

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
НАВОИЙСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ
НАВОИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ
КАФЕДРА «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА»**

**РАСЧЕТНО-ПОСНИТЕЛЬНАЯ
ЗАПИСКА К КУРСОВОМУ
ПРОЕКТУ**

**«Расчет двухобмоточного
трехфазного трансформатора »**

Рассчитал:

ст. гр. 2-10ЭЭ

Артыков Ж.

Проверил:

Шайматов Б.Х

Навои 2013 г.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:

1. Тип трансформатора: **ТМ-2500/35**.
2. Обмотки: концентрические.
3. Мощность трансформатора: **2500** кВА.
4. Число фаз: 3
5. Номинальное напряжение: ВН **35** кВ; НН **0,69** кВ.
6. Частота тока: 50 Гц.
7. Схема и группа соединения: **Y/Y₀ – 0**.
8. Характеристика по ГОСТу: 11677 – 85.
9. Потери холостого хода: **1420** Вт.
10. Потери короткого замыкания: **2500** Вт.
11. Напряжение короткого замыкания: **6,5%**
12. Ток холостого хода: **2%**.
13. Способ охлаждения: естественный масляный.
14. Режим работы: продолжительный.
15. Характер установки: наружный.

Порядок расчёта.

1. Расчёт основных электрических величин и изоляционных материалов.
2. Расчёт обмоток.
3. Расчёт параметров короткого замыкания.
4. Расчёт магнитной системы трансформатора и параметров холостого хода.
5. Тепловой расчёт трансформатора, расчёт системы охлаждения.

Введение.

Трансформаторы—это наиболее распространённые устройства в современной электротехнике. Трансформаторы большой мощности составляют основу систем передачи электроэнергии от электростанций в линии электропередачи. Они повышают напряжение переменного тока, что необходимо для экономной передачи электроэнергии на значительные расстояния. В местах распределения энергии между потребителями применяют трансформаторы, понижающие напряжение до требуемых для потребителей значений. Наряду с этим, трансформаторы являются элементами электроустановок, где они осуществляют преобразование напряжения питающей сети до значений необходимых для работы последних.

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более обмоток связанных индуктивно, и предназначенные для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока. Обмотку, присоединённую к питающей сети, называют первичной, а обмотку, к которой подсоединяется нагрузка—вторичной. Обычно все величины, относящиеся к первичной обмотке трансформатора помечают индексом 1, а относящиеся к вторичной—индексом 2.

Первичную обмотку трансформатора подсоединяют к питающей сети переменного тока. Ток первичной обмотки I_1 имеет активную и индуктивную составляющие. При разомкнутой вторичной обмотке (холостой ход), вследствие действия индуктивной составляющей тока I_{0m} , возникает магнитный поток, который намагничивает сердечник. Активная составляющая тока I определяется потерями, возникающими, в местах стали, при перемагничивании сердечника. Наибольшая часть потока Φ_1 сцеплённого с первичной обмоткой, сцеплена также со всеми обмотками фазы и является потоком взаимоиндукции между обмотками, или главным рабочим потоком Φ . Другая часть полного потока Φ_1 сцеплена не со всеми витками первичной и вторичной обмоток. Её называют потоком рассеивания.

ЭДС обмотки пропорциональна числу её витков. Отношение ЭДС первичной и вторичной обмоток называется *коэффициентом трансформации*, который пропорционален отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток.

Устройство силовых трансформаторов.

Трансформаторы имеют магнитопроводящие сердечники и токопроводящие обмотки. Для лучшего охлаждения сердечники и обмотки мощных трансформаторов погружаются в бак, наполненный маслом. Сердечники трансформаторов состоят из стержней, на которых размещаются обмотки, и ярм, которые служат для проведения потока между стержнями. Различают два вида сердечников: *стержневой* и *броневой*.

Броневой сердечник имеет разветвлённую магнитную систему, вследствие этого поток в ярме составляет половину от потока стержня, на котором расположены обмотки.

Трёхфазные трансформаторы выполняются обычно стержневыми. Их сердечники состоят из расположенных в одной плоскости трёх стержней, соединённых ярмами. Магнитная система таких трансформаторов несколько

несимметрична, так как магнитная проводимость потока крайних стержней и среднего – является неодинаковой.

Вследствие изменения потока, в контурах стали сердечника индуцируется ЭДС, вызывающая вихревые токи, которые стремятся замкнуться по контуру стали, расположенному в поперечном сечении стержня. Для уменьшения вихревых токов, сердечники трансформатора набираются (шихтуются) из изолированных прямоугольных пластин электротехнической стали толщиной 0.5мм или 0.35мм. Для уменьшения зазоров в местах стыков, слои сердечника, набранные различными способами, чередуются через один. После сборки, листы верхнего ярма вынимаются и на стержнях устанавливаются обмотки, после чего ярмо вновь зашихтовывается. Листы сердечника изолируются лаком или бумагой, имеющей толщину 0.03мм, и стягиваются при помощи изолированных шпилек.

В большинстве случаев в трансформаторах электропередач применяются так называемые концентрические обмотки, имеющие вид размещённых концентрически (одна в другой) полых цилиндров. Обычно ближе к сердечнику размещается обмотка низшего напряжения, требующая меньшей толщины изоляции сердечника.

По способу охлаждения трансформаторы разделяются на *масляные*, обмотки которых погружены в масло и *сухие*, охлаждаемые воздухом. Мощные силовые трансформаторы имеют масляное охлаждение. Трансформатор в большинстве случаев не является полностью твёрдым телом, а содержит большое количество жидкого масла, которое оказывает значительное влияние на теплопередачу.

В большинстве случаев в трансформаторах электропередач применяются так называемые *концентрические* обмотки, которые имеют вид размещённых концентрически полых цилиндров (одна в другой). Обычно ближе к сердечнику размещается обмотка низшего напряжения, требующая меньшей толщины изоляции сердечника.

В трансформаторах мощностью до 560 кВА концентрическая обмотка выполняется по типу цилиндрической обмотки, в большинстве случаев имеющей два слоя. Слои обмотки выполняются из провода круглого или прямоугольного сечения. Провод наматывается впритык по винтовой линии вдоль образующей цилиндра.

В трансформаторах больших мощностей концентрическая обмотка низшего напряжения выполняется по типу винтовой, в которой между двумя соседними по высоте витками оставляется канал.

В трансформаторах на напряжение 35 кВ и более применяют концентрическую обмотку, выполненную по типу непрерывной, в которой, отличие от винтовой, каждый виток состоит из нескольких концентрически намотанных витков обмотки. Катушки этой обмотки наматываются непрерывно одним проводом без пайки. При воздействии осевых сжимающих усилий, возникающих при внезапных коротких замыканиях, наиболее надёжными являются непрерывные обмотки.

1. Расчёт основных электрических величин и изоляционных расстояний.

1.1 Определение основных электрических величин

Расчёт проводим для трёхфазного трансформатора стержневого типа с концентрическими обмотками.

$$S_{\phi} = S' = S_n/3 = 2500/3 = 833.3 \text{ кВА}$$

Номинальные (линейные) токи на сторонах:

$$\text{ВН: } I_2 = \frac{S_n}{U_{н2} \times \sqrt{3}} = \frac{2500 \times 10^3}{35000 \times \sqrt{3}} = \frac{2500 \times 10^3}{60622} = 41.2 \text{ А}$$

$$\text{НН: } I_1 = \frac{S_n}{U_{н1} \times \sqrt{3}} = \frac{2500 \times 10^3}{690 \times \sqrt{3}} = \frac{2500 \times 10^3}{1195} = 2091.85 \text{ А}$$

Фазные токи соединения звезда равны линейным.

Фазные напряжения обмоток:

$$\text{ВН: } U_{\phi 2} = U_{н2} / \sqrt{3} = 35000 / \sqrt{3} = 20207 \text{ В}$$

$$\text{НН: } U_{\phi 1} = U_{н1} / \sqrt{3} = 690 / \sqrt{3} = 398 \text{ В}$$

Испытательное напряжение обмоток смотрим по таблице 4.1 (Л-1):

$$\text{ВН: } U_{\text{исп.2}} = 85 \text{ кВ}$$

$$\text{НН: } U_{\text{исп.1}} = 5 \text{ кВ}$$

По таблице 5.8 (Л-1) выбираем тип обмоток:

Обмотка ВН при напряжении 35 кВ и токе 41.2 А – непрерывная катушечная из прямоугольного провода.

Обмотка НН при напряжении 690 кВ и токе 2091.85 А – винтовая двухходовая из прямоугольного провода.

Для испытательного напряжения обмотки ВН, $U_{\text{исп.2}} = 85 \text{ кВ}$ по таблице 4.5 (Л-1) находим изоляционные расстояния:

$$a_{12} = 27 \text{ мм}; \quad l_{02} = 75 \text{ мм}; \quad a_{22} = 30 \text{ мм}$$

Для обмотки НН, $U_{\text{исп.1}} = 5 \text{ кВ}$

$$a_{01} = 15 \text{ мм}$$

1.2. Определение исходных данных расчёта.

Мощность обмоток одного стержня:

$$S = 833,3 \text{ кВА}$$

Ширина приведённого канала рассеивания:

$$a_p = a_{12} + (a_1 + a_2) / 3$$
$$(a_1 + a_2) / 3 = K \sqrt[4]{S} \times 10^{-2}, \text{ где } K=0.52 \text{ (из табл. 3.3), (Л-1)}$$
$$(a_1 + a_2) / 3 = 0.52 \sqrt[4]{833,3} \times 10^{-2} = 0.0279 \text{ м}$$
$$a_p = a_{12} + (a_1 + a_2) / 3 = 27 \times 10^{-3} + 0.0279 = 0.0549 \text{ м}$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$U_a = P_k / 10 S_n = 25000 / 10 \times 2500 = 1 \%$$

Реактивная составляющая: $U_p = \sqrt{U_k^2 - U_a^2} = \sqrt{6.5^2 - 1^2} = 6,42 \%$

Выбираем трёхфазную стержневую шихтованную магнитную систему с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми стыками на среднем стержне по рис.1.

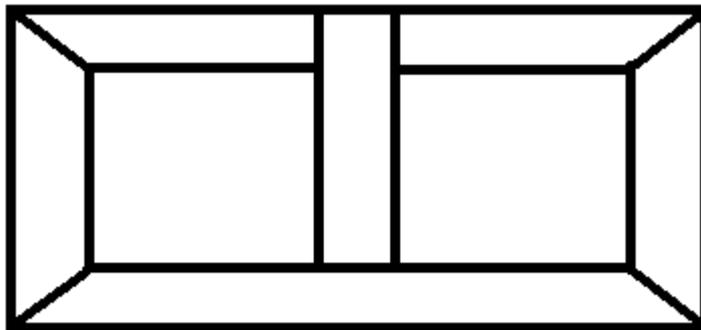


Рис. 1 Схема плоской магнитной системы трансформатора.

Прессовка стержней бандажами из стеклоленты и ярм стальными балками. Материал магнитной системы – холоднокатаная сталь марки 3404 толщиной 0.35 мм.

Индукция в стержне $B_c = 1.62$ Тл (по таблице 2.4). В сечении стержня 9 ступеней, коэффициент заполнения круга $K_{кр} = 0.929$ (по таблице 2.5), изоляция пластин – нагревостойкое изоляционное покрытие плюс

однократная лакировка, $K_3 = 0.97$ (по таблице 2.2) , коэффициент заполнения сталью $k_c = K_{кр} \times K_3 = 0.929 \times 0.97 = 0.901$

Ярмо многоступенчатое, число ступеней 6, коэффициент усиления ярма (по таблице 8.7) :

$$k_{я} = 1.1$$

индукция в зазоре:

$$B_{я} = B_c / k_{я} = 1.62 / 1.1 = 1.473 \text{ Тл}$$

Число зазоров магнитной системы на косом стыке = 4, на прямом = 3.

Индукция в зазоре на прямом стыке:

$$B_3'' = B_c = 1.62 \text{ Тл}$$

На косом стыке:

$$B_3' = B_c / \sqrt{2} = 1.62 / \sqrt{2} = 1.146 \text{ Тл}$$

Удельные потери в стали $p_c = 1.353 \text{ Вт/кг}$; $p_{я} = 1,242 \text{ Вт/кг}$.

Удельная намагничивающая мощность $q_c = 1.958 \text{ ВА/кг}$, $q_{я} = 1,66 \text{ ВА/кг}$,

Для зазоров на прямых стыках $q_3'' = 25100 \text{ ВА/кг}$,

для зазора на косых стыках $q_p' = 3200 \text{ ВА/м}^2$.

