

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

НАМАНГАНСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-  
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

КАФЕДРЫ: ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКА

**Курсовой проект**

**« Расчет силового трехфазного двухобмоточного  
трансформатора с естественным масляным  
охлаждением ».**

Вариант №12.

Выполнил: студент 44-ЭЭ-14  
Сулайманов М

Проверила: ассистентка  
Вахабова С. К

Наманган- 2016 г.

## Содержание.

<i>1. Условие и исходные данные курсовой работы –</i>	3 стр.
<i>2. Расчет основных электрических величин и определение изоляционных расстояний -</i>	4 - 6 стр.
<i>3. Определение основных размеров -</i>	6 стр.
<i>4. Расчет обмотки НН –</i>	7 – 9 стр.
<i>5. Расчет обмотки ВН -</i>	11 – 16 стр.
<i>6. Расчет параметров короткого замыкания -</i>	16 – 17 стр.
<i>7. Расчет напряжения короткого замыкания -</i>	17 - 18 стр.
<i>8. Расчет магнитной системы -</i>	18 – 20 стр.
<i>9. Расчет потерь и тока холостого хода -</i>	20 – 22 стр.
<i>10. Тепловой расчет трансформатор -</i>	22 – 29 стр.
<i>11. Список литературы -</i>	30 стр.

## 1. Условие и исходные данные курсовой работы.

Рассчитать силовой трехфазный двухобмоточный трансформатор с естественным масляным охлаждением (теория вопроса, общая методика расчета и справочный материал в виде таблиц, графических зависимостей и рисунков даются по книге «Расчет трансформаторов» автор П.М. Тихомиров М.: Энергоатомиздат, 1986).

Исходные данные:

- полная мощность трансформатора  $S = 400$  кВА;
- число фаз  $m = 3$ ;
- частота тока в сети  $f = 50$  Гц;
- номинальное линейное напряжение обмотки высшего напряжения (ВН)  $U_{1н} = 10$  кВ;
- номинальное линейное напряжение обмотки низшего напряжения (НН)  $U_{2н} = 0,4$  кВ;
- ток холостого хода -  $i_0 = 2,1$  %,
- потери холостого хода -  $P_x = 1,05$  кВт,
- напряжение короткого замыкания -  $U_k = 4,5$  %,
- потери короткого замыкания -  $P_k = 5,5$  кВт.
- способ регулирования напряжения, число ступеней и пределы регулирования - ПБВ 2 x 2,5% (переключением без возбуждения на стороне ВН, т.е. ручным переключением, 2 ступени каждая по 2,5%);
- схема и группа соединения обмоток - Y/Δ- 11;
- материал сердечника (магнитопровода) и обмоток - холоднокатаная текстурованная рулонная сталь 3404, медь;
- режим работы и способ охлаждения - длительный, естественный масляный,
- характер установки - внутренняя (внутри помещения).

## 2. Расчет основных электрических величин и определение изоляционных расстояний.

Расчет проводится для трехфазного трансформатора с плоской шихтованной магнитной системой, с концентрическими обмотками из медного провода.

Определение основных электрических величин по § 3.2. Мощность одной фазы и одного стержня

$$S_{\phi} = S' = S/m = 400/3 = 133 \text{ кВА.}$$

Номинальные токи:  $I = S/\sqrt{3} \cdot U$ , где  $S$  - в кВА,  $U$  - в кВ  
на стороне ВН

$$I_1 = 400/\sqrt{3} \cdot 10 = 23 \text{ А;}$$

на стороне НН

$$I_2 = 400/\sqrt{3} \cdot 0.4 = 577 \text{ А}$$

Фазные токи:

$$\text{ВН } I_{\phi 1} = 23 \text{ А;}$$

$$\text{НН } I_{\phi 2} = 577/\sqrt{3} = 333 \text{ А.}$$

Фазные напряжения:

$$\text{ВН } U_{\phi 1} = 10000/\sqrt{3} = 5774 \text{ В;}$$

$$\text{НН } U_{\phi 1} = 400 \text{ В.}$$

Испытательные напряжения (см. табл. 4.1): обмотки ВН  $U_{исп1} = 35$  кВ; обмотки НН  $U_{исп2} = 18$  кВ.

По табл. 5.8 выбираем тип обмоток: обмотка ВН при напряжении 10 кВ и токе 23 А — выбрали цилиндрическую многослойную из кругового провода; обмотка НН при напряжении 0,4 кВ и токе 333 А — выбрали цилиндрическая двухслойная обмотка из прямоугольного провода.

Для испытательного напряжения обмотки ВН  $U_{исп1} = 35$  кВ по табл. 4.5 находим изоляционные расстояния (см. рис. )  $a_{12} = 9$  мм;  $l_{02} = 30$  мм;  $a_{22} = 10$  мм.

Для испытательного напряжения обмотки НН  $U_{исп2} = 18$  кВ по табл. 4.4 найдем  $a_{01} = 5$  мм.

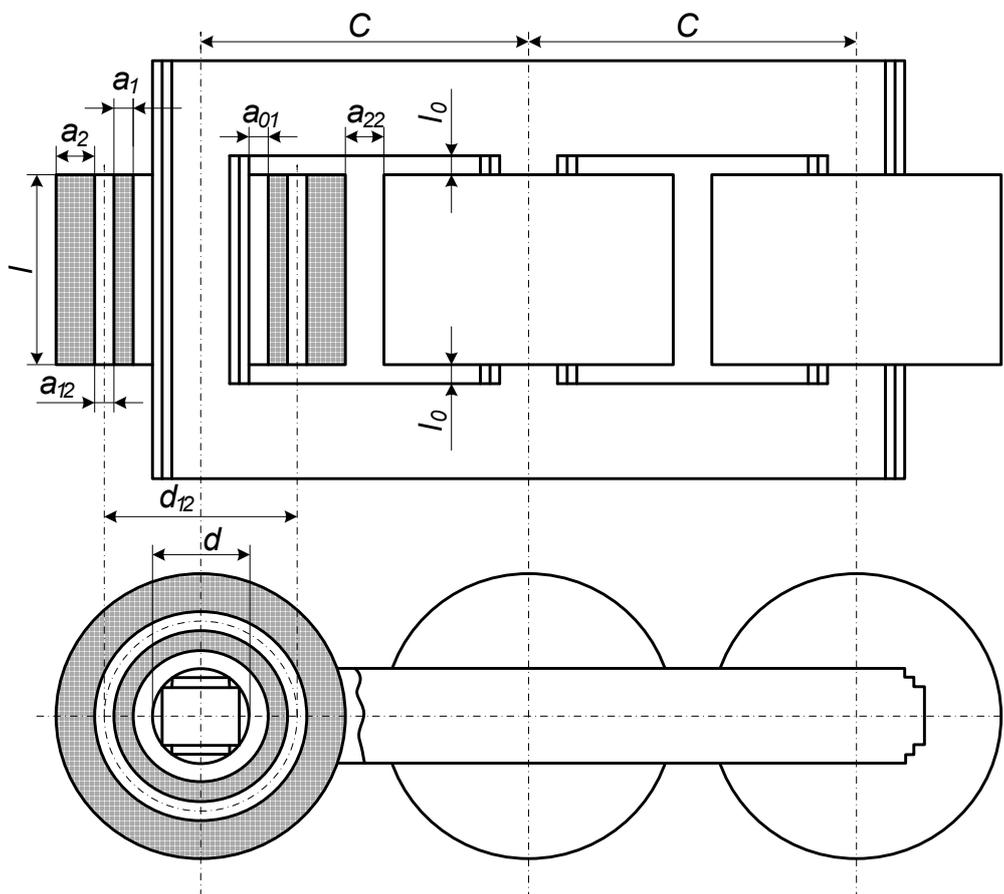


Рис. Основные размеры трансформатора

Определение исходных данных расчета. Мощность обмоток одного стержня  $S'=133$  кВА.

