

Исходные данные

вар	S _н ,кВа	U _{вн} ,кВ	U _{нн} ,кВ	U _к , %	d, см	C, см	l _с , см	Пя, см ²	Схема и группа	Марка стали	P _о ,Вт	P _к , Вт	l _о , %
108	400	10	0,4	4,5	18	36	62,5	222	звезда/звезда	3414	1180	5430	3,1

Задание:

1. Провести расчет обмотки низкого напряжения.
2. Провести расчет обмотки высшего напряжения.
3. Определить потери короткого замыкания
4. Провести тепловой расчет обмоток трансформатора.

1. Расчет обмоток низшего напряжения

Расчет обмоток трансформатора начинают с обмотки НН, располагаемой у большинства трансформаторов ближе к стержню.
Фазное напряжение

Число витков на одну фазу обмотки НН

$$w_1 = \frac{U_{\phi 1}}{4.44 \times f \times B_c \times l_c \times 10^{-4}}$$

где

$$U_{\phi 1} = \frac{U_{НН}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230.94 \quad \text{В}$$

Частота тока $f = 50$ Гц

$B_c = 1.63$ Тл - магнитная индукция в стержнях

Площадь активного поперечного сечения стержня

$$P_c = \frac{\pi d^2}{4} \times k_p = \frac{\pi \times 0.18^2}{4} \times 0.92 = 0.0234 \quad \text{м}^2$$

где $k_p = 0.92$ - коэффициент заполнения круга при расчете площади сечения стержня для трансформаторов от 40 до 630 кВА

тогда число витков на одну фазу обмотки НН

$$w_1 = \frac{U_{\phi 1}}{4.44 \times f \times B_c \times l_c} = \frac{230.94}{4.44 \times 50 \times 1.63 \times 0.0234} = 27.3 \quad \text{витков}$$

Округлим число витков приняв число слоев витков $n = 2$

$$w_1 = 28 \quad \text{витков}$$

Найдем напряжение одного витка

$$u_B = \frac{U_{\phi 1}}{w_1} = \frac{230.94}{28} = 8.25 \quad \text{В}$$

Для обмотки НН принимаем простую по технологии изготовления цилиндрическую обмотку из двухслойного прямолинейного провода. Число слоев принимаем равными двух

Число витков в одном слое

$$W_{\text{сл1}} = \frac{w_1}{n} = \frac{28}{2} = 14.0 \quad \text{витков}$$

Осевой размер обмотки

$$l_1 = l_C - 2 \times l_{01} = 0.625 - 2 \times 0.03 = 0.565 \quad \text{м}$$

где $l_{01} = 0.03 \quad \text{м}$ - расстояние от обмотки НН до ярма для трансформаторов;

$l_C = 0.625 \quad \text{м}$ - высота стержня.

Ориентировочный осевой размер витка, м

$$h_{B1} = \frac{l_1}{W_{\text{сл1}} + 1} = \frac{0.565}{14.0 + 1} = 0.0377 \quad \text{м}$$

Ориентировочное сечение витка

$$P'_1 = \frac{I_1}{J_{\text{cp}} \times 10^{-6}}$$

где J_{cp} - ориентировочная средняя плотность тока, $\frac{\text{А}}{\text{м}^2}$ для медного провода

$$J_{\text{м}} = J_{\text{cp}} = 0.746 \times k_{\partial} \times \frac{P_k \times u_B}{S_H \times d_{12}} \times 10^4$$

где $k_{\partial} = 0.94$ - коэффициент, учитывающий добавочные потери в обмотках

$u_B = 8.25 \quad \text{В}$ - напряжение одного витка

$S_H = 400 \text{ жВА}$ - мощность трансформатора

$d_{12} = \tau \times d = 1.36 \times 0.18 = 0.245 \quad \text{м}$ - средний диаметр витка двух обмоток

$$\text{Тогда } J_{cp} = 0.746 \cdot k_d \cdot \frac{P_k \cdot u_B}{\frac{S_H}{10^3} \cdot l_{12}} \cdot 10^4 = 0.746 \cdot 0.94 \cdot \frac{5430 \cdot 8.25}{\frac{400000}{10^3} \cdot 0.245} \cdot 10^4 = 3.21e6 = 3.21 \cdot 10^6 \quad \frac{A}{m^2}$$