По таблице 3.6 (Л-1) находим коэффициент, учитывающий отношение основных потерь в обмотках к потерям короткого замыкания, $k_{л} = 0.91$ и по таблице 3.4 и 3.5 (Л-1) находим постоянные коэффициенты для медных обмоток $a = 1.4$ и $b = 0.3$.

Принимаем $k_p \leq 0.95$.

Диапазон изменения β от 1.5 до 3.6

1.3. Расчет основных коэффициентов.

Расчет коэффициентов проводится по следующим формулам (3.30) , (3.36) , (3.43) , (3.44) , (3,52) , (3.65) :

$$A = 0.507 \times \sqrt[4]{\frac{S' \times a_p \times k_p}{f \times u_p \times B_c^2 \times k_c^2}} ;$$

$$A = 0.507 \times \sqrt[4]{\frac{833.3 \times 0.0549 \times 0.95}{50 \times 6.42 \times 1.62^2 \times 0.901^2}} = 0.254 ;$$

$$A_1 = 5.633 \times 10^4 \times k_c \times A^3 \times a;$$

$$A_1 = 5.633 \times 10^4 \times 0.901 \times 0.254^3 \times 1.4 = 1164.4 \text{ кг};$$

$$A_2 = 3.605 \times 10^4 \times k_c \times A^2 \times l_0;$$

$$A_2 = 3.605 \times 10^4 \times 0.901 \times 0.254^2 \times 0.075 = 157.2 \text{ кг};$$

$$B_1 = 2.4 \times 10^4 \times k_c \times k_{\text{я}} \times A^3 \times (a + b + e);$$

$$B_1 = 2.4 \times 10^4 \times 0.901 \times 1.1 \times 0.254^3 \times (1.4 + 0.3 + 0.41) = 822.5 \text{ кг};$$

$$B_2 = 2.4 \times 10^4 \times k_c \times k_{\text{я}} \times A^2 \times (a_{12} + a_{22});$$

$$B_2 = 2.4 \cdot 10^4 \times 0.901 \times 1.1 \times 0.254^2 \times (0.027 + 0.03) = 87.5 \text{ кг};$$

$$C_1 = K_0 \times \frac{S \times a^2}{k_{\text{д}} \times k_c^2 \times B_c^2 \times u_a \times A^2};$$

$$C_1 = 2.46 \times 10^{-2} \times \frac{2500 \times 1.4^2}{0.91 \times 0.901^2 \times 1.62^2 \times 1. \times 0.254^2} = 963.7 \text{ кг};$$

$$M = 0.244 \times 10^{-6} \times k_{\text{к,3}}^2 \times k_{\text{д}} \times k_{\text{р}} \times (P_{\text{к}} / (a \times A));$$

$$M = 0.244 \times 10^{-6} \times 34.7^2 \times 0.91 \times 0.95 \times (25000 / (1.4 \times 0.254)) = 17.9 \text{ МПа}$$

$$k_{\text{к,3}} = 1.41 \times \frac{100}{u_k} \times (1 + e^{-\pi \times u_a / u_p});$$

$$k_{\text{к,3}} = 1.41 \times \frac{100}{6.5} \times (1 + e^{-\pi \times 1 / 6.42}) = 34,7;$$

Минимальная стоимость активной части трансформатора имеет место при условиях, определяемых (3.55) Для рассчитываемого трансформатора

$$B = 2 \times (B_2 + A_2) / (3 \times B_1);$$

$$B = 2 \times (157.2 + 87.5) / (3 \times 822.5) = 0.20;$$

$$C = A_1 / (3 \times B_1);$$

$$C = 1164.4 / (3 \times 822.5) = 0.470;$$

$$k_{\text{и,р}} = 1.06; k_{\text{о,с}} = 2.36 \text{ по таблице 3.7}$$

$$D = k_{\text{о,с}} \times k_{\text{и,р}} \times (2 \times C_1 / 3 \times B_1);$$

$$D = 2.36 \times 1.06 \times (2 \times 963.7) / (3 \times 822.5) = 1.95$$

$$x^5 + B \times x^4 + C \times x + D = 0$$

$$x^5 + 0.20 \times x^4 + 0.470 \times x + 1.95 = 0$$

по выражениям 3.61 и 3.66 находим предельные значения β по допустимым значениям плотности тока и растягивающим механическим напряжениям.

$$x_J \leq 4.5 \cdot 10^6 \sqrt{2.4 \times 10^{-12} \times C_1 / (k_d P_\kappa)} \quad \beta_J = x_J^4;$$

$$x_J = \leq 4.5 \sqrt{2.4 \times 963,7 / (0.91 \times 25000)} = 1,43 ; \quad \beta_J = 1.43^4;$$

$$\beta_J = 4.18;$$

$$x_\sigma \leq \sqrt[3]{\sigma_p / M} ;$$

где σ_p – обычно для медного провода допускают значение не более 60 МПа

$$x_\sigma \leq \sqrt[3]{60 / 17,9} = 1,5 ; \quad \beta_\sigma = 1.5^4 = 5.06;$$

$$\beta_\sigma = x_\sigma^4;$$

Оба этих значений β лежат за пределами обычно принимаемых. Масса одного угла магнитной системы по (3.45 а)

$$G_y = 0.492 \times 10^4 \times k_c \times k_\alpha \times A^3 \times x^3 ;$$

$$G_y = 0.492 \times 10^4 \times 0.91 \times 1.1 \times 0.254^3 \times x^3 = 79.91 \cdot x^3$$

Активное сечение стержня по (3.59)

$$\Pi_c = 0.785 \times k_c \times A^2 \times x^2;$$

$$\Pi_c = 0.785 \times 0,901 \times 0.254^2 \times x^2 = 0.0456 \cdot x^2;$$

Площадь зазора на прямом стыке

$$\Pi_3'' = \Pi_c = 0.0456 \times x^2 ;$$

На косом стыке

$$\Pi_3' = \Pi_c \times \sqrt{2} ;$$

$$\Pi_3' = 0.0456 \times x^2 \times \sqrt{2} = 0.0645 \times x^2;$$

Для магнитной системы рис 217,б по (8.33) потери холостого хода с учетом таблиц 8.10 , 8.13 и 8.14.

$$P_x = k_{п,д} \times p_c (G_c + 0.5 \times k_{п,у} \times G_y) + k_{п,д} \times p_\alpha (G_\alpha - 6 \times G_y + 0.5 k_{п,у} \times G_y);$$

где : $k_{п,д} = 1.15$ по таблице 8.14;

$k_{п,у} = 10,18$ по таблице 8.13;

p_α и p_c – определены в пункте 1.2;

$$P_x = 1.15 \times 1.353 \times (G_c + 0.5 \times 10.18 \times G_y) + 1.15 \times 1.242 \times (G_y - 6 \times G_y + 0.5 \times 10.18 \times G_y) = 1.556 \times G_c + 1.428 \times G_y + 6.62 \times G_y;$$

Намагничивающая мощность по (8.44) с учетом таблицы 8.17 и 8.20

$$Q_x = k'_{т,д} \times k''_{т,д} \times q_c \times (G_c + 0.5 \times k_{т,у} \times k_{т,пл} \times G_y) + k'_{т,д} \times k''_{т,д} \times q_y (G_y - 6 \times G_y + 0.5 \times k_{т,у} \times k_{т,пл} \times G_y) + k''_{т,д} \times \sum q_z \times n_z \times \Pi_z ;$$

где : $k_{т,у} = 42,45$ по таблице 8.20;

$k_{т,пл} = 1,25$ по таблице 8.21;

$k'_{т,д} = 1,20$, $k''_{т,д} = 1,07$ (из пояснений к формуле 8.44);

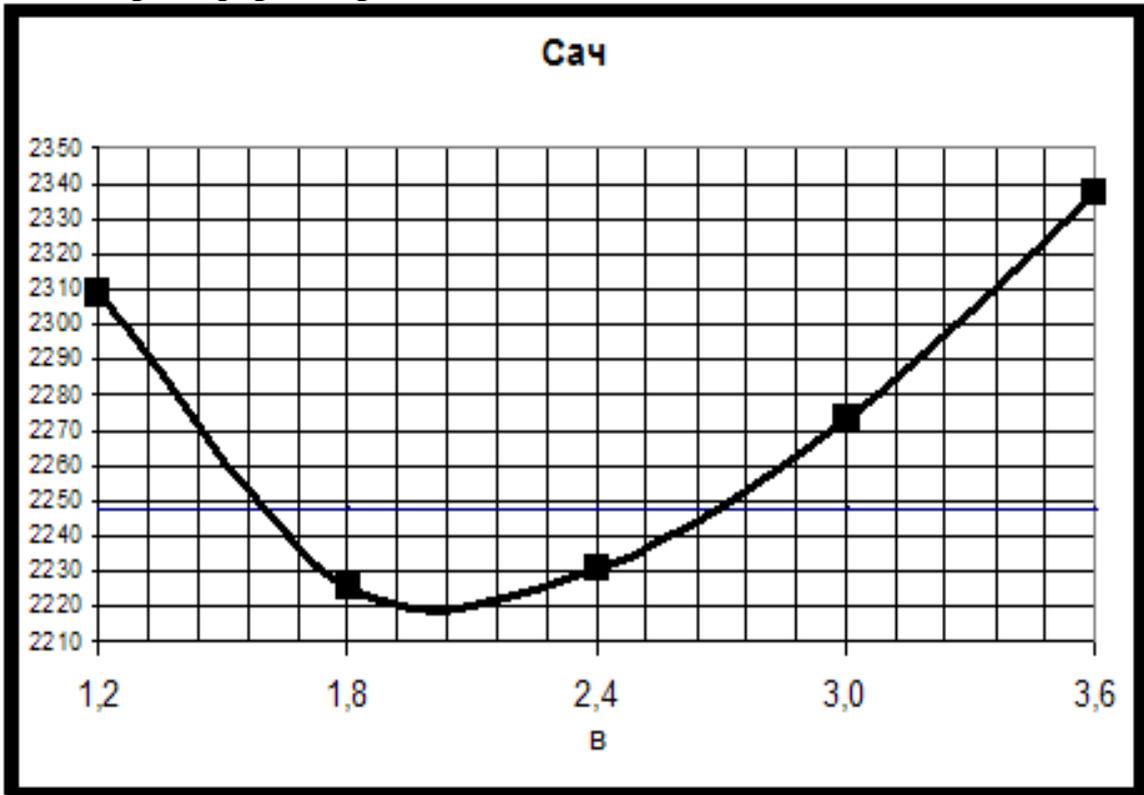
q_c и q_y – определены в пункте 1.2;

$$Q_x = 1.20 \times 1.07 \times 1.958 \times (G_c + 0.5 \times 42.45 \times 1.25 \times G_y) + 1.20 \times 1.07 \times 1,66 \times (G_y - 6 \times G_y + 0.5 \times 42.45 \times 1.25 \times G_y) + 1.07 \times 3200 \times 4 \times 0,0645 \times x^2 + 1.07 \times 25100 \times 3 \times 0,0456 \times x^2 = 2.514 \times G_c + 2.131 \times G_y + 110.46 \times G_y + 4557 \times x^2;$$

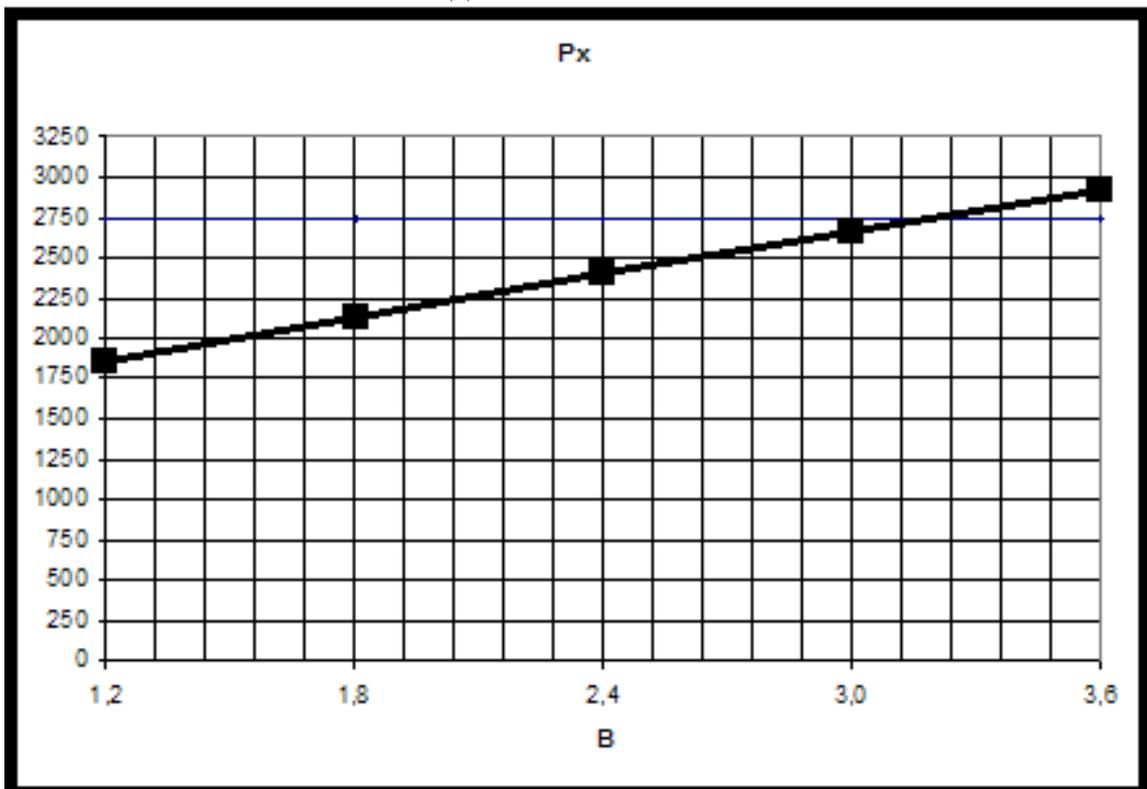
Весь дальнейший расчет, начиная с определения массы стали магнитной системы, для пяти различных значений β (от 1.2 до 3.6) приводится по форме табл. 3.8.