Ширина приведенного канала рассеяния

$$\underline{a_p} = \underline{a_{12}} + (\underline{a_1} + \underline{a_2})/3;$$

$(\underline{a_1} + \underline{a_2})/3 = 1,25 * k * S'^{(1/4)} * 10^{-2} = 1,25 * 0,53 * 133^{(1/4)} * 10^{-2} = 0,0225$  м (см. табл. 3.3, прим. 1);

$$\underline{a_p} = 0,009 + 0,0225 = 0,0315 \text{ м.}$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$\underline{u_a} = \underline{P_k} / (10S) = 5500 / (10 * 400) = 0,1375 \text{ \%}.$$

Реактивная составляющая

$$\underline{u_p} = \sqrt{4,5^2 - 0,1375^2} = 4,28 \text{ \%}.$$

Согласно указаниям § 2.3 выбираем трехфазную стержневую шихтованную магнитную систему с косыми стыками на крайних стержнях и комбинированными «полукосыми» на среднем стержне по рис. 2.17, в. Прессовка стержней бандажами

из стеклоленты — по рис. 2.18,6 и ярм— стальными балками по рис. 2.21, а. Материал магнитной системы — холоднокатаная текстурованная рулонная сталь марки 3404 толщиной 0,35 мм. Индукция в стержне  $B_c = 1,6$  Тл (по табл. 2.4). В сечении стержня 6 ступеней, коэффициент заполнения круга  $k_{кр} = 0,913$  (см. табл. 2.5), изоляция пластин — нагревостойкое изоляционное покрытие,  $k_3 = 0,97$  (табл. 2.3). Коэффициент заполнения сталью  $k_c = k_{кр} * k_3 = 0,913 * 0,97 = 0,886$ . Ярмо многоступенчатое, число ступеней 5, коэффициент усиления ярма  $k_я = 1,015$  (см. табл. 8.7). Индукция в ярме  $B_я = 1,6 / 1,015 = 1,576$  Тл. Число зазоров в магнитной системе на косом стыке 6, на прямом 2. Индукция в зазоре на прямом стыке  $B_з'' = 1,60$  Тл, на косом стыке  $B_з' = B_c / \sqrt{2} = 1,60 / \sqrt{2} = 1,131$  Тл.

Удельные потери в стали  $p_c = 1,295$  Вт/кг;  $p_я = 1,242$  Вт/кг. Удельная намагничивающая мощность  $q_c = 1,795$  ВА/кг;  $q_я = 1,655$  ВА/кг; для зазоров на прямых стыках  $q_з'' = 23\,500$  В-А/м<sup>2</sup>, для зазора на косых стыках  $q_з' = 3000$  В-А/м<sup>2</sup> (табл. 8.10, 8.17).

По табл. 3.6 находим коэффициент, учитывающий отношение потерь в обмотках к потерям короткого замыкания  $k_d = 0,95$  и по табл. 3.4 и 3.5 — постоянные коэффициенты для медных обмоток  $a = 1,33$  и  $b = 0,42$ .

Принимаем  $k_p = 0,95$ .

### **3. Определение основных размеров. (по § 3.6)**

Диаметр стержня

$$d = A * \beta^{(1/4)}$$

,где  $\beta$  — соотношение размеров, выбирается по таблице 3.12. Я принимаю для своего расчета  $\beta = 1,9$ .

$$A = 0,507 * ((S' * a_p * k_p) / (f * u_p * B_c^2 * k_c^2))^{(1/4)}$$

$$A = 0,507 * ((133 * 0,0315 * 0,95) / (50 * 4,28 * 1,6^2 * 0,886^2))^{(1/4)} = 0,157$$

$$d = 0,157 * 1,9^{(1/4)} = 0,18 \text{ м.}$$

Окончательно принимаем  $d = 0,18$  м.

Средний диаметр обмоток НН и ВН

$$d_{12} = a * d$$

$$d_{12} = 1,33 * 0,18 = 0,246 \text{ м.}$$

Ориентировочная высота обмоток

$$l = \pi * d_{12} / B_c$$

$$l = 3,14 * 0,246 / 1,6 = 0,41 \text{ м.}$$

Активное сечение стержня по табл. 8.7

$$P_c = k_3 * P_{\text{фс}}$$

где  $P_{\text{фс}}$  - площадь ступечатой фигуры поперечного сечения стержня  
выбираем по таблице 8.7

$$P_c = 0,97 * 232 * 10^{-4} = 0,0226 \text{ м}^2.$$

Напряжение одного витка предварительно

$$u_B = 4,44 * f * B_c * P_c$$

$$u_B = 4,44 * 50 * 1,6 * 0,0226 = 8,02 \text{ В.}$$

#### **4. Расчет обмотки НН (по § 6.3).**

Число витков в обмотке НН

$$w_2 = U_2 / u_B$$

$$w_2 = 400 / 8,02 = 49,87$$

принимаем 50 виток.

Уточнение напряжения одного витка

$$u_B = U_2 / w_2$$

$$u_B = 400 / 50 = 8 \text{ В.}$$

Уточнение индукцию в стержне

$$B_c = u_B / (4,44 * f * P_c)$$

$$B_c = 8 / (4,44 * 50 * 0,0226)$$

Средняя плотность тока в обмотках

$$J_{\text{ср}} = 0,746 * k_D * ((P_k * u_B) / (S * d_{12})) * 10^4$$

$$\underline{J_{cp} = 0.746 * 0.95 * ((5500 * 8) / (400 * 0.246)) * 10^4 = 3,172688 \text{ MA/m}^2}$$

Окончательно принимаем  $3 \text{ MA/m}^2$

По табл. 5.8  $S=400 \text{ кВА}$ , номинальному току группы  $I_2 = 333 \text{ А}$  и напряжению  $0,4 \text{ кВ}$  выбираем цилиндрическую двухслойную обмотку из прямоугольного медного провода. Размер радиального канала предварительно  $h_k = 5 \text{ мм}$ . Согласно § 5.1 число реек по окружности 8.

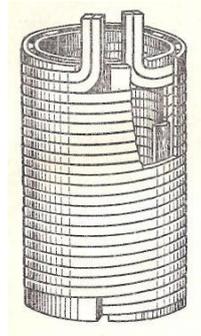


Рис. Двухслойная цилиндрическая обмотка из провода прямоугольного сечения

Число витков в одном слое двухслойной обмотки

$$\underline{w_{cl2} = w_1 / 2.}$$

$$\underline{w_{cl2} = 50 / 2 = 25.}$$

Ориентировочный осевой размер витка, м,

$$\underline{h_{в2} = l_2 / (w_{cl2} + 1)}$$

$$\underline{h_{в2} = 0,41 / (25 + 1) = 0,016 \text{ м.}}$$

Ориентировочное сечение витка,  $\text{м}^2$ ,

$$\underline{(\Pi'_{в})_{HH} = I_{\phi 2} / J_{cp}}$$

$$\underline{(\Pi'_{в})_{HH} = 333,33 * 10^{-6} / 3 = 111,11 * 10^{-6} \text{ м}^2.}$$

По сечению витка по табл. 5.2 выбираем четыре параллельных провода сечением  $29 \text{ мм}^2$ .

МПБ  $4 \times \frac{2,5 \times 11,8}{3 \times 12,3}$  изоляция  $0,5 \text{ мм}$  на две стороны.

Сечение витка

$$\underline{\Pi_2 = 4 * 29 * 10^{-6} = 116 * 10^{-6} \text{ м}^2.}$$

Плотность тока в обмотке НН

$$\underline{J_2 = I_{\phi 2} / \Pi_2}$$

$$J_2 = 333/116 * 10^{(-6)} = 2,9 \text{ МА/м}^2.$$

Осевой размер обмотки, м,

$$l_2 = h_{B2}(w_{cl} + 1) + (0,005 \div 0,015)$$

$$l_2 = 0,016 * (25 + 1) + 0,005 = 0,41 \text{ м.}$$

Радиальный размер обмотки (обозначения по рис. 6.2 и 6.3), м:  
двухслойной

$$a_2 = (2a' + a_{22}) * 10^{-3}$$

$$a_2 = (2 * 3 + 10) * 10^{-3} = 0,016 \text{ м.}$$

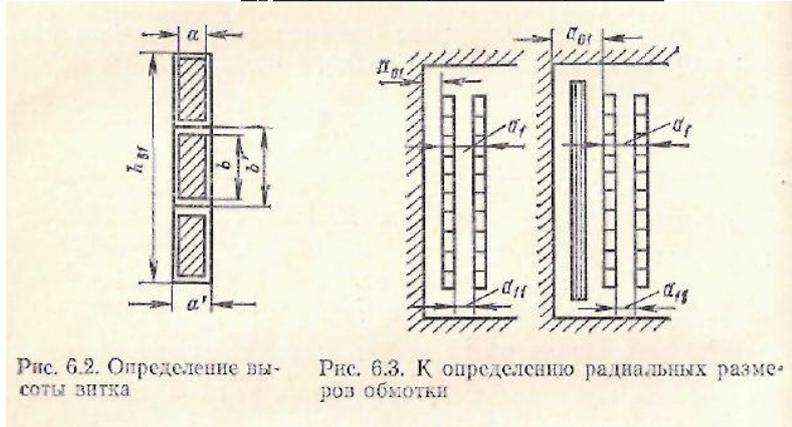


Рис. 6.2. Определение высоты витка

Рис. 6.3. К определению радиальных размеров обмотки

Внутренний диаметр обмотки, м,

$$D'_2 = d + 2 * a_{01} * 10^{-3}$$

$$D'_2 = 0,41 + 2 * 5 * 10^{-3} = 0,19 \text{ м.}$$

Наружный диаметр обмотки, м,

$$D''_2 = D'_2 + 2a_2$$

$$D''_2 = 0,19 + 2 * 0,016 = 0,227 \text{ м.}$$

Средний диаметр

$$D_{cp2} = (D'_2 + D''_2) / 2$$

$$D_{cp2} = (0,19 + 0,227) / 2 = 0,211 \text{ м.}$$

Масса металла

$$G_{M2} = 28 * 10^3 * c * D_{cp2} * w * l_2$$

где c - число активных стержней трансформатора.

