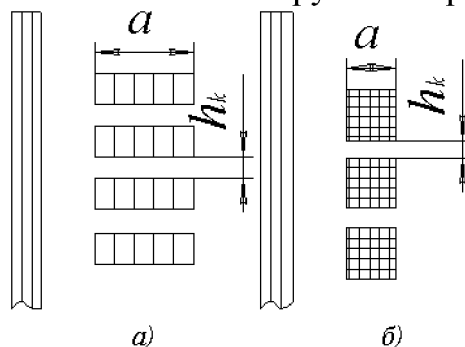


Рис. 16. К определению перепада температуры на поверхности обмотки с горизонтальными каналами

*Тепловой расчет бака и охлаждающей системы*

Подробно конструкции охлаждающей системы рассмотрены в работах [1,2,3].

Для силовых масляных трансформаторов рекомендуется выбирать при мощности до 50-50 кВА баки с гладкими стенками, до 1800 кВА - трубчатые баки, свыше 1800 кВА - с радиаторами, причем, начиная с 10000 кВА, следует использовать баки с радиаторами и с искусственным дутьевым охлаждением. Для определения перепада температуры используется рис. 16.

Трубчатый бак (рис. 17)

108. Ранее(п. 69) минимальные внутренние размеры бака определялись с учетом допустимых изоляционных расстояний ширины бака В (см) и длины бака А (см). Общая глубина бака (предварительно)

$$H = H_B + H_{ЯК}, \text{ см}.$$

Здесь высота выемной части (см.рис. 12)



$$H_B = l_C + 2h_{я} + h, \text{ см,}$$

где  $h$  - толщина подкладки ( $h=3-5$ ), см;  $h_{я}$  - высота ярма (см.п. 82).

Минимальное расстояние  $H_{як}$  при напряжении ВН 6кВ равно 27 см, 10кВ - 30см, 20кВ - 30см, 35кВ - 47см.

Размер  $H_{як}$  может быть увеличен в 1,5-2 раза, если это потребуется по условиям охлаждения. Полученные значения А, В и Н следует округлить до нормальных габаритных размеров.

109. Допустимый средний перегрев масла (над воздухом)

$$\theta_{M-B} = 70 - \theta_{0-M_{CP}}, \text{ } ^\circ\text{C,}$$

где  $\theta_{0-M_p}$  - больший перегрев для обмоток ВН и НН.

110. Допустимый средний перегрев стенки бака над воздухом

$$\theta_{B-B} = \theta_{M-B} - \theta_{M-B},$$

где  $\theta_{M-B}$  - превышение температуры масла над стенкой бака, обычно  $\theta_{M-B} = 3 \div 6 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

111. Поверхность теплоотдачи путем излучения предварительно определяем как обтягивающую, т.е. определяемую внешним периметром (рис. 18). Это обуславливается прямолинейным распространением лучистой энергии.

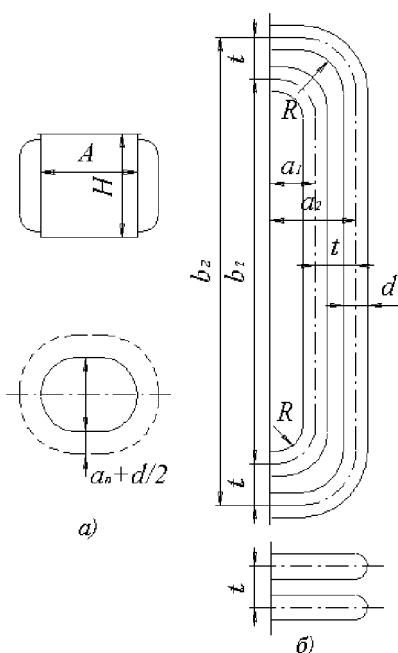


Рис. 17. Размеры и детали трубчатого бака

Для бака овального сечения в плане:

$$P_{II} = [2(A - B) + \pi B] * H * K * 10^{-4}, \text{ м}^2$$

Для бака прямоугольного сечения в плане

$$P_{II} = 2(A - B) * H * K * 10^{-4}, \text{ м}^2.$$

Коэффициент К учитывает отношение параметра излучения к поверхности гладкой части бака. Ниже приведены приближенные величины К: гладкий бак-1,0; бак с охладителями-1,5-2,0. Большие значения коэффициента К принимаются для большего числа рядов труб, для большого тока охла-

дителей.