β	1,20	1,80	2,40	3,00	3,60	1,83
$x = \sqrt[4]{\beta}$	1,047	1.16	1,24	1,32	1,38	1.16
$x^2 = \sqrt[4]{\beta^2}$	1,095	1,34	1,55	1,73	1,9	1.35
$x^3 = \sqrt[4]{\beta^3}$	1,15	1,55	1,93	2,28	2,61	1.57
$A_1/x = 1164.4/x$	1112.1	1003.8	939.03	822.1	843.8	1003.8
$A_2 \cdot x^2 = 157.2 \cdot x^2$	172.1	210.6	243.6	271.9	298.7	212.2
$G_c = A_1/x + A_2 \cdot x^2$	1284.2	1214.4	1182.6	1154	1142.5	1216
$B_1 \cdot x^3 = 822.5 \cdot x^3$	945.9	1274.9	1587.4	1875.3	2146.7	1291.3
$B_2 \cdot x^2 = 87.5 \cdot x^2$	95.8	117.2	135.6	151.4	166.2	118.1
$G_{\text{я}} = B_1 \cdot x^3 + B_2 \cdot x^2$	1041.7	1392.1	1723	2026.7	2312.9	1409.4
$G_{\text{cr}} = G_c + G_{\text{я}}$	2325.9	2606.5	2905.6	3180.7	3455.4	2625.1
$G_y = 79.91 \cdot x^3$	91.9	123.9	154.2	161.7	208.6	125.5
$1.556G_c$	1998.2	1889.6	1840.1	1795.6	1777.7	1892.1
$1.428G_{\text{я}}$	1487.5	1987.9	2460.4	2894.1	3302.8	2012.6
$6.62G_y$	608.4	820.2	1020.8	1070.5	1380.9	830.8
$P_x = 1.556 G_c + 1.428G_{\text{я}} + 6.62G_y$	4094.1	4697.7	5321.3	5760.2	6461.4	4735.5
$\Pi_c = 0.0456 \cdot x^2$	0.0499	0.0611	0.0707	0.0789	0.0866	0.0616
$2.514 \cdot G_c$	3228.5	3053	2973.1	2901.2	2872.2	3057
$2.131 \cdot G_{\text{я}}$	2219.9	2966.6	3671.2	4318.9	4928.8	3003.4
$110.46G_y$	10151.3	13686	17032.9	17861.4	23042	13862.7
$4557 x^2$	4989.9	6106.4	7063.4	7883.6	8658.3	6152
$Q_x = 2.514 \cdot G_c + 2.131 \cdot G_{\text{я}} + 110.46G_y + 4557 x^2$	20589.6	25812	30740.6	32965.1	39501.3	26075.1
$i_0 = Q_x/10S, \%$	0.824	1.032	1.23	1.319	1.58	1.043
$G_0 = C_1/x^2 = 963.7/x^2$	880.1	719.2	621.7	557.1	507.2	713.9
$G_{\text{np}} = 103 \cdot 1.03 \cdot G_0$	932.9	762.4	659	590.5	537.6	756.7
$k_{o,c} \cdot G_{\text{np}} = 2.36 \cdot G_{\text{np}}$	2201.6	1799.4	1555.2	1393.6	1268.7	1785.8
$C_{a,\text{ч}} = G_{\text{cr}} + k_{o,c} \cdot G_{\text{np}}$	4527.5	4405.9	4460.8	4574.3	4724.1	4410.9
$J = \sqrt{k_{\text{д}} \cdot P_{\text{к}} / (K \cdot G_0)} = \frac{97,36 \cdot 10^6}{\sqrt{G_0}}$	$3,282 \cdot 10^6$	$3,63 \cdot 10^6$	$3,905 \cdot 10^6$	$4,125 \cdot 10^6$	$4,32310^6$	$3,64 \cdot 10^6$
$\sigma_p = M \cdot x^3 = 17.9 \cdot x^3$	20,59	27,75	34,55	40,81	46,72	28,1
$d = A \cdot x = 0.0254x$	0,266	0,295	0,315	0,335	0,351	0,295
$d_{12} = a \cdot d = 1.4 \cdot d$	0,372	0,413	0,441	0,469	0,491	0,413
$l = \pi \cdot d_{12} / \beta$	0,974	0,721	0,577	0,491	0,428	0,709
$2a_2 = bd = 0.3d$	0,08	0,089	0,095	0,101	0,105	0,089
$C = d_{12} + a_{12} + 2a_2 + a_{22}$	0,509	0,559	0,593	0,627	0,653	0,559

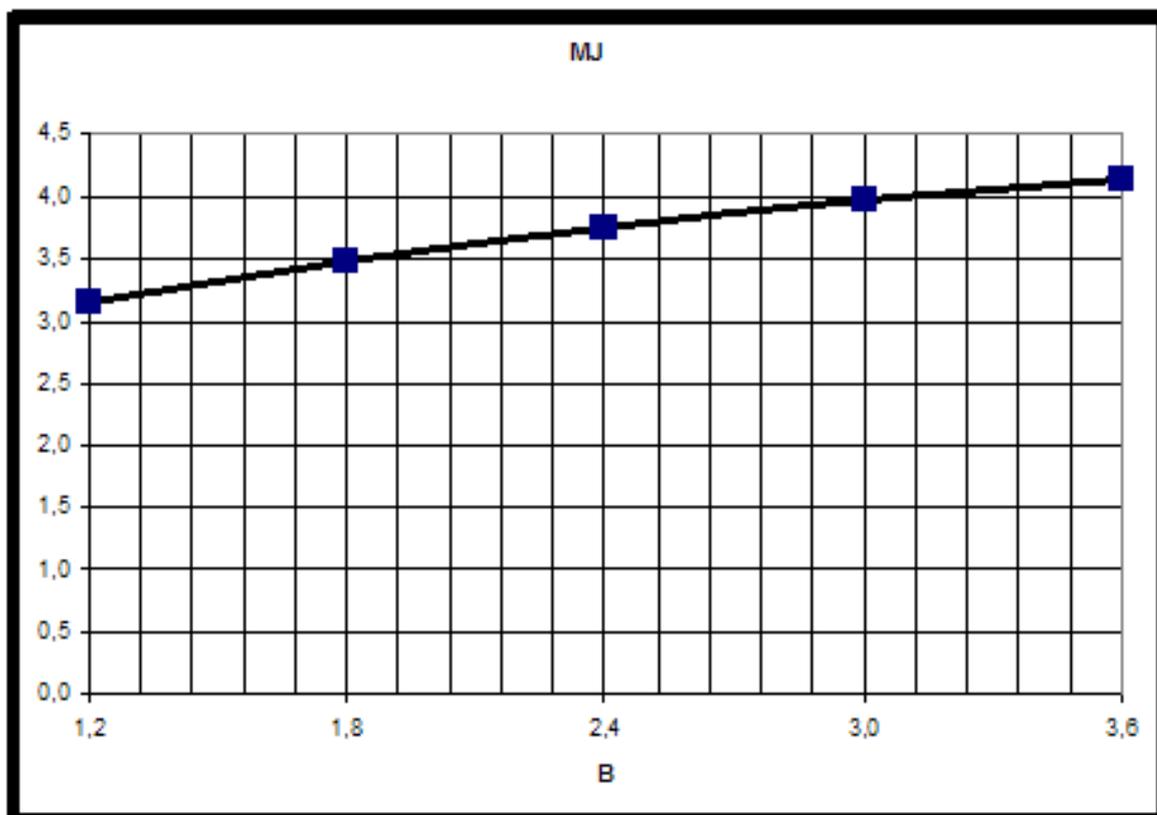
Изменение относительной стоимости активной части с изменением β для трансформатора типа ТМ – 2500/35 с медными обмотками



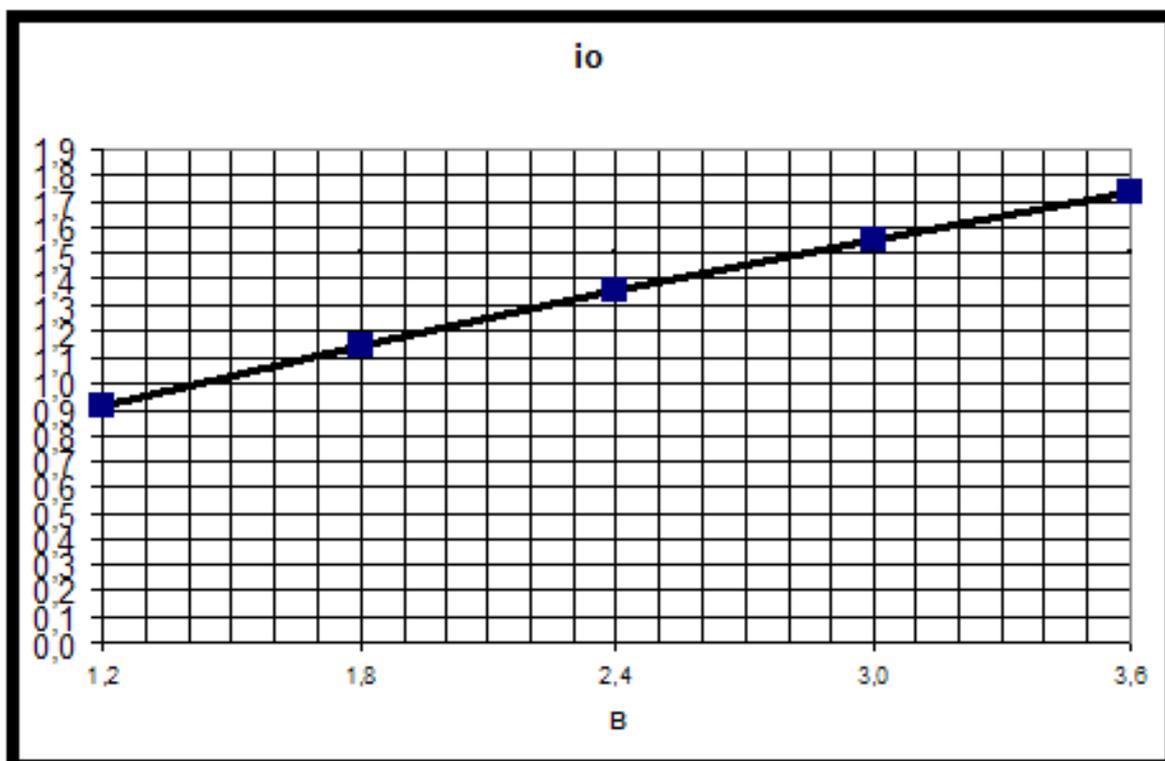
Изменение потерь с изменением β для трансформатора типа ТМ 2500/35 с медными обмотками.



