

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электромеханика  
(направленность (профиль)/специализация)

## **БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему «Проектирование силового трансформатора ТРДЦН- 125000/330»

Студент

М.А. Шалюгин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Ю.П. Петунин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

О.Н. Брега

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

«    » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Тольятти 2017

## Аннотация

В данной бакалаврской работе спроектирован трансформатор ТРДЦН 125000/330. Произведен технико-экономический расчет, электромагнитный расчет, тепловой расчет трансформатора, а также расчет динамической стойкости трансформатора при коротком замыкании, после сделан выбор вспомогательного оборудования.

Данная работа состоит из пояснительной записки на 52 страницах, содержащей 4 рисунка, 5 таблиц. Графическая часть - 6 чертежей формата А1.

## Abstract

This thesis deals with the design of power oil transformer TRDES-125000/330kV. The task of the diploma project was to design an oil transformer with a new voltage class. This voltage class was chosen by developing power substations.

The diploma paper may be divided into several logically connected parts which are technical and economic calculation, calculation of the cross-section of the core of the magnetic circuit, calculation of windings, calculation of losses of short circuit and idling, calculation of the thermal part of the transformer. Much attention is given to reduction of power losses and transformer dimensions. We will also investigate how the transformer behaves when loaded, then we will perform a system analysis.

After several corrections, considerable progress was made, these results lead us to the conclusion that with this class of stress, it is possible to reduce the overall losses and increase the efficiency.

The thesis consists of an explanatory note on 50 pages, introduction, including 1 figures, 4 tables, the list of 5 references including 20 foreign sources and 5 appendices.

## Содержание

Введение	5
1 Расчет оптимального экономического варианта	6
2 Электромагнитный расчет трансформатора	13
3 Расчет системы охлаждения трансформатора	37
4 Расчет динамической стойкости трансформатора при коротком замыкании	41
5 Подбор вспомогательного оборудования силового масляного трансформатора	45
6 Описание конструкции трансформатора	47
Заключение	49
Список используемых источников	50

## Введение

Передача электроэнергии на большие расстояния от генераторов электростанций к потребителю связана с определенной трудностью. Если подключить генератор, производящий энергию большой мощности к линиям электропередач, то по закону Джоуля-Ленца, провода будут нагреваться пропорционально квадрату силы тока и сопротивлению провода. Даже при наибольшем номинальном напряжении современных генераторов, сила тока текущего по проводам будет высокой и чтобы уменьшить нагрев проводов, придется уменьшить их сопротивление.

Для решения этой проблемы используют силовой трансформатор, например, 330 кВ с частотой 50 Гц, при помощи которого увеличивают напряжение и уменьшают пропорционально силу тока при этом передаваемая мощность остается без изменений. У потребителя ставится силовой трансформатор, который понижает напряжение до требуемых значений.

Силовой трансформатор – статический электромагнитный аппарат с двумя (или больше) обмотками, предназначенный чаще всего для преобразования переменного тока одного напряжения в ток другого напряжения. Преобразование энергии в силовом трансформаторе, осуществляется переменным магнитным полем [25].

Целью данного проекта, является понизить потери холостого хода, путем применения новейшей марки стали: 30ZH95, у которой удельные потери 0,95 Вт/кг при толщине стали 0,3 мм.

## 1 Расчет оптимального экономического варианта

Необходимостью технико-экономического расчета является отбор из нескольких технически возможных вариантов, один, который является оптимальным соответствием между количеством затрат на изготовление трансформатора и уровнем затрат при работе трансформатора [1].

1.1 Примерный масштаб обмотки НН, м, рассчитанный по формуле (1):

$$e_n \cong \kappa_{B1} \cdot \kappa_{B2} \cdot (S_{ном} \cdot 10^{-6})^{\alpha_B} = 0,12 \cdot 0,4 \cdot (25)^{0,0577} = 0,063, \quad (1)$$

где  $\kappa_{B1}$ ,  $\kappa_{B2}$ ,  $\alpha_B$  – геометрические компоненты, коэффициенты которых равны:

$$\alpha_B = 0,0577 ;$$

$\kappa_{B1} = 0,12$  – обмотка трансформатора, состоящая из медного провода;

$$\kappa_{B2} = 0,4 .$$

1.2 Примерный масштаб обмотки ВН, м, рассчитанный по формуле (2):

$$e_v \cong \kappa_{B1} \cdot (S_{ном} \cdot 10^{-6})^{\alpha_B} - e_n = 0,12 \cdot (25)^{0,0577} - 0,063 = 0,095. \quad (2)$$

1.3 Примерный диаметр ведущего канала рассеяния (обмоток НН и ВН), м, рассчитанный по формуле (3):

$$e_{K_{H-B}} = \frac{e_n + e_v}{3} + e_{n-v} = \frac{0,063 + 0,095}{3} + 0,085 = 0,137, \quad (3)$$

где  $e_{n-v} = 0,085 м$  – размах канала посреди обмоток НН и ВН.

1.4 Диаметр стержня магнитопровода, м, рассчитанный по формуле (4):

$$\begin{aligned} D_{CT} &= 0,0682 \cdot \sqrt[4]{\frac{S_{ном} \cdot \beta \cdot e_{K_{H-B}} \cdot K_{oc}}{f \cdot B_{CT}^2 \cdot K_{3АП.КР}^2 \cdot U_{кз}}} = \\ &= 0,0682 \cdot \sqrt[4]{\frac{125 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 0,137 \cdot 0,95}{50 \cdot 1,6^2 \cdot 0,885 \cdot 12,5}} = 0,81, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $K_{3АП.КР} = 0,885$  – составляющая, заполненная сталью;

$K_{oc} = 0,95$  – составляющая осевого поля рассеяния;

$B_{CT} = 1,6 Тл$  – индукция в стержне;

$$\epsilon_{н-в} = 0,085, \quad \epsilon_{в-р} = 0,09, \quad \epsilon_{в-ф} = 0,054, \quad h_{обм-в.я} = 0,246, \quad h_{обм-н.я} = 0,074 \quad -$$

коэффициенты при классе напряжения 330 кВ[2].

1.5 Средний диаметр канала между обмотками, м, рассчитанный по формуле (5):

$$\begin{aligned} D_{н-в} &= (1 + 2 \cdot K_{СТ-О}) \cdot D_{СТ} + 2 \cdot (\epsilon_{о-н} + \epsilon_{н}) + \epsilon_{н-в} = \\ &= (1 + 2 \cdot 0,015) \cdot 0,81 + 2 \cdot (0,018 + 0,063) + 0,085 = 1,082, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $K_{СТ-О} = 0,015$  – составляющая, берущихся в расчет бандажей;

$\epsilon_{о-н} = 0,018$  – изоляционное расстояние от стержня до обмотки НН.

1.6 Межосевое расстояние между центрами разных фаз, м рассчитанное по формуле (6):

$$\begin{aligned} L_{МО} &= D_{н-в} + \epsilon_{н-в} + 2 \cdot (\epsilon_{в} + \epsilon_{в-р} + \epsilon_{р}) + \epsilon_{м-ф} = \\ &= 1,08 + 0,085 + 2 \cdot (0,095 + 0,09 + 0,5 \cdot 0,063) + 0,054 = 1,65, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\epsilon_{р} = 0,5 \cdot \epsilon_{н}$  – ширина регулировочной обмотки, м;

$\epsilon_{м-ф} = 0,054$  – межфазное расстояние, м;

$\epsilon_{в-р} = 0,09$  – ширина канала между ВН и РО, м.

1.7 Показатель высоты обмотки, м, рассчитанный по формуле (7):

$$H_{обм} = \frac{\pi}{\beta} D_{н-в} = \frac{3,14}{1} \cdot 1,082 = 3,39. \quad (7)$$

1.8 Коэффициент высоты окошка магнитопровода, м, рассчитанный по формуле (8):

$$\begin{aligned} H_{окн} &= H_{обм} + h_{ЕК} + h_{обм-в.я} + h_{обм-н.я} + h_{прес} = \\ &= 3,39 + 0,03 + 0,246 + 0,074 + 0,07 = 2,693, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $h_{ЕК} = 0,03$  – стандарт высоты емкостной окружности ВН обмотки одновременно с охватывающим к обмотке каналом, м;

$h_{обм-в.я} = 0,246$ ,  $h_{обм-н.я} = 0,074$  – изоляционное пространство от обмотки до наивысшего и наимизшего ярма магнитопровода, м;

$h_{прес} = 0,07$  – стандарт высоты, для расположения компонентов, придавливаемых обмотки, м.

1.9 Масса электротехнической стали магнитопровода, кг, рассчитанная по формуле (9):

$$G_{ст} = (3 \cdot H_{окн} + 2 \cdot D_{ст} + 4 \cdot K_{ус.яр} \cdot L_{мо}) \cdot \gamma_{ст} \cdot K_{зап.кр} \cdot \pi \cdot \frac{D_{ст}^2}{4} =$$

$$= (3 \cdot 3,382 + 2 \cdot 0,81 + 4 \cdot 1,02 \cdot 1,65) \cdot 7,65 \cdot 10^3 \cdot 0,885 \cdot 3,14 \cdot \frac{0,81^2}{4} = 69130, \quad (9)$$

где  $\gamma_{ст} = 7,65 \cdot 10^3$  – стандартная плотность электротехнической стали;

$K_{ус.яр} = 1,02$  – составляющая прироста площади сечения ярма по сравнению с площадью сечения стержня.

1.10 Приближенные потери в стали магнитопровода, Вт/кг, рассчитанные по формуле (10):

$$p_{XX} = K_p \cdot B_{СТ}^{K_{ep}} = 0,296 \cdot 1,6^{2,64} = 1,023, \quad (10)$$

где  $K_p = 0,296$ ,  $K_{ep} = 2,64$  – стандартные составляющие стали;

$B_{ст} = 1,5 \dots 1,7$  Тл.

1.11 Полные утечки в стали магнитопровода, Вт, рассчитанные по формуле (11):

$$P_{xx} = p_{xx} \cdot K_{ув.р} \cdot G_{ст} = 1,023 \cdot 1,4 \cdot 69130 = 99075, \quad (11)$$

где  $K_{ув.р} = 1,4$  – составляющая, принимающая увеличение активных утечек в стали в зависимости от конструкции и методики конструирования магнитопровода.

1.12 Приближенная намагничивающая мощность в стали, ВАР/кг, рассчитанная по формуле (12):

$$q_{XX} = K_q \cdot B_{СТ}^{K_{eq}} = 0,137 \cdot 1,6^{5,06} = 1,48, \quad (12)$$

где  $K_q = 0,137$ ,  $K_{eq} = 5,06$ .

1.13 Приближенная намагничивающая мощность в стыках, Вт/м<sup>2</sup>, рассчитанная по формуле (13):

$$q_{стык} = K_{стык} \cdot B_{СТ}^{K_{в.стык}} = 2620 \cdot 1,6^5 = 27472, \quad (13)$$

где  $K_{стык} = 2620$ ,  $K_{в.стык} = 5$ .



Величина коэффициентов  $K_p$ ,  $K_{вр}$ ,  $K_q$ ,  $K_{вq}$ ,  $K_{стык}$ ,  $K_{в.стык}$  зависит от марки стали.

1.14 Коэффициент реактивных потерь холостого хода трансформатора (полная намагничивающая производительность), ВАР, рассчитанный по формуле (14):

$$Q_{xx} = K_{ув. Q} \cdot q_{xx} \cdot G_{ст} + \sqrt{2} \cdot n_{стык} \cdot q_{стык} \cdot K_{зан. КР} \cdot \pi \cdot \frac{D_{ст}^2}{4} =$$

$$= 1,2 \cdot 1,48 \cdot 69130 + \sqrt{2} \cdot 8 \cdot 27472 \cdot 0,885 \cdot 3,14 \cdot \frac{0,81}{7} = 222757, \quad (14)$$

где  $K_{ув. Q} = 1,2$  – составляющая, принимающая увеличение реактивных трат в стали в зависимости от устройства и технологии конструирования магнитопровода;

$n_{стык} = 8$  – число соединений в схеме шихтовки трехфазных трансформаторов плоской стержневой конструкции с кривым стыком.