112. Поверхность теплоотдачи путем конвекции (предварительно):

$$P_K = \frac{1,05 \sum p}{2,5 \theta_{B-B}^{1,25}} - 1,12 P_H, \text{ м2.}$$

Здесь  $\sum p = p_K + p_0$  - суммарные потери трансформатора, Вт; 1,05 - коэффициент, учитывающий возможные отклонения фактических потерь единичного трансформатора. При расчете серии целесообразно принять коэффициент, равный 1.1.

113. Фактические конструктивные размеры бака выбирают так, чтобы подучить поверхности конвекции и излучения, наиболее близкие к определенным расчетом.

Пусть окончательно выбран бак овальной формы (см.рис. 17). Размеры бака в плане  $A \times B$ , см; глубина бака  $H$ , см; число рядов труб  $n$ ; число труб в ряду  $m_1, m_2, m_3$ . Периметр бака в плане (гладкая часть)  $P_B = 2(A - B) + \pi B$ , см.

Развернутая длина трубы  $l_1, l_2, l_3$  по рядам:

а) первый (внутренний) ряд

$$l_1 = (e_1 - 2a_1 + \pi a_1) = e + 1,14a, \text{ см,}$$

б) второй ряд  $l_2 = l_1 + 4t$ , см,

д) третий ряд  $l_3 = l_2 + 4t$ , см,

Здесь  $t$  - шаг труб в ряду и между рядами ( $t=1,5-2,0$ )d;  $a_1, a_2, \dots, a_n$  определяются по рис. 17. Параметр трубы  $d$  принимается равным 4-5 см.

114. Общая длина всех труб

$$l_{TP} = m_1 l_1 + m_2 l_2 + m_3 l_3, \text{ см.}$$

115. Параметр поперечного сечения трубы

$$P_{TP} = \pi d, \text{ см.}$$

116. Полная поверхность всех труб

$$P_{TP} = P_{TP} l_{TP} 10^{-4}, \text{ м2.}$$

117. Поверхность конвекции гладкой части бака

$$P_{K.ГЛ} = P_B H 10^{-4}, \text{ м2.}$$

118. Поверхность крышки

$$P_{KP} = \left[ \frac{\pi e_{KP}^2}{4} + (l_{KP} - e_{KP}) e_{KP} \right] 10^{-4}, \text{ м2.}$$

Здесь  $e_{KP} = B + 2e_P$  - ширина крышки, см;  $l_{KP} = A + 2e_P$  - длина крышки, см; ширина рамы  $e_P$  при мощностях от 10 до 5600 кВА принимается равной 4-10 см.

Поверхность конвекции труб

$$P_{KTP} = P_{TP} K_{II}, \text{ м2.}$$

Коэффициент  $K_{II}$  учитывает ухудшение теплоотдачи путем конвекции вследствие уменьшения скорости воздуха между трубами. В зависимости от числа рядов труб  $K_{II}$  имеет следующие значения: число рядов труб  $n$  1 2 3 4

$$K_{II} 1,0 0,96 0,93 0,90$$

119. Суммарная приведенная поверхность конвекции

$$P_K = P_{TP} K_{TP} + P_{2II} + P_{KP} K_P$$

Здесь  $K_{TP}$  - коэффициент, учитывающий улучшение конвекции у поверхности труб по сравнению с гладкой стенкой;  $K_P = 0,5$  - коэффициент, учитывающий величину закрытия поверхности изоляторами и арматурой.