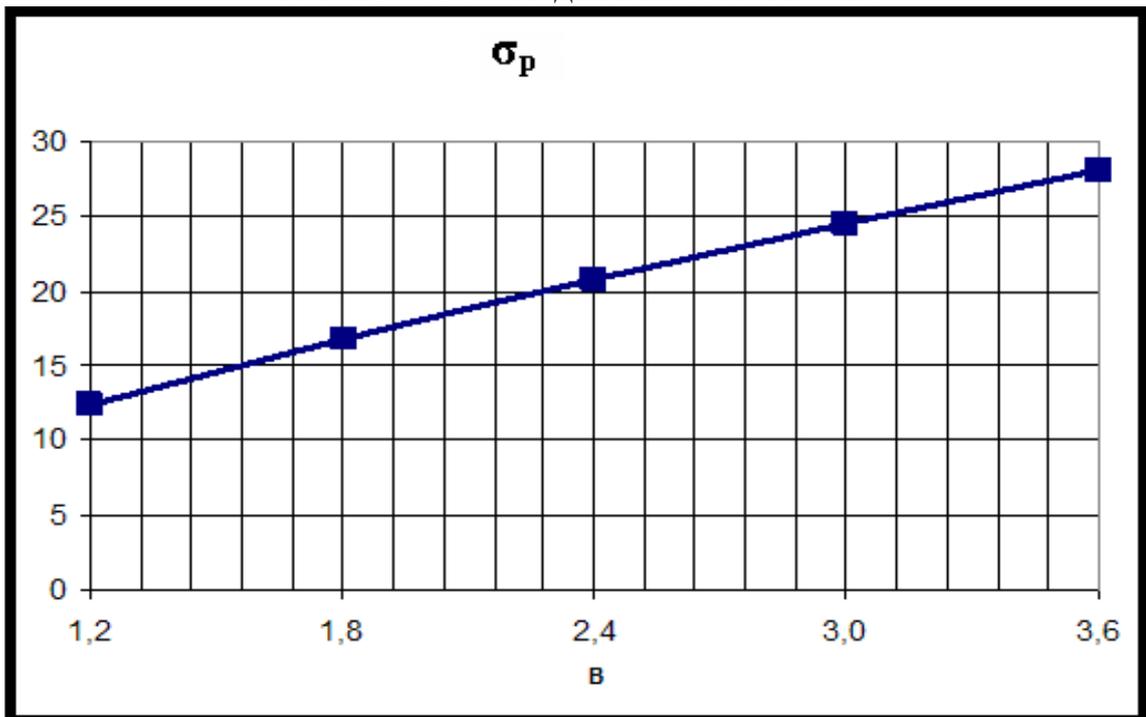
Изменение плотности тока с изменением β для трансформатора типа ТМ -2500/35 с медными обмотками.



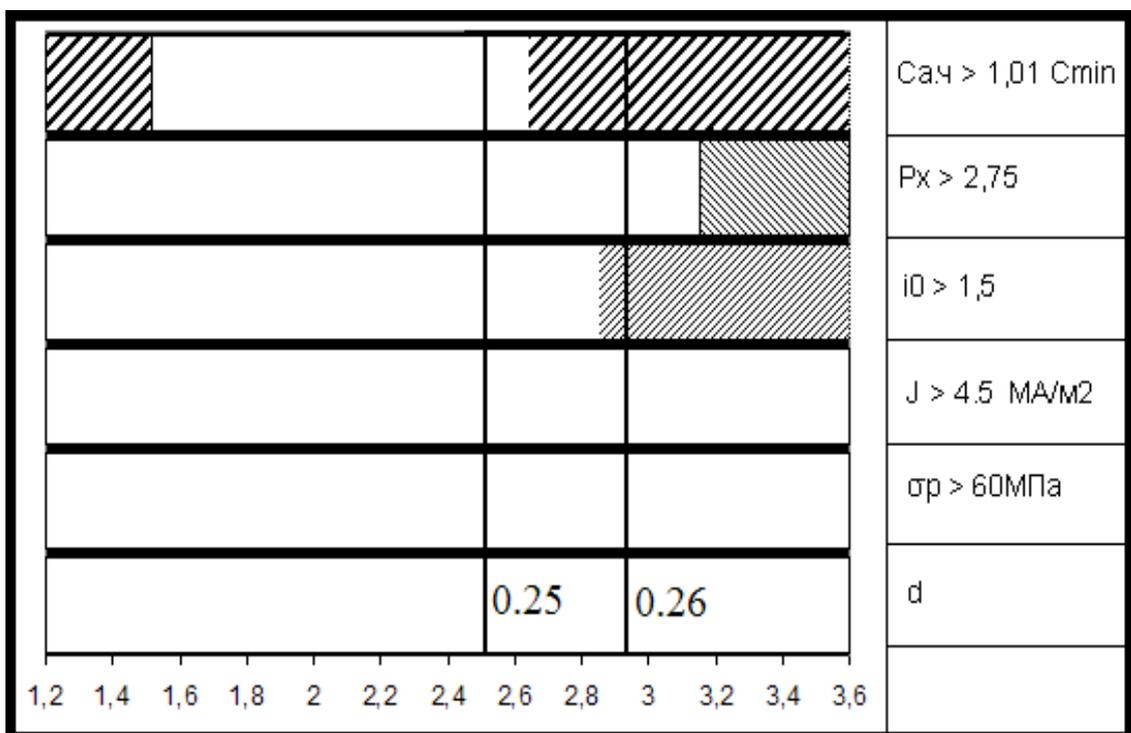
Изменение тока холостого хода с изменением β для трансформатора типа ТМ -2500/35 с медными обмотками.



Изменение механических натяжений для трансформатора типа ТМ -2500/35 с медными обмотками.



Определение оптимального значения β и диаметра стержня d для трансформатора типа ТМ -2500/35 с медными обмотками.



Используя, рисунок для определения оптимального значения β определяем, что самое оптимальное β=2.506 при d = 0,25м. Для выданных значений β и d рассчитываем и находим по графикам приведенные ниже данные трансформатора.

1.5 Определение основных размеров.

$$\beta = 1.83; x = 1.16; x^2 = 1.35; x^3 = 1.57;$$

$$\text{Диаметр стержня: } d = Ax = 0,254 \times 1,16 = \mathbf{0,29 \text{ м}};$$

Активное сечение стержня:

$$П_c = 0.0456x^2 = 0.0456 \times 1.35 = \mathbf{0,0616 \text{ м}^2};$$

Средний диаметр обмоток:

$$d_{12} = ad = 1,4 \times 0.29 = \mathbf{0.4125 \text{ м}};$$

Высота обмоток:

$$l = \pi d_{12} / \beta = 3.14 \times 0.4125 / 1.83 = \mathbf{0.708 \text{ м}};$$

Высота стержня:

$$l_c = l + 2l_0 = 0.708 + 2 \times 0.075 = \mathbf{0.858 \text{ м}};$$

Расстояние между осями стержней:

$$C = d_{12} + a_{12} + bd + a_{22} = 0.4125 + 0.027 + 0.3 \times 0.29 + 0.03 = \mathbf{0,5565 \text{ м}};$$

ЭДС одного витка:

$$u_b = 4.44f\Pi_C B_C = 4.44 \times 50 \times 0.0616 \times 1.62 = \mathbf{22.15 \text{ В}};$$

Масса стали:

$$G_{ст} = \mathbf{2625 \text{ кг}};$$

Масса металла обмоток:

$$G_0 = \mathbf{714 \text{ кг}};$$

Масса провода:

$$G_{пр} = 1.03 \times G_0 = 1.03 \times 714 = \mathbf{735.4 \text{ кг}};$$

Плотность тока:

$$J = \mathbf{3.78 \times 10^6 \text{ А/м}^2};$$

Механическое напряжение в обмотках:

$$\sigma_p = M \cdot x^3 = 17.9 \times 1.57 = \mathbf{28.1 \text{ МПа}}$$

Стоимость активной части в условных единицах

$$C_{a,ч} = \mathbf{4411}$$

Потери и ток холостого хода.

$$P_x = \mathbf{2452.88 \text{ Вт}};$$

Ток холостого хода

$$i_0 = \mathbf{1,39\%}$$

2. Расчет обмоток.

2.1. Расчёт обмоток НН.

Число витков обмоток НН:

$$\omega_1 = U_{\phi 1} / U_B = 399 / 22.15 = \mathbf{18.04}.$$

Принимаем $\omega_1 = \mathbf{19}$

Напряжение одного витка $U_B = U_{\phi 1} / \omega_1 = 399 / 19 = \mathbf{21В}$

Средняя плотность тока в обмотках :

$$J_{cp} = 10^4 \times 0.746 k_g P_k U_B / S d_{12} = 10^4 \times 0.746 \times 0.91 \times 125000 \times 21 / 2500 \times 0.4125 = \\ = \mathbf{3.46 \times 10^6 \text{ А/м}^2} = \mathbf{3.46 \text{ МА/м}^2}$$

Сечение витка ориентировочно:

$$S_1 = S_B = I_{\phi 1} / J_{cp} = 2092 / 3.46 \times 10^6 = \mathbf{604.6 \times 10^{-6} \text{ м}^2} = \mathbf{604.6 \text{ мм}^2}$$

По таблице 5.8 по мощности 2500 кВА, току на один стержень 2092 А, номинальному напряжению одной обмотки 690 В и сечению витка 604.6 мм² – выбираем конструкцию винтовой обмотки.

Размер радиального канала предварительно: $h_k = \mathbf{5 \text{ мм}}$.

Число реек по окружности обмотки – **12**.

Ширина между витковых прокладок: $b_{пр.} = \mathbf{40 \text{ мм}}$

Ориентировочный осевой размер витка:

$$h_{в1} = \frac{l}{w_1 + 4} - h_k = \frac{0.708}{19 + 4} - 0.005 = 0.026 \text{ м} = \mathbf{26 \text{ мм}}$$

Ввиду того, что $h_{в1}$ больше предельно допустимого $h_{в1} \geq 6,5 \text{ мм}$, выбираем двухходовую винтовую обмотку с радиальными каналами между витками с равномерно распределённой транспозицией по рисунку 6.5 г.

По полученным ориентировочным значениям S_1 и $h_{в1}$ в таблице 5.2 подбираем значение сечения витка из 12-ти параллельных проводов:

$$\mathbf{ПБ12 \times \frac{5.30 \times 10.0}{5.80 \times 10.50}}$$

Разделённых на две группы по шесть проводов с каналами по 4 мм между витками (рис.2).

Для частичной компенсации разрыва в обмотке ВН при регулировании напряжения размещаем в середине высоты обмотки НН **шесть радиальных каналов по 10 мм**.

Полное сечение витка:

$$S_1 = 12 \times 52.1 = 625.2 \text{ мм}^2 = \mathbf{625.2 \times 10^{-6} \text{ м}^2}$$

Плотность тока:

$$J_1 = 2092 \times 10^6 / 625.2 = \mathbf{3.35 \text{ МА/м}^2}$$

По графику рис.5.34(а) ($J-I$), находим, что для $J = 3.35 \text{ МА/м}^2$ и $b = 10 \text{ мм}$,

$$\mathbf{q = 1200 \text{ Вт/м}^2}$$

Высота обмотки:

$$l_1 = 2 \times b' \times 10^{-3} \times (\omega_1 + 1) + k \times h_k \times (2\omega_1 + 1) \times 10^{-3};$$

$$l_1 = (19+1) \times 2 \times 10.5 \times 10^{-3} + 0.95 \times 5 \times (38+1) = 610 \approx \mathbf{0.61 \text{ м}}$$

Радиальный размер обмотки: $a_1 = 6 \times 5.8 \times 10^{-3} = \mathbf{0.035 \text{ м}}$.

По таблице 4.4 (Л-1) для $U_{исп.1} = 5 \text{ кВ}$, $S = 2500 \text{ кВА}$ и винтовой обмотки находим $a_{01} = \mathbf{15 \text{ мм}}$, обмотка наматывается на 12 рейках на бумажно-бакелитовом цилиндре размером

$$\frac{0.25}{0.258} \times \mathbf{0.500 \text{ м}}$$

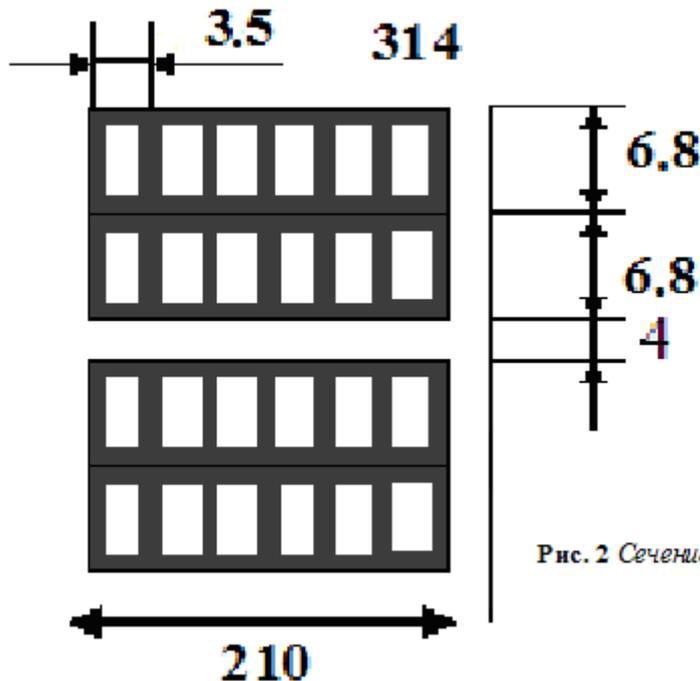


Рис. 2 Сечение витка обмотки НН.