что укладывается в пределы для средней плотности тока для масляных трансформаторов

Определим номинальный фазный ток обмотки

$$I_1 = \frac{S_H}{3 \cdot U_{\phi 1}} = \frac{400000}{3 \cdot 230.94} = 577.35 \quad A$$

Тогда ориентировочное сечение витка

$$P'_1 = \frac{I_1}{J_{cp} \cdot 10^{-6}} = \frac{577.35}{3210000 \cdot 10^{-6}} = 179.86 \quad \text{мм}^2$$

По полученным значениям P'_1 и $h_{\phi 1}$ по сортаменту обмоточного провода для трансформаторов подбираются подходящие провода с соблюдением следующих правил:

а) число параллельных проводников $n_{\phi 1}$ не более 4-6 при намотке плашмя и не более 6-8 при намотке на ребро.

б) все провода имеют одинаковые размеры поперечного сечения;

в) радиальные размеры всех параллельных проводов витка равны между собой;

г) радиальные размеры проводов не выходят за предельные размеры.

Тепловая нагрузка не превышает $q \leq 1200 \text{ Вт/м}^2$

Определим больший размер поперечного сечения алюминиевого провода:

$$b = \frac{q \cdot k_3}{1.07 \cdot J_{cp}^2 \cdot 10^{-8}}$$

где $q = 1200 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ - удельная теплоотдача поверхности провода в результате нагрева.

$k_3 = 0.8$ - коэффициент запаса

$$b = \frac{q \cdot k_3}{1.07 \cdot J_{cp}^2 \cdot 10^{-8}} = \frac{1200 \cdot 0.8}{1.07 \cdot 3210000^2 \cdot 10^{-8}} = 0.00871 \quad \text{м}$$

Данный размер провода следует рассматривать как предельно допустимый.

С учетом размерностей сечения проводов в таблице выбора номинальных размеров выбираем длину $b = 8.5 \text{ мм}$

длина витка принята равной $h_{B1} = 0.038 \quad \text{м}$

тогда число проводов в витке $n_{B1} = \frac{h_{B1}}{b} = \frac{0.0377}{8.5 \cdot 0.001} = 4.44$

Округляем $n_{B1} = 4$

выбираем предельно размер a

$$a = \frac{\Pi'_1 \times 10^{-6}}{b \times n_{B1}} = \frac{179.86 \times 10^{-6}}{8.5 \times 0.001 \times 4} = 0.00529$$

По найденным значениям $a = 5.29 \text{ мм}$ и $b = 8.5 \text{ мм}$ выбираем провод с параметрами $a = 5.6 \text{ мм}$ $b = 8.5 \text{ мм}$ $\Pi''_1 = 46.7 \text{ мм}^2$

толщину изоляции принимаем равной $[2\delta] = 0.62 \times 10^{-3} \text{ м}$
тогда $a' = a + [2\delta] = 5.6 \times 0.001 + 0.62 \times 10^{-3} = 0.00622 = 6.22 \text{ мм}$
 $b' = b + [2\delta] = 8.5 \times 0.001 + 0.62 \times 10^{-3} = 0.00912 = 9.12 \text{ мм}$

Марка провода

$$\text{ПБ } 4 \frac{5,6 \times 8,5}{6,22 \times 9,12}$$

полное сечение витка

$$\Pi_1 = n_{B1} \times \Pi''_1 \times 10^{-6} = 4 \times 46.7 \times 10^{-6} = 0.000187 \text{ м}^2 \quad \text{при первоначальном } \Pi'_1 = 179.86 \text{ мм}^2$$