1.15 Коэффициент тока холостого хода, рассчитанный по формуле (15):

$$i_{xx} = \frac{Q_{xx}}{S_{ном}} \cdot 100\% = \frac{222757}{125 \cdot 10^6} = 0,178. \quad (15)$$

1.16 Приближенная плотность тока в обмотках,  $A/m^2$ , рассчитанная по формуле (16):

$$j = \frac{1,67 \cdot K_{зан. КР} \cdot f \cdot B_{СТ} \cdot D_{СТ}^2 \cdot P_{кз}}{K_{доб} \cdot \rho_{пр} \cdot m_{\phi} \cdot D_{Н-В} \cdot S_{ном}} =$$

$$= \frac{1,67 \cdot 0,885 \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 0,81^2 \cdot 380000}{1,25 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 1,08 \cdot 125 \cdot 10^6} = 2728338, \quad (16)$$

где  $\rho_{пр} = 2,13 \cdot 10^{-8}$  – приближенное сопротивление провода при 750С для медного провода, Ом·м;

$K_{доб} = 1,25$  – составляющая, учитывающая добавочные потери к. з., создаваемые с помощью магнитного поля рассеивания трансформатора.

1.17 Составляющая масса обмоточного провода, кг, рассчитанная по формуле (17):

$$G_{np} = \frac{\gamma_{np} \cdot P_{кз} \cdot K_{рез}}{K_{доб} \cdot \rho_{np} \cdot j^2} = \frac{8,89 \cdot 10^3 \cdot 1,05}{1,25 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8} \cdot 2728338^2} = 17897, \quad (17)$$

где  $\gamma_{np} = 8,89 \cdot 10^3$  – плотность обмоточного провода, для медного провода, кг/м<sup>3</sup>;

$K_{рез} = 1,05$  – составляющая, принимающая увеличения веса обмоточного провода за счет РО.

1.18 Экономическая составляющая к стали масса активных материалов, кг, рассчитанная по формуле (18):

$$G_{прив} = G_{СТ} + \frac{Ц_{np}}{Ц_{СТ}} \cdot K_{из} \cdot G_{np} = 69130 + \frac{1,11}{0,54} \cdot 1,065 \cdot 17897 = 134481, \quad (18)$$

где  $Ц_{np} = 1,11$  – стандартная цена медного провода, руб./кг;

$Ц_{СТ} = 0,54$  – для электротехнической стали, руб./кг;

$K_{из} = 1,065$  – составляющая увеличения массы медного обмоточного провода за счет изоляции.

1.19 Приближенная стандартная цена трансформатора, руб./кг, рассчитанная по формуле (19):

$$C_0 = \kappa_{c1} \cdot (S_{ном} \cdot 10^{-6})^{-\kappa_{c2}} = 6,03 \cdot (125)^{-0,284} = 1,53, \quad (19)$$

где  $\kappa_{c1} = 6,02$ ,  $\kappa_{c2} = 0,284$ .

1.20 Конечная цена трансформатора, руб., рассчитанная по формуле (20):

$$Ц_{тр} = C_0 \cdot G_{прив} = 1,53 \cdot 134481 = 205805. \quad (20)$$

1.21 Приведенные затраты, руб./год, рассчитанные по формуле (21):

$$\begin{aligned} Z_{прив} = & (\varepsilon_H + \alpha_{тр}) \cdot Ц_{тр} + y_э \cdot T_{вкл} \cdot P_{xx} + \frac{y_э \cdot T_{вкл} \cdot i_{xx}}{100} \cdot S_{ном} = \\ & (0,15 + 0,063) \cdot 205805 + 5300 \cdot 8600 \cdot 99075 + \\ & + \frac{5300 \cdot 8600 \cdot 0,178}{100} \cdot 125 \cdot 10^6 = 94486, \end{aligned} \quad (21)$$

где  $\alpha_{mp} = 0,063$  – наилучший вариант затрат, 1/год;

$C_{mp}$  – трансформатор по низкой цене, руб.;

$y_9$  – стоимость электроэнергии, при не высокой нагрузки для трансформатора, понижающего 5300 час/год;

$y_9 = 0,0183 \cdot 10^{-3}$ , руб./Вт· час;

$T_{вкл} = 8600$  час/год – работа трансформатора, подсоединенного в сеть.

1.22  $\beta$  – коэффициент, рассчитанный по формуле (22):

Больше всего подходит вариант наибольший минимум затрат, исходя из расчетов, для разных значений  $\beta$  – коэффициента, выражающих наилучших размеров в трансформаторе [3].

$$\beta = \frac{\pi \cdot D_{H-B}}{H_{обм}} = \frac{3,14 \cdot 1,082}{3,397} = 1,58, \quad (22)$$

где  $D_{H-B}$  – середина диаметра канала средь обмоток НН и ВН;

$H_{обм}$  – параметр высоты обмотки.

Составляющая  $\beta$  в трансформаторах меняется, начиная с 0,5 заканчивая 4. Вычисления наименьших затрат проводится исходя из расчета пяти стандартных составляющих  $\beta(0.63, 1, 1.6, 3.5, 4)$ . Итог заносится в таблицу 1. Отбор наилучшего варианта, исходя  $Z_{прив.мин}$ , рассматривается по графику  $Z_{прив} = f(\beta)$ . Для наилучшего значения, выбранного из графика  $\beta_{opt}$  важно рассчитать заново, округляя  $D_{ст}$  до наилучшего стандартного коэффициента.

Таблица 1- Результаты расчетных коэффициентов

Параметры	Результаты расчета						
	$\beta$	0,63	1	1,6	2,5	4	$\beta_{opt} = 1,58$
$D_{СТ}, м$		0,76	0,81	0,89	0,98	1,13	0,87
$D_{H-6}, м$		1,03	1,08	1,164	1,25	1,411	1,144

Продолжение таблицы 1

$L_{MO}, M$	1,6	1,65	1,73	1,83	1,98	1,74
$H_{обм}, M$	5,13	3,39	2,28	1,58	1,1	2,27
$H_{окн}, M$	5,55	3,81	2,7	1,99	1,58	2,69
$G_{cm}, KZ$	75921	69130	71498	78723	101394	67677
$P_{xx}, Bm$	108807	99075	102469	112824	145315	96993
$Q_{xx}, BAP$	222813	222757	247722	286231	374756	235572
$i_{xx}, \%$	0,178	0,178	0,198	0,299	0,299	0,188
$j, A / M^2$	2521922	2728338	3060816	3437524	4070183	2977467
$Z_{np}, руб./год$	101870	94486	95345	101884	124471	92286

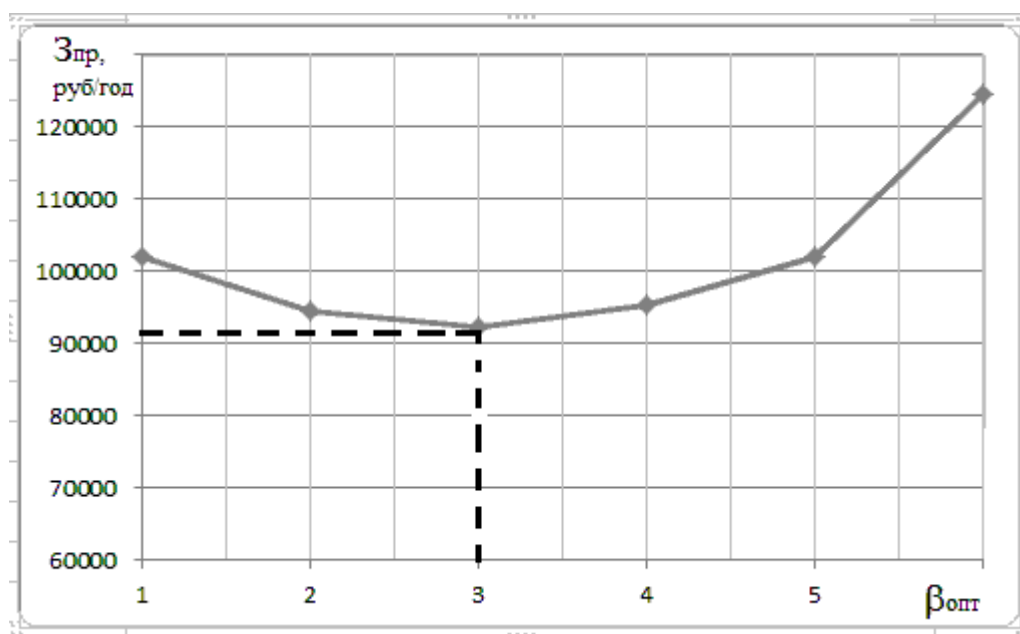


Рисунок 1- Определение минимума приведенных затрат

## 2 Электромагнитный расчет трансформатора

### 2.1 Расчет активного сечения стержня магнитопровода

Поперечное сечение стержня в магнитной системе трансформатора имеет ступенчатый вид, состоящее в окружности диаметром  $D_{ст}$ . Оно изображено на рисунке 2. Построение ступенчатого сечения стержня магнитопровода [24].

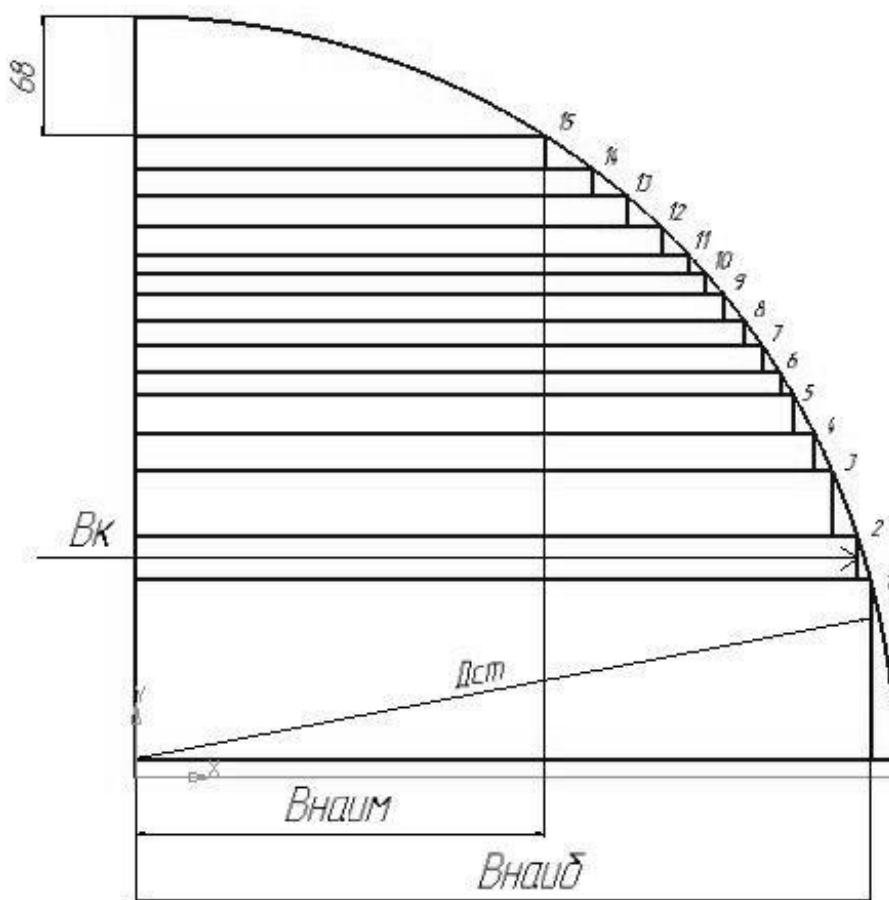


Рисунок 2- Построение ступенчатого сечения стержня магнитопровода

Данное сечение стержня (и ярма) формируется сечениями пакетов (стопкой пластин одного размера):

$B_k$  – ширина пакета;

$t_k$  – толщина пакета.

Вычисление выполнено с помощью построения поперечного сечения стержня магнитопровода, соблюдая наивысших и наименьших стандартных

величин ширины пластин, наименьшая толщина пакета не менее 6мм, величины  $f = 68$  мм, важная для размещения конструкторских деталей прессовки стержня сердечника [4].

Отбор размеров и числа пакетов в сечении стержня магнитопровода делается так, что площадь фигуры, состоящая из ступеней, втиснутая в окружность, была наибольшей.

2.1.1 Активное сечение стержня, рассчитанное по формуле (23):

$$F_{cm} = k_{зан} \cdot F_{cm.геом} = 0,96 \cdot 0,56 = 0,547, \quad (23)$$

где  $k_{зан} = 0,96$  – составляющая заполнения сталью, зависит от толщи пакета сталью, зависит от размера изоляционного покрытия стали, принимающая [23].

2.1.2 Коэффициент заполнения площади круга, рассчитанный по формуле (24):

$$K_{зан.КР} = \frac{F_{СТ}}{\frac{\pi}{4} \cdot D_{СТ}^2} = \frac{0,547}{0,785 \cdot 0,87} = 0,92. \quad (24)$$

Важно получить расположение по радиусу, сконструированное сечение стержня  $K_{зан.КР}$  не меньше стандартного варианта:

$$K_{зан.КР} \geq 0,885.$$

2.2 Подсчет напряжения одного витка, числа витков напряжений и токов на всех ответвлениях обмотки РО

Для выполнения качественных обмоточных работ важно подсчитать необходимое число витков, напряжений и всех токов на отводах обмотки [8].