$$G_{M2} = 28 * 10^3 * 3 * 0,211 * 50 * 116 * 10^{-6} = 103 \text{ кг.}$$

Масса провода

$$G_{\text{пр}2} = \kappa * G_{\text{М}2}$$

где  $\kappa$  – коэффициент ориентировочное увеличение массы прямоугольного медного провода в процентах за счет изоляции по таблице 5.5 выбрали 1,05

$$G_{\text{пр}2} = 1,05 * 103 = 108 \text{ кг.}$$

Однослойная обмотка и двухслойная без охлаждающего канала между слоями имеют две охлаждаемые поверхности. Полная охлаждаемая поверхность обмотки НН,  $\text{м}^2$ , для всего трансформатора в этом случае

$$P_{02} = c * k_3 * \pi * (D'_2 + D''_2) * l_2$$

$$P_{02} = 3 * 0,97 * 3,14 * (0,19 + 0,227) * 0,41 = 2 \text{ м}^2.$$

Основные потери короткого замыкания в НН

$$P_{\text{осн}2} = 2,4 * 10^{-12} * J^2 * G_{\text{М}}$$

$$P_{\text{осн}2} = 2,4 * 10^{-12} * 2,9^2 * 10^{12} * 103 = 2035 \text{ Вт.}$$

После определения потерь короткого замыкания для обмотки НН (см. §7.1) следует найти плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , на поверхности обмотки

$$q_2 = (P_{\text{осн}2} * k_{\text{д}2}) / P_{02}$$

где  $k_{\text{д}2} = 1 + 0,095 * 10^8 * \beta^2 * a^4 * n^2$

$$\beta = (b * m / l) * k_p$$

$$\beta = (11,8 * 10^{-3} * 4 / 0,41) * 0,95 = 0,11$$

$$k_{\text{д}2} = 1 + 0,095 * 10^8 * 0,11^2 * (2,5 * 10^{-3})^4 * 8^2 = 1,00033$$

где  $n$  — число проводников обмотки в направлении, перпендикулярном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния;  $m$  — число проводников обмотки в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния;  $a$  — размер проводника в направлении, перпендикулярном линиям магнитной индукции поля рассеяния;  $b$  — размер проводника в направлении, параллельном линиям магнитной индукции поля рассеяния;  $l$  — общий размер обмотки в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния;  $k_p$  — коэффициент приведения поля рассеяния (см. § 7.2).

$$q_2 = (2035 * 0,95) / 2 = 1286 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

меньше допустимого ( $q_{\text{доп}} \leq 1200 \div 1400 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ).

## 5. Расчет обмотки ВН (по § 6.3).

Расчет обмоток ВН начинается с определения числа витков, необходимого для получения номинального напряжения, для напряжений всех ответвлений. Число витков при номинальном напряжении определяется по формуле

$$\underline{w_{H1} = w_2 * (U_{\phi 1} / U_{\phi 2})}$$

$$\underline{w_{H1} = 50 * (5774 / 400) = 722.}$$

Число витков па одной ступени регулирования напряжения при соединении обмотки ВН в звезду

$$\underline{w_p = \Delta U / (u_B * \sqrt{3})}$$

$$\underline{w_p = (10000 * 0,025) / (8 * \sqrt{3}) = 18,04}$$

принемаем

$$\underline{w_p = 18}$$

где  $\Delta U$  — напряжение на одной ступени регулирования обмотки или разность напряжений двух соседних ответвлений, В;  $u_B$  — напряжение одного витка обмотки, В.

Обычно ступени регулирования напряжения выполняются равными между собой, чем обуславливается также и равенство числа витков на ступенях. В этом случае число витков обмотки на ответвлениях

На четырех ступенях:

верхние ступени напряжения ....  $\underline{w_1 = w_{H1} + 2w_p, w_{H1} + w_p}$ ;

при номинальном напряжении:  $\underline{w_{H1}}$

нижние ступени напряжения ....  $\underline{w_{H1} - w_p, w_{H1} - 2w_p}$ .

Напряжение, В

число витков на ответвлениях

$$\underline{U_{H1} + 2 * 0,025 * U_{H1}}$$

$$\underline{w_1 = w_{H1} + 2w_p}$$

$$\underline{U_{H1} + 0,025 * U_{H1}}$$

$$\underline{w_1 = w_{H1} + w_p}$$

$$\underline{U_{H1}}$$

$$\underline{w_1}$$

$$\underline{U_{H1} - 0,025 * U_{H1}}$$

$$\underline{w_1 = w_{H1} - w_p}$$

$$\underline{U_{H1} - 2 * 0,025 * U_{H1}}$$

$$\underline{w_1 = w_{H1} - 2w_p}$$

напряжение, В	Число витков на ответвлениях
10500	758
10250	740
10000	722
9750	704
9500	686

Для трехфазного трансформатора или однофазного с параллельным соединением обмоток двух стержней найденное число витков  $w_1 = w_{H1} + 2w_p$  или  $w_1 = w_{H1} - 2w_p$  является числом витков на один стержень.

Осовой размер обмотки ВН  $l_1$  принимается равным ранее определенному осевому размеру обмотки НН  $l_2$ .

Плотность тока, А/м<sup>2</sup>, в обмотке ВН предварительно определяется по формуле

$$J_1 = 2 * J_{CP} - J_2$$

$$J_1 = 2 * 3 * 10^6 - 2,9 * 10^6 = 3,5 * 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Сечение витка обмотки ВН, мм<sup>2</sup>

$$(\Pi'_{ВН})_{ВН} = I_{\phi 1} / (J_{CP} * 10^{-6})$$

$$(\Pi'_{ВН})_{ВН} = 23 / 3 = 6,7 \text{ мм}^2$$

По таблице 5,8 — выбрали цилиндрическую многослойную из кругового провода (S= 400 кВА; I= 23 А; U<sub>H1</sub>=10000 В; П'1 =6,7 мм<sup>2</sup>)

**Расчет многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода.**

$\Pi''_1 = (\Pi'_{ВН})_{ВН} / n_{В1} = 6,7 / 2 = 3,3$  — сечение одного провода, мм<sup>2</sup>. Окончательно принимаем  $\Pi''_1 = 3,53 \text{ мм}^2$ . По этому сечению и сортаменту обмоточного провода для трансформаторов (см. табл. 5.1) подбирается провод подходящего сечения или в редких случаях два параллельных одинаковых провода с диаметрами провода без изоляции  $d_2$  и провода в изоляции  $d''_2$ , мм. Подобранные размеры провода записываются так:

$$\text{Марка провода} \times n_{В1} \times \frac{d1}{d''1}$$

$$\text{ПБ} \times 2 \times \frac{2,12}{3,95}$$

где  $n_{в1}$  — число параллельных проводов,

Полное сечение витка,  $m^2$ ,

$$\underline{\Pi_1 = n_{в1} * \Pi''_1 * 10^{-6}}$$

$$\underline{\Pi_1 = 2 * 3,53 * 10^{-6} = 7,06 * 10^{-6} m^2}$$

где  $\Pi''_1$  — сечение одного провода,  $mm^2$ . Полученная плотность тока,  $A/m^2$ ,

$$\underline{J_1 = I_{\Phi 1} / \Pi_1}$$

$$\underline{J_1 = 23 / 7,06 * 10^{-6} = 3,27 * 10^6 A/m^2.}$$

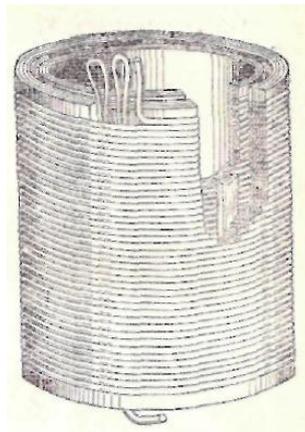


Рис. Многослойная цилиндрическая обмотка из провода круглого сечения.