120. Поверхность излучения определяется параметром, равным длине нити, обтягивающей бак по трубам (или охладителям), и высотой бака:

$$P_{II} = P_{II} H * 10^{-4} = [2(A - B) + \pi(B + a_1 + d)] H * 10^{-4}, \text{ м}^2$$

Бак с радиаторами

121. По минимальным изоляционным расстояниям ранее были определены минимальные размеры бака.

Минимальная ширина бака

$$B = D_2'' + S_1 + S_2 + d_1 + S_3 + S_4 + d_2, \text{ см.}$$

122. Минимальная длина бака  $A = 2C + B$ , см.

123. Глубина бака

$$H = H_B + H_{ЯК}, \text{ см.}$$

Примем округленные значения  $B$ ,  $A$  и  $H$ .

124. Допустимый средний перегрев масла над воздухом

$$\theta_{M-B} = 70 - \theta_{0-M_{CP}}, \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Где  $\theta_{0-M_{CP}}$  - большой перегрев обмотки (ВН или НН) над маслом.

125. Допустимый средний перегрев стенки бака над воздухом.

$$\theta_{B-B} = \theta_{M-B} - \theta_{M-B}, \text{ } ^\circ\text{C.}$$

где  $\theta_{M-B}$  - превышение температуры масла над стенкой бака; обычно  $\theta_{M-B}$  принимается в пределах 3-6 $^\circ\text{C}$ .

126. Поверхность теплоотдачи излучением предварительно определяется внешним периметром (рис. 18) по охладителям, так как энергия излучения распространяется прямолинейно:

$$P_{II} = [2(A - B) + \pi B] H * K * 10^{-4}, \text{ м}^2$$

Значения коэффициента  $K$  для бака с охладителями приведены в п. 3.

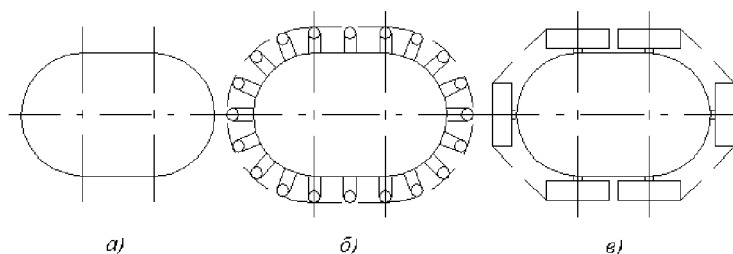


Рис. 18. К определению эквивалентной поверхности излучения: а – гладкий бак, б – трубчатый бак, в – бак с охладителями

127. Поверхность теплоотдачи путем конвекции (предварительно) вычисляется по формуле

$$\Pi_K = \frac{1,05(p_0 + p_K)}{2,5\theta_{B-B}^{1,25}} - 1,12\Pi_{II}$$

Здесь 1,05 - коэффициент, учитывающий отклонение фактических потерь от расчетных для единичного трансформатора. При расчете серии этот коэффициент следует принять равным 1,1.

128. Фактические конструктивные размеры бака подбирают так, чтобы получить поверхности конвекции и излучения примерно равными предварительно рассчитанным (рис. 19).

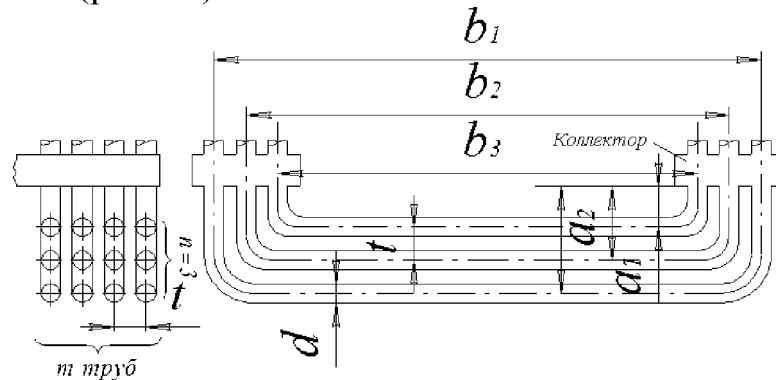


Рис. 19. Трубчатый охладитель

Пусть выбраны: число охладителей  $r$ , число рядов труб в охладителе  $n$ , число труб в ряду  $m$ , полная длина труб в рядах  $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$  (табл. 9-9 [1]).