Внутренний диаметр обмотки:

$$D'_1 = d + 2a_{01} = 0.29 + 2 \times 0.015 = \mathbf{0.32 \text{ м}}$$

Внешний диаметр обмотки по (7.19):

$$D''_1 = D'_1 + 2a_1 = 0.32 + 2 \times 0.035 = \mathbf{0.39 \text{ м}}$$

Плотность теплового потока на поверхности обмотки по (7.19)

$$q = \frac{107 J I W_k k_g}{k_3 (b' + a')} \times 10^{-10} = \frac{107 \times 3.35 \times 10^6 \times 2092 \times 0.5 \times 1.05}{0.75 \times (0.011 + 0.035)} \times 10^{-10} \approx \mathbf{1141 \text{ Вт/м}^2}$$

В обмотке предусматривается равномерно распределённая транспозиция параллельных проводов-12 транспозиций по принципиальной схеме рис. 5.29 (Л-1). Первая транспозиция после первого витка, 11 последующих с шагом в два витка, т.е. после третьего витка, пятого витка и т.д. .

Масса металла обмотки по (7.6) (Л-1):

$$G_{01} = 28 \times 10^3 c D_{cp} \omega_1 \Pi_1 = 28 \times 10^3 \times 3 \times 0.355 \times 19 \times 625.2 \times 10^{-6} = \mathbf{354.2 \text{ кг}}$$

Масса провода по таблице 5.5 (Л-1)

$$G_{np1} = 354.2 \times 1.015 = \mathbf{359.5 \text{ кг}}$$

2.2 Расчёт обмотки ВН.

Выбираем схему регулирования по рис. 3 (6.14) (Л-1) с выводом концов всех трёх фаз обмотки к одному трёх фазному переключателю. Контакты переключателя рассчитываются на рабочий ток 41.2 А. Наибольшее напряжение между контактами переключателя в одной фазе:

$$\text{рабочее: } \frac{10}{\sqrt{3}} \%U_2, \text{ т.е. } \mathbf{2020 \text{ В}}$$

$$\text{испытательное: } 2 \times \frac{10}{\sqrt{3}} \%U_2, \text{ т.е. } \mathbf{4040 \text{ В.}}$$

для получения на стороне В различных напряжений необходимо соединять

Напряжение, В	Ответвления обмотки
36 750	A ₂ A ₃ B ₂ B ₃ C ₂ C ₃
35 875	A ₃ A ₄ B ₃ B ₄ C ₃ C ₄
35 000	A ₄ A ₅ B ₄ B ₅ C ₄ C ₅
34 125	A ₅ A ₆ B ₅ B ₆ C ₅ C ₆
33 250	A ₆ A ₇ B ₆ B ₇ C ₆ C ₇

Число витков в обмотке ВН при номинальном напряжении:

$$\omega_{н2} = U_{\phi 2} / U_B = \frac{20207}{21} = \mathbf{962 \text{ витка}}$$

Число витков на одной ступени регулирования:

$$\omega_p = \frac{\Delta U}{U_B \sqrt{3}} = \frac{875}{21 \cdot \sqrt{3}} = \mathbf{24 \text{ витка}}$$

Для пяти ступеней

Напряжение, В	Число витков на ответвлениях
36 750	962+2×24=1010
35 875	962+24=986
35 000	962
34 125	962-24=938
33 250	962-2×24=914

Ориентировочная плотность тока

$$J_2 \approx 2 \times J_{\text{ср.}} - J_1 = 2 \times 3.46 \times 10^6 - 3.55 \times 10^6 = \mathbf{3.57 \text{ МА/м}^2}$$

Ориентировочное сечение витка

$$\Pi_2 \approx \frac{I_2}{J_2} = \frac{41.2}{3.57 \cdot 10^6} = 11.54 \times 10^{-6} \text{ м}^2 = \mathbf{11.54 \text{ мм}^2}$$

По таблице 5,8 (Л-1) выбираем непрерывную катушечную обмотку из медного прямоугольного провода (S=2500 квА; I₂=41.2А; U₂= 35000 В; Π₂ =

11.54 мм²). По сортаменту медного обмоточного провода (табл. 5,2) выбираем провод марки ПБ.

$$\text{ПБ-1} \times \frac{1.70 \times 7.10}{2.20 \times 7.60} \text{ сечением } \Pi_2 = 11.8 \times 10^{-6} \text{ м}^2$$

Плотность тока в обмотке: $J_2 = \frac{I_2}{\Pi_2} = \frac{41.2}{11.8 \cdot 10^{-6}} = 3.49 \text{ МА/м}^2$.

При $J_2 = 3.49 \text{ МА/м}^2$ и $b=7.1 \text{ мм}$ по графикам рис. 5,34 (а) находим $q = 1000 \text{ Вт/м}^2$

Принимаем конструкцию обмотки с радиальными каналами по 4 мм между всеми катушками. Две крайние катушки вверху и внизу катушки отделены каналами по 7,5 мм (см. табл. 4,10) (Л-1).

Схема регулирования напряжения (по рис. 6,14) (Л-1), канал в месте разрыва обмотки $h_{кр} = 12 \text{ мм}$ (см. табл.4,9) (Л-1).

Осевой размер катушки 7.6 мм.

Число катушек на стержне ориентировочно:

$$N_{\text{кат.2}} \approx \frac{l_2 \cdot 10^3}{b + h_k} = \frac{0.708 \times 10^3}{7.6 + 4} = 61.03$$

В целях соблюдения условий по высоте катушек берем 61

Число витков в катушке ориентировочно:

$$\omega_{\text{кат}} \approx \frac{1010}{61} = 16.56 \approx 17$$

Радиальный размер: $a_2 = 2.2 \times 17 = 37.4 \approx 37 \text{ мм}$

Общее распределение витков по катушкам:

42 основные катушки В по 18 витков.....	756 витков
7 основных катушек Г по 17 витков.....	119 витков
8 регулировочных катушек Д по 12 витков.....	96 витков
4 катушки с усиленной изоляцией Е 9.75 витка	39 витков

Всего: 61 катушек.....1010 витков

Расположение катушек на стержне и размеры радиальных каналов приняты по рис. 3 (а).

Осевой размер обмотки:

$$l = 0.61 \text{ м}$$

По испытательному напряжению $U_{\text{исп.}} = 85 \text{ кВ}$ и мощности трансформатора $S=1000$,

канал между обмотками ВН и НН $a_{12} = 27 \text{ мм}$

Толщина цилиндра $\delta_{12} = 5 \text{ мм}$

Выступ цилиндра за высоту обмотки $\Gamma_{11} = 55 \text{ мм}$

Расстояние между обмотками ВН двух соседних стержней $a_{22} = 30 \text{ мм}$

Толщина междуфазной перегородки $\delta_{22} = 3 \text{ мм}$

Расстояние от обмотки ВН до яра $\Gamma_0 = 75 \text{ мм}$

Согласно параграфу 4,3 (Л-1) принимаем размеры бумажно-бакелитового цилиндра, на котором на 12 рейках наматывается обмотка диаметром:

$$\frac{345}{355} \times 0.500$$

основные размеры обмоток трансформатора показаны на рис. 3 (б).
Плотность теплового потока на поверхности обмотки для катушки Г по (7,19) (Л-1):

$$q_2 = \frac{107 \cdot J_2 \cdot 10^6 \cdot I \cdot \omega_K \cdot k_D}{k_3(b+a_2)} \times 10^{-10}$$

$$q_2 = \frac{107 \times 3,49 \times 10^6 \times 41.2 \times 17 \times 1,05}{0,8 \times (0,0022 + 0,037)} \times 10^{-10} = 876 \text{ Вт/м}^2$$

Данные катушек обмотки ВН трансформатора ТМ-1000/35 с медными обмотками.

Данные	Условные обозначения катушки				Всего
	В	Г	Д	Е	
Назначение катушек	основная	основная	регулирующая	С усиленной изоляцией	-
Катушек на стержень	42	7	8	4	61
Число витков в катушке	18	17	12	9.75	-
Всего	756	119	96	39	1010
Размеры провода: Без изоляции, мм С изоляцией, мм	1.70×7.10 2.20×7.60			1.70×7.10 3.20×8.60	- -
Сечение витка, мм ²	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8
Плотность тока, МА/ мм ²	3.49	3.49	3.49	3.49	3.49
Размер ,мм: Радиальный Осевой	40 7.60	37 7.60	(26.4)* 35 7.60	31 8.60	36 610
Масса провода,кг: Без изоляции С изоляцией	362.7 373.6	56.7 58.4	45.6 47	18.4 20.3	483.4 499.3
К _{из} по табл. 5.5	1,03	1,03	1,03	1,105	-
Диаметры , м :					
Внутренний	0,444	0,444	0,444	0,444	0,444
Внешний	0,524	0,518	0,514	0,506	0,516

примечание :

* в катушки и Д вмотать полоску картона до радиального размера 35 мм

- 1- $k_{из}$ - учитывает увеличение массы провода за счет массы изоляции.
- 2- Внутренний диаметр обмотки ВН: $D'_2 = D''_1 + 2a_{12}$;
- 3- Внешний диаметр обмотки ВН: $D''_2 = D'_2 + 2a_2$;
- 4- Средний диаметр ВН: $D_{cp} = (D'_2 + D''_2) / 2$;
- 5- Масса металла обмотки ВН $G_{02} = 28 \times 10^3 \times c \times D_{cp} \times w_2 \times \Pi_2$
- 6- Масса провода в обмотке ВН с изоляцией: $G_{np2} = K_{из} \times G_{02}$

Масса металла обмотки ВН по таблице 4:

$$G_{02} = 489.4 \text{ кг}$$

Масса провода в обмотке ВН с изоляцией по таблице 4:

$$G_{\text{пр}2} = 499.3 \text{ кг}$$

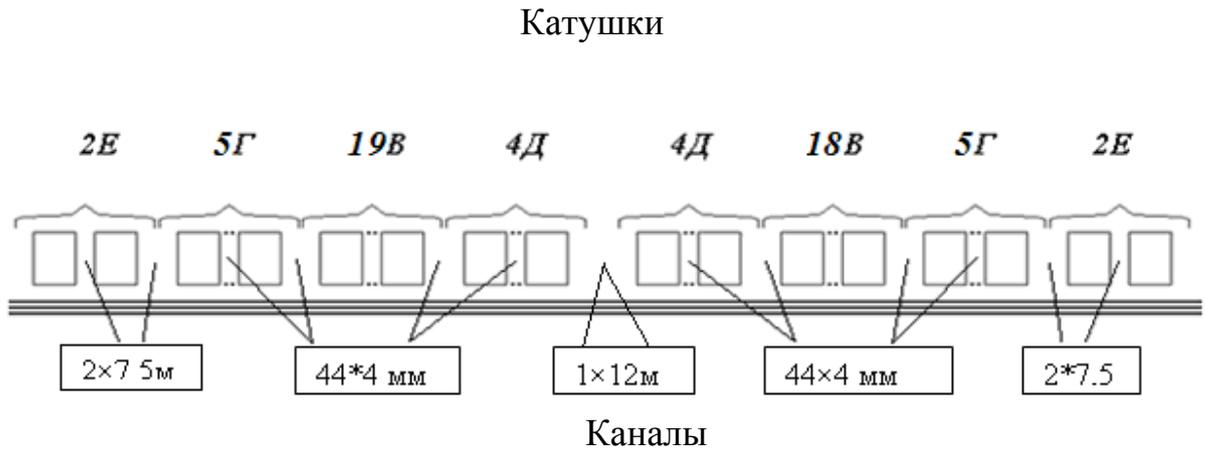
Масса металла (меди) обмоток НН и ВН:

$$G_o = G_{o1} + G_{o2} = 354.2 + 483.4 = 837.6 \text{ кг}$$

Масса провода двух обмоток:

$$G_{\text{пр}} = G_{\text{пр}1} + G_{\text{пр}2} = 359.5 + 499.3 = 858.8 \text{ кг}$$

Рис. 3 Обмотка трансформатора.



3. Расчёт токов короткого замыкания.

Потерями короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называются потери, возникающие в трансформаторе при номинальной частоте и установленной в одной из обмоток тока, соответствующего его номинальной мощности при замкнутой накоротко второй обмотки.