Число витков в слое

$$\underline{w_{сл1} = I_1 * 10^3 / (n_{в1} * d''1) - 1}$$

$$\underline{w_{сл1} = 0,41 * 10^3 / (2 * 3,95) - 1 = 52}$$

Число слоев в обмотке

$$\underline{n_{сл1} = w_1 / w_{сл1}}$$

$$\underline{n_{сл1} = 722 / 52 = 14}$$

( $n_{сл1}$  округляется до ближайшего большего числа).

Рабочее напряжение двух слоев, В,

$$\underline{U_{мсл} = 2 * w_{сл1} * u_{в.}}$$

$$\underline{U_{мсл} = 2 * 52 * 8,02 = 834,18 В.}$$

По рабочему напряжению двух слоев по табл. 4.7 в соответствии с указаниями § 4.5 выбираются число слоев и общая толщина  $\delta_{мсл}$  кабельной бумаги в изоляции между двумя слоями обмотки ( $2 * \delta_{мсл} = 0,12$  мм). Минимальная ширина

масляного канала между катушками  $a_{22}$  выбирается по табл. 9.2.

Радиальный размер обмотки, м: две катушки без экрана

$$a_1 = \frac{(d''_1 * n_{сл1} + \delta_{мсл} * (n_{сл1} - 1) + a_{22}) * 10^{-3}}{1}$$
$$a_1 = \frac{(3,95 * 14 + 0,24 * (14 - 1) + 10) * 10^{-3}}{1} = 0,01314 \text{ м.}$$

В обмотках классов напряжений 20 и 35 кВ под внутренним слоем обмотки устанавливается металлический экран — незамкнутый цилиндр из алюминиевого листа толщиной 0,5 мм. Экран соединяется электрически с линейным концом обмотки (начало внутреннего слоя) и изолируется от внутреннего слоя обмотки обычно междуслойной изоляцией. Такая же изоляция экрана устанавливается со стороны масляного канала.

При наличии экрана радиальный размер обмотки определяется по формуле

$$a_{2экp} = a_1 + (\delta_{экp} + 2 * \delta_{мсл}) * 10^{-3}$$
$$a_{2экp} = 0,01314 + (0,5 + 2 * 0,12) * 10^{-3} = 0,01412 \text{ м}$$

где  $\delta_{экp} = 0,5$  мм;  $\delta_{мсл}$  по табл. 4.7.

Для рабочего напряжения 35 кВ можно принять дополнительное увеличение радиального размера обмотки за счет экрана и двух слоев междуслойной изоляции на 3 мм. Минимальный радиальный размер  $a'_{12}$ , мм, осевого канала между обмотками НН и ВН и толщина изоляционного цилиндра выбираются по испытательному напряжению обмотки ВН согласно § 4.5. ( $a'_{12} = 9$  мм)

$$a_{12экp} = (a'_{12} + \delta_{экp} + 2 * \delta_{мсл}) * 10^{-3}$$
$$a_{12экp} = (9 + 0,5 + 0,12) * 10^{-3} = 0,00998 \text{ м.}$$

Внутренний диаметр обмотки (при наличии экрана — до его внутренней изоляции), м,

$$D'_1 = D''_2 + 2a_{12}$$
$$D'_1 = 0,227 + 2 * 9 * 10^{-3} = 0,245 \text{ м.}$$

Наружный диаметр обмотки: с экраном

$$D''_1 = D'_1 + 2 * a_{2экp}$$
$$D''_1 = 0,245 + 2 * 0,01314 = 0,273 \text{ м.}$$

Поверхность охлаждения, м<sup>2</sup>,

$$\underline{\Pi_{01}} = c * n * k * \pi * (D'_{11} + D''_{11}) * l$$

где  $c$  — число активных стержней магнитной системы.

Для двух катушек по рис. 5.22,  $\partial n = 2$ ;  $k = 0,8$ .

$$\underline{\Pi_{01}} = 3 * 2 * 0,8 * 3,14 * (0,245 + 0,273) * 0,41 = 3,17 \text{ м}^2.$$

Средний диаметр

$$D_{cp1} = (D'_{11} + D''_{11}) / 2$$

$$D_{cp1} = (0,245 + 0,273) / 2 = 0,259 \text{ м.}$$

Масса металла

$$G_{M1} = 28 * 10^3 * c * D_{cp1} * w_{H1} * \Pi_1$$

где  $c$  — число активных стержней трансформатора.

$$\underline{G_{M1}} = 28 * 10^3 * 3 * 0,259 * 722 * 7,06 * 10^{-6} = 111 \text{ кг.}$$

Масса провода

$$G_{пр1} = k * G_{M1}$$

где  $k$  — коэффициент ориентировочное увеличение массы прямоугольного медного провода в процентах за счет изоляции по таблице 5.5 выбрали 1,05

$$\underline{G_{пр1}} = 1,1 * 103 = 126 \text{ кг.}$$

Основные потери короткого замыкания в НН

$$P_{осч1} = 2,4 * 10^{-12} * J^2 * G_{M1}$$

$$\underline{P_{осч1}} = 2,4 * 10^{-12} * 3^2 * 10^{12} * 111 = 2845 \text{ Вт.}$$

После определения потерь короткого замыкания для обмотки НН (см. §7.1) следует найти плотность теплового потока,  $\text{Вт/м}^2$ , на поверхности обмотки

$$q_1 = (P_{осч1} * k_{д1}) / \Pi_{01}$$

где  $k_{д1} = 1 + 0,095 * 10^8 * \beta_1^2 * d^4 * n^2$

$$\beta_1 = (d * m / l) * k_p$$

$$\beta = (2,12 * 10^{-3} * 2 / 0,41) * 0,95 = 0,01$$

$$\underline{k_{д1}} = 1 + 0,095 * 10^8 * 0,01^2 * (2,12 * 10^{-3})^4 * 8^2 = 1,000007$$

где  $n$  — число проводников обмотки в направлении, перпендикулярном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния;  $m$  — число проводников обмотки в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния;  $l$  — общий размер обмотки в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния;  $d$  —

диаметр круглого проводника;  $k_p$  — коэффициент приведения поля рассеяния (см. § 7.2).

$$q_2 = (2845 * 1,000007) / 3,17 = 853 \text{ Вт/м}^2.$$

меньше допустимого ( $q_{\text{доп}} \leq 1200 \div 1400 \text{ Вт/м}^2$ ).

## **6. Расчет параметров короткого замыкания.**

Основные потери в отводах:

отводы НН

общую длину проводов для соединения в треугольник

$$l_{\text{отв2}} = 14 * 1$$

$$l_{\text{отв2}} = 14 * 0,41 = 5,8 \text{ м};$$

масса металла проводов отводов можно

$$G_{\text{отм2}} = l_{\text{отв2}} * \Pi_2 * \gamma$$

где  $\gamma$  — плотность металла отводов для меди  $8900 \text{ кг/м}^3$

$$G_{\text{отм2}} = 5,8 * 116 * 10^{-6} * 8900 = 5,94 \text{ кг.}$$

$$P_{\text{отв2}} = k * G_{\text{отм2}} * J_2^2$$

где  $k$  выбирается в зависимости от металла отводов для меди выбрали  $2,4 * 10^{-12}$

$$P_{\text{отв2}} = 2,4 * 10^{-12} * 5,94 * (2,88 * 10^6)^2 = 118 \text{ Вт};$$

отводы ВН

общую длину проводов для соединения в звездой

$$l_{\text{отв1}} = 7,5 * 1$$

$$l_{\text{отв1}} = 7,5 * 0,41 = 3 \text{ м};$$

масса металла проводов отводов можно

$$G_{\text{отм1}} = l_{\text{отв1}} * \Pi_1 * \gamma$$

где  $\gamma$  — плотность металла отводов для меди  $8900 \text{ кг/м}^3$

$$G_{\text{отм1}} = 3 * 7,06 * 10^{-6} * 8900 = 0,2 \text{ кг.}$$

$$P_{\text{отв1}} = k * G_{\text{отм1}} * J_1^2$$

где  $k$  выбирается в зависимости от металла отводов для меди выбрали  $2,4 * 10^{-12}$