2.2.1 Примерное значение напряжения одного витка,  $V$ , рассчитанное по формуле (25):

$$U_{В0} = 4,44 \cdot f \cdot B_{cm.o} \cdot F_{cm} = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 0,547 = 194, \quad (25)$$

где  $B_{cm.o} = 1,6$  Тл– примерная величина индукции в стержне.

2.2.2 Число витков в обмотке НН, рассчитано по формуле (26):

$$W_{HH} = \left[ \frac{U_{HH\_ф\_ном}}{U_{B0}} \right]_{ц} = \left[ \frac{10500}{194} \right] = 55, \quad (26)$$

где  $U_{HH\_ф\_ном} = U_{HH\_л}$  – соединение фазы обмоток НН в треугольник.

2.2.3 Установившиеся величина напряжения одного витка,  $U_B$ , рассчитанная по формуле (27):

$$U_B = \frac{U_{HH\_ф\_ном}}{W_{HH}} = \frac{10500}{55} = 190,9. \quad (27)$$

2.2.4 Величина индукции в стержне, рассчитанная по формуле (28):

$$B_{CT} = \frac{U_B}{4,44 \cdot f \cdot F_{CT}} = \frac{190}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,547} = 1,57. \quad (28)$$

2.2.5 Число витков обмотки ВН на главном ответвлении, рассчитанные по формуле (29):

$$W_{BH\_ном} = \left[ \frac{U_{BH\_ф\_ном}}{U_B} \right]_{ц} = \left[ \frac{190525}{190} \right] = 998, \quad (29)$$

$$\text{где } U_{BH\_ф\_ном} = \frac{U_{BH\_ном}}{\sqrt{3}} = \frac{330000}{\sqrt{3}} = 190525,6. \quad (30)$$

2.2.6 Число витков в одной ступени регулирования, рассчитанных по формуле (31):

$$W_{ступ} = \left[ \frac{U_{ступ\_BH\_ф}}{U_B} \right]_{ц} = 18, \quad (31)$$

$$\text{где } U_{ступ\_BH\_ф} = U_{BH\_ф\_ном} \cdot \frac{U_{ступ}}{100} = 190525 \cdot \frac{1,78}{100} = 3391. \quad (32)$$

$$U_{ступ} = 1,78\%.$$

2.2.7 Число витков на любой ступени регулирования, рассчитанных по формуле (33):

$$W_{BH\_0\_ступ} = W_{BH\_ном} \pm N_{ступ} \cdot W_{ступ} = 998 + 0 \cdot 17,7 = 998, \quad (33)$$

где  $N_{ступ}$  – обозначает номер ступени регулирования  $N_{ступ} = \pm 9$ , для стандартного ответвления  $N_{ступ} = 0$ .

2.2.8 Действительная величина напряжения на любом шаге регулирования, рассчитанная по формуле (34):

$$U_{BH\_ф\_N_{смун}}^* = U_6 \cdot W_{BH\_N_{смун}} = 190 \cdot 998 = 190527. \quad (34)$$

2.2.9 Итоговая величина напряжения на любом шаге регулирования, рассчитанная по формуле (35):

$$\begin{aligned} U_{BH\_ф\_N_{смун}} &= U_{BH\_ф\_ном} \pm N_{смун} \cdot U_{смун\_BH\_ф} = \\ &= 190525 + 0 \cdot 3391 = 190525. \end{aligned} \quad (35)$$

2.2.10 Отклонение расчетного и фактического значений напряжений на любом шаге регулирования, рассчитанное по формуле (36):

$$\Delta U = U_{BH\_ф\_N_{смун}} - U_{BH\_ф\_N_{смун}}^* = 190525 - 190527 = -1,68. \quad (36)$$

2.2.11 Относительный уклон расчетных и итоговых напряжений, рассчитанных по формуле (37):

$$\left[ \frac{\Delta U}{U_{BH\_ф\_N_{смун}}} \right] = \left[ \frac{-1,68}{190525} \right] = -8,8 \cdot 10^{-6}. \quad (37)$$

Результаты расчетов сводятся в таблицу 2

Таблица 2- Расчет числа витков и величин отклонений напряжений и токов на всех шагах регулирования

$N_{смун}$	$U_{BH\_ф\_N_{смун}}$	$W_{BH\_0\_смун}$	$I_{BH\_ф\_0_{смун}} =$	$U_{BH\_ф\_N_{смун}}^*$	$\Delta U$	$\frac{\Delta U}{U_{BH\_ф\_N_{смун}}}$
-9	160003,4	838,12	260,41	160005,1	-1,68	$-1,052 \cdot 10^{-5}$
-8	163394,7	855,88	255	163396,4	-1,68	$-1,030 \cdot 10^{-5}$
-7	166786,1	873,65	249,82	166787,8	-1,68	$-1,009 \cdot 10^{-5}$
-6	170177,5	891,41	244,84	170179,1	-1,68	$-0,989 \cdot 10^{-5}$
-5	173568,8	909,17	240,05	173570,5	-1,68	$-0,970 \cdot 10^{-5}$
-4	176960,2	926,94	235,45	176961,9	-1,68	$-0,951 \cdot 10^{-5}$
-3	180351,5	944,70	231,03	180353,2	-1,68	$-0,933 \cdot 10^{-5}$
-2	183742,9	962,47	226,76	183744,6	-1,68	$-0,916 \cdot 10^{-5}$



Продолжение таблицы 2

-1	187134,2	980,23	222,65	187135,9	-1,68	$-0,899 \cdot 10^{-5}$
0	190525,6	998	218,69	190527,3	-1,68	$-0,883 \cdot 10^{-5}$
+1	193916,9	1015,76	214,86	193918,6	-1,68	$-0,868 \cdot 10^{-5}$
+2	197308,3	1033,52	211,17	197310	-1,68	$-0,853 \cdot 10^{-5}$
+3	200699,7	1051,293	207,60	200701,3	-1,68	$-0,839 \cdot 10^{-5}$
+4	204091	1069,057	204,15	204092,7	-1,68	$-0,825 \cdot 10^{-5}$
+5	207482,4	1086,821	200,82	207484,1	-1,68	$-0,811 \cdot 10^{-5}$
+6	210873,7	1104,585	197,59	210875,4	-1,68	$-0,798 \cdot 10^{-5}$
+7	214265,1	1122,35	194,46	214266,8	-1,68	$-0,785 \cdot 10^{-5}$
+8	217656,4	1140,114	191,43	217658,1	-1,68	$-0,773 \cdot 10^{-5}$
+9	221047,8	1157,878	188,49	221049,5	-1,68	$-0,761 \cdot 10^{-5}$

2.2.12 Номинальный фазный ток обмотки ВН, А, рассчитанный по формуле (37):

$$I_{ВН\_ф\_ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}} = \frac{125 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 330000} = 218,6. \quad (38)$$

2.2.13 Фазный ток обмотки ВН на любом шаге регулирования, А, рассчитанный по формуле (38):

$$I_{ВН\_ф\_0\_стун} = \frac{S_{ном}}{m_{\phi} \cdot U_{ВН\_ф\_N\_стун}} = \frac{125 \cdot 10^6}{3 \cdot 190525} = 218,6. \quad (39)$$

При максимально допустимом токе обмотки ВН выше  $1,25 \cdot I_{ВН\_ф\_ном}$  важно при использовании понижать нагрузку трансформатора во избежание перегрева трансформатора [5].

### 2.3 Подсчет параметров обмоток трансформатора

В отечественных трансформаторах наиболее популярными являются винтовые и непрерывные обмотки [22].

2.3.1 Величины определяющий номинальный ток обмоток НН и ВН, А, рассчитанные по формулам (39) и (40):

$$I_{\text{НН}_\phi_{\text{ном}}} = \frac{S_n}{m_\phi \cdot U_{\text{НН}}} = \frac{125 \cdot 10^6}{3 \cdot 10500} = 3968, \quad (40)$$

$$I_{\text{ВН}_\phi_{\text{ном}}} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}} = \frac{125 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 330000} = 218, \quad (41)$$

где  $m_B$  – количество параллельных ветвей обмотки;

$m_B = 2$  – для трансформаторов с расщепленными обмотками;

$m_B = 1$  – для трансформаторов без расщепления.

$t_B = 0,5 \cdot 10^{-3}$  – толщина изоляции провода на две стороны, НН обмотки, м;

$t_B = 1,35 \cdot 10^{-3}$  – толщина изоляции провода на две стороны, ВН обмотки,

м;

$h_{\text{кан.мин}} = 3 \cdot 10^{-3}$  – высота минимального радиального канала, НН обмотки,

м;

$h_{\text{кан.мин}} = 5 \cdot 10^{-3}$  – высота минимального радиального канала, ВН обмотки,

м;

$h_{\text{пр.мин}} = 4,75 \cdot 10^{-3}$  – максимальный минимум высоты провода, м;

$h_{\text{пр.макс}} = 19,5 \cdot 10^{-3}$  – максимум высоты провода, м;

$b_{\text{пр.макс}} = 5,6 \cdot 10^{-3}$  – максимум ширины провода, м;

$b_{\text{пр.мин}} = 1,25 \cdot 10^{-3}$  – максимальный минимум ширины провода, м;

– минимально допустимый коэффициент от высоты провода к его ширине:

$$\left[ \frac{h_{\text{пр}}}{b_{\text{пр}}} \right]_{\text{мин}} = 2.$$

– максимально допустимый коэффициент от высоты провода к его ширине:

$$\left[ \frac{h_{\text{пр}}}{b_{\text{пр}}} \right]_{\text{макс}} = 6.$$

Коэффициент максимального числа параллельных проводов на параллельную ветвь обмотки  $n_{пар.макс}$  :

– для непрерывной 8;

– для винтовой не ограниченное количество;

$P_{доб.ос} \% \approx 10\%$  – потери добавочные с осевого поля рассеяния, для медной обмотки;

$k_{ус} = 0,1$  – усадка обмотки при сушке;

$k_{зан.пр} = 0,985$  – заполнение сечения провода, уменьшая сечения провода с помощью скругление его углов;

$I_{поля} = 0,12м$  – расстояние промеж соседними прокладками;

$\varphi_{кат} = 2$  – кратность числа катушек в одной параллельной ветви непрерывной обмотки.

Ассортимент прямоугольных обмоточных проводов модели ПБ и АПБ, используются для трансформаторов определенного диапазона мощностей, можно взять следующий:

Стандартная высота провода для НН и ВН  $h_{пр}$ , мм –11,36; 12,5.

Стандартная ширина провода для НН и ВН  $b_{пр}$ , мм –5,00; 5,64.

### 2.3.2 Подбор типа обмотки

Для подбора типа обмотки необходимо высчитать высоту провода, эта высота является главным равенством для коэффициентов катушечных обмоток, которыми являются винтовые и непрерывные обмотки:

$$h_{пр} = \frac{H_{обм} \cdot W_{кат}}{W_{обм} \cdot m_B} - h_{кан.мин} \cdot (1 - k_{ус}) - t_B. \quad (42)$$

Весь расчет начинается выбора винтовой, u-образной одноходовой обмотки. Сначала в выражении для  $h_{пр}$  подставляется  $W_{кат} = 1$ . Критерием при подбора типа обмотки является соотношение:

$$h_{пр} \geq h_{пр.мин},$$

где  $h_{пр.мин} = 4,75 \cdot 10^{-3} м$  – по исходным данным.

Если это соотношение выполняется, то проверяется возможность выбора винтовой, u-образной двухходовой обмотки. В итоге выбирается винтовая, u-образная обмотка с наибольшим возможным количеством заходов, что позволяет выбрать обмотку, занимающую в окне магнитопровода меньший размер по ширине [21].

Если соотношение критерия не происходит, или  $h_{np}$  получается отрицательным, то берется непрерывная обмотка.