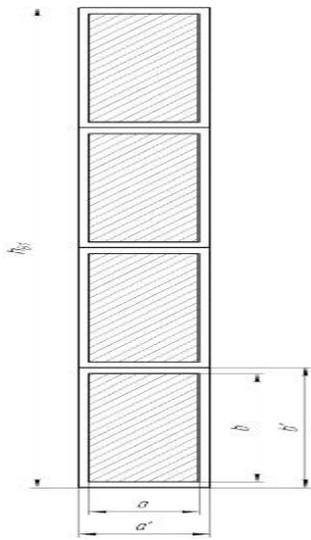
Полученная плотность тока

$$J_1 = \frac{I_1}{\Pi_1} = \frac{577.35}{0.000187} = 3.087 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \quad \text{Что в пределах нормы для медного сечения провода}$$

Осевой размер витка

$$h_{B1} = n_{B1} \times b' = 4 \times 0.00912 = 0.03648 \text{ м}$$

Необходимо изобразить поперечное сечение одного витка обмотки трансформатора, показав размеры

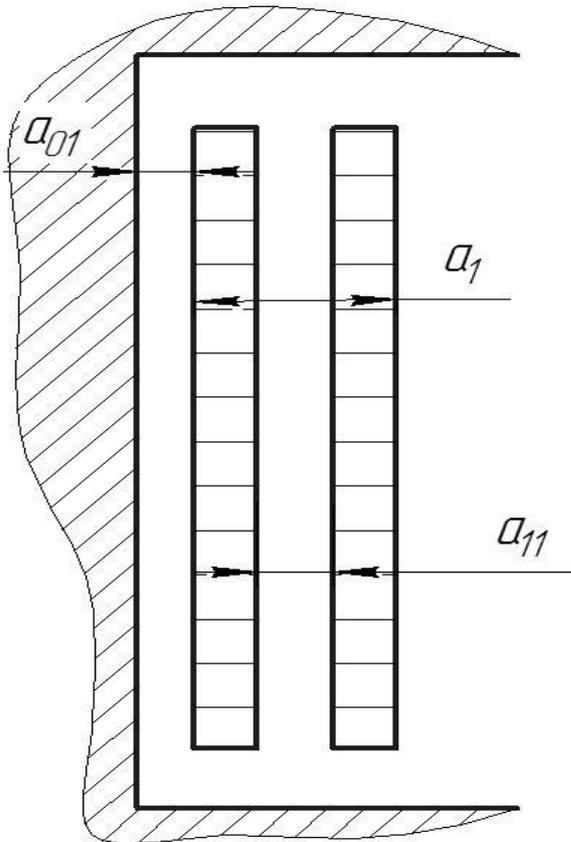


Осевой размер обмотки

$$l'_1 = h_{B1} \times (W_{сн1} + 1) + 0.01 = 0.03648 \times (14.0 + 1) + 0.01 = 0.557 \quad \text{м}$$

при определенной ранее $l_1 = 0.565 \quad \text{м}$

Для условия $l'_1 \leq l_1$ Условие выполняется.



Размеры $a_{01} = 5 \cdot 10^{-3} \quad \text{м}$ - расстояние от

стержня магнитопровода до обмотки НН

Радиальный размер обмотки

$$a_1 = n \cdot a' + (n - 1) \cdot a_{11} = 2 \cdot 0.00622 + (2 - 1) \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 0.0184 \text{ м}$$

где $a_{11} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - минимальная

ширина охлаждающего канала в между обмотками масляного трансформатора

Внутренний диаметр обмотки:

$$D'_1 = d + 2 \cdot a_{01} = 0.18 + 2 \cdot 0.005 = 0.19 \text{ м}$$

Наружный диаметр обмотки:

$$D''_1 = D'_1 + 2 \cdot a_1 = 0.19 + 2 \cdot 0.0184 = 0.227$$

Средний диаметр обмотки:

$$D_{ср1} = \frac{D'_1 + D''_1}{2} = \frac{0.19 + 0.227}{2} = 0.208$$

Полная охлаждаемая поверхность обмотки НН, м^2

$$П_{01} = n \cdot k_3 \cdot \pi \cdot (D'_1 + D''_1) \cdot l_1 = 2 \cdot 3 \cdot 0.8 \cdot \pi \cdot (0.19 + 0.227) \cdot 0.565 = 3.55 \text{ м}^2$$