$$P_{\text{отв1}} = 2,4 * 10^{-12} * 0,2 * (3 * 10^6)^2 = 5 \text{ Вт};$$

Потери в стенках бака и других элементах конструкции до выяснения размеров бака определяем приближенно по (7.25) и  $K$  находим по табл. 7.1 принимаем для нашего расчета  $K = 0,015$

$$P_{\text{б}} = 10 * K * S$$

$$P_{\text{б}} = 10 * 0,015 * 400 = 60 \text{ Вт.}$$

Полные потери короткого замыкания

$$P_{\text{к ном}} = P_{\text{очн1}} * k_{\text{д1}} + P_{\text{очн2}} * k_{\text{д2}} + P_{\text{отв2}} + P_{\text{отв1}} + P_{\text{б}}$$

$$P_{\text{к ном}} = 2845 * 1,000007 + 2035 * 1,00033 + 118 + 5 + 60 = 5063,32 \text{ Вт,}$$

$$\frac{(P_{\text{к}} - P_{\text{к ном}})}{P_{\text{к}}} * 100$$

$$\frac{(5500 - 5063,32)}{5500} * 100 = 7,94 \%$$

## 7. Расчет напряжения короткого замыкания (по § 7.2).

Активная составляющая

$$u_{\text{а}} = P_{\text{к ном}} / (10 * S)$$

$$u_{\text{а}} = 5063,32 / (10 * 400) = 1,27 \%$$

Реактивная составляющая

$$u_{\text{р}} = \frac{(7,92 * f * S' * \beta * a_{\text{р}} * k_{\text{р}})}{u_{\text{в}}^2} * 10^{-3}$$

$$u_{\text{р}} = \frac{(7,92 * 50 * 133 * 1,9 * 0,0315 * 0,95)}{8,02^2} * 10^{-3} = 4,66 \%$$

Напряжение короткого замыкания

$$u_{\text{к}} = \sqrt{u_{\text{а}}^2 + u_{\text{р}}^2}$$

$$u_{\text{к}} = \sqrt{1,27^2 + 4,66^2} = 4,83 \%$$

или

$$\frac{(u_{\text{кз}} - u_{\text{к}})}{u_{\text{кз}}} * 100$$

$$\frac{(4,5 - 4,83)}{4,5} * 100 = - 7,23 \%$$

**Установившийся ток короткого замыкания** в обмотке ВН по (7.38) и табл. 7.2.

$$I_{\text{кв}} = \frac{(100 * I_{\text{ном}})}{u_{\text{к}} * (1 + ((100 * S_{\text{ном}}) / (u_{\text{к}} * S_{\text{к}})))}$$

$$I_{\text{кв}} = \frac{(100 * 23)}{(4,83 * (1 + ((100 * 400) / (4,83 * 500000))))} = 470,8 \text{ А}$$

где  $S_{\text{к}}$  - выбирается по таблице 7.2.

Мгновенное максимальное значение тока короткого замыкания

$$i_{\text{к max}} = 1,41 * k_{\text{м}} * I_{\text{кв}}$$

где при  $u_p / u_a = 4,66 / 1,27 = 4$  по табл. 7.3  $k_M \sqrt{2} = 2,09$ .

$$\underline{i_{kmax}} = 2,09 * 470 = 984 \text{ А.}$$

Радиальная сила по (7.43)

$$\underline{F_p} = 0,628 (i_{kmax} * w)^2 * \beta * k_p * 10^{-6}$$

$$\underline{F_p} = 0,628 (984 * 722)^2 * 1,9 * 0,95 * 10^{-6} = 571613 \text{ Н.}$$

Среднее растягивающее напряжение в проводах обмотки ВН по (7.48) и (7.49)

$$\underline{\sigma_p} = F_p / (2 * \pi * w_1 * \Pi_1)$$

$$\underline{\sigma_p} = 571613 / (2 * 3,14 * 722 * 6,7 * 10^{-6}) = 18,96 \text{ МПа.}$$

Среднее сжимающее напряжение в проводах внутренней обмотки

$$\underline{\sigma_p} = F_p / (2 * \pi * w_2 * \Pi_2)$$

$$\underline{\sigma_p} = 571613 / (2 * 3,14 * 50 * 111,11 * 10^{-6}) = 15,69 \text{ МПа.}$$

## **8. Расчет магнитной системы (по § 8.1 – 8.3).**

Выбираем конструкцию плоской трехфазной магнитной системы, собираемой в переплет (шихтованной), с четырьмя косыми стыками и комбинированными «полу косыми» на среднем стержне. Стержень прессуется бандажами из стеклоленты, ярма — балками и стальными полубандажами. Обмотки прессуются прессующими кольцами. Сечение стержня с 6 ступенями без прессующей пластины, размеры пакетов по табл. 8.5. Сечение ярма повторяет сечение стержня, три последних пакета ярма объединены в один; в ярме 5 ступеней. В стержне и ярме два продольных канала по 3 мм.

Полное сечение стержня

$$\underline{\Pi_{фс}} = 232,8 \text{ см}^2 \text{ (табл. 8.7).}$$

Активное сечение

$$\underline{\Pi_c} = k_3 * \Pi_{фс}$$

$$\underline{\Pi_c} = 0,97 * 235 = 228 \text{ см}^2.$$

Полное сечение ярма

$$\underline{\Pi_{фя}} = 242 \text{ см}^2.$$

Активное сечение ярма

$$\underline{\Pi_{я} = k_3 * \Pi_{фя}}$$

$$\underline{\Pi_{я} = 0,97 * 242 = 235 \text{ см}^2.}$$

Общая толщина пакетов в половине сечения стержня (по таблице 8.5)

$$\underline{0,8 + 0,9 + 0,8 + 0,13 + 0,25 + 0,21 = 3,09 \text{ см.}}$$

Ширина ярма

$$\underline{b_{я} = 2 * 3,09 = 6,18 \text{ см.}}$$

Длина стержня при наличии нажимного кольца по (8.3)

$$\underline{l_c = (1 + 2 * l_0) * 10^{-3}}$$

$$\underline{l_c = (410 + 2 * 30) * 10^{-3} = 0,47 \text{ м.}}$$

Расстояние между осями соседних стержней

$$\underline{C = D_{1}'' + a_{22}}$$

$$\underline{C = 0,273 + 0,01 = 0,283 \text{ м.}}$$

Объем угла по табл. 8.7  $V_y = 3452 \text{ см}^3$ ,  $\gamma_{ст} = 7650 \text{ кг / м}^3$ .

Масса стали угла по (8.6)

$$\underline{G_y = k_3 * V_y * \gamma_{ст} * 10^{-6}}$$

$$\underline{G_y = 0,97 * 3452 * 7650 * 10^{-6} = 26 \text{ кг.}}$$

Масса стали стержней в пределах окна магнитной системы по (8.12)

$$\underline{G'_c = c * \Pi_c * l_c * \gamma_{ст}}$$

$$\underline{G'_c = 3 * 226 * 10^{-4} * 0,44 * 7650 = 254 \text{ кг.}}$$

Масса стали в местах стыка пакетов стержня и ярма по (8.13)

$$\underline{G''_c = c * (\Pi_c * a_{1я} * \gamma_{ст} * 10^{-3} - G_y)}$$

$$\underline{G''_c = 3 * (228 * 10^{-4} * 0,175 * 7650 * 10^{-3} - 25,6) = 14 \text{ кг.}}$$

Масса стали стержней

$$\underline{G_c = G'_c + G''_c}$$

$$\underline{G_c = 254 + 14 = 267 \text{ кг.}}$$

Масса стали в ярмах по (8.8) — (8.10)

$$G'_{я} = 2 * (c - 1) * C * \Pi_{я} * \gamma_{ст}$$

$$G'_{я} = 2 * (3 - 1) * 0,283 * 235 * 10^{-3} * 7650 = 203 \text{ кг};$$

$$G''_{я} = 2 * G_y$$

$$G''_{я} = 2 * 26 = 52 \text{ кг};$$

$$G_{я} = G'_{я} + G''_{я}$$

$$G_{я} = 203 + 52 = 255 \text{ кг}.$$

Полная масса стали трансформатора

$$G_{ст} = G_c + C_{я} = 267 + 255 = 522 \text{ кг}.$$

## **9. Расчет потерь и тока холостого хода (по § 8.2).**

Магнитная система шихтуется из электротехническом тонколистовой рулонной холоднокатаной текстурованной стали марки 3404 толщиной 0,35 мм.