2.3.2.1 Проверка возможности выбора двухходовой винтовой, u-образной обмотки, рассчитанная по формуле (43):

$$h_{np} = \frac{H_{обм}}{W_{обм} \cdot m_s} - h_{кан.мин} \cdot (1 - \kappa_{yc}) - t_s \geq h_{np.мин} =$$

$$= \frac{2,27}{2 \cdot 55} - 3 \cdot 10^{-3} \cdot (-0,1) - 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,0125. \quad (43)$$

### 2.3.3 Расчет параметров винтовой, u-образной обмотки НН

При подсчете параметров винтовой обмотки высота провода практически predetermined высотой обмотки и взятым количеством заходов. Чтобы радиальный канал не оказался меньше  $h_{кан.мин}$ , полученную в результате расчета высоты провода необходимо округлять до табличного наименьшего значения. Наилучшая ширина провода  $b_{np}$ , берется из критерия минимума добавочных потерь от осевого поля рассеяния:

$$\frac{\partial P_{доб.ос}}{\partial b_{np}} = 0.$$

Примерная ширина обмотки  $b_{кат.о}$  берется равной уже существующей ширине обмотки НН из подсчета оптимального варианта  $b_n$ . Полученные в результате подсчета конечные размеры ширины обмотки  $b_{кат}$  и высоты канала  $h_{кан.ср}$  должны, по возможности, иметь минимальные отличия от  $b_{кат.о}$  и  $h_{кан.мин}$ .

Финальное решение по выбору величин обмотки можно принять только после подсчета другой обмотки, т.к. если одна из обмоток будет шире, а у

другой будет ширина меньше, то общая ширина обмоток будет невесомо отклоняться от ориентировочного значения [9].

2.3.3.1 Число катушек, рассчитанных по формуле (44):

$$n_{кат} = n_{зах} \cdot m_{\epsilon} \cdot W_{обм} = 2 \cdot 1 \cdot 55 = 110. \quad (44)$$

2.3.3.2 Высота провода, м, рассчитанная по формуле (45):

$$h_{пр.} = \left[ \frac{H_{обм} + h_{кан.мин} \cdot (1 - \kappa_{ус})}{n_{кат}} - h_{кан.мин} \cdot (1 - \kappa_{ус}) - t_{\epsilon} \right]_{м.м.} =$$

$$= \left[ \frac{2,73 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot (-0,1)}{110} - 3 \cdot 10^{-3} \cdot (-0,1) - 0,5 \cdot 10^{-3} \right] = 0,0125. \quad (45)$$

2.3.3.3 Ширина провода, м, рассчитанная по формуле (46):

$$b_{пр} = \left[ 3,79 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[3]{\left( \frac{H_{обм}}{W_{обм} \cdot m_{\epsilon} \cdot n_{зах} \cdot h_{пр} \cdot b_{кат.о} \cdot K_{ос}} \right)^2} \cdot t_{\epsilon} \right]_{м.} =$$

$$= \left[ 3,79 \cdot 10^{-3} \sqrt{\left( \frac{2,273}{55 \cdot 2 \cdot 0,125 \cdot 0,063 \cdot 0,95} \right)^2} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \right] = 0,003. \quad (46)$$

2.3.3.4 Сечения провода, рассчитано по формуле (47):

$$F_{пр.} = \kappa_{зан.пр} \cdot h_{пр} \cdot b_{пр} = 0,985 \cdot 0,125 \cdot 0,003 = 3,69 \cdot 10^{-5}. \quad (47)$$

2.3.3.5 Число параллельных проводов, рассчитанных по формуле (48):

$$n_{пар} = \left[ \frac{I_{ф.ном.}}{j_0 \cdot F_{пр.}} \right]_{ц.б.} = \left[ \frac{3938}{2977467 \cdot 3,69 \cdot 10^{-5}} \right] = 54. \quad (48)$$

2.3.3.6 Сечения обмотки, рассчитано по формуле (49):

$$F_{обм} = n_{пар} \cdot F_{пр.} = 54 \cdot 3,69 \cdot 10^{-5} = 0,00199. \quad (49)$$

2.3.3.7 Плотность тока,  $A/m^2$ , рассчитанная по формуле (50):

$$j = \frac{I_{ф.ном.}}{F_{обм}} = \frac{3968}{3,69 \cdot 10^{-5}} = 1989474. \quad (50)$$

2.3.3.8 Высота обмотки, м, рассчитанная по формуле (51):

$$h_{кат} = h_{пр} + t_{\epsilon} = 0,0125 + 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,013. \quad (51)$$

2.3.3.9 Ширина обмотки, м, рассчитанная по формуле (52):

$$b_{кат} = 1,03 \cdot (b_{np} + t_{\epsilon}) \cdot \frac{n_{нар}}{m_{\epsilon} \cdot n_{зах}} = 1,03 \cdot (0,003 + 0,5 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{110}{2} = 0,074. \quad (52)$$

2.3.3.10. Средняя высота канала, м, рассчитанная по формуле (53):

$$h_{кан.ср.} = \frac{H_{обм.} - n_{кат} \cdot h_{кат}}{(1 - \kappa_{yc}) \cdot (n_{кат} - 1)} = \frac{2,273 - 110 \cdot 0,013}{0,9 \cdot 109} = 0,0859. \quad (53)$$

#### 2.3.4 Расчет параметров равномерной непрерывной обмотки ВН

Все параметры обмотки необходимы, соответствовать всем требованиям. Альтернативными параметрами при отборе варианта обмотки является высота провода  $h_{np}$ , которая дана в стандартном ряде, и число параллельных проводов  $n_{нар}$  [19].

Из всех допустимых вариантов непрерывной обмотки, за финальный, следует взять тот, для которого  $b_{кат}$  минимально отклоняется от его параметра в оптимальном варианте ( $b_{\epsilon}$  или  $b_n$ ), наименьшее значение  $P_{доб.ос}$  и дробная часть  $W_{кат} > 0,5$  [20].

2.3.4.1 Число прокладок, рассчитанных по формуле (54):

$$n_{прок} = \left( \frac{\pi \cdot D_{н-в.о}}{\varphi_{кат} \cdot I_{поля}} \right) \cdot \varphi_{кат} = \left( \frac{3,14 \cdot 1,144}{2 \cdot 0,12} \right) \cdot 2 = 32. \quad (54)$$

2.3.4.2 Ширина провода, м, рассчитанная по формуле (55):

$$b_{np} = \frac{F_{обм.о}}{\kappa_{зан.пр} \cdot h_{np} \cdot n_{нар}} = \frac{7,35 \cdot 10^{-5}}{0,985 \cdot 0,1136 \cdot 2} = 0,00564, \quad (55)$$

где  $m_{\epsilon} = 2$ ,  $h_{np} = 0,01136$ ,  $n_{нар} = m_{\epsilon}$ ,  $F_{обм.о} = 7,35 \cdot 10^{-5}$ .

2.3.4.3 Сечение провода, рассчитанное по формуле (56):

$$F_{пр.} = \kappa_{зан.пр} \cdot h_{gh} \cdot b_{np} = 0,985 \cdot 0,1136 \cdot 0,00564 = 6,31 \cdot 10^{-5}. \quad (56)$$

2.3.4.4 Сечение обмотки, рассчитанное по формуле (57):

$$F_{обм} = n_{нар} \cdot F_{пр} = 2 \cdot 6,31 \cdot 10^{-5} = 12,6 \cdot 10^{-5}. \quad (57)$$

2.3.4.5 Плотность тока,  $A/m^2$ , рассчитанная по формуле (58):

$$j = \frac{I_{ф.ном.}}{F_{обм}} = \frac{218}{12,6 \cdot 10^{-5}} = 1732654. \quad (58)$$

2.3.4.6 Поле рассеивание, рассчитанное по формуле (59):

$$B_{oc} = \frac{1,78 \cdot 10^{-6} \cdot I_{ф.ном} \cdot W_{обм.} \cdot K_{oc}}{H_{обм}} = \frac{1,78 \cdot 10^{-6} \cdot 218 \cdot 998 \cdot 0,95}{2,27} = 0,162. \quad (59)$$

2.3.4.7 Добавочные потери от осевого поля рассеивания, %, рассчитанные по формуле (60):

$$P_{доб.ос. \%} = 54,8 \cdot \left( \frac{f}{\rho_{np}} \right)^2 \cdot \left( \frac{b_{np} \cdot B_{oc}}{j} \right)^2 =$$

$$54,8 \cdot \left( \frac{50}{2,13 \cdot 10^{-8}} \right)^2 \cdot \left( \frac{0,00564 \cdot 0,162}{1732654} \right)^2 = 8,4 \leq 10. \quad (60)$$

2.3.4.8 Высота обмотки, м, рассчитанная по формуле (61):

$$h_{кат} = h_{np} + t_{\epsilon} = 0,01136 + 1,35 \cdot 10^{-3} = 0,0127. \quad (61)$$

2.3.4.9 Число катушек, рассчитанных по формуле (62):

$$n_{кат} = \left[ \frac{H_{обм}}{h_{кат} + h_{кан.мин} \cdot (1 - \kappa_{ус})} \cdot \varphi_{кат} \right]_{ц.м.} \cdot \varphi_{кат} =$$

$$= \left[ \frac{2,27}{0,01271 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9 \cdot 2} \right] = 142 \quad (62)$$

2.3.4.10 Число витков в катушке, рассчитанных по формуле (63):

$$W_{кат} = \frac{W_{обм} \cdot m_{\epsilon}}{n_{кат}} = \frac{998}{142} = 7. \quad (63)$$

2.3.4.11 Ширина обмотки, м, рассчитанная по формуле (64):

$$b_{кат} = 1,03 \cdot (b_{np} + t_{\epsilon}) \cdot \frac{n_{нар}}{m_{\epsilon}} \cdot W_{кат} = 1,03 \cdot 0,00564 \cdot 19 = 0,110. \quad (64)$$

Финальный вариант обмоток НН и ВН служит в трансформаторе заданный при проектировании уровень  $U_{кз} = 12,5\%$ . В ГОСТе разрешено отклонения этой величины в расчете на  $\pm 5\%$  и в готовом трансформаторе на  $\pm 10\%$  [18].

2.3.5.1 Средний диаметр между обмотками НН и ВН, м, рассчитанный по формуле (65):

$$\begin{aligned} D_{н-в} &= (1 + 2 \cdot K_{CT-O}) \cdot D_{CT} + 2 \cdot (\epsilon_{o-н} + \epsilon_n) + \epsilon_{н-в} = \\ &= (1 + 2 \cdot 0,015) \cdot 0,87 + 2 \cdot (0,027 + 0,063) + 0,115 = 1,91. \end{aligned} \quad (65)$$

2.3.5.2 Средний диаметр обмотки НН, м, рассчитанный по формуле (66):

$$D_{н.сп.} = D_{н-в} - B_n - B_{н-в} = 1,19 - 0,074 - 0,085 = 1,033. \quad (66)$$

2.3.5.3 Средний диаметр обмотки ВН, м, рассчитанный по формуле (67):

$$D_{в.сп.} = D_{н-в} + \epsilon_в + \epsilon_{н-в} = 1,19 + 0,110 + 0,085 = 1,387. \quad (67)$$

2.3.5.4 Средний диаметр обмотки РО, м, рассчитанный по формуле (68):

$$D_{р.сп.} = D_{н-в} + \epsilon_p + \epsilon_{в-р} = 1,19 + 0,0265 + 0,09 = 1,12. \quad (68)$$

2.3.5.4 Диаметр бака, м, рассчитывается по формуле (69):

$$\begin{aligned} D_{\delta} &= \frac{\epsilon_n}{3} \cdot D_{н.сп.} + \epsilon_{н-в} \cdot D_{н-в} + \frac{\epsilon_n}{3} \cdot D_{в.сп.} = \\ &= \frac{0,074}{3} \cdot 1,03 + 0,115 \cdot 1,19 + \frac{0,110}{3} \cdot 1,38 + 1,12 = 0,223. \end{aligned} \quad (69)$$

2.3.5.5 Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %, рассчитанная по формуле (70):

$$\begin{aligned} U_{кз.р} &= \frac{2,48 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot S_{ном} \cdot D_{\delta} \cdot K_{oc}}{m_{\phi} \cdot U_B^2 \cdot H_{обм}} = \\ &= \frac{2,48 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 125 \cdot 10^6 \cdot 0,223 \cdot 0,95}{3 \cdot 190^2 \cdot 2,69} = 13,24. \end{aligned} \quad (70)$$

2.3.6 Расчет параметров регулировочной обмотки

2.3.6.1 Высота провода, м, рассчитанная по формуле (71):

$$h_{пр} = \frac{n_{сл} \cdot H_{обм.ро}}{W_{стун} \cdot m_{зах} \cdot m_{в.ро}} - t_{в.сл} \geq h_{пр.мин} = \frac{2,27}{12 \cdot 5 \cdot 1} - 3 \cdot 10^{-3} = 0,0335, \quad (71)$$

где  $n_{сл} = 2$ ,  $m_{в.ро} = 1$ ,  $t_{в.сл} = 2,95 \cdot 10^{-3}$ .