Потери короткого замыкания согласно параграфу 7.1 (Л-1):

Основные потери в обмотках по параграфу 7.3, при $t = 75^\circ \text{C}$.

Обмотка НН:

$$P_{\text{осн.1}} = 2,4 \times 10^{-12} \times J_1^2 \times G_{\text{об.1}} = 2,4 \times 10^{-12} \times (3.35 \times 10^6)^2 \times 354.2 = \mathbf{9540 \text{ Вт}};$$

Обмотка ВН:

$$P_{\text{осн.2}} = 2,4 \times 10^{-12} \times J_2^2 \times G_{\text{об.2}} = 2,4 \times 10^{-12} \times (3.49 \times 10^6)^2 \times 483.4 = \mathbf{14130.9 \text{ Вт}};$$

Принимаем $k_p = \mathbf{0,95}$

Добавочные потери в обмотке НН:

$$k_{\text{Д1}} = 1 + 0,095 \times 10^8 \times \beta^2 \times a^4 \times n^2;$$

$$\beta_1^2 = (b \times m \times k_p / l)^2;$$

$$\beta_1^2 = (10 \times 10^{-3} \times 35 \times 0,95 / 0.61)^2 = 0.35;$$

$$k_{\text{Д1}} = 1 + 0,095 \times 10^8 \times 0.35 \times 5.3^4 \times 10^{-12} \times 6^2 = 1 + 0.094 = 1.094$$

Добавочные потери в обмотке ВН:

$$k_{\text{Д2}} = 1 + 0,095 \times 10^8 \times \beta^2 \times a^4 \times n^2;$$

$$\beta_2^2 = (b \times m \times k_p / l)^2;$$

$$\beta_2^2 = (7.1 \times 10^{-3} \times 61 \times 0,95 / 0.61)^2 = 0.455;$$

$$k_{\text{Д2}} = 1 + 0,095 \times 10^8 \times 0.455 \times 1.7^4 \times 10^{-12} \times 18^2 = 1 + 0.012 = 1.012$$

Основные потери в отводах рассчитываются следующим образом:

Длина отводов определяется приближённо по (7,21) (Л-1):

$$l_{\text{отв}} = 7.5 \times l = 7.5 \times 0.61 = \mathbf{4.575 \text{ м}}$$

Масса отводов НН: (при плотности меди отводов $\gamma = 8900 \text{ кг/м}^3$)

$$G_{\text{отв.1}} = l_{\text{отв.1}} \times \Pi_{\text{отв.1}} \times \gamma = 4.575 \times 625 \times 10^{-6} \times 8900 = \mathbf{25.45 \text{ Вт}}$$

Потери в отводах НН: (при $k = 2,4 \times 10^{-12}$)

$$P_{\text{отв.1}} = k \times J_1^2 \times G_{\text{отв.1}} = 2,4 \times 10^{-12} \times 3.35^2 \times 10^{12} \times 25.45 = \mathbf{685.5 \text{ Вт}}$$

Масса отводов ВН: (при плотности меди отводов $\gamma = 8900 \text{ кг/м}^3$)

$$G_{\text{отв.2}} = l_{\text{отв.2}} \times \Pi_{\text{отв.2}} \times \gamma = 4.575 \times 11.8 \times 10^{-6} \times 8900 = \mathbf{0.48 \text{ Вт}}$$

Потери в отводах ВН: (при $k = 2,4 \times 10^{-12}$)

$$P_{\text{отв.2}} = k \times J_2^2 \times G_{\text{отв.2}} = 2,4 \times 10^{-12} \times 3.49^2 \times 10^{12} \times 0.48 = \mathbf{14 \text{ Вт}}$$

Потери в стенках бака и других элементах конструкции до выяснения размеров бака определяем приближённо, по (7,25) и табл. 7,1 (Л-1):

$$P_6 = 10kS = 10 \times 0,035 \times 2500 = \mathbf{875 \text{ Вт}}$$

Полные потери короткого замыкания:

$$P_k = P_{\text{осн.1}} \times k_{\text{Д1}} + P_{\text{осн.2}} \times k_{\text{Д2}} + P_{\text{отв.1}} + P_{\text{отв.2}} + P_6$$

$$P_k = 9540 \times 1.094 + 14130.9 \times 1.012 + 685.5 + 14 + 875 = \mathbf{26312 \text{ Вт}}$$

Для номинального напряжения обмотки ВН:

$$P_k = 26312 - 0,05 \times 14130,9 = 25597 \text{ Вт}$$

или $\frac{25597 \times 100}{25000} = 102,4 \%$

Напряжение короткого замыкания рассчитывается согласно параграфу 7,2 (Л-1):

Активная составляющая:

$$u_a = \frac{P_k}{10S} = \frac{25597}{10 \cdot 2500} = 1,024\%$$

Реактивная составляющая:

$$u_p = \frac{7,9 \times f \times S' \times \beta \times a_p \times k_p \times k_q}{u_g^2} \times 10^{-1}$$

где: $f = 50$ Гц

$S' = 833,3$ кВА

$\beta = \pi \times d_{12} / l = 3,14 \times 0,4125 / 0,61 = 2,123$

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 0,027 + \frac{0,035 + 0,0374}{3} = 0,051$$

$$k_p = 1 - \sigma(1 - e^{-1/\sigma}) = 1 - 0,0519(1 - e^{-1/0,0519}) = 0,95$$

$$\sigma = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi \times l} = \frac{0,027 + 0,035 + 0,0374}{\pi \times 0,61} = 0,0519$$

$$k_q = 1 + \frac{l \times x^2}{m \times a_p \times k_p} = 1 + \frac{0,61 \times 0,09^2}{3 \times 0,051 \times 0,95} = 1,034$$

$$u_p = \frac{7,9 \cdot 50 \cdot 833,3 \cdot 2,123 \cdot 0,051 \cdot 0,95 \cdot 1,034}{21^2} \times 10^{-1} = 7,938 \%$$

Напряжение короткого замыкания:

$$u_k = \sqrt{u_p^2 + u_a^2} = \sqrt{7,938^2 + 1,024^2} = 8 \%$$

или $8 \times 100 / 6,5 = 123,1 \%$ заданного значения.

Установившийся ток короткого замыкания на обмотке ВН по (7,38) и табл. 7,2 (Л-1):

$$I_{к.у.} = \frac{100 \cdot I_n}{u_k \times (1 + \frac{100 \cdot S_n}{u_k \cdot S_k})} = \frac{100 \cdot 41,2}{8 \cdot (1 + \frac{100 \cdot 2500}{8 \cdot 2500 \cdot 10^3})} = 508,6 \text{ А}$$

Мгновенное максимальное значение тока короткого замыкания:

$$i_{к.маx} = 1,41 k_{маx} \times I_{к.у.} = 1201,2 \text{ А}$$

Радиальная сила по (7,43) (Л-1):

$$F_p = 0,628 \times (i_{к.маx} \times w)^2 \times \beta \times k_p \times 10^{-6} =$$

$$0,628 \times (1201,2 \times 962)^2 \times 2,123 \times 0,95 \times 10^{-6} = 1691274 \text{ Н}$$

Среднее сжимающее напряжение в проводе обмотки НН по (7,48) и (7,49):

$$\sigma_{сж,р} = \frac{F_p}{2 \times \pi \times \omega_1 \times \Pi_1} = \frac{1691274}{2 \times \pi \times 19 \times 625,2} = 22.67 \text{ МПа};$$

Средние растягивающие напряжение в проводе обмотки ВН по (7,48) и(7,49):

$$\sigma_{сж,р} = \frac{F_p}{2 \times \pi \times \omega_2 \times \Pi_2} = \frac{1691274}{2 \times \pi \times 962 \times 11.8 \times 10^{-6}} \times 10^{-6} = 23.72 \text{ МПа};$$

т.е. 40% допустимого значения 60 МПа. Осевые силы по рис. 7.11,в.

$$F'_{ос} = F_p \times \frac{a_p}{2l} = 1691274 \times 0.051 / (2 \times 0.61) = 70701 \text{ Н};$$

$$F''_{ос} = F_p \times \frac{l_x}{l'' \times k_p \times m} = 1691274 \times \frac{0.099}{0.250 \times 0.95 \times 4} = 176249 \text{ Н}$$

где $l_x = 0.099$ мм по рисунку 7.15 а, расположение обмоток по рис 7.11в $m = 4$; после установления размеров бака $l'' = 0.25$ м распределение осевых сил по рис 7.15 б.

$$F_{сж1} = F'_{ос} + F''_{ос} = 70701 + 176249 = 246950 \text{ Н};$$

$$F_{сж2} = F''_{ос} - F'_{ос} = 176249 - 70701 = 105548 \text{ Н};$$

Наибольшая сжимающая сила наблюдается в середине высоты обмотки НН , где $F_{сж1} = 246950$ Н. Напряжение сжатия на межвитковых прокладках

$$\sigma_{сж} = F_{сж} \times 10^{-6} / (n \times a \times b) = 246950 \times 10^{-6} / (12 \times 0.03 \times 0.04) = 17.15 \text{ МПа}$$

Что ниже допустимого значения 18-20 Н.

Температура обмотки через $t_k = 5$ сек. после возникновения короткого замыкания по (7,54) (Л-1):

$$\Theta = \frac{670 \cdot t_k}{12,5 \times \left(\frac{u_k}{J_2 \cdot 10^{-6}} \right)^2 - t_k} + \Theta_H = \frac{670 \cdot 5}{12,5 \times \left(\frac{8}{3.49} \right)^2 - 5} + 90 = 145 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.Расчёт магнитной системы трансформатора и параметров холостого хода.

4.1 Расчёт магнитной системы трансформатора.

Определение размеров магнитной системы и массы стали по параграфу 8,1. Принята конструкция трёхфазной плоской шихтованной магнитной системы, собираемой из пластин холоднокатаной текстурованной стали марки 3404,0,35 мм по рис 4. Стержни магнитной системы скрепляются бандажами из стеклотенты, ярма прессуются ярмовыми балками. Размеры пакетов выбраны по табл. 8.4 (Л-1), для стержня диаметром 0.29м без прессующих пластин. Число ступеней в сечении стержня 8, в сечении ярма 6.

Размеры пакетов в сечении стержня и ярма по табл. 8.4

№ пакета	Стержень, мм	Ярмо (в половине поперечного сечени), мм
1	280×37	280×37
2	260×27	260×27
3	235×21	235×21
4	210×15	210×15
5	180×13	180×13
6	165×6	165×20
7	145×6	—
8	115×8	—

Общая толщина пакетов стержня (ширина ярма): 0.266 м.

По табл. 8.7 (Л-1)

Площадь ступенчатой фигуры сечения стержня: $\Pi_{\phi.c} = 612.4\text{см}^2 = \mathbf{0.06124\text{м}^2}$;

Площадь ступенчатой фигуры сечения ярма: $\Pi_{\phi.я} = 622.8\text{см}^2 = \mathbf{0,06228\text{ м}^2}$;

Объём угла магнитной системы: $V_y = 14858\text{см}^3 = \mathbf{0,014858\text{ м}^3}$

Активное сечение стержня:

$$\Pi_c = k_3 \times \Pi_{\phi.c} = 0,97 \times 0.06124 = \mathbf{0.0594\text{м}^2}$$

Активное сечение ярма:

$$\Pi_я = k_3 \times \Pi_{\phi.я} = 0,97 \times 0.06228 = \mathbf{0.06041\text{м}^2}$$

Объём стали угла магнитной системы:

$$V_{y.ст} = k_3 \times V_y = 0,97 \times 0.014858 = \mathbf{0.01441\text{м}^3}$$

Длина стержня:

$$l_c = 0.061 + 2 \times 0,075 = \mathbf{0.76\text{м}}$$

Расстояние между осями стержней:

$$C = D_2'' + a_{22} \times 10^{-3} = 0.524 + 0.03 = \mathbf{0.554\text{ м}}$$

Массы стали в стержнях и ярмах магнитной системы рассчитываем по (8,6), (8,8)–(8,13) (Л-1):

Масса стали угла магнитной системы:

$$G_y = V_{y.ст.} \times \gamma_{ст.}; \text{ где } \gamma_{ст.} = 7650 \text{ кг/м}^3$$

$$G_y = 0.01441 \times 7650 = 110.3 \text{ кг}$$

Масса стали ярм:

$$G_{я} = G_{я'} + G_{я''} = 2\Pi_{я} \times 2C\gamma_{ст.} + 2G_y = 2 \times 0.06041 \times 2 \times 0.554 \times 7650 + 2 \times 110.3 = 1024.1 + 220.6 = 1244.7 \text{ кг}$$

Масса стали стержней:

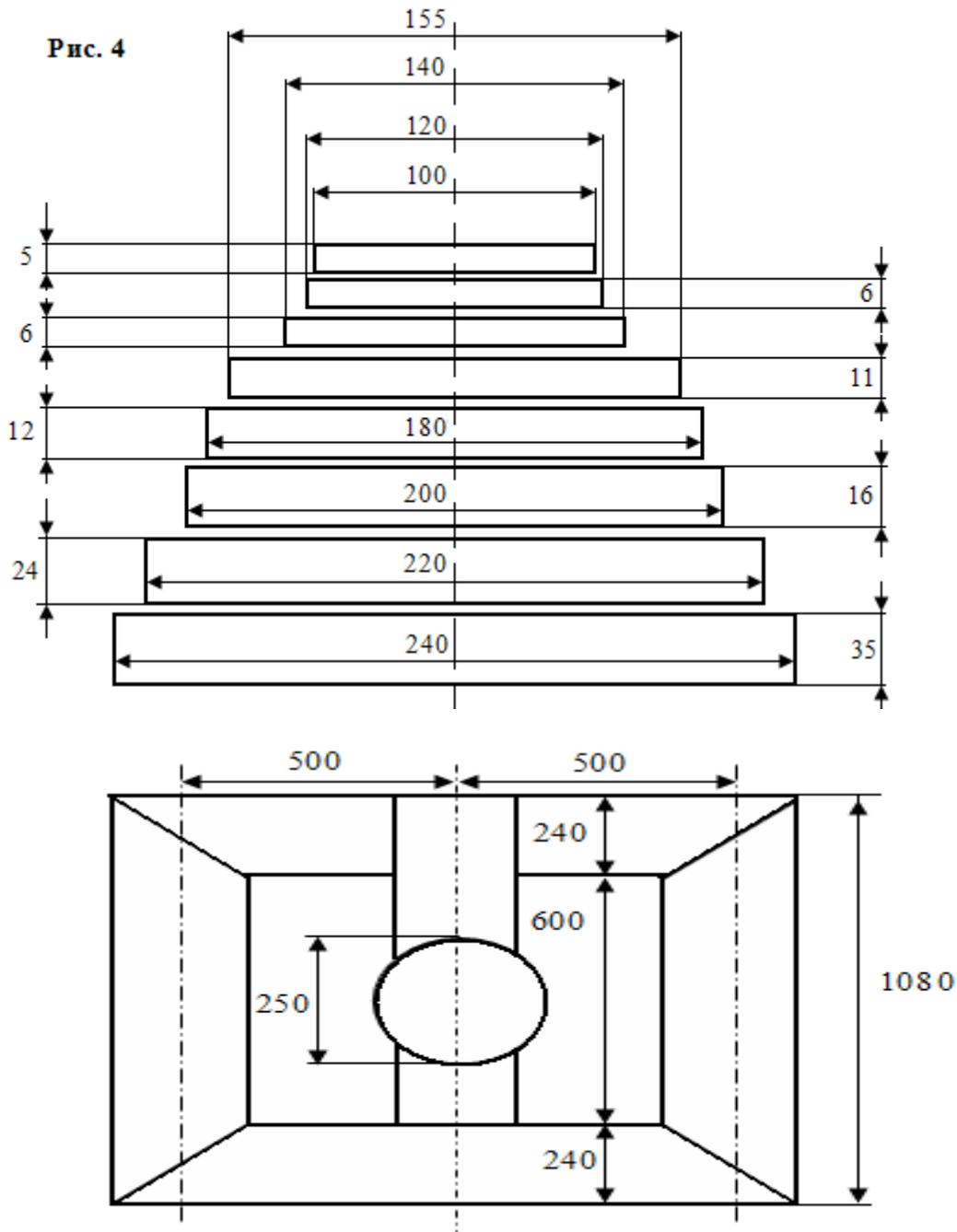
$$G_c = G_c' + G_c'' = 1036.1 + 50.8 = 1086.9 \text{ кг}$$

где $G_c' = 3 \times l_c \times \Pi_c \times \gamma_{ст.} = 3 \times 0.0594 \times 0.76 \times 7650 = 1036.1 \text{ кг}$

$$G_c'' = 3 \times (\Pi_c \times a_{1я} \times \gamma_{ст.} - G_y) = 3 (0.0594 \times 0.280 \times 7650 - 110.3) = 50.8 \text{ кг}$$

Общая масса стали:

$$G_{ст.} = G_{я} + G_c = 1086.9 + 1244.7 = 2331.6 \text{ кг}$$



4.2. Расчёт потерь холостого хода.

Расчёт потерь холостого хода производим по параграфу 8.2

Индукция в стержне:

$$B_c = \frac{u_\sigma}{4,44 f \Pi_c} = \frac{21}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,0594} = 1,593 \text{ Тл}$$

Индукция в ярме:

$$B_{я} = \frac{u_\sigma}{4,44 f \Pi_c} = \frac{21}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,06041} = 1,567 \text{ Тл}$$

Индукция на косом стыке

$$B_{\text{кос.}} = \frac{B_c}{\sqrt{2}} = \frac{1,593}{1,41} = 1,126 \text{ Тл}$$

Площади сечения немагнитных зазоров на прямом стыке среднего стержня равны соответственно активным сечениям стержня и ярма.

Площадь сечения стержня на косом стыке:

$$\Pi_{\text{кос.}} = \sqrt{2} \Pi_c = 1,41 \times 0,0594 = 0,084 \text{ м}^2$$

Удельные потери для стали стержней, ярм и стыков по табл. 8.10 (Л-1) для стали марки 3404 толщиной 0,35 мм при шихтовке в две пластины:

$$\text{При } B_c = 1,593 \text{ Тл, } p_c = 1,28 \text{ Вт/кг; } p_3 = 980 \text{ Вт/м}^2$$

$$\text{При } B_{я} = 1,567 \text{ Тл, } p_{я} = 1,222 \text{ Вт/кг; } p_3 = 944 \text{ Вт/м}^2$$

$$\text{При } B_{\text{кос.}} = 1,126 \text{ Тл, } p_{\text{кос.}} = 452 \text{ Вт/м}^2$$

Для плоской магнитной системы с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми стыками на среднем стержне, с многоступенчатым ярмом, без отверстий для шпилек, с отжигом пластин после резки стали и удаления заусенцев для определения потерь применим выражение (8,32) (Л-1).

На основании параграфа 8,2 и табл. 8,12 принимаем:

$$k_{п.р.} = 1,05; k_{п.з.} = 1; k_{п.я.} = 1; k_{п.п.} = 1,03; k_{п.ш.} = 1,05.$$

По таблице 8,13 (Л-1) находим коэффициент $k_{п.у.} = 10,18$.

Тогда потери холостого хода:

$$P_x = [k_{п.р.} \times k_{п.з.} \times (p_c G_c + p_{я} G_{я} - 4 p_{я} G_y + \frac{p_c + p_{я}}{2} \times k_{п.у.} \times G_y) + 4 \times \Pi_{\text{кос.}} \times p_{\text{кос.}} + 1 \times \Pi_c \times p_3 + 2 \times \Pi_{я} \times p_3] \times k_{п.я.} \times k_{п.п.} \times k_{п.ш.}$$

$$P_x = [1,05 \times 1 \times (1,28 \times 1086,9 + 1,222 \times 1024,1 - 4 \times 1,222 \times 110,3 + \frac{1,28 + 1,222}{2} \times 10,18 \times 110,3) + 4 \times 0,084 \times 452 + 1 \times 0,0594 \times 980 + 2 \times 0,0604 \times 944] \times 1 \times 1,03 \times 1,05 = 4334 \text{ Вт}$$

$$\text{Или } \frac{4334}{4350} \times 100 = 99,6 \% \text{ от заданного}$$

4.3. Расчёт тока холостого хода.

Расчёт тока холостого хода производим по параграфу 8.3.

По таблице 8,17 (Л-1) находим удельные намагничивающие мощности:

$$\text{При } B_c = 1.593 \text{ Тл, } q_c = 1.74 \text{ ВА/кг; } q_{c.з} = 23010 \text{ ВА/м}^2$$

$$\text{При } B_{я} = 1.567 \text{ Тл, } q_{я} = 1.61 \text{ ВА/кг; } q_{я.з} = 21190 \text{ Вт/м}^2$$

$$\text{При } B_{\text{кос.}} = 1.126 \text{ Тл, } q_{\text{кос.}} = 2890 \text{ ВА/м}^2$$

Для принятой конструкции магнитной системы и технологии её изготовления используем (8.43), в котором по параграфу 8.3 и таблице 8.12 и 8.21 принимаем коэффициенты:

$$k_{\text{т.р.}} = 1,18; \quad k_{\text{т.з.}} = 1,0; \quad k_{\text{т.пл.}} = 1,29; \quad k_{\text{т.я.}} = 1,0; \quad k_{\text{т.п.}} = 1,05;$$

$$k_{\text{т.ш.}} = 1,05; \quad k_{\text{т.у}} = 42,45.$$

По таблице 8,20 (Л-1) находим коэффициент $k_{\text{п.у.}} = 10,18$.

$$Q_x = [k_{\text{т.р.}} \times k_{\text{т.з.}} \times (q_c G_c + q_{я} G_{я} - 4q_{я} G_y + \frac{q_c + q_{я}}{2} \times k_{\text{т.у.}} \times k_{\text{т.пл.}} \times G_y) + 4 \times q_{\text{кос.}} \times \Pi_{3.\text{кос.}} + 1 \times \Pi_c \times q_{c.з} + 2 \times \Pi_{я} \times q_{я.з}] \times k_{\text{т.я.}} \times k_{\text{т.п.}} \times k_{\text{т.ш.}}$$

$$Q_x = [1,18 \times 1 \times (1.74 \times 1086.9 + 1.61 \times 1024.1 - 4 \times 1.61 \times 110.3 + \frac{1.74 + 1.61}{2} \times 42,45 \times 1.29 \times 110.3) + 4 \times 2890 \times 0.084 + 1 \times 23010 \times 0.0594 + 2 \times 21190 \times 0.0604] \times 1 \times 1,05 \times 1,05 = 22243 \text{ ВА}$$

Ток холостого хода

$$i_0 = Q_x / 10S = 22243 / 10 \times 2500 = 0.89 \%$$

$$\text{или } \frac{0.89 \times 100}{1.1} = 80.9 \% \text{ заданного значения.}$$

Активная составляющая тока холостого хода:

$$i_{0a} = \frac{P_x}{10 \times S} = \frac{4334}{10 \times 2500} = 0.173 \%$$

Реактивная составляющая тока холостого хода:

$$i_{0p} = \sqrt{i_0^2 - i_{0a}^2} = \sqrt{0.89^2 - 0.173^2} = 1.57 \%$$

5. Тепловой расчёт трансформатора, расчёт системы охлаждения.

5.1. Тепловой расчёт обмоток.

Тепловой расчёт обмоток производится согласно параграфу 9.5 (Л-1).
Внутренний перепад температуры

Обмотка НН по (9.9) и по рис. 9.9 (Л-1).

$$\Theta_{01} = \frac{q_1 \cdot \delta}{\lambda_{из}} = \frac{1141 \times 0.25 \times 10^{-3}}{0.17} = 1.68^\circ \text{C}$$

где δ – толщина изоляции провода на одну сторону, $\delta = 0,25 \times 10^{-3}$ м;

q – плотность теплового потока на поверхности обмотки;

$\lambda_{из}$ – теплопроводность бумажной, пропитанной маслом изоляции провода по табл. 9.1 (Л-1), $\lambda_{из} = 0,17$ Вт/(м \times °C);

Обмотка ВН по (9.9) и рис 9.9 (Л-1);

$$\Theta_{02} = \frac{q_1 \cdot \delta}{\lambda_{из}} = \frac{876 \times 0.25 \times 10^{-3}}{0.17} = 1.29^\circ \text{C}$$

Перепад температуры на поверхности обмоток:

Обмотка НН:

$$\Theta_{o, m1} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times 0,35 \times q^{0,6} = 1 \times 1,1 \times 0,9 \times 0,35 \times 1141^{0,6} = 23.66^\circ \text{C}$$

где $k_1 = 1$ – для естественного масляного охлаждения;

$k_2 = 1,1$ – для внутренней обмотки НН;

$k_3 = 0,9$ – по таблице 9.3 (Л-1) для $h_k/a = 5/35 = 0.19$.

Обмотка ВН:

$$\Theta_{o, m2} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times 0,35 \times q^{0,6} = 1 \times 1,1 \times 0,95 \times 0,35 \times 876^{0,6} = 21.32^\circ \text{C}$$

где $k_1 = 1$ – для естественного масляного охлаждения;

$k_2 = 1,1$ – для внешней обмотки ВН;

$k_3 = 0,95$ – по таблице 9.3 (Л-1) для $h_k/a = 4/37 = 0.087$.