Индукция в стержне

$$B_c = u_B / (4,44 * f * \Pi_c)$$

$$B_c = 8,02 / (4,44 * 50 * 228 * 10^{-4}) = 1,6 \text{ Тл}.$$

Индукция в ярме

$$B_{я} = u_B / (4,44 * f * \Pi_{я})$$

$$B_{я} = 8,02 / (4,44 * 50 * 235 * 10^{-4}) = 1,54 \text{ Тл}.$$

По табл. 8.10 находим удельные потери:

при  $B_c = 1,6$  Тл;  $p_c = 1,32$  Вт/кг;  $p_{з,с} = 650$  Вт/м<sup>2</sup> (шихтовка в одну пластину);

при  $B_{я} = 1,54$  Тл;  $p_{я} = 1,54$  Вт/кг;

при  $B_3 = 1,6 / \sqrt{2} = 1,12$  Тл;  $p_3 = 360$  Вт/м<sup>2</sup>.

По тексту гл. 8 и табл. 8.13 находим коэффициенты для стали 3404 толщиной 0,35 мм при наличии отжига:  $k_{п,я} = 1,0$ ;  $k_{п,р} = 1,05$ ;  $k_{п,з} = 1,0$ ;  $k_{п,л} = 1,0$ ;  $k_{п,ш} = 1,02$ ;

$k_{п,п} = 1,03$ ;  $k_{п,у} = 9,38$ .

Число косых зазоров 5, прямых — 1.

$$P_x = (k_{п,р} * k_{п,з} * (p_c * G_c + p_{я} * G'_{я} - 4 * p_{я} * G_y + ((p_c + p_{я}) / 2) * k_{п,у} * G_y) + \sum p_3 * n_3 * \Pi_3) * k_{п,я} * k_{п,п} * k_{п,ш}$$

$$P_x = \frac{(1,05 * 1 * (1,32 * 267 + 1,54 * 203 - 4 * 1,54 * 26 + ((1,32 + 1,54) / 2) * 9,38 * 26) + 650 * 1 * 228 / \sqrt{2} * 10^{-4} + 360 * 5 / \sqrt{2} * 228 * 10^{-4}) * 1,0 * 1,03 * 1,02}{=} = 893 \text{ Вт}$$

Потери холостого хода  $P_x = 893 \text{ Вт}$ , или  $((1050 - 893) / 50) * 100 = 15 \%$ .

По табл. 8.17 находим удельные намагничивающие мощности:

при  $B_c = 1,6 \text{ Тл}$ ;  $q_c = 1,8 \text{ ВА/кг}$ ;  $q_{3,c} = 24000 \text{ ВА/м}^2$  (шихтовка в одну пластину);

при  $B_y = 1,54 \text{ Тл}$ ;  $q_y = 1,6 \text{ ВА/кг}$ ;

при  $B_z = 1,6 / \sqrt{2} = 1,12 \text{ Тл}$ ;  $q_z = 3500 \text{ ВА/м}^2$

По тексту гл. 8 и табл. 8.12, 8.20 и 8.21 находим коэффициенты:  $k_{т,р} = 1,18$ ;  $k_{т,з} = 1,0$  (при наличии отжига пластин);  $k_{т,у} = 35,2$ ;  $k_{т,пл} = 1,2$ ;  $k_{т,я} = 1,0$ ;  $k_{т,п} = 1,05$ ;  $k_{т,ш} = 1,02$ .

$$Q_x = (k_{т,р} * k_{т,з} * (q_c * G_c + q_y * G_y - 4 * q_y * G_y + ((q_c + q_y) / 2) * k_{т,у} * k_{т,пл} * G_y) + \sum q_z * n_z * \Pi_z) * k_{т,я} * k_{т,п} * k_{т,ш}$$

$$Q_x = \frac{(1,18 * 1,0 * (1,8 * 267 + 1,6 * 203 - 4 * 1,6 * 26 + ((1,8 + 1,6) / 2) * 35,2 * 1,2 * 25,6) + 24000 / \sqrt{2} * 1 * 228 * 10^{-4} + 3500 / \sqrt{2} * 5 * 228 * 10^{-4}) * 1,0 * 1,05 * 1,02}{=} = 3864 \text{ ВА}$$

Относительное значение тока холостого хода

$$i_0 = Q_x / (10 * S)$$

$$i_0 = 3864 / (10 * 400) = 1 \%$$

или  $((2,1 - 1) / 2,1) * 100 = 54 \%$ .

Активная составляющая тока холостого хода

$$i_{oa} = P_x / (10 * S)$$

$$i_{oa} = 893 / (10 * 400) = 0,22 \%$$

Реактивная составляющая

$$i_{op} = \sqrt{i_0^2 - i_{oa}^2}$$

$$i_{op} = \sqrt{1^2 - 0,22^2} = 0,94 \%$$

Ток холостого хода (для обмотки НН)

$$I_x = Q_x / (m * U_{ф2})$$

$$I_x = 3864 / (3 * 400) = 3,22 \text{ А}$$

Активная составляющая тока холостого хода, фазное значение,

$$I_{xa} = P_x / (m * U_{\phi 2})$$

$$I_{xa} = 893 / (3 * 400) = 0,74 \text{ A};$$

Реактивная составляющая

$$I_{xp} = \sqrt{I_x^2 - I_{xa}^2}$$

$$I_{xp} = \sqrt{3,41^2 - 0,72^2} = 3,13 \text{ A}$$

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = (1 - ((P_{к ном} + P_x) / (S + P_{к ном} + P_x))) * 100$$

$$\eta = (1 - ((5063,32 + 893) / (400 * 10^3 + 5063,32 + 893))) * 100 = 98,58$$

## 10. Тепловой расчет трансформатора.

Внутренний перепад температуры

Обмотка НН

$$\Theta_0 = \frac{q \cdot \delta}{\lambda_{из}}$$

где

$q_2$  - плотность теплового потока на поверхности обмотки (см. п. Расчет обмотки НН)

$\delta_2$  - толщина изоляции провода на одну сторону  $\delta = \frac{0,005}{2} = 0,0025 \text{ м}$

$\lambda$  - теплопроводность изоляции провода определяемая для различных материалов по таблице

$\lambda_{из1} = 0,17 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$  - Бумага кабельная в масле (табл. 9.1)

$$\Theta_{02} = \frac{q_1 * \delta_1}{\lambda_{\text{ЕЦ1}}} = \frac{1286 * 0,00025}{0,17} = 1,89^\circ\tilde{\text{N}}$$

$$\Theta_{02, \tilde{\text{ND}}} = \frac{2}{3} \cdot \Theta_0$$

$$\Theta_{02, \tilde{\text{ND}}} = \frac{2}{3} \cdot \Theta_0 = \frac{2}{3} \cdot 1,89 = 1,26^\circ\tilde{\text{N}}$$

## Обмотка ВН

Полный внутренний перепад для обмоток не имеющих горизонтальные охлаждающих каналов рассчитывается по формуле

$$\Theta_0 = \frac{p \cdot a^2}{8 \cdot \lambda_{CP}}$$

где

$a$  - радиальный размер катушки.

$p$  - потери, выделяющиеся в  $1\text{ м}^3$  общего объема обмотки

Для медного провода

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

$$p_i = 1,68 \cdot \frac{(3 \cdot 10^6)^2 \cdot (2,12 \cdot 10^{-3})^2}{(3,95 \cdot 10^{-3} + 0,24 \cdot 10^{-3}) \cdot 3,95 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^{-8} = 41059,38 \frac{\text{А} \cdot \text{д}}{\text{д}^3}$$

$\lambda_{CP}$  - средняя теплопроводность обмотки **приведенная к условному случаю** равномерного распределения витковой и межвитковой изоляции по всему объему обмотки, определяется по формуле

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

где

$\lambda_{MC}$  - теплопроводность междуслойной изоляции.  $\lambda_{MC} = 0,17 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$  (табл. 9.1).