2.3.6.2 Число параллельных проводов, шт., рассчитано по формуле (72):

$$n_{пар} = m_{зах} = 9. \quad (72)$$



2.3.6.3 Ширина провода, м, рассчитанная по формуле (73):

$$b_{np} = \frac{F_{обм.о}}{\kappa_{зап.пр} \cdot h_{np} \cdot n_{пар}} = \frac{0,00012}{0,985 \cdot 0,335 \cdot 9} = 0,005, \quad (73)$$

где  $F_{обм.о} = \frac{I_{ВН\_ф.ном.}}{j_{ВН}} = \frac{218}{1732653} = 12 \cdot 10^{-5},$  (72)

2.3.6.4 Сечение провода, м, рассчитанное по формуле (74):

$$F_{пр.} = \kappa_{зап.пр} \cdot h_{np} \cdot b_{np} = 0,985 \cdot 0,335 \cdot 0,005 = 16 \cdot 10^{-5}. \quad (74)$$

2.3.6.5 Сечение обмотки, м, рассчитанное по формуле (75):

$$F_{обм} = n_{пар} \cdot F_{пр} = 9 \cdot 16 \cdot 10^{-5} = 14 \cdot 10^{-4}. \quad (75)$$

2.3.6.6 Плотность тока, А/м<sup>2</sup>, рассчитанная по формуле (76):

$$j = \frac{I_{ВН\_ф.ном.}}{F_{обм}} = \frac{218}{14 \cdot 10^{-4}} = 147103. \quad (76)$$

2.3.6.7 Ширина обмотки, м, рассчитанная по формуле (77):

$$b_{обм} = \frac{\left[ h_{np} + 1,35 \cdot 10^{-3} \right] \cdot n_{пар} \cdot n_{ступ.зах.}}{2} = \frac{\left[ 0,005 + 1,35 \cdot 10^{-3} \right] \cdot 9 \cdot 0,4}{2} = 0,0265. \quad (77)$$

В таблицу 3 занесены основные параметры обмоток

Таблица 3- Основные параметры обмоток

Параметр	Ед. изм.	Двухходовая, U-образная (НН)	ВН не прерывная	Регуляционная РО
Высота обмотки, $H_{обм}$	м	1,558	1,55	1,55
Номинальный ток, $I_{ф.ном.}$	А	3968	219	219
Плотность тока, $j$	А/м <sup>2</sup>	1732653	879299	147103
Число витков в катушке, $W_{кат}$	ШТ	1	7	7
Число парал. проводов, $n_{пар}$	ШТ	54	2	9

Продолжение таблицы 3

Число катушек, $n_{кат}$	Шт	184	505	441
Высота провода, $h_{пр}$	м	0,0125	0,01136	0,0335
Ширина провода, $b_{пр}$	м	0,003	0,00564	0,005
Отношение $h_{пр} / b_{пр}$	—	—	2	6
Сечение обмотки, $F_{обм}$	м <sup>2</sup>	0,002	$12 \cdot 10^{-5}$	$15 \cdot 10^{-4}$
Ширина обмотки, $b_{кат}$	м	0,074	0,110	0,0265

## 2.4 Расчет потерь и напряжения короткого замыкания

2.4.1 Активное сопротивление обмоток НН и ВН при расчетной температуре, Ом, рассчитанное по формуле (78) и (79):

$$R_{обм\_НН} = \rho_{пр} \frac{L_{нар}}{F_{обм}} = 2,13 \cdot \frac{178}{0,0019} = 0,0019, \quad (78)$$

$$R_{обм\_ВН} = \rho_{пр} \frac{L_{нар}}{F_{обм}} = 2,13 \cdot \frac{4347}{0,00012} = 0,733, \quad (79)$$

где  $L_{нар} = \pi \cdot D_{обм.ср} \cdot W_{обм}$  – расчет протяжённости одного разомкнутого провода на ответвлении, кг:

$$L_{нар.нн} = 178, \quad (80)$$

$$L_{нар.вн} = 4347, \quad (81)$$

где  $D_{обм.ср}$  – коэффициент среднего диаметра обмотки.

2.4.2 Масса одного обмоточного провода катушек НН и ВН, кг, рассчитанная по формуле (82) и (83):

$$G_{пр\_НН} = m_{ф} \cdot L_{нар} \cdot F_{обм} \cdot \gamma_{пр} = 3 \cdot 178 \cdot 0,0019 \cdot 8,89 \cdot 10^3 = 5120, \quad (82)$$

$$G_{пр\_ВН} = m_{ф} \cdot L_{нар} \cdot F_{обм} \cdot \gamma_{пр} = 3 \cdot 4347 \cdot 0,00012 \cdot 10^3 = 8562. \quad (83)$$

### 2.4.3 Подсчет главных потерь в обмотках НН и ВН

2.4.3.1 Главные потери в токе и сопротивления в обмотках НН и ВН, Вт, рассчитанные по формуле (84) и (85):

$$P_{осн.НН} = m_{\phi} \cdot I_{\phi.ном.}^2 \cdot R_{обм} = 3 \cdot 3968^2 \cdot 0,0019 = 89992, \quad (84)$$

$$P_{осн.ВН} = m_{\phi} \cdot I_{\phi.ном.}^2 \cdot R_{обм} = 3 \cdot 218^2 \cdot 0,733 = 105264. \quad (85)$$

2.4.3.2 Главные потери в обмотках НН и ВН, Вт, рассчитанные по формуле (86) и (87):

$$P_{осн.НН} = \frac{\rho_{np}}{\gamma_{np}} \cdot j_{обм}^2 \cdot G_{np} = \frac{2,13 \cdot 10^{-8}}{8,89 \cdot 10^3} \cdot 1989473^2 \cdot 5120 = 89992, \quad (86)$$

$$P_{осн.ВН} = \frac{\rho_{np}}{\gamma_{np}} \cdot j_{обм}^2 \cdot G_{np} = \frac{2,13 \cdot 10^{-8}}{8,89 \cdot 10^3} \cdot 1732653^2 \cdot 8562 = 105264. \quad (87)$$

2.4.3.3 Сумма главных потерь в обмотках НН и ВН, Вт, рассчитанная по формуле (88):

$$\sum P_{осн} = P_{осн.НН} + P_{осн.ВН} = 89992 + 105264 = 195257. \quad (88)$$

Результаты основных потерь заносится в таблицу 4

Таблица 4- Основные результаты подсчета потерь в обмотках НН и ВН

Параметры	Обмотка	
	НН	ВН
$L_{нар}, \text{ М}$	178	4121
$R_{обм}, \text{ Ом}$	0,0019	0,733
$G_{np}, \text{ кг}$	5120	8562
$P_{осн.ВН} = f(I \cdot R), \text{ Вт}$	105264	89992
$P_{осн.ВН} = f(f \cdot G_{np}), \text{ Вт}$	105264	8992

### 2.4.4 Подсчет коэффициентов добавочных потерь в обмотках ВН, НН

Следует учесть, что добавочные потери в самих обмотках напрямую связаны с действием полей рассеяния.

Для измерения этих потерь важно знать распределения составляющих индукции поля рассеяния. Сам расчет поля рассеяния силового трансформатора довольно сложный и решается с рядом упрощающих допущений [17].

На рисунке 3 показано изображение достаточно сложного в действительности поля рассеяния двух-обмоточного трансформатора. Осовой компонент поля рассеяния распределяется в виде трапеции, вершина которой находится в пределах основного канала рассеяния, а основание – в пределах радиального размера обмоток и главного канала [6].

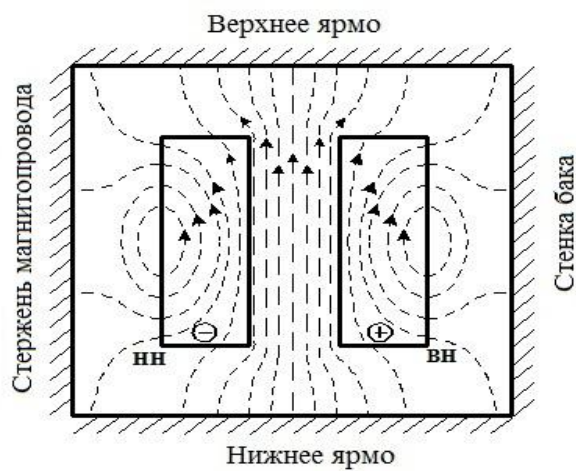


Рисунок 3- Приближенная картина распределения поля рассеяния

2.4.4.1 Индукция осевого поля рассеяния обмоток НН и ВН, Тл, рассчитанная по формуле (89) и (90):

$$B_{ос.НН} = \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot I_{обм.ф} \cdot W_{обм} \cdot K_{ос}}{H_{обм}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 3968 \cdot 54 \cdot 0,95}{2,27} = 0,162, \quad (89)$$

$$B_{ос.ВН} = \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot I_{обм.ф} \cdot W_{обм} \cdot K_{ос}}{H_{обм}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 218 \cdot 998 \cdot 0,95}{2,27} = 0,162, \quad (90)$$

где  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  – коэффициент магнитного проницаемости воздуха, Гн/м;

$B_{ос}$  – подсчитанная через величины обмоток НН и ВН, должна совпадать.

2.4.4.2 Коэффициент потерь от осевого элемента поля рассеяния в обмотках НН, ВН, Вт/кг, рассчитанный по формуле (91) и (92):

$$P_{в.ос.НН} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot b_{np}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{ос}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,003^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,162^2 = 1,7, \quad (91)$$

$$P_{в.ос.ВН} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot b_{np}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{ос}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,00564^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,162^2 = 2. \quad (92)$$

2.4.4.3 Полные потери от осевого элемента поля рассеяния в обмотках НН и ВН, Вт, рассчитанные по формуле (93) и (94):

$$P_{в.ос.НН} = p_{в.ос.} \cdot G_{np} = 1,74 \cdot 5120 = 8745, \quad (93)$$

$$P_{в.ос.ВН} = p_{в.ос.} \cdot G_{np} = 2 \cdot 8562 = 17504. \quad (94)$$

2.4.4.4 Радиальный элемент поля рассеяния обмоток НН и ВН, рассчитанный по формуле (95) и (96):

$$B_{рад.ВН_{1-2}} = \sqrt{B_{рад.1}^2 + B_{рад.1} \cdot B_{рад.2} + B_{рад.2}^2} = \sqrt{0,064^2 + 0,064 \cdot 0,016^2 + 0,016^2} = 0,074, \quad (95)$$

$$B_{рад.НН_{1-2}} = \sqrt{B_{рад.1}^2 + B_{рад.1} \cdot B_{рад.2} + B_{рад.2}^2} = \sqrt{0,064^2 + 0,064 \cdot 0,016^2 + 0,016^2} = 0,074, \quad (96)$$

где  $B_{рад.1} = 0,4 \cdot B_{ос}$ ;  $B_{рад.2} = 0,1 \cdot B_{ос}$ ;  $B_{рад.2-3} = B_{рад.2}$ ;

2.4.4.5 Удельные потери от радиального элемента поля рассеяния в обмотках НН и ВН, для участков 1–2 и 2–3, Вт/кг, рассчитанные по формулам (97), (98), (99) и (100):

$$P_{в.рад.НН_{1-2}} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot h_{np}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{рад}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,0125^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,074^2 = 6,22, \quad (97)$$

$$P_{в.рад.ВН_{1-2}} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot h_{np}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{рад}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,01136^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,074^2 = 14,38, \quad (98)$$

$$P_{в.рад.НН_{2-3}} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot h_{np}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{рад}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,0125^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,016^2 = 0,296, \quad (99)$$

$$P_{в.рад.ВН_{2-3}} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot h_{np}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{рад}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,01136^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,016^2 = 0,685. \quad (100)$$

2.4.4.6 Полные потери на участках 1-2 и 2-3 от радиального элемента поля рассеяния в обмотках НН и ВН, Вт, рассчитанные по формулам (101), (102), (103) и (104):

$$P_{\text{в.рад.НН}_{1-2}} = p_{\text{в.рад.1-2}} \cdot G_{\text{нр.1-2}} = 6,22 \cdot 256 = 1594, \quad (101)$$

$$P_{\text{в.рад.ВН}_{1-2}} = p_{\text{в.рад.1-2}} \cdot G_{\text{нр.1-2}} = 14,38 \cdot 428 = 6159, \quad (102)$$

$$P_{\text{в.рад.НН}_{2-3}} = p_{\text{в.рад.2-3}} \cdot G_{\text{нр.2-3}} = 0,296 \cdot 2304 = 683, \quad (103)$$

$$P_{\text{в.рад.ВН}_{2-3}} = p_{\text{в.рад.2-3}} \cdot G_{\text{нр.2-3}} = 0,685 \cdot 3852 = 2639, \quad (104)$$

где  $G_{\text{нр.1-2}} = 0,05 \cdot G_{\text{нр}}$ ,  $G_{\text{нр.2-3}} = 0,45 \cdot G_{\text{нр}}$ .

