



Министерство высшего и среднего образование Республика
Узбекистана
Наманганский инженерно педагогический институт
Кафедра «Электр энергетика»

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

Вариант №12.

Выполнил: студент 44-ЭЭ-13
Солиев Ф.

Проверил: преподаватель
Юсупов Д.Р.

Наманган- 2015 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

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

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

на стороне ВН

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

на стороне НН

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

Фазные токи:

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

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

Фазные напряжения:

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

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

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.

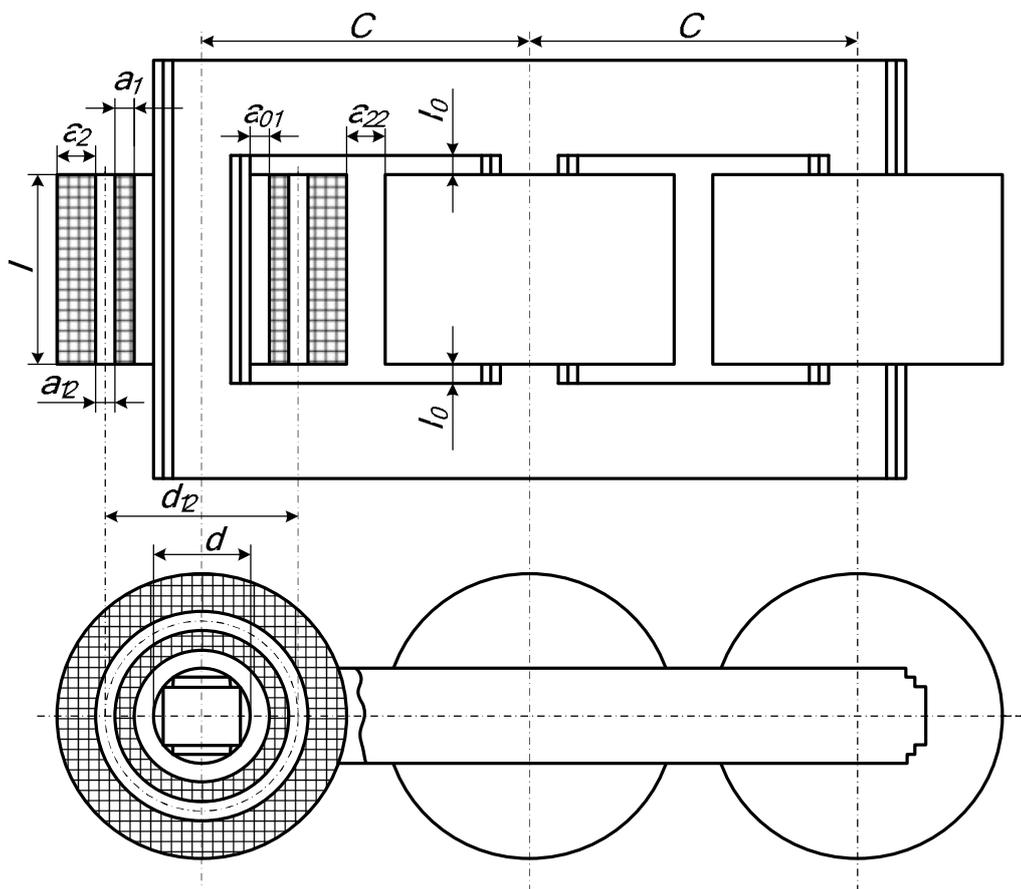


Рис. Основные размеры трансформатора

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

Ширина приведенного канала рассеяния

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

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

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

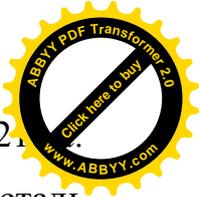
Активная составляющая напряжения короткого замыкания

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

Реактивная составляющая

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

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



стеклоленты — по рис. 2.18,6 и ярм— стальными балками по рис. 2.2.

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/м², для зазора на косых стыках $q_з' = 3000$ В-А/м² (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 β — 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

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



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

Ориентировочная высота обмоток

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

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

Активное сечение стержня по табл. 8.7

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

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

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

Напряжение одного витка предварительно

$$\underline{u_B} = 4,44 * f * B_c * \underline{\Pi_c}$$

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

4. Расчет обмотки НН (по § 6.3).

Число витков в обмотке НН

$$\underline{w_2} = U_2 / \underline{u_B}$$

$$\underline{w_2} = 400 / 8,02 = 49,87$$

принимаем 50 виток.

Уточнение напряжения одного витка

$$\underline{u_B} = U_2 / \underline{w_2}$$

$$\underline{u_B} = 400 / 50 = 8 \text{ В.}$$

Уточнение индукцию в стержне

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

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

Средняя плотность тока в обмотках

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



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

Окончательно принимаем 3 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.