$\lambda$  - средняя условная теплопроводность обмотки без учета междуслойной изоляции

$$\lambda = \frac{\lambda_{ИЗ}}{0,7 \cdot \sqrt{\alpha}}$$

где

$\lambda_{ИЗ}$  - теплопроводность материала изоляции витков  $\lambda_{ИЗ} = 0,17$  (табл. 9.1).

$\alpha$  - коэффициент, который рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{d' - d}{d}$$

$$\alpha = \frac{3,95 - 2,12}{2,12} = 0,86$$

$$\lambda = \frac{\lambda_{\tilde{E}\tilde{C}}}{0,7 \cdot \sqrt{\alpha}} = \frac{0,17}{0,7 \cdot \sqrt{0,86}} = 0,261 \frac{\hat{A}\dot{\theta}}{\dot{i} \cdot \tilde{N}}$$

$$\lambda_{\tilde{N}\tilde{D}} = \frac{\lambda \cdot \lambda_{i\tilde{N}} \cdot (d' + \delta_{i\tilde{N}})}{\lambda \cdot \delta_{i\tilde{N}} + \lambda_{i\tilde{N}} \cdot d'}$$

$$\lambda_{\tilde{N}\tilde{D}} = \frac{0,261 \cdot 0,17 \cdot (3,95 \cdot 10^{-3} + 0,24 \cdot 10^{-3})}{0,261 \cdot 0,24 \cdot 10^{-4} + 0,17 \cdot 3,95 \cdot 10^{-3}} = 0,254 \frac{\hat{A}\dot{\theta}}{\dot{i} \cdot \tilde{N}}$$

$$\Theta_{01} = \frac{p \cdot a^2}{8 \cdot \lambda_{\tilde{N}\tilde{D}}} = \frac{41059,38 \cdot 0,01712^2}{8 \cdot 0,254} = 13,29^\circ \tilde{N}$$

Средний перепад температуры

$$\Theta_{01, \tilde{N}\tilde{D}} = \frac{2}{3} \cdot \Theta_0$$

$$\Theta_{01, \tilde{N}\tilde{D}} = \frac{2}{3} \cdot \Theta_0 = \frac{2}{3} \cdot 13,29 = 8,86^\circ \tilde{N}$$

Перепад температуры на поверхности обмотки

Обмотка НН

Перепад на поверхности обмотки НН может быть рассчитан по эмпирической формуле

$$\Theta_{O, M} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot 0,35 \cdot q^{0,6}$$

где

$k_1$  - коэффициент, учитывающий скорость движения масла внутри обмотки; для естественного масляного охлаждения  $k_1 = 1,0$  (стр. 427).

$k_2$  - коэффициент, учитывающий затруднение конвекции масла в каналах внутренних обмоток; для внутренних обмоток НН и СН  $k_2 = 1,1$  (стр. 427).

$k_3$  - коэффициент, учитывающий влияние на конвекцию масла относительной ширины (высоты) горизонтальных масляных каналов.  $k_3 = 0,80$  (табл. 9.3)

$$\Theta_{i, i_2} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot 0,35 \cdot q^{0,6}$$

$$\Theta_{i, i_2} = 1,0 \cdot 1,1 \cdot 0,80 \cdot 0,35 \cdot 1221^{0,6} = 22,6^\circ \tilde{N}$$

## Обмотка ВН

Для цилиндрической обмотки из круглого провода, не имеющей радиальных (горизонтальных) каналов, перепад на поверхности обмотки масляного трансформатора рассчитывается по формуле

$$\Theta_{0,M} = k \cdot q^{0,6}$$

Где

$k$  - коэффициент, учитывающий условия теплообмена  $k = 0,285$

$q$  - плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности (см. п. расчета ВН)

$$\Theta_{0,i_1} = k \cdot q^{0,6}$$

$$\Theta_{i_1,i_1} = 0,285 \cdot 853^{0,6} = 7,32^\circ\tilde{N}$$

Среднее превышение температуры обмотки над средней температурой масла

$$\Theta_{0,M,CP} = \Theta_{0,CP} + \Theta_{0,M}$$

## Обмотка ВН

$$\Theta_{0,i_1, \tilde{N}D1} = \Theta_{0, \tilde{N}D1} + \Theta_{0,i_1}$$

$$\Theta_{i_1,i_1, \tilde{N}D1} = 8,86 + 7,32 = 16,18^\circ\tilde{N}$$

## Обмотка НН

$$\Theta_{0,i_2, \tilde{N}D2} = \Theta_{0, \tilde{N}D2} + \Theta_{0,i_2}$$

$$\Theta_{i_2,i_2, \tilde{N}D2} = 1,26 + 22,60 = 23,86^\circ\tilde{N}$$

Выбираем бак с навесными радиаторами с прямыми трубами (табл. 9.4).

Минимальные расстояния и размеры

$s_1$  - изоляционная расстояние от изолированного отвода обмотки ВН (внешней) до собственной обмотки  $s_1 = 20\text{мм}$  (стр. 199 табл. 4.11)

$s_2$  - расстояние отвода до стенки бака  $s_2 = s_1 = 20\text{мм}$

$d_1$  - диаметр изолированного отвода обмотки  $d_1 = 20\text{мм}$  (стр. 430)

$s_3$  - изоляционное расстояние от отвода обмотки НН до обмотки ВН  $s_3 = 10\text{мм}$  (стр. 200 табл. 4.12)

$s_4$  - изоляционной расстояние от неизолированного отвода обмотки НН до стенки бака  $s_4 = 20\text{мм}$  (стр. 199 табл. 4.11)

$d_2$  - диаметр изолированного отвода от обмотки НН, равный  $d_1$   $d_2 = d_1 = 20\text{мм}$  (стр. 430)

Минимальная ширина бака, м

$$B = D_1'' + (s_1 + s_2 + d_1 + s_3 + s_4 + d_2) \cdot 10^{-3}$$
$$\hat{A} = 0,273 + (20 + 20 + 20 + 10 + 20 + 20) \cdot 10^{-3} = 0,37\hat{i}$$

Минимальная длина бака для трехфазного трансформатора

$$A = 2 \cdot C + D_1'' + 2 \cdot s_5 \cdot 10^{-3}$$

где

$s_5$  - при испытательных напряжениях до 85кВ может быть принято таким же, как и расстояние от неизолированного отвода до обмотки и определено по таблице (табл. 4.12)  $s_5 = 23\text{мм}$

$$A = 2 \cdot 0,283 + 0,273 + 2 \cdot 23 \cdot 10^{-3} = 0,9\hat{i}$$

Высота активной части

$$H_{A,\text{ч}} = l_C + 2 \cdot h_{\text{я}} + n \cdot 10^{-3}$$

где

$n$  - толщина прокладки под нижнее ярмо  $n = 50\text{мм}$

$$H_{A,\text{ч}} = l_C + 2 \cdot h_{\beta} + n \cdot 10^{-3} = 0,44 + 2 \cdot 0,160 + 50 \cdot 10^{-3} = 0,83\hat{i}$$

Общая глубина бака

$$H = H_{A,\text{ч}} + H_{\text{я},\text{к}}$$
$$H = 0,83 + 0,160 = 0,99\hat{i}$$

Принимаем  $H = 1\hat{i}$

Среднее превышение температуры

Длительно допустимое среднее превышение температуры обмоток над воздухом при номинальной нагрузке может быть принято равным  $65^{\circ}\text{C}$ . Тогда среднее превышение температуры масла, омывающего обмотки, должно быть не более

$$\Theta_{M,B} = 65 - \Theta_{O,M,CP}$$

Для обмотки ВН

$$\Theta_{\hat{i},\hat{A}1} = 65 - \Theta_{\hat{i},\hat{i},\tilde{N}D1}$$
$$\Theta_{\hat{i},\hat{A}1} = 65 - 16,18 = 48,82^{\circ}\tilde{N}$$

Для обмотки НН

$$\Theta_{\hat{i},\hat{A}2} = 65 - \Theta_{\hat{i},\hat{i},\tilde{N}D2}$$
$$\Theta_{\hat{i},\hat{A}2} = 65 - 23,86 = 41,14^{\circ}\tilde{N}$$

Следует принять большее из посчитанных значений.