2.4.4.7 Потери от радиального элемента поля рассеяния в обмотках НН и ВН, Вт, рассчитанные по формуле (105) и (106):

$$P_{\text{в.рад.НН}} = 2 \cdot (P_{\text{в.рад1-2}} + P_{\text{в.рад2-3}}) = 2 \cdot (1594 + 683) = 4554, \quad (105)$$

$$P_{\text{в.рад.ВН}} = 2 \cdot (P_{\text{в.рад1-2}} + P_{\text{в.рад2-3}}) = 2 \cdot (6159 + 2639) = 17502. \quad (106)$$

2.4.4.8 Функция типа транспозиции и числа параллельных проводов обмоток НН и ВН, рассчитывается по формуле (107) и (108):

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{ц.НН}} &= k_{\text{транс}}^4 \cdot \frac{n_{\text{нар}}^2}{m_{\text{г}}^2} \cdot 0,635 \cdot \left( \frac{k_{\text{транс}} \cdot n_{\text{нар}}}{m_{\text{г}}} \right)^{0,109} = \\ &= 0,125^4 \cdot \frac{54^2}{3^2} \cdot 0,635 \cdot \left( \frac{0,125 \cdot 54}{3} \right)^{0,109} = 0,054, \end{aligned} \quad (107)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{ц.ВН}} &= k_{\text{транс}}^4 \cdot \frac{n_{\text{нар}}^2}{m_{\text{г}}^2} \cdot 0,635 \cdot \left( \frac{k_{\text{транс}} \cdot n_{\text{нар}}}{m_{\text{г}}} \right)^{0,109} = \\ &= 0,125^4 \cdot \frac{2^2}{3^2} \cdot 0,635 \cdot \left( \frac{0,125 \cdot 2}{3} \right)^{0,109} = 5 \cdot 10^{-5}, \end{aligned} \quad (108)$$

где  $k_{\text{транс}} = 0,125$  – транспозиция с двумя групповыми и одной общей.

2.4.4.9 Добавочные потери от циркулирующих токов, пробужденных осевым полем рассеяния в обмотках НН и ВН, Вт, рассчитанные по формуле (109) и (110):

Для того, чтобы уменьшить потери от движущих токов в много параллельных обмотках используется транспозиция параллельных проводов,

чтобы сделать равными потокосцепление каждого провода с полем рассеяния. При использовании не более 4-ех параллельных проводов, транспозиция получается идеальной и потери от циркулирующих токов отсутствуют. Так же они отсутствуют в непрерывных обмотках, и двухходовых винтовых, U-образных обмотках, т.к. всегда можно получить идеальную транспозицию. В одноходовой винтовой обмотке при  $n_{нар} > 4$  потери от циркулирующих токов, пробужденные осевым полем рассеяния, с учетом транспозиции.

$$P_{ц.ос.НН} = P_{в.ос} \cdot \left( \frac{b_{пр.уз}}{b_{пр}} \right)^2 \cdot \varphi_{ц} = 8745 \cdot \left( \frac{0,0035}{0,003} \right)^2 \cdot 0,054 = 653, \quad (109)$$

$$P_{ц.ос.ВН} = P_{в.ос} \cdot \left( \frac{b_{пр.уз}}{b_{пр}} \right)^2 \cdot \varphi_{ц} = 17504 \cdot \left( \frac{0,00699}{0,00564} \right)^2 \cdot 5,2 \cdot 10^{-5} = 1,44, \quad (110)$$

где  $b_{пр.уз.НН} = 0,035$ ,  $b_{пр.уз.ВН} = 0,007$ ;

2.4.4.10 Добавочные потери в обмотках НН и ВН, Вт, рассчитанные по формуле (111) и (112):

$$P_{доб.НН} = P_{в.ос} + P_{в.рад} + P_{ц.ос} + P_{ц.рад} = 8745 + 4554 + 653 = 13953, \quad (111)$$

$$P_{доб.ВН} = P_{в.ос} + P_{в.рад} + P_{ц.ос} + P_{ц.рад} = 17504 + 17598 + 1,41 = 35104, \quad (112)$$

где  $P_{в.ос}$ ,  $P_{в.рад}$  – параметры добавочных потерь от вихревых токов;

$P_{ц.ос}$ ,  $P_{ц.рад}$  – параметры добавочных потерь от циркулирующих токов.

Результаты расчета добавочных потерь сводится в таблицу 5

Таблица 5- Финальные расчеты добавленных потерь от вихревых токов, вызванных осевой и радиальной составляющей поля рассеяния

Параметр		Обмотка	
		НН	ВН
$B_{ос}$	Тл	0,162	0,162
$p_{в.ос}$	Вт/к	1,7	2
$P_{в.ос}$	Вт	8745	17504
$B_{рад}$	1-2 Тл	0,074	0,074

Продолжение таблицы 5

	1-2		6	14
$P_{в.рад}$	2-3	Вт/кг	0,29	0,685
	1-2		1594	6159
$P_{в.рад}$	2-3	Вт	683	2639
$\Sigma P_{в.об.рад}$		Вт	13953	35104

2.4.5 Расчет коэффициентов добавочных потерь в металлоконструкциях

Они зарождаются полями рассеяния и распределяются в составляющих конструкции трансформатора – ярмовых балках, на стенках бака и д.р.

Для начала, чтобы рассчитать добавочные потери в металлоконструкциях мы определяем предварительные размеры бака. Финальные размеры бака узнаются в результате выполнения компоновки активной части трансформатора в баке.

2.4.5.1 Межосевое расстояние, м, рассчитанное по формуле (113):

$$L_{мо} = D_{н-в} + b_{н-в} + 2 \cdot (\epsilon_{с} + \epsilon_{в-ро} + \epsilon_{ро}) + \epsilon_{м-ф} = 1,19 + 0,085 + 3 \cdot (0,074 + 0,09 + 0,0265) + 0,054 = 1,68. \quad (113)$$

2.4.5.2 Наружный диаметр обмоток, м, рассчитанный по формуле (114):

$$D_{ро.нар} = D_{в-ро} + \epsilon_{в-ро} + 2 \cdot \epsilon_{ро} = (0,323) + 0,9 + 2 \cdot 0,0265 = 0,53, \quad (114)$$

где  $D_{в-ро} = D_{в.ср} + \epsilon_{в} + \epsilon_{в-ро}$  – расчет среднего диаметра между обмотками РО и ВН.

2.4.5.3 Ширина бака, м, рассчитанная по формуле (115):

$$B_{Б} = D_{ро.нар} + 2 \cdot \epsilon_{обм-Б} = 0,536 + 2 \cdot 0,365 = 1,26, \quad (115)$$

где  $\epsilon_{обм-Б} = 0,365$  – коэффициент среднего расстояния от наружной обмотки до стенки бака, м.

2.4.5.4 Длина бака, м, рассчитанная по формуле (116):

$$L_{Б} = 2 \cdot L_{мо} + D_{ро.нар} + 2 \cdot \epsilon_{обм-Б} = 2 \cdot 1,68 + 0,536 + 2 \cdot 0,365 = 4,63. \quad (116)$$



2.4.5.5 Периметр бака, м, рассчитанный по формуле (117):

$$P_B = 4 \cdot (L_{MO} + B_B) = 4 \cdot (1,68 + 1,26) = 11,79. \quad (117)$$

2.4.5.6 Средний радиус бака, м, рассчитанный по формуле (118):

$$R_B = \frac{(L_B + B_B - 2L_{MO})}{4} = \frac{1,63 + 1,26 - 2 \cdot 1,68}{4} = 0,63. \quad (118)$$

2.4.5.7 Приближенные добавочные потери в металлоконструкциях, Вт, рассчитанные по формуле (119):

$$P_{доб.конст} \approx \frac{U_{кз.р}^2 \cdot \Phi_{ст}^2 \cdot H_{обм}^3 \cdot 10^4}{P_B \left[ H_{обм} + 2 \cdot \left( R_B - \frac{D_{н-в}}{2} \right) \right]^2} \approx$$

$$\approx \frac{13,24^2 \cdot 0,85^2 \cdot 2,27^3 \cdot 10^4}{11,79 \left[ 2,27 + 2 \cdot \left( 0,63 - \frac{1,19}{2} \right) \right]^2} \approx 102564. \quad (119)$$

2.4.5.7.1 Поток одного стержня, Вб, рассчитанный по формуле (120):

$$\Phi_{СТ} = F_{СТ} \cdot B_{СТ} = 0,547 \cdot 1,57 = 0,85. \quad (120)$$

2.4.6 Суммарные потери короткого замыкания, Вт, рассчитанные по формуле (121):

$$P_{к.з.} = \Sigma P_{осн} + \Sigma P_{доб.обм.} + P_{доб.конст.} = P_{осн.НН} + P_{осн.ВН} + P_{в.радНН} +$$

$$+ P_{в.радВН} + P_{восНН} + P_{в.ос.ВН} + P_{ц.осНН} + P_{доб.конст.} = 195257 + 17504 +$$

$$+ 8745 + 17598 + 4554 + 1,41 + 653 + 149354 = 381069,$$

где результат этих потерь не должно превышать от заданных более чем на +5%.

2.5 Подсчет напряжения короткого замыкания

2.5.1 Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания  $U_{кз.р}$

берется из подсчитанной формулы (70).

2.5.2 Активный элемент напряжения короткого замыкания, %, рассчитанный по формуле (122):

$$U_{кз.а} = \frac{P_{кз}}{S_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{393669}{125 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,314. \quad (122)$$

2.5.3 Полное напряжение короткого замыкания, %, рассчитанное по формуле (123):

$$U_{кз} = \sqrt{U_{кз.р}^2 + U_{кз.а}^2} = \sqrt{0,314^2 + 13,24^2} = 13,24. \quad (123)$$

## 2.6 Расчет потерь и тока холостого хода

### 2.6.1 Расчет массы магнитопровода

На рисунке 4 показан пример активной стали магнитопровода.

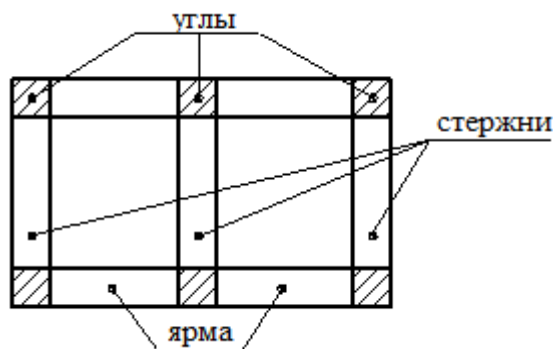


Рисунок 4- Подразделения активной стали магнитопровода на участки

2.6.1.1 Объем стержневой магнитопровода, рассчитанный по формуле (124):

$$V_{стерж} = 3 \cdot H_{окн} \cdot F_{СТ} = 3 \cdot 2,69 \cdot 0,547 = 4,42. \quad (124)$$

2.6.1.2 Масса стержневой магнитопровода, кг, рассчитанная по формуле (125):

$$G_{стерж} = \gamma_{СТ} \cdot V_{стерж} = 7,65 \cdot 10^3 \cdot 4,41 = 32459, \quad (125)$$

где  $\gamma_{СТ} = 7,65 \cdot 10^3$  – плотность электротехнической стали, кг/м.

2.6.1.3 Объем угла стержня магнитопровода, рассчитанный по формуле (126):

$$V_{угл} = 6 \cdot D_{СТ} \cdot F_{СТ} = 6 \cdot 0,87 \cdot 0,547 = 2,85. \quad (126)$$

2.6.1.4 Масса углов стержневой магнитопровода, кг, рассчитанная по формуле (127):

$$G_{угл} = \gamma_{СТ} \cdot V_{угл} = 7,65 \cdot 10^3 \cdot 2,85 = 20969. \quad (127)$$

2.6.1.5 Объем ярмовых балок магнитопровода, рассчитанный по формуле (128):

$$\begin{aligned}
V_{\text{ярм}} &= 4 \cdot (K_{\text{ус.яр.}} \cdot F_{\text{СТ}} \cdot L_{\text{мо}} - \frac{V_{\text{угл}}}{6}) = \\
&= 4 \cdot \left( 1,02 \cdot 0,547 \cdot 1,68 - \frac{2,85}{6} \right) = 1,85,
\end{aligned} \tag{128}$$

где  $K_{\text{ус.яр.}} = 1,02$  – параметр усиления ярма.