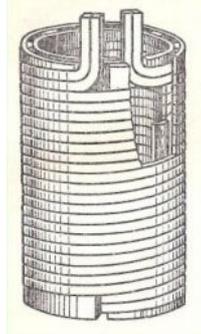


Рис. Двухслойная цилиндрическая обмотка из провода прямоугольного сечения

Число витков в одном слое двухслойной обмотки

$$w_{ст2} = w_1 / 2.$$

$$w_{ст2} = 50 / 2 = 25.$$

Ориентировочный осевой размер витка, м,

$$h_{в2} = l_2 / (w_{ст2} + 1)$$

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

Ориентировочное сечение витка, м^2 ,

$$(\Pi'_в)_{нн} = I_{\phi 2} / J_{cp}$$

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

По сечению витка по табл. 5.2 выбираем четыре параллельных провода сечением 29 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

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

Плотность тока в обмотке НН

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

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

Осевой размер обмотки, м,

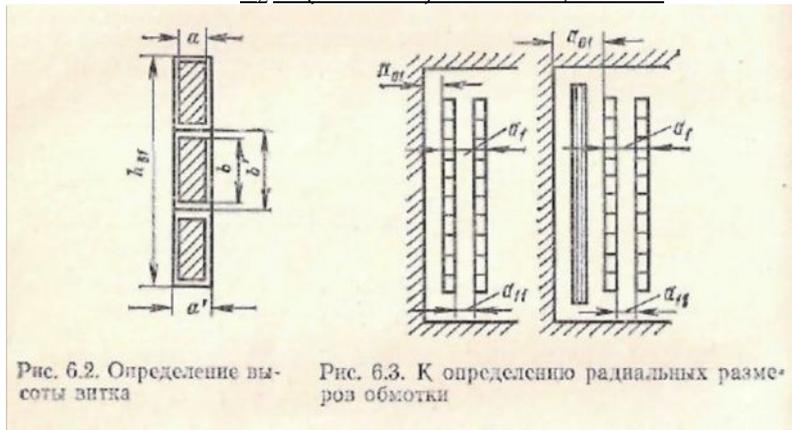
$$\underline{l_2 = h_{B2}(w_{cl} + 1) + (0,005 \div 0,015)}$$

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

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

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

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



Внутренний диаметр обмотки, м,

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

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

Наружный диаметр обмотки, м,

$$\underline{D''_2 = D'_2 + 2a_2}$$

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

Средний диаметр

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

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

Масса металла

$$\underline{G_{M2} = 28 * 10^3 * c * D_{cp2} * w * \Pi_2}$$

где c - число активных стержней трансформатора.

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

Масса провода



$$G_{\text{пр}2} = \kappa * G_{M2}$$

где κ – коэффициент ориентирующее 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, 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

$$P_{\text{очн}2} = 2,4 * 10^{-12} * J^2 * G_M$$

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

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

$$q_2 = (P_{\text{очн}2} * k_{д2}) / P_{02}$$

где $k_{д2} = 1 + 0,095 * 10^8 * \beta^2 * a^4 * n^2$

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

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

$$k_{д2} = 1 + 0,095 * 10^8 * 0,11^2 * (2,5 * 10^{-3})^4 * 8^2 = 1,00033$$

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 ΔU — 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/м², в обмотке ВН предварительно определяется по формуле

$$J_1 = \frac{2 * J_{CP} - J_2}{2 * 3 * 10^6 - 2,9 * 10^6} = 3,5 * 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Сечение витка обмотки ВН, мм²

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

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

По таблице 5,8 — выбрали цилиндрическую многослойную из кругового провода (S= 400 кВА; I1= 23 А; Uн1=10000 В; П'1 =6,7 мм2)

Расчет многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода.

$\Pi''_1 = (\Pi'_{В})_{ВН} / n_{В1} = 6,7 / 2 = 3,3$ — сечение одного провода, мм². 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 ,

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

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

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

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

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

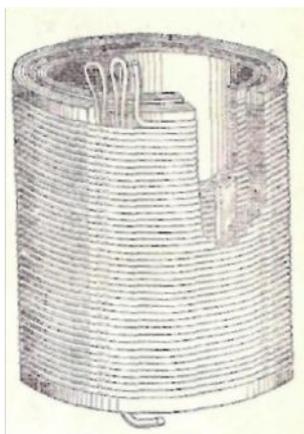


Рис. Многослойная цилиндрическая обмотка из провода круглого сечения.

Число витков в слое

$$w_{сл1} = l_1 * 10^3 / (n_{в1} * d''_1) - 1$$

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

Число слоев в обмотке

$$n_{сл1} = w_1 / w_{сл1}$$

$$n_{сл1} = 722 / 52 = 14$$

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

Рабочее напряжение двух слоев, В,

$$U_{мсл} = 2 * w_{сл1} * u_{в.}$$

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

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, м²,



$$\underline{\Pi_{01}} = c * n * k * \pi * (D'_1 + D''_1) * l$$

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

$$D_{\text{ср1}} = (D'_1 + D''_1) / 2$$

$$D_{\text{ср1}} = (0,245 + 0,273) / 2 = 0,259 \text{ м.}$$

Масса металла

$$G_{M1} = 28 * 10^3 * c * D_{\text{ср1}} * w_{\text{н1}} * \Pi_1$$

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

$$G_{\text{пр1}} = k * G_{M1}$$

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

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

Основные потери короткого замыкания в НН

$$P_{\text{очн1}} = 2,4 * 10^{-12} * J^2 * G_{M1}$$

$$\underline{P_{\text{очн1}}} = 2,4 * 10^{-12} * 3^2 * 10^{12} * 111 = 2845 \text{ Вт.}$$

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

$$q_1 = (P_{\text{очн1}} * k_{\text{д1}}) / \Pi_{01}$$

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

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

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

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

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 § 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 γ — плотность металла отводов для меди 8900 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

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

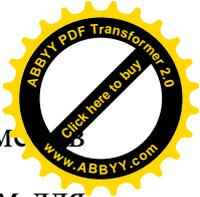
где γ — плотность металла отводов для меди 8900 кг/м^3

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

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

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.