Полный средний перепад температуры от обмотки к маслу:

Обмотка НН:

$$\Theta_{o, m. \text{ ср.}} = \Theta_{01} + \Theta_{o, m1} = 1.68 + 23.66 = 25.34^\circ \text{C}$$

Обмотка ВН:

$$\Theta_{o, m. \text{ ср.}} = \Theta_{02} + \Theta_{o, m2} = 1.29 + 21.32 = 22.61^\circ \text{C}$$

5.2. Тепловой расчёт бака.

Тепловой расчёт бака проводится согласно параграфу 9.6.

По таблице 9.4 (Л-1), в соответствии с мощностью трансформатора выбираем конструкцию $S=2500$ кВА, выбираем конструкцию гладкого бака с навесными радиаторами и прямыми трубами по рис. 9.16 (Л-1). Минимальные внутренние размеры бака – по рис. 9.18, (а) и (б), (Л-1).

Изоляционные расстояния отводов определяем до прессующей балки верхнего ярма и стенки бака. До окончательной разработки конструкции внешние габариты прессующих балок принимаем равными внешнему габариту обмотки ВН.

$$\begin{aligned} S_1 &= 40 \text{ мм} & S_3 &= 25 \text{ мм} \\ S_2 &= 42 \text{ мм} & S_4 &= 90 \text{ мм} \\ d_2 &= 10 \text{ мм} & d_1 &= 20 \text{ мм} \end{aligned}$$

Минимальная ширина бака по рис. 9.18, (а) и (б), (Л-1).

$$\begin{aligned} B &= D_2'' + (S_1 + S_2 + d_2 + S_3 + S_4 + d_1) \times 10^{-3} = \\ &= 0.52 + (40 + 42 + 20 + 25 + 90 + 10) \times 10^{-3} = \mathbf{0.747 \text{ м}} \end{aligned}$$

Принимаем $B = 0,75$, при центральном положении активной части трансформатора в баке.

Длина бака:

$$A = 2C + B = 2 \times 0.55 + 0.75 = \mathbf{1.85 \text{ м}}.$$

Высота активной части по (9.24) (Л-1):

$$H_{\text{а.ч.}} = l_c + 2h_{\text{я}} + n = 0.76 + 2 \times 0.28 + 0.05 = \mathbf{1.37 \text{ м}}.$$

где $n = 0,05$ м – толщина бруска между дном бака и нижним ярмом

Принимаем расстояние от верхнего ярма до крышки бака при горизонтальном расположении над ярмом переключателя ответвлений обмотки ВН по табл. 9.5 (Л-1).

$$H_{\text{я.к.}} = 400 \text{ мм} = \mathbf{0,4 \text{ м}}.$$

Глубина бака:

$$H_6 = H_{\text{а.ч.}} + H_{\text{я.к.}} = 1.37 + 0,4 = \mathbf{1.77 \text{ м}}.$$

Для развития должной поверхности охлаждения целесообразно использовать радиаторы с прямыми трубами по рис. 9.16 (Л-1).

Расстояние между осями фланцев по табл. 9.9 (Л-1):

$$A_p = \mathbf{1615 \text{ мм}}$$

Поверхность конвекции труб:

$$P_{\text{к.тр.}} = \mathbf{4.961 \text{ м}^2}$$

Поверхность конвекции двух коллекторов при двух рядах:

$$P_{\text{к.к.}} = \mathbf{0,34 \text{ м}^2}$$

Минимальные расстояния осей фланцев радиатора:

$$\text{От нижнего среза стенки бака } c_1 = \mathbf{0,085 \text{ м}}$$

$$\text{От верхнего среза стенки бака } c_2 = \mathbf{0,1 \text{ м}}$$

Для установки этих радиаторов глубина бака должна быть принята:

$$H_6 = A_p + c_1 + c_2 = 1.615 + 0,085 + 0,1 = \mathbf{1.8 \text{ м}}$$

Допустимое превышение средней температуры масла над температурой окружающего воздуха для наиболее нагретой обмотки НН по (9.32) (Л-1):

$$\Theta_{\text{м.в}} = 65 - \Theta_{\text{о.м.ср.}} = 65 - 25.34 \approx 40^\circ$$

найденное среднее превышение может быть допущено, так как превышение температуры масла в верхних слоях в этом случае будет

$$\Theta_{\text{м.в.в}} = \delta \times \Theta_{\text{м.в}} = 1,2 \times 40 = 48^\circ \text{ C} < 60^\circ \text{ C}$$

Принимая предварительно перепад температуры на внутренней поверхности стенки бака $\Theta_{\text{м.б.}} = 5^\circ \text{ C}$ и запас 2° C , находим среднее превышение температуры наружной стенки бака над температурой воздуха:

$$\Theta_{\text{б.в.}} = \Theta_{\text{м.в}} + \Theta_{\text{м.б.}} = 40 - 5 - 2 = 33^\circ \text{ C}$$

Для выбранного размера бака рассчитываем поверхность конвекции гладкой стенки бака:

$$\Pi_{\text{к.гл.}} = H_6 [2(A-B) + \pi B] = 1.8 \times [2 \times (1.85 - 0.747) + 3,14 \times 0.747] = 8.193 \text{ м}^2$$

Ориентировочная поверхность излучения бака с радиаторами по (9.35) (Л-1):

$$\Pi_{\text{и}} = k \times \Pi_{\text{к.гл.}} = 1,5 \times 8.193 = 12.29 \text{ м}^2$$

Ориентировочная необходимая поверхность конвекции для заданного значения $\Theta_{\text{б.в.}} = 33^\circ \text{ C}$ по (9.30) (Л-1):

$$\Pi_{\text{к}}' = \frac{P_{\text{к}} + P_{\text{х}}}{2,5 \cdot \Theta_{\text{б.в.}}^{1,25}} - 1.12 \times \Pi_{\text{и}} = \frac{1.05 \cdot (25597 + 4334)}{2,5 \cdot 33^{1,25}} - 1.12 \times 12.29 = 145.17 \text{ м}^2$$

Поверхность конвекции составляется из:

$$\text{Поверхности гладкого бака: } \Pi_{\text{к.гл.}} = 8.193 \text{ м}^2$$

Поверхности крышки бака:

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{к.кр.}} = 0.5 [(A-B) \times (B+0.16) + \pi \cdot \frac{(B+0.16)^2}{4}] = 0.5 \times [(1.85 - 0.747) \times (0.747 + \\ + 0.16) + 3.14 \times \frac{(0.747 + 0.16)^2}{4}] = 0.823 \text{ м}^2 \end{aligned}$$

где 0.16 – удвоенная ширина верхней рамы бака; коэффициент 0.5 учитывает закрытие поверхности крышки вводами и арматурой.

Поверхность конвекции радиаторов:

$$\Sigma \Pi_{\text{к.р.}} = \Pi_{\text{к}}' - \Pi_{\text{к.гл.}} - \Pi_{\text{к.кр.}} = 145.17 - 8.193 - 0.823 = 136.154 \text{ м}^2$$

поверхность конвекции радиаторов, приведённая к поверхности гладкой стенки (табл.9.6) (Л-1):

$$\Pi_{\text{к.р.}} = \Pi_{\text{тр.}} \times k_{\text{ф}} + \Pi_{\text{к.к}} = 4.961 \times 1.26 + 0,34 = 6.59 \text{ м}^2$$

Необходимое число радиаторов:

$$n_p = \frac{\Sigma \Pi_{\text{к.р.}}}{\Pi_{\text{к.р.}}} = 136.154 / 6.59 \approx 20.66$$

Принимаем 20 радиаторов с расположением по рис. 5.

Поверхность конвекции бака:

$$\Pi_{\text{к}} = \Sigma \Pi_{\text{к.р.}} + \Pi_{\text{к.гл.}} + \Pi_{\text{к.кр.}} = 20 \times 6.59 + 8.193 + 0.82 = 140.81 \text{ м}^2$$

Поверхность излучения: $\Pi_{\text{и}} = 12.3 \text{ м}^2$

Определение превышения температуры масла и обмоток над температурой охлаждающего воздуха по параграфу 9.7.

Среднее превышение температуры наружной поверхности трубы над температурой воздуха по (9.49) (Л-1):

$$\Theta_{\text{б.в}} = \left[\frac{1.05 \cdot (P_{\kappa} + P_x)}{2.8\Pi_u + 2.5\Pi_{\kappa}} \right]^{0.8} = \left[\frac{1.05 \cdot (25597 + 4334)}{2.8 \cdot 12.3 + 2.5 \cdot 140.81} \right]^{0.8} = 33.74^{\circ} \text{C}$$

среднее превышение температуры масла вблизи стенки над температурой внутренней поверхности стенки трубы по (9.50) (Л-1):

$$\Theta_{\text{м.б}} = 0.165 \times \left[\frac{1.05 \cdot (P_{\kappa} + P_x)}{\sum \Pi_p + \Pi_{\kappa.21} + \Pi_{\kappa p}} \right]^{0.6} = 0.165 \times \left[\frac{1.05 \cdot (25597 + 4334)}{20 \cdot 4.961 + 8.193 + 0.82} \right]^{0.6} =$$

4.96° C

Превышение средней температуры масла над температурой воздуха:

$$\Theta_{\text{м.в}} = \Theta_{\text{м.б}} + \Theta_{\text{б.в}} = 4.96 + 33.74 = \mathbf{38.7^{\circ} \text{C}}$$

Превышение температуры масла в верхних слоях над температурой воздуха:

$$\Theta_{\text{м.в.в}} = k \times \Theta_{\text{м.в}} = 1.2 \times 38.7 = \mathbf{46.44^{\circ} \text{C}} < 60^{\circ} \text{C}$$

Превышение средней температуры обмоток над температурой воздуха:

Обмотки НН;

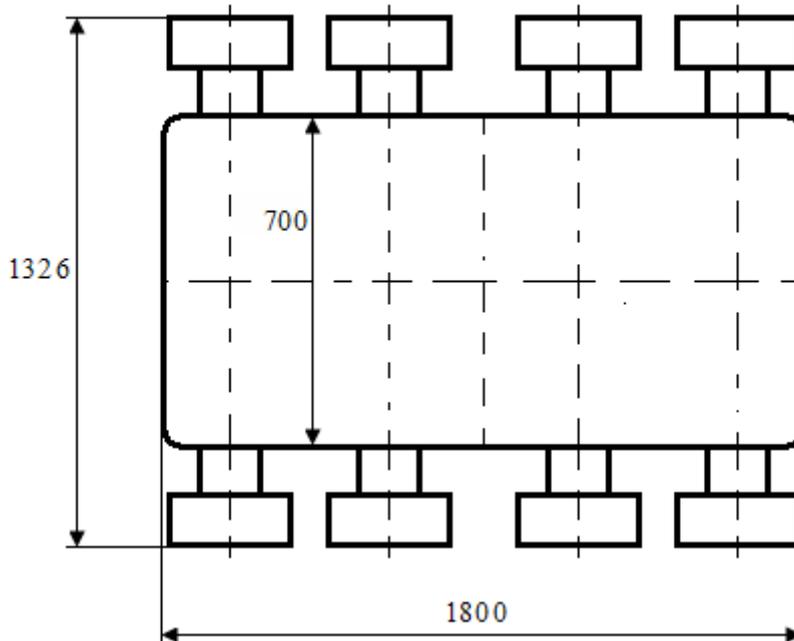
$$\Theta_{\text{о.в1}} = \Theta_{\text{о1}} + \Theta_{\text{о.м1}} + \Theta_{\text{м.в}} = 1.68 + 23.66 + 38.7 = \mathbf{64.04^{\circ} \text{C}} < 65^{\circ} \text{C}$$

Обмотки ВН;

$$\Theta_{\text{о.в2}} = \Theta_{\text{о2}} + \Theta_{\text{о.м2}} + \Theta_{\text{м.в}} = 1.29 + 21.32 + 38.7 = \mathbf{61.31^{\circ} \text{C}} < 65^{\circ} \text{C}$$

Превышения температуры масла в верхних слоях $\Theta_{\text{м.в.в}} < 60^{\circ} \text{C}$ и обмоток $\Theta_{\text{о.в}} < 65^{\circ} \text{C}$ лежат в пределах допустимого нагрева по ГОСТ 11677-85.

Рис. 5. Расположение радиаторов на стенке бака.



Используемая литература:

(Л-1) – Тихомиров П.М. "Расчёт трансформаторов", издательство Москва, энергоатомиздат 1986 г.

Все ссылки (формулы и таблицы), используемые в составлении данной курсовой работы даны на учебник Тихомирова П.М. "Расчёт трансформаторов", издательство Москва, энергоатомиздат 1986 г.