129. Поверхность конвекции одного охладителя:

а) для двойного охладителя (см. рис 19).

$$\Pi_{K.OXII} = K2\pi dm(l_1 + l_2 + \dots l_n) * 10^{-4} + 2\Pi_{KK}, \text{ м}^2$$

б) для одинарного охладителя, где трубы располагаются только с одной стороны коллектора.

$$\Pi_{K.OXII} = K\pi dm(l_1 + l_2 + \dots l_n) * 10^{-4} + 2\Pi_{KK}, \text{ м}^2$$

Здесь развернутая длина труб различных рядов:  $l_1 = \epsilon_1 + 1,14a$ ,  $l_2 = l_1 + 4t$ ,  $l_3 = l_2 + 4t$  и т.д., причем  $t = (1,5-2)d$  - шаг трубы;  $a_1, a_2, \dots, a_n$  определяются по рис. 19,  $K = 1,4$  - коэффициент, учитывающий улучшение конвекции воздуха и поверхности трубы по сравнению с гладкой вертикальной стенкой;  $\Pi_{KK}$  - поверхность конвекции одного коллектора, равная его геометрической поверхности.

130. Поверхность конвекции гладкой части бака:

$$\Pi_{K.ГЛ} = P_B H * 10^{-4} = [2(A - B) + \pi B] H * 10^{-4}, \text{ м}^2$$

131. Поверхность крышки

$$\Pi_{KP} = \left[ \frac{\pi \epsilon_{KP}^2}{4} + (l_{KP} - \epsilon_{KP}) \epsilon_{KP} \right] * 10^{-4}, \text{ м}^2$$

где  $\epsilon_{KP} = B + 2\epsilon_p$  - ширина крышки, см;

$l_{KP} = A + \epsilon_p$  - длина крышки, см.

Ширину угольника рамы  $\epsilon_p$  принимаем равной 8 см (от 4 до 10 см).

132. Суммарная приведенная поверхность конвекции:

$$\Pi_K = r\Pi_{K.OXII} + \Pi_{ГЛ} + K_{KP}\Pi_{KP}, \text{ м}^2$$

Здесь  $\gamma$  - число охладителей;  
 $K_{кр}=0,5$  - коэффициент, учитывающий закрытие части поверхности крышки изоляторами и арматурой.

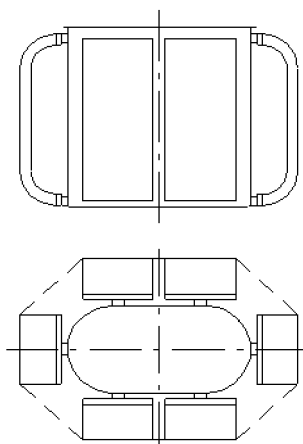


Рис.20. Бак с охладителями

133. Поверхность излучения

$$\Pi_{и} = P_{и} H * 10^{-4}, \text{ м}^2,$$

где  $P_{и}$  - параметр, равный длине нити, обтягивающей бак с охладителями (рис. 20).

Определение фактических перегревов

Определение фактических перегревов производится на базе определенных потерь и поверхностей охлаждения (конвекцией и лучеиспусканием), причем потери единичного трансформатора увеличиваются на 5%, а при расчете серии - на 10% против гарантированной величины  $P_c + P_k$ . Это делается для того, чтобы учесть возможное отклонение опыта от расчета.

134. Средний перегрев стенки бака (трубы) над воздухом:

$$\theta_{Б-В} = \left[ \frac{K(p_0 + p_k)}{2,8\Pi_{и} + 2,5\Pi_k} \right]^{0,8}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Как указано выше,  $K=1,05-1,1$ .