Среднее превышение температуры **стенки бака**

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

$$\Theta_{\hat{A},\hat{A}} = 48,82 - 5 = 43,82$$

Полученное значение должно удовлетворять равенству

$$\sigma \cdot (\Theta_{B,B} + \Theta_{M,B}) \leq 60^\circ\text{C}$$

$$1,2 \cdot (43,82 + 5) = 58,59 \leq 60^\circ\text{C}$$

Поверхность излучения бака

Где

$k$  - учитывающий отношение периметра поверхности излучения к поверхности гладкой части бака

$k = 1$  (для гладкого бака)

$k = 1,5$  (для бака с навесным радиатором)

$$P_H \approx [2 \cdot (A - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot k$$

$$\dot{I}_{\hat{E},\hat{A}\hat{E}} \approx [2 \cdot (A - B) + \pi \cdot \hat{A}] \cdot H \cdot k = [2 \cdot (0,9 - 0,37) + \pi \cdot 0,37] \cdot 1 = 2,2 \dot{i}^2$$

$$\dot{I}_{\hat{E}} \approx [2 \cdot (A - B) + \pi \cdot \hat{A}] \cdot H \cdot k = [2 \cdot (0,9 - 0,37) + \pi \cdot 0,37] \cdot 1 \cdot 1,5 = 3,29 \dot{i}^2$$

Ориентировочная необходимая поверхность конвекции

$$P'_K = \frac{1,05 \cdot \sum P}{2,5 \cdot \Theta_{B,B}^{1,25}} - 1,12 \cdot P_H$$

$$\dot{I}'_{\hat{E}} = \frac{1,05 \cdot (5063 + 893)}{2,5 \cdot 43,82^{1,25}} - 1,12 \cdot 3,29 = 19,72 \dot{i}^2$$

Поверхность крышки бака

$$P_{K,KP} = 0,5 \left[ (A - B)(B + 0,16) + \pi \cdot \frac{(B + 0,16)^2}{4} \right]$$

где

0,16 – удвоенная ширина верхней рамы бака

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

$$\dot{I}_{\hat{E},\hat{E}D} = 0,5 \left[ (0,9 - 0,37)(0,37 + 0,16) + \pi \cdot \frac{(0,37 + 0,16)^2}{4} \right] = 0,58 \dot{i}^2$$

Поверхность конвекции радиатора

$$\sum P_{K,P} = P'_K - P_{K,ГЛ} - P_{K,KP}$$

$$\sum \dot{I}_{\hat{E},D} = 19,72 - 2,20 - 0,58 = 16,94 \dot{i}^2$$

Поверхность конвекции радиатора, приведенная к поверхности гладкой стенки

$$P_{K,P} = P_{K,TP} \cdot k_\phi + P_{K,K}$$

где

$k_\phi$  - коэффициент, учитывающий улучшение или ухудшение теплоотдачи конвекцией для данной формы поверхности по сравнению с вертикальной

стенкой  $k_{\phi} = 1,26$  (табл. 9.6)

$\Pi_{K,TP}$  - площадь конвекции труб  $\Pi_{K,TP} = 3,533 \text{ м}^2$  (табл. 9.9)

$\Pi_{K,K}$  - поверхность конвекции двух коллекторов  $\Pi_{K,K} = 0,34 \text{ м}^2$

(табл. 9.9 примечание 1)

$$\dot{I}_{\hat{E},D} = \dot{I}_{\hat{E},\partial D} \cdot k_{\hat{O}} + \dot{I}_{\hat{E},\hat{E}} = 2,733 \cdot 1,26 + 0,34 = 3,78 \text{ Вт}^2$$

Необходимое число радиаторов

$$n_P = \frac{\sum \Pi_{K,P}}{\Pi_{K,P}}$$
$$n_D = \frac{\sum \dot{I}_{\hat{E},D}}{\dot{I}_{\hat{E},D}} = \frac{16,94}{3,78} = 4,48$$

Принимаем число радиаторов  $n_P = 5$

Поверхность конвекции бака

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

$$\dot{I}_{\hat{E}} = 5 \cdot 3,78 + 2,2 + 0,58 = 21,7 \text{ Вт}^2$$

Увеличиваем  $\Pi_K$  до  $23 \text{ м}^2$

Среднее превышение температуры стенки бака над температурой окружающей воздуха

$$\Theta_{B,B} = \left[ \frac{k \cdot (P_X + P_K)}{2,8 \cdot \Pi_{II} + 2,5 \cdot \Pi_K} \right]^{0,8}$$

где  $k = 1,05$

$$\Theta_{A,A} = \left[ \frac{1,05 \cdot (5063 + 893)}{2,8 \cdot 3,29 + 2,5 \cdot 21,7} \right]^{0,8} = 36,35^\circ \text{Ñ}$$

Среднее превышение температуры масла вблизи стенки над температурой стенки бака

$$\Theta_{M,B} \approx k_1 \cdot 0,165 \cdot \left[ \frac{k \cdot (P_X + P_K)}{\sum \Pi_K} \right]^{0,6}$$

где

$k_1 = 1$  - для естественного масляного охлаждения (стр. 446)

$k = 1,05$

$\sum \Pi_K$  - сумма поверхности гладкой части труб, волн, крышки, без учета коэффициента улучшения или ухудшения конвекции

$$\Theta_{I,A} \approx k_1 = 1 \cdot 0,165 \cdot \left[ \frac{1,05 \cdot (5063 + 893)}{23} \right]^{0,6} = 4,77^\circ \text{Ñ}$$

Превышение температуры в верхних слоях над температурой окружающего воздуха

$$\Theta_{M,B,B} = \sigma \cdot (\Theta_{B,B} + \Theta_{M,B})$$

где

Коэффициент  $\sigma$  для трубчатых баков и для баков с радиаторами может быть принят равным 1,2.

$$\Theta_{i, \hat{A}, \hat{A}} = 1,2 \cdot (39,29 + 4,93) = 50^\circ \tilde{N} < 60^\circ C$$

Превышение температуры обмоток над температурой окружающего воздуха

$$\Theta_{\hat{I}, \hat{A}} = \Theta_{\hat{I}, \tilde{N}D} + \Theta_{\hat{I}, \hat{I}} + \Theta_{\hat{I}, \hat{A}} + \Theta_{\hat{A}, \hat{A}}$$

Обмотка ВН

$$\Theta_{i, \hat{A}1} = 8,86 + 7,32 + 4,77 + 36,35 = 57,3 < 65^\circ C$$

Обмотка НН

$$\Theta_{i, \hat{A}2} = 1,26 + 22,6 + 4,77 + 36,35 = 64,98^\circ \tilde{N} < 65^\circ C$$

Масса проводов двух обмоток

$$G_{iD} = G_{iD1} + G_{iD2}$$

$$G_{iD} = 116 + 108 = 234 \hat{e} \tilde{a}$$

Масса активной части трансформатора

$$G_{\hat{A}, \times} = G_{iD} + G_{\tilde{N}D}$$

$$G_{\hat{A}, \times} = 234 + 522 = 757 \hat{e} \tilde{a}$$

Объем бака определяется по формуле

$$V_{\hat{a}} = \left[ (A - B) \cdot \hat{A} + \frac{\pi \cdot B^2}{4} \right] * \hat{I}$$

$$v_{\hat{a}} = \left[ (0,9 - 0,37) \cdot 0,37 + \frac{\pi \cdot 0,37^2}{4} \right] * 1 = 0,3 \hat{i}^3$$

Объем активной части

Для определения  $V_{\hat{i}, \times}$  можно воспользоваться приближенной формулой

$$V_{\hat{A}, \times} = \frac{G_{\hat{A}, \times}}{\gamma_{\hat{i}, \times}}$$

$$V_{\hat{A}, \times} = \frac{G_{\hat{A}, \times}}{\gamma} = \frac{491}{7650} = 0,096 \hat{i}^3$$

Объем масла в баке

$$V_{\hat{i}, \hat{A}} = V_{\hat{A}} - V_{\hat{A}, \times}$$

$$V_{\hat{i}, \hat{A}} = 0,3 - 0,151 = 0,149 \hat{i}^3$$

Масса масла в радиаторах

$$G_{\hat{i}, D} = 5 \cdot 30 = 150 \hat{e} \tilde{a}$$

Общая масса масла в трубах

$$G_{\dot{I}} = 1,05(900 \cdot V_{\dot{I},A} + G_{\dot{I},D})$$

$$G_M = 1,05 \cdot (900 \cdot 0,149 + 150) = 298 \hat{e} \tilde{a}$$

## **11. Список литературы**

- 1) Тихомиров П.М. «Расчет трансформаторов»; Москва, 1986
- 2) Сапожников В.А. «Конструирование трансформаторов»; Москва, 1984