$c = 3$ - число активных стержней

Определяем плотность теплового потока

$$q_1 = \frac{P_{осн1} \cdot k_{\partial}}{П_{01}}$$

где $P_{осн1}$ - основные потери в обмотке НН;

k_{∂} - коэффициент добавочных потерь в обмотке

$$k_{\partial 1} = 1 + 0.095 \cdot 10^8 \cdot \beta^2 \cdot a'^4 \cdot n^2$$

$$\text{где } \beta = \frac{b \cdot n \cdot B_1}{l_1} \cdot k_p$$

где $a' = 6.22 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - размер проводника в направлении перпендикулярном линиям магнитной индукции

$b' = 9.12 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - размер проводника в направлении параллельном линиям магнитной индукции

$$k_p = 0.95$$

$n = 2$ - число слоев обмотки

$$\beta = \frac{b \times n_{BI}}{l_1} \times k_p = \frac{8.5 \times 0.001 \times 4}{0.565} \times 0.95 = 0.0572$$

тогда

$$k_{\partial I} = 1 + 0.095 \times 10^8 \times \beta^2 \times a^4 \times n^2 = 1 + 0.095 \times 10^8 \times 0.0572^2 \times 0.0056^4 \times 2^2 = 1.0$$

Основные потери в обмотке НН:

Для медного провода

$$P_{оснI} = 2.4 \times 10^{-12} \times J_1^2 \times G_{aI}$$

где $J_1 = 3.087 \cdot 10^6 \frac{A}{m^2}$ - плотность тока в обмотке

Масса обмотки из медного провода:

$$G_{aI} = 28 \times D_{срI} \times n \times W_{слI} \times \pi \times 10^3 = 28 \times 3 \times 0.208 \times 2 \times 14.0 \times 0.000187 \times 10^3 = 91.5 \quad \text{кг}$$

тогда

$$P_{оснI} = 2.4 \times 10^{-12} \times J_1^2 \times G_{aI} = 2.4 \times 10^{-12} \times 3087433^2 \times 91.5 = 2093.0 \quad \text{Вт}$$

тогда

$$q_I = \frac{P_{оснI} \times k_{\partial}}{П_{0I}} = \frac{2093.0 \times 0.94}{3.55} = 554.2 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Для масляных трансформаторов плотность теплового потока не должна превышать

$$800-1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Условие выполняется.

2. Расчет обмотки ВН

Определяем число витков при номинальном напряжении:

$$W_{H2} = W_1 \times \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 1}}$$

$$\text{где } U_{\phi 2} = \frac{U_{BH}}{\sqrt{3}} = \frac{10000}{\sqrt{3}} = 5773.5 \quad \text{В}$$

$$\text{тогда } w_2 = w_1 \times \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 1}} = 28 \times \frac{5773.5}{230.94} = 700.0 \quad \text{витков}$$

проверяем коэффициенты трансформации

$$K_{mpU} = \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 1}} = \frac{5773.5}{230.94} = 25.0$$

$$K_{mpW} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{700}{28} = 25.0$$

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

$$W_p = \frac{\Delta U}{\sqrt{3} \times u_B}$$

где $u_B = 8.25$ В - напряжение одного витка обмотки

ΔU - напряжение на одной ступени регулирования обмотки или разность напряжений двух соседних ответвлений, В

$$\Delta U = 0.025 \times U_{BH} = 0.025 \times 10000 = 250.0 \quad \text{В}$$

$$\text{тогда } W_p = \frac{\Delta U}{\sqrt{3} \times u_B} = \frac{250.0}{\sqrt{3} \times 8.25} = 17.5 \quad \text{витков}$$