2.6.1.6 Масса ярмовых балок магнитопровода, кг, рассчитанная по формуле (129):

$$G_{\text{ярм}} = \gamma_{\text{СТ}} \cdot V_{\text{ярм}} = 7,65 \cdot 10^3 \cdot 1,85 = 13585. \tag{129}$$

2.6.1.7 Полная масса магнитопровода, кг, рассчитанная по формуле (130):

$$G_{\text{ст}} = G_{\text{стерж}} + G_{\text{угл}} + G_{\text{ярм}} = 32459 + 20969 + 13585 = 60554. \tag{130}$$

2.6.2 Потери холостого хода, Вт, рассчитанные по формуле (131):

$$\begin{aligned}
P_{\text{хх}} &= (P_{\text{стерж}} \cdot K_{\text{р.отв.стерж}} \cdot K_{\text{р.тех.стерж}} \cdot G_{\text{стерж}} + P_{\text{ярм}} \cdot \\
&\cdot K_{\text{р.отв.яр}} \cdot K_{\text{р.тех.яр}} \cdot G_{\text{ярм}} + P_{\text{угл}} \cdot K_{\text{р.отв.угл}} \cdot K_{\text{р.тех.угл}} \cdot \\
&\cdot K_{\text{р.угл}} \cdot G_{\text{угл}} + P_{\text{стык}} \cdot n_{\text{стык}} \cdot F_{\text{стык}}) \cdot K_{\text{р.прес}} \cdot K_{\text{р.ф.яр}} \cdot \\
&\cdot K_{\text{р.шхт.яр}} = (0,949 \cdot 32459 + 0,919 \cdot 13585 + 0,949 \cdot \\
&\cdot 20969 \cdot 1,55 + 430 \cdot 0,773 \cdot 8) \cdot 1,02 \cdot 1,05 = 82246,
\end{aligned} \tag{131}$$

где  $P_{\text{стерж}}$ ,  $P_{\text{ярм}}$ ,  $P_{\text{угл}}$  – удельные потери  $P_{\text{хх}}$ ,  $P_{\text{стык}}$  – данные удельных потерь в стыке магнитопровода, пропорциональной индукции  $B_{\text{стык}} = B_{\text{ст}} / \sqrt{2}$ ,  $F_{\text{стык}} = F_{\text{ст}} \cdot \sqrt{2}$  (при косом стыке),  $n_{\text{стык}} = 8$  где  $K_{\text{р.отв.стерж}}$ ,  $K_{\text{р.тех.стерж}}$ ,  $K_{\text{р.прес}}$ ,  $K_{\text{р.ф.яр}}$ ,  $K_{\text{р.шхт.яр}}$  – параметры повышения потерь на пропорциональных участках магнитопровода благодаря конструкции и технологии изготовления магнитопровода [7].

2.6.3 Намагничивающая мощность, употребляемая трансформатором при холостом ходе, рассчитанная по формуле (132):

$$\begin{aligned}
Q_{\text{хх}} &= (q_{\text{стерж}} \cdot K_{\text{q.отв.стерж}} \cdot K_{\text{q.тех.стерж}} \cdot G_{\text{стерж}} + \\
&+ q_{\text{ярм}} \cdot K_{\text{q.отв.яр}} \cdot K_{\text{q.тех.яр}} \cdot G_{\text{ярм}} + q_{\text{угл}} \cdot K_{\text{q.отв.угл}} \cdot \\
&\cdot K_{\text{q.тех.угл}} \cdot K_{\text{q.угл}} \cdot G_{\text{угл}} + q_{\text{стык}} \cdot n_{\text{стык}} \cdot F_{\text{стык}}) \cdot K_{\text{q.прес}} \cdot \\
&\cdot K_{\text{q.ф.яр}} \cdot K_{\text{q.шхт.яр}} = (1,26 \cdot 32459 + 1,196 \cdot 13585 + \\
&+ 1,26 \cdot 2,9 \cdot 20969 + 8 \cdot 0,77) \cdot 1,02 \cdot 1,05 = 143320,
\end{aligned} \tag{132}$$

где  $q_{\text{стерж}}$ ,  $q_{\text{ярем}}$ ,  $q_{\text{угл}}$  – параметры удельной намагничивающей мощности, пропорциональных индукций;  $q_{\text{стык}}$  – параметр удельной намагничивающей мощности в стыках магнитопровода;

$K_{q.\text{отв.яр}}$ ,  $K_{q.\text{тех.яр}}$ ,  $K_{q.\text{прес}}$ ,  $K_{q.\text{ф.яр}}$ ,  $K_{q.\text{шихт.яр}}$  – параметры, усиливающие мощность на определенных участках магнитопровода.

$$\begin{aligned} K_{p.\text{отв}} &= K_{q.\text{отв}} = 1, \\ K_{p.\text{техн}} &= K_{p.\text{рез}} \cdot K_{p.\text{валиц}} = 1, \\ K_{q.\text{техн}} &= K_{q.\text{рез}} \cdot K_{q.\text{валиц}} = 1. \end{aligned}$$

Эти параметры учитывают влияние технологических факторов резки, вальцовки на электромагнитные коэффициенты магнитопровода.

2.6.4 Коэффициент реактивной составляющей тока холостого хода, %, рассчитанный по формуле (133):

$$i_{xx.p} \% = \frac{Q_{xx}}{S_{ном}} \cdot 100\% = \frac{143320}{125 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,114. \quad (133)$$

2.6.5 Коэффициент активной составляющей холостого хода, %, рассчитанный по формуле (134):

$$i_{xx.a} \% = \frac{P_{xx}}{S_{ном}} \cdot 100\% = \frac{82247}{125 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,065. \quad (134)$$

2.6.6 Коэффициент полного тока холостого хода, %, рассчитанный по формуле (135):

$$i_{xx} \% = \sqrt{i_{xx.a}^2 + i_{xx.p}^2} = \sqrt{0,114^2 + 0,065^2} = 0,13. \quad (135)$$

### 3 Расчет системы охлаждения трансформатора

Для того, чтобы рассчитать систему охлаждения, нужно подсчитать превышении температуры трансформатора: верхних слоев и обмоток масла над температурой окружающей среды и подбора охлаждающей системы, должны не превышать стандартных коэффициентов:  $Q_{кат} = 65^{\circ}C$  и  $Q_{в.сл.м} = 60^{\circ}C$ .

Определения превышения температуры катушки над охлаждающим воздухом складывается из двух составляющих, рассчитываемых отдельно:

$$Q_{кат} = Q_{кат.мс} + Q_{мс.ср}, \quad (136)$$

где  $Q_{кат.мс}$  – коэффициент нагрева катушки над охлаждающим маслом;

$Q_{мс.ср}$  – коэффициент среднего нагрева температуры масла над охлаждающим воздухом.

3.1 Нагрев катушек над маслом НН и ВН,  $^{\circ}C$ , рассчитанный по формуле (137) и (138):

$$Q_{кат.НН} = Q_{кат.мс} + Q_{мс.ср} = 8 + 56 = 64, \quad (137)$$

$$Q_{кат.ВН} = Q_{кат.мс} + Q_{мс.ср} = 6 + 58 = 64. \quad (138)$$

3.1.1 Параметр закрывающий область катушек НН и ВН изоляционными прокладками, рассчитанный по формуле (139) и (140):

$$K_{закр.кат.НН} = \frac{\pi \cdot D_{обм.ср}}{\pi \cdot D_{обм.ср} - n_{прокл} \cdot b_{прокл}} = \frac{3,14 \cdot 1,03}{3,14 \cdot 1,03 - 32 \cdot 0,05} = 1,97, \quad (139)$$

$$K_{закр.кат.ВН} = \frac{\pi \cdot D_{обм.ср}}{\pi \cdot D_{обм.ср} - n_{прокл} \cdot b_{прокл}} = \frac{3,14 \cdot 1,38}{3,14 \cdot 1,38 - 32 \cdot 0,05} = 1,58, \quad (140)$$

где  $b_{прокл.НН} = 0,04м$ ,  $b_{прокл.ВН} = 0,05м$ ,  $n_{прокл.НН} = n_{прокл.ВН}$ ;

3.1.2 Удельная тепловая нагрузка теплоотдающей поверхности катушек НН и ВН, Вт/м<sup>2</sup>, рассчитанная по формуле (141) и (142):

$$q_{кат.НН} = \frac{\rho_{пр} \cdot j \cdot I_{обм} \cdot W_{кат} \cdot K_{закр.кат} \cdot (1 + K_{доб.кат})}{2 \cdot m_g \cdot (b_{кат} + h_{кат})} =$$

$$= \frac{2,13 \cdot 10^{-8} \cdot 1989473 \cdot 3968 \cdot 1,97 \cdot (1 + 0,155)}{2 \cdot (0,074 + 0,013)} = 2203, \quad (141)$$

$$q_{кат.ВН} = \frac{\rho_{np} \cdot j \cdot I_{обм} \cdot W_{кат} \cdot K_{закр.кат} \cdot (1 + K_{доб.кат})}{2 \cdot m_e \cdot (b_{кат} + h_{кат})} =$$

$$= \frac{2,13 \cdot 10^{-8} \cdot 1732653 \cdot 218 \cdot 7 \cdot (1 + 0,333)}{2 \cdot (110 + 0,012)} = 485, \quad (142)$$

где  $K_{доб.кат}$  – параметр определяет действие добавочных потерь.

3.1.3 Превышение температуры катушки над маслом,  $^{\circ}C$ , рассчитанное по формуле (143) и (144):

$$Q_{кат.мс.НН} = f_1 \cdot q_{кат}^{K_{кат}} + f_2 \cdot q_{кат} = 0,174 \cdot 2203 + 2,75 \cdot 0,8 = 8, \quad (143)$$

$$Q_{кат.мс.ВН} = f_1 \cdot q_{кат}^{K_{кат}} + f_2 \cdot q_{кат} = 1,37 \cdot 485 + 2,75 \cdot 0,8 = 6, \quad (144)$$

где  $f_1 = 0,147 \cdot [1 + (5 \cdot b_{кат} - 0,18)]$  – коэффициент, учитывающий внутренний предел температуры катушки;

$f_2 = 2,75 \cdot (t_e - 0,55 \cdot 10^{-3})$  – коэффициент, учитывающий перепад температуры в собственной изоляции катушки;

$K_{кат} = 0,7$  – стандартный коэффициент.

### 3.2 Расчет превышения температуры масла над воздухом

Для расчета нагрева масла над воздухом есть два способа: норма нагрева самого масла и норма нагрева обмоток [10].

3.2.1 Положение тепловых центров трансформатора, рассчитанное по формуле (145):

$$K_{тц} = 1,179 \cdot \alpha_{тц}^2 - 1,375 \cdot \alpha_{тц} + 1,473 =$$

$$= 1,179 \cdot 0,93^2 - 1,375 \cdot 0,93 + 1,473 = 1,21. \quad (145)$$

3.2.2 Тепловой центр высоты трансформатора, рассчитанный по формуле (146):

$$\alpha_{тц} = \frac{H_{цп}}{H_{цо}} = \frac{D_{СТ} + h_{Б-ня} + \frac{1}{2} \cdot H_{окн}}{H_{окн} + 2 \cdot D_{СТ} - \frac{1}{2} \cdot H_{мо}} = \frac{0,87 + 0,05 + 0,5 \cdot 2,69}{2,69 + 2 \cdot 0,87 - 0,5 \cdot 4} = 0,93, \quad (146)$$

где  $H_{мо} = 3000 \text{ мм}$  – межосевой промежуток по высоте межприсоединительными трубками охладителя;

$F_{охл} = 52 \text{ м}^2$  – поверхность, отводящая тепло одного охладителя.

3.2.3 Температура масла над воздухом исходя из нормы нагрева масла, °C  
рассчитанная по формуле (147):

$$Q_{\text{мс.ср}} = \frac{[Q_{\text{в.сл.м}}]}{1,2 \cdot K_{\text{ти}}} = \frac{60}{1,2 \cdot 1,21} = 41. \quad (147)$$

3.2.4 Высота бака, м, рассчитанная по формуле (148):

$$\begin{aligned} H_{\text{Б}} &= 2 \cdot D_{\text{СТ}} + H_{\text{окн}} + h_{\text{Б-ня}} + h_{\text{Б-вя}} = \\ &= 2 \cdot 0,87 + 2,69 + 0,1 + 0,05 = 4,5. \end{aligned} \quad (148)$$

3.2.5 Температура масла, над воздухом исходя из нормы нагрева обмоток  
НН и ВН, °C, рассчитанная по формуле (149) и (150):

$$Q_{\text{мс.ср.НН}} = [Q_{\text{обм}}] - Q_{(\text{кат.мс})\text{макс}} = 60 - 8 = 56, \quad (149)$$

$$Q_{\text{мс.ср.ВН}} = [Q_{\text{обм}}] - Q_{(\text{кат.мс})\text{макс}} = 60 - 6 = 58, \quad (150)$$

где  $Q_{(\text{кат.мс})\text{макс}}$  – температура обмотки над маслом более нагретой.