135. Средний перегрев масла вблизи стенки по сравнению с температурой стенки бака

$$\theta_{М-Б} = 0,165 * \left[ \frac{K(p_0 + p_k)}{\sum \Pi_k} \right]^{0,6}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

Здесь  $\sum \Pi_k$  - сумма поверхностей конвекции гладкой части, труб и крышки без коэффициентов ухудшения или улучшения конвекции

136. Перегрев верхних слоев масла над окружающим воздухом

$$\theta_{М-В.В} = \sigma(\theta_{Б-В} + \theta_{М-Б}), \text{ } ^\circ\text{C}$$

Коэффициент  $\sigma=1,2$  для трубчатых баков и баков с охладителями учитывает перегрев верхних слоев над остальным маслом,  $\theta_{М-В.В} < 60^\circ\text{C}$

137. Перегрев средних слоев масла над воздухом

$$\theta_{М-В} = \theta_{Б-В} + \theta_{М-Б}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

138. Перегрев обмоток над окружающим воздухом:

обмотки ВН

$$\theta_{(0-B)^2} = \theta_{(0-M_{CP})^2} + \theta_{M-B}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

обмотки НН

$$\theta_{(0-B)^1} = \theta_{(0-M_{CP})^1} + \theta_{M-B}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

Перегрев обмоток над воздухом не может превышать  $70^\circ\text{C}$ . Если перегревы  $\theta_{M-B}$  или  $\theta_{0-M}$  превышают допустимые значения или значительно ниже их, то следует изменить систему охлаждения или принятые нагрузки и произвести пересчет.

Определение веса масла и размер охладителя

139. Внутренний объем бака, труб, радиаторов  $V_B$  подсчитывается по известным формулам. Значение  $V_B$  удобнее определять в  $\text{дм}^3$ .

140. Объем выемной части (приблизленно)

$$V_B = \frac{1,2(G_M + G_{CT})}{\gamma_B}, \text{ дм}^3$$

где  $\gamma_B = 5,5-6 \text{ кг/дм}^3$  - средний удельный вес внутренней части. Для сердечников, запрессованных деревянными брусками, принимают меньшее значение  $\gamma_B$ , для запрессованных швеллерами или стальными балками - большее.

141. Объем масла

$$V_M = V_B - V_{B'}, \text{ дм}^3$$

142. Вес масла трансформатора

$$G_M = 0,9V_M, \text{ кг}$$

143. Все трансформаторы мощностью выше 100 кВА и напряжением 6 кВ и выше снабжаются расширителями.

Объем расширителя принимается с таким расчетом, чтобы при колебаниях окружающей температуры  $-35$  до  $+35^\circ\text{C}$  и допустимых превышениях температуры масла в баке колебания уровня масла были в пределах расширителя:

$$V_P = (0,07 \div 0,1)V_M, \text{ дм}^3.$$

144. Диаметр расширителя

$$d_P = \sqrt{\frac{4V_P * 10^3}{\pi l_P}}$$

Здесь  $l_P$  - длина расширителя, см. При расположении его поперек крышки бака  $l_P \leq B$  - для гладкого бака,  $l_P \geq B$  - для трубчатого бака или бака с радиаторами. Величина  $a_D$  определяется по рис. 17 или 19.

Технико-экономические показатели

145. Удельный расход меди

$$g_M = \frac{G_M}{S}, \text{ кг/кВА}$$

146. Удельный расход электротехнической стали

$$g_{CT} = \frac{G_{CT}}{S}, \text{ кг/кВ*А}$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов.- 5-е изд., перераб. и доп.- М.: Альянс. 2017.-527 с.
2. Агеев А.Ю., Валеева Е.В., Груздева Л.А. Составление аннотации и заключения на иностранном языке: Руководство для студентов. – Северск.: СТИ ТПУ, 1997.-57 с.
3. Токарев Б.В. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат. 1990. – 638 с.