принимаем

$$W_p = 18 \quad \text{витков}$$

$$\text{верхние ступени регулирования } w_2 + 2 \times W_p = 736 \quad \text{витков}$$

$$w_2 + W_p = 718 \quad \text{витков}$$

$$\text{при номинальном напряжении } w_2 = 700 \quad \text{витков}$$

$$\text{нижние ступени регулирования } w_2 - W_p = 682 \quad \text{витков}$$

$$w_2 - 2 \times W_p = 664 \quad \text{витков}$$

$$\text{Для трехфазного трансформатора найденное число витков } W_2 = w_2 + 2 \times W_p = 736 \quad \text{витков}$$

является числом витков на 1 стержень

Осевой размер обмотки ВН $l_2 = l'_1 = 0.557$ м

Плотность тока в обмотке ВН:

$$\text{Примем } J_2 = 2J_{cp} - J_1 = 3.333 \cdot 10^6 \frac{A}{m^2}$$

Потребная сила тока

$$I_2 = \frac{S_H}{3U_{\phi 2}} = \frac{400000}{3 \cdot 5773.5} = 23.1 \text{ A}$$

Сечение витка обмотки определяется по формуле

$$П''_2 = \frac{I_2}{J_2 \cdot 10^{-6}} = \frac{23.1}{3332567 \cdot 10^{-6}} = 6.93 \text{ мм}^2$$

По ориентировочному сечению витка П''₂ и сортаменту обмоточного провода для трансформаторов подбирается провод подходящего сечения или в редких случаях два параллельных одинаковых провода

Выбираем марку провода - ПБ (медь)

число параллельных проводов в витке $n_{B2} = 1$

диаметр сечения без изоляции $d_2 = 3$ мм

толщина изоляции $[2\delta] = 1.06$ мм

диаметр сечения провода с учетом изоляции $d'_2 = d_2 + [2\delta] = 3 + 1.06 = 4.06$ мм

Площадь активного сечения $П''_2 = 7.07$ мм²

ПВ х $1 \times \frac{3}{4.06}$

Полное сечение витка:

$$П_2 = n_{B2} \cdot П''_2 \cdot 10^{-6} = 7.07 \cdot 10^{-6} = 0.00000707 \text{ мм}^2$$

Полученная плотность тока

$$J_2 = \frac{I_2}{П_2} = \frac{23.1}{0.00000707} = 3.2673267e6 = 3.267 \cdot 10^6 \frac{A}{m^2}$$

$$\text{Число витков в слое: } W_{сл2} = \frac{l_2 \cdot 10^3}{n_{B2} \cdot d'_2} - 1 = \frac{0.557 \cdot 10^3}{4.06} - 1 = 136.0$$

принимаем

$$W_{сл2} = 136 \text{ витков}$$

$$\text{Число слоев в обмотке } n_{сл2} = \frac{w_2}{W_{сл2}} = \frac{700}{136} = 5.15$$

принимаем

$$n_{сл2} = 6 \quad \text{слоев}$$

Рабочее напряжение двух слоев

$$U_{мсл} = 2 \times W_{сл2} \times u_B = 2 \times 136 \times 8.25 = 2244.0 \quad \text{В}$$

По рабочему напряжению двух слоев по таблице 6 выбираем число слоев и общую толщину кабельной бумаги в изоляции между двумя слоями обмотки.