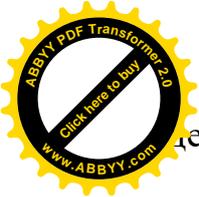
$$I_{\text{кв}} = \frac{(100 * I_{\text{ном}})}{u_{\text{к}} * (1 + ((100 * S_{\text{ном}}) / (u_{\text{к}} * S_{\text{к}})))}$$

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

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

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



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

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

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 ярах 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 яреме

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

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

По табл. 8.10 находим удельные потери:

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

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

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

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 $B_{я} = 1,54 \text{ Тл}$; $q_{я} = 1,6 \text{ ВА/кг}$;

при $B_3 = 1,6 / \sqrt{2} = 1,12 \text{ Тл}$; $q_3 = 3500 \text{ ВА/м}^2$

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); $k_{т,у} = 35,2$; $k_{т,ш} = 1,2$; $k_{т,я} = 1,0$; $k_{т,п} = 1,05$; $k_{т,ш} = 1,02$.

$$Q_x = (k_{т,р} * k_{т,з} * (q_c * G_c + q_{я} * G_{я} - 4 * q_{я} * G_y + ((q_c + q_{я}) / 2) * k_{т,у} * k_{т,пл} * G_y) + \sum q_3 * n_3 * \Pi_3) * k_{т,я} * k_{т,п} * k_{т,ш}$$

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

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)

δ_2 - толщина изоляции провода на одну сторону $\delta = \frac{0,005}{2} = 0,0025 \text{ м}$

λ - 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)

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

$$\Theta_{02, \tilde{N}D} = \frac{2}{3} \cdot \Theta_0$$

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



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 м^3 общего объема обмотки

Для медного провода

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

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

λ_{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

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

λ - 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).

α - коэффициент, который рассчитывается по формуле

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



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

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

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

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

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

Средний перепад температуры

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

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

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)

$$\Theta_{i,i2} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot 0,35 \cdot q^{0,6}$$

$$\Theta_{i,i2} = 1,0 \cdot 1,1 \cdot 0,80 \cdot 0,35 \cdot 1221^{0,6} = 22,6 \circ\tilde{N}$$



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

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

где

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

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

Общая глубина бака

$$H = H_{A,ч} + H_{Я,К}$$

$$H = 0,83 + 0,160 = 0,99 \hat{i}$$

Принимаем $H = 1 \hat{i}$

Среднее превышение температуры

Длительно допустимое среднее превышение температуры обмоток над воздухом при номинальном нагрузке может быть принято равным 65°C . Тогда среднее превышение температуры масла, омывающего обмотки, должно быть не более

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

Для обмотки ВН

$$\Theta_{i, \hat{A}1} = 65 - \Theta_{i, i, \hat{N}D1}$$

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

Для обмотки НН

$$\Theta_{i, \hat{A}2} = 65 - \Theta_{i, i, \hat{N}D2}$$

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

Следует принять большее из посчитанных значений.

Среднее превышение температуры **стенки бака**

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



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

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)

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

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

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

Ориентировочная необходимая поверхность конвекции

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

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

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

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

Поверхность конвекции радиатора

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

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

Поверхность конвекции радиатора, приведенная к поверхности гладкой стенки

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

где

k_ϕ - коэффициент, учитывающий улучшение или ухудшение теплоотдачей 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)

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

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 Π_K до 23 м^2

Среднее превышение температуры стенки бака над температурой окружающей воздуха

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

где $k = 1,05$

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

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

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

Превышение температуры в верхних слоях над температурой окружающего воздуха



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

где

Коэффициент σ для трубчатых баков и для баков с радиаторами может быть принят равным 1,2.

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

Превышение температуры обмоток над температурой окружающего воздуха

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

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

$$G_{ID} = G_{ID1} + G_{ID2}$$

$$G_{ID} = 116 + 108 = 234 \text{êã}$$

Масса активной части трансформатора

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

$$G_{\hat{A}, \times} = 234 + 522 = 757 \text{êã}$$

Объем бака определяется по формуле

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

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

Объем активной части

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

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

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

Объем масла в баке

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

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

Масса масла в радиаторах

$$G_{i, D} = 5 \cdot 30 = 150 \text{êã}$$

Общая масса масла в трубах



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

$$G_M = 1,05 \cdot (900 \cdot 0,149 + 150) = 298 \text{êã}$$

11. Список литературы

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