Выступ междуслойной изоляции на торцах обмотки

$$l_B = 16 \quad \text{мм}$$

Число слоев кабельной бумаги

$$n_L = 4$$

Толщина кабельной бумаги

$$\delta_{мсл} = n_L \times 0.12 = 4 \times 0.12 = 0.48 \quad \text{мм}$$

Обмотку каждого стержня выполняем в виде двух концентрических катушек с осевым масляным каналом между ними

Радиальный размер обмотки

в случае 20 и 35 классов напряжений учтем вставку экрана - незамкнутого цилиндра из алюминиевого листа толщиной 0,5 мм

$$a_2 = d'_2 \times n_{сл2} + \delta_{мсл} (n_{сл2} - 1) + a'_{22} \times 10^3$$

$$a_2 = 4.06 \times 6 + 0.48 (6 - 1) + 0.006 \times 10^3 = 32.76 \quad \text{мм}$$

где

$$a'_{22} = 6 \text{ мм} \quad - \text{ ширина масляного канала между катушками}$$

Внутренний диаметр обмотки

$$D'_2 = D''_1 + 2 \times a_{12} = 0.227 + 2 \times 0.009 = 0.245 \quad \text{м}$$

где $a_{12} = 9 \text{ мм}$ - минимальный радиальный размер между обмотками НН и ВН и толщина изоляционного цилиндра выбирается по испытательному напряжению обмотки ВН

Наружный диаметр обмотки, м

$$D''_2 = D'_2 + 2 \times a_2 = 0.245 + 2 \times 0.03276 = 0.31052 \quad \text{м}$$

Среднее значение

$$D_{ср2} = \frac{D'_2 + D''_2}{2} = \frac{0.245 + 0.31052}{2} = 0.27776 \quad \text{м}$$

Поверхность охлаждения

$$П02 = c_{\pi} \times \pi \times (D'_2 + D''_2) \times l_2$$

где при наличии осевого канала внутри катушки ВН

$$n = 1.5 \quad k = 0.83$$

тогда

$$П02 = c_{\pi} \times \pi \times (D'_2 + D''_2) \times l_2 = 3 \times 1.5 \times 0.83 \times \pi \times (0.245 + 0.31052) \times 0.557 = 3.63 \quad \text{м}^2$$

Определяем плотность теплового потока

$$q_2 = \frac{P_{осн2}}{П02} \times \kappa_{\partial 2}$$

$$P_{осн2} = 2.4 \times 10^{-12} \times J_2^2 \times G_{a2} \quad - \text{основные потери в обмотке ВН};$$

$$G_{M2} = 28 \times D_{cp2} \times w_2 \times П02 \quad - \text{масса обмоток}$$

$$\kappa_{\partial 2} = 1 + 0.044 \times 10^8 \times \beta^2 \times d_2^4 \times n_{сл2}^2 \quad - \text{коэффициент добавочных потерь в обмотке из круглого провода}$$

$$\beta = \frac{d_2 \times n_{B2}}{l_2} \times k_p \quad \text{где} \quad d_2 = 3 \quad \text{мм} \quad - \text{диаметр проводника}$$

$$n_{B2} = 1 \quad - \text{число параллельных проводов в витке}$$

$$n_{сл2} = 6 \quad - \text{число слоев обмотки}$$

$$l_2 = 0.557 \times \text{м} \quad - \text{осевой размер обмотки}$$

$$k_p = 0.95$$

$$\beta = \frac{d_2 \times 10^{-3} \times n_{B2}}{l_2} \times k_p = \frac{3 \times 10^{-3}}{0.557} \times 0.95 = 0.0051167$$

тогда

$$\kappa_{\partial 2} = 1 + 0.044 \times 10^8 \times \beta^2 \times d_2^4 \times n_{сл2}^2 = 1 + 0.044 \times 10^8 \times 0.0051167^2 \times (3 \times 10^{-3})^4 \times 6^2 = 1.0$$

$$\text{тогда} \quad G_{M2} = 28 \times D_{cp2} \times w_2 \times П02 \times 10^{-3} = 28 \times 3 \times 0.27776 \times 700 \times 3.63 \times 10^{-3} = 59.3 \quad \text{кг}$$

$$\text{тогда} \quad P_{осн2} = 2.4 \times 10^{-12} \times J_2^2 \times G_{M2} = 2.4 \times 10^{-12} \times 3267326.7^2 \times 59.3 = 1519.3 \quad \text{Вт}$$

$$\text{тогда} \quad q_2 = \frac{P_{осн2}}{П02} \times \kappa_{\partial 2} = \frac{1519.3}{3.63} \times 1.0 = 418.54 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Полученное значение не должно быть более 1000 Вт/м². Значение q лежит в пределах допустимого

3. Определение потерь короткого замыкания

Полные потери короткого замыкания, Вт:

$$P_K = P_{осн1} \times \kappa_{\partial 1} + P_{осн2} \times \kappa_{\partial 2} + P_{отв1} \times \kappa_{отв1} + P_{отв2} \times \kappa_{отв2} + P_{\sigma}$$

$P_{осн1}, P_{осн2}$ - основные потери в обмотке НН и ВН, Вт

P_{σ} - потери в баке и деталях конструкции, Вт

$P_{отв1}, P_{отв2}$ - основные потери в отводах НН и ВН, Вт

$$\kappa_{отв1} = \kappa_{\partial 1} = 1$$

$$\kappa_{отв2} = \kappa_{\partial 2} = 1$$

для меди

$$P_{отв} = 2.4 \times 10^{-12} \times J^2 \times G_{отв}$$

Масса металла проводов отводов: $G_{отв} = l_{отв} \times \Pi_{отв} \times \gamma$

$l_{отв}$ - длина отводов, м

$$\Pi_{отв1} = \Pi 1 = 1.87 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$\Pi_{отв2} = \Pi 2 = 7.07 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$\gamma_M = 8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad \text{- плотность металла отвода}$$

тогда

$$G_{отв1} = l_{отв1} \times \Pi_{отв1} \times \gamma_M = 4.2375 \times 0.000187 \times 8900 = 7.0525 \text{ кг}$$

$$G_{отв2} = l_{отв2} \times \Pi_{отв2} \times \gamma_M = 4.2375 \times 0.00000707 \times 8900 = 0.26664 \text{ кг}$$

тогда

$$P_{отв1} = 2.4 \times 10^{-12} \times J_1^2 \times G_{отв1} = 2.4 \times 10^{-12} \times 3087433^2 \times 7.0525 = 161.0 \text{ Вт}$$

$$P_{отв2} = 2.4 \times 10^{-12} \times J_2^2 \times G_{отв2} = 2.4 \times 10^{-12} \times 3267326.7^2 \times 0.26664 = 6.8316 \text{ Вт}$$

$$l_{отв1} = 4.237 \text{ м}$$

Длина провода

$$l_{отв2} = 4.237 \text{ м}$$

Потери в баке и деталях конструкций, Вт

$$P_{\sigma} = 10 \times S_H$$

где $k = 0.017$

$$\text{тогда } P_{\sigma} = 10 \times S_H \times 10^{-3} = 10 \times 0.017 \times 400000 \times 10^{-3} = 68.0 \quad \text{Вт}$$

$$P_{K.} = (P_{очн1} \times \partial_1 + P_{очн2} \times \partial_2 + P_{омб1} \times \partial_{омб1} + P_{омб2} \times \partial_{омб2} + P_{\sigma})$$

$$P_{K.} = 2093.0 \times 1.0 + 1519.3 \times 1.0 + 161.0 + 6.8316 + 68.0$$

$$P_{K.} = 5.23 \times 10^3 \quad \text{Вт}$$

При значении табличного $P_k = 5.43 \cdot 10^3$

$$\text{погрешность } \frac{P_{K.} - P_k}{P_{K.}} = -3.824\%$$

4. Тепловой расчет трансформатора

Внутренний перепад температуры в обмотке НН (прямоугольное сечение)

$$Q_{01} = \frac{q_1 \times \delta}{\lambda_{из}}$$

где $\delta = \frac{[2\delta]}{2} = 3.1 \cdot 10^{-4}$ - толщина изоляции провода на одну сторону

$$\lambda_{из} = 0.17 \frac{Вт}{м \times ^\circ C} \quad \text{- теплопроводность изолированного провода}$$

$$\text{тогда } Q_{01} = \frac{q_1 \times \delta}{\lambda_{из}} = \frac{554.2 \times 0.00031}{0.17} = 1.01 \quad ^\circ C$$

повышение температуры обмотки над температурой масла

$$Q_{ом1} = k \times q_1^{0.6}$$

$$\text{где } k = 0.285$$

$$\text{тогда } Q_{ом1} = k \times q_1^{0.6} = 0.285 \times 554.2^{0.6} = 12.6 \quad ^\circ C$$

Среднее повышение температуры обмотки над температурой масла

$$Q_{ом.ср1} = Q_{01} + Q_{ом1} = 1.01 + 12.6 = 13.6 \quad ^\circ C$$

Внутренний перепад температуры в обмотке для наружной катушки

$$Q_{02} = \frac{p \times (0.75 \times a_2)^2}{2 \times \lambda_{ср}}$$

$$a_2 = 0.033 \quad м \quad \text{- радиальный размер обмотки, м}$$

Средняя теплопроводность обмотки, приведения к условному случаю равномерного распределения витковой и междуслойной изоляции:

$$\lambda_{ср.} = \frac{\lambda \times \lambda_{мс} \times (d'_2 + \delta_{мсл})}{\lambda \times \delta_{мсл} + \lambda_{мс} \times d'_2}$$

$$\text{где } \lambda = \frac{\lambda_{из}}{0.7 \times \sqrt{\alpha}}$$

$$\text{где } \alpha = \frac{d'_2 - d_2}{d_2} = \frac{4.06 - 3}{3} = 0.353$$

$$\text{тогда } \lambda = \frac{\lambda_{из}}{0.7 \times \sqrt{\alpha}} = \frac{0.17}{0.7 \times \sqrt{0.353}} = 0.409 \quad \frac{Вт}{м \times ^\circ C}$$

$\lambda_{мс} = 0.12 \frac{Вт}{м \times ^\circ C}$ - теплопроводность междуслойной изоляции витков (кабельная бумага)

тогда $\lambda_{ср.} = \frac{\lambda \lambda_{мс} (d'_2 + \delta_{мсл})}{\lambda \delta_{мсл} + \lambda_{мс} d'_2} = \frac{0.409 \times 0.12 (4.06 + 0.48)}{0.409 \times 0.48 + 0.12 \times 4.06} = 0.326 \frac{Вт}{м \times ^\circ C}$

$$p = 1.68 \times \frac{J_2^2 \times a^2 \times 10^{-3} \frac{с^2}{\varnothing}}{(d'_2 + \delta_{мсл}) \times d'_2 \times 10^{-6}} \times 10^{-8} = 1.68 \times \frac{3267326.7^2 \times (3 \times 10^{-3})^2}{(4.06 + 0.48) \times 4.06 \times 10^{-6}} \times 10^{-8} = 87569.9 \frac{Вт}{м^3}$$

тогда

$$Q_{o2} = \frac{p (0.75 \times a_2)^2}{2 \times \lambda_{ср.}} = \frac{87569.9 (0.75 \times 0.03276)^2}{2 \times 0.326} = 81.081 \quad ^\circ C$$

Средний перепад температуры

$$Q_{оср} = \frac{2}{3} Q_{o2} = \frac{2}{3} \times 81.081 = 54.1 \quad ^\circ C$$

Перепад температуры на поверхности обмотки

$$Q_{ом2} = k \times q_2^{0.6} = 0.285 \times 418.54^{0.6} = 10.7$$

Перепад температуры обмотки над температурой масла

$$Q_{ом.ср2} = Q_{ом2} + Q_{o2} = 10.7 + 81.081 = 91.781 \quad ^\circ C$$

Согласно ГОСТ предельная температура обмоток в наиболее жаркое время года не более 110 °С.