3.3. Подсчет числа охладителей для системы охлаждения типа ДЦ:

Задача охлаждения, это отвести от трансформатора тепло, которое равно потерям в трансформаторе.

3.3.1 Полные потери трансформатора, Вт, рассчитанные по формуле (151):

$$P_{\text{расч}} = 1,1 P_{\text{хх}} + P_{\text{к.з}} \approx 1,1 \cdot (2247 + 393669) \approx 523509. \quad (151)$$

Поверхность, отдающая тепло в трансформаторе вычисляется суммарностью труб всех охладителей, крышки бака и стенок бака. Само дно бака слабо отводит тепло.

3.3.2 Тепловая нагрузка, действующая на поверхность бака, Вт/м<sup>2</sup>,  
рассчитанная по формуле (152):

$$q_{\text{Б}} = \left( \frac{Q_{\text{мс.ср}}}{0,262} \right)^{1,25} = \left( \frac{59}{0,262} \right)^{1,25} = 878. \quad (152)$$

3.3.3 Тепло, отводимое с помощью поверхности бака, Вт, рассчитанное по формуле (153):

$$\begin{aligned}
 Q_B &= q_B \cdot \left[ H_B \cdot \Pi_B + \left( 2 \cdot L_{mo} \cdot B_B + \frac{\pi \cdot B_B^2}{4} \right) \cdot 0,75 \right] = \\
 &= 878 \cdot \left[ 4,58 \cdot 11,79 + \left( 2 \cdot 1,68 \cdot 1,26 + \frac{3,14 \cdot 1,26^2}{4} \cdot 0,75 \right) \right] = 51127.
 \end{aligned}
 \tag{153}$$

3.3.4 Тепло отводимое с помощью охладителей, Вт, рассчитанное по формуле (154):

$$Q_{охл} = P_{расч} - Q_B = 523509 - 51127 = 420912.
 \tag{154}$$

3.3.5 Параметр тепловой нагрузки охладителя, рассчитанный по формуле (155):

$$q_{охл} = \left( \frac{Q_{мс.ср}}{K_{охл}} \right)^{1,25} = \left( \frac{59}{0,22} \right) = 1092,
 \tag{155}$$

где  $K_{охл} = 0,22$  – для системы охлаждения ДЦ.

3.3.6 Количество охладителей, рассчитанное по формуле (156):

$$n_{охл} = \left[ \frac{Q_{охл}}{F_{охл} \cdot q_{охл}} \right]_{ц,б} = \left[ \frac{420912}{1092 \cdot 64} \right] = 14.
 \tag{156}$$



## 4 Расчет динамической стойкости трансформатора при коротком замыкании

4.1 Размах кратности тока короткого замыкания по расположению к номинальному, рассчитанный по формуле (157):

$$K_{к.з} = \frac{I_{к.з.уд}}{I_{ном}} = \sqrt{2} \cdot K_{уд} \cdot K_{кз.уст} = \sqrt{2} \cdot 1,92 \cdot 7,54 = 7,5, \quad (157)$$

где  $K_{кз.уст} = 100 / U_{к.з.}$  – коэффициент кратности определившегося тока короткого замыкания;

$$K_{уд} = \left( 1 + \exp \left[ - \frac{\pi \cdot U_{кз.а}}{U_{кз.р}} \right] \right) = 2,1 \quad \text{– коэффициент ударный увеличивающий ток}$$

короткого замыкания из-за присутствия апериодической составляющей.

4.2 Ударный ток короткого замыкания, пролегающий через все витки в катушки обмоток НН и ВН, А, рассчитанный по формуле (158) и (159):

$$I_{к.з.уд.НН} = I_{ном} \cdot K_{к.з} = 3968 \cdot 20,5 = 82032, \quad (158)$$

$$I_{к.з.уд.ВН} = I_{ном} \cdot K_{к.з} = 218 \cdot 20,5 = 4520. \quad (159)$$

### 4.3 Подсчет механических напряжений в обмотках от радиальных сил

Радиальные силы в обмотки появляются при взаимодействии проходящего через проводник тока короткого замыкания с осевым полем рассеяния, в котором присутствует проводник.

Из за некоторых концентрически расположенных обмоток наружная всегда испытывает растяжение, а внутренняя – сжатию из за радиальных сил. Радиальные силы подсчитываются для обмоток НН и ВН.

4.3.1 Средний радиус обмоток НН и ВН, м, рассчитанный по формуле (160) и (161):

$$R_{ср.НН} = \frac{1}{2} \cdot D_{ср.обм} = 0,5 \cdot 1,03 = 0,52, \quad (160)$$

$$R_{ср.ВН} = \frac{1}{2} \cdot D_{ср.обм} = 0,5 \cdot 1,38 = 0,69. \quad (161)$$

4.3.2 Средняя величина индукции осевого поля рассеяния при коротком замыкании, которая действует по масштабу катушки НН и ВН, Тл, рассчитанная по формуле (162) и (163):

$$B_{ос.ср.кз.НН} = K_{уд} \cdot K_{кз.уст} \cdot \frac{B_{ос}}{2} = 7,54 \cdot 1,92 \cdot \frac{0,1619}{2} = 1,185, \quad (162)$$

$$B_{ос.ср.кз.ВН} = K_{уд} \cdot K_{кз.уст} \cdot \frac{B_{ос}}{2} = 7,54 \cdot 1,92 \cdot \frac{0,162}{2} = 1,184. \quad (163)$$

4.3.3 Напряжение увеличения или понижения в проводнике катушки НН и ВН, Н/м<sup>2</sup>, рассчитанное по формуле (164) и (165):

$$G_{рад.НН} = \frac{B_{ос.ср.кз} \cdot I_{кз.уд} \cdot R_{ср}}{F_{обм}} = \frac{1,178 \cdot 81676 \cdot 0,51}{0,00199} = 25149269, \quad (164)$$

$$G_{рад.ВН} = \frac{B_{ос.ср.кз} \cdot I_{кз.уд} \cdot R_{ср}}{F_{обм}} = \frac{1,178 \cdot 4501 \cdot 0,69}{0,00012} = 29417278. \quad (165)$$

#### 4.4 Подсчет механических напряжений в обмотках от продольных сил

Осевые силы в проводниках обмотки появляются при взаимном действии проходящего через проводник тока короткого замыкания с радиальным полем рассеяния, в котором находится проводник.

4.4.1 Длина рассчитанного пролета НН и ВН, м, рассчитанная по формуле (166) и (167):

$$l_{о.НН} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{ср}}{n_{прокл}} - b_{прокл} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,516}{32} - 0,05 = 0,051, \quad (166)$$

$$l_{о.ВН} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{ср}}{n_{прокл}} - b_{прокл} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,693}{32} - 0,05 = 0,086. \quad (167)$$

4.4.2 Средняя алгебраическая величина индукции радиального поля рассеяния при коротком замыкании, влияющего по высоте обмотки, Тл, рассчитанная по формуле (168):

$$B_{рад.ср.кз} = K_{уд} \cdot K_{кз.уст} \cdot 0,17 \cdot B_{ос} = 7,54 \cdot 1,92 \cdot 0,17 \cdot 0,162 = 0,40. \quad (168)$$

4.4.3 Напряжение изгиба в каждом проводнике катушки НН и ВН, Н/м<sup>2</sup>, рассчитанное по формуле (168) и (169)

$$G_{oc.HH} = \frac{B_{рад.ср.кз} \cdot I_{кз.уд} \cdot l_o^2}{2 \cdot n_{нар} \cdot b_{np} \cdot h_{np}^2} = \frac{0,4 \cdot 81676 \cdot 0,051^2}{2 \cdot 54 \cdot 0,003 \cdot 0,0125} = 1705630, \quad (169)$$

$$G_{oc.BH} = \frac{B_{рад.ср.кз} \cdot I_{кз.уд} \cdot l_o^2}{2 \cdot n_{нар} \cdot b_{np} \cdot h_{np}^2} = \frac{0,4 \cdot 84501 \cdot 0,086^2}{2 \cdot 2 \cdot 0,0035 \cdot 0,01136} = 7408188. \quad (170)$$

#### 4.5 Проверка механической прочности обмоток НН и ВН

4.5.1 Напряжение в проводнике от радиальных и осевых сил не должны преобладать допустимого напряжения, Н/м<sup>2</sup>, рассчитанные по формуле (171) и (172):

$$G = G_{рад} + G_{oc} \leq [G]$$

$$G_{HH} = 1705630 + 24931541 = 26637172, \quad (171)$$

$$G_{BH} = 7408188 + 29162601 = 36570789. \quad (172)$$

где суммарное напряжение для медного провода не должно превышать заданного параметра  $[G] = 1,18 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>.

Так же обмотка, которая была сжата, важно проверить на устойчивость. Сжатие происходит на обмотки НН.

4.5.2 Момент инерции, рассчитанный по формуле (173):

$$I_{np} = \frac{h_{np} \cdot b_{np}^3}{12} = \frac{0,0125 \cdot 0,003^3}{12} = 2,8 \cdot 10^{-11}. \quad (173)$$

4.5.3 Параметр стабильности округлой арки, подчиняющийся от раствора концов арки, выявляемого среднем углом и характером потери устойчивости арки, рассчитанный по формуле (174):

$$K_y = \left( \frac{n_{прок}}{2} \right)^2 - 1 = 16^2 - 1 = 255. \quad (174)$$

4.5.4 Критическая радиальная нагрузка для округлой балки, влияющей на единую длину балки, рассчитанная по формуле (175):

$$P_{\kappa} = K_y \frac{E_{np} \cdot I_{np}}{R_{cp}^3} = 255 \cdot \frac{1,15 \cdot 10^{11} \cdot 2,8 \cdot 10^{-11}}{0,51} = 5986, \quad (175)$$

где  $E_{np}$  – параметр эластичности проводника.

4.5.5 Критическое напряжение в проводнике НН и ВН, определенной критической радиальной нагрузке из рассчитанной формулы (175),  $\text{Н/м}^2$ , рассчитанное по формуле (176) и (177):

$$G_{\kappa.НН} = \frac{K_y \cdot E_{np} \cdot b_{np}^2}{12 \cdot R_{cp}^2} = \frac{255 \cdot 1,15 \cdot 10^{11} \cdot 0,003}{12 \cdot 0,51} = 82453185, \quad (176)$$

$$G_{\kappa.ВН} = \frac{K_y \cdot E_{np} \cdot b_{np}^2}{12 \cdot R_{cp}^2} = \frac{255 \cdot 1,15 \cdot 10^{11} \cdot 0,00564}{12 \cdot 0,69} = 161556229. \quad (177)$$

## 5 Подбор вспомогательного оборудования силового масляного трансформатора

### 5.1 Подбор расширителя

Благодаря расширителю (металлическому цилиндру), масло в трансформаторе защищается, т.е. ему не грозит увлажнение и окисление, так как масло в расширителе меньше, чем в баке трансформатора. Сам расширитель отводит излишки масла [11].

Объем расширителя, если брать отклонения температуры окружающего воздуха от  $-45^{\circ}$  до  $+40^{\circ}$  С выходит около 10% объема масла в трансформаторе.

5.1.1 Внутренний объем бака,  $\text{м}^3$ , рассчитанный по формуле (178):

$$V_B = B_B \cdot L_B \cdot H_B = 1,26 \cdot 4,63 \cdot 4,58 = 27. \quad (178)$$

5.1.2 Суммарная масса проводов обмоток ВН, НН и РО, кг, рассчитанная по формуле (179):

$$G_{np} = G_{cu.vh} + G_{cu.nn} + G_{cu.ro} = 8562 + 5120 + 1434 = 15166. \quad (179)$$

5.1.3 Параметр объема, активной составляющей,  $\text{м}^3$ , рассчитанный по формуле (180):

$$V_{a.ч.} = \frac{1,2 \cdot (G_{np} + G_{cm})}{\gamma_{a.ч.}} = \frac{1,2 \cdot (5166 + 60554)}{5500} = 16,5, \quad (180)$$

где  $\gamma_{a.ч.} = 5500 \div 6000 \text{ кг} / \text{м}^3$  – стандартный коэффициент средней плотности активной части трансформатора.

5.1.4 Общая масса масла, кг, рассчитанная по формуле (181):

$$\begin{aligned} G_{\text{масла}} &= 1,05 \cdot [1,9 \cdot (V_B - V_{a.ч.}) \cdot 10^3 + G_{\text{м.эл}}] \\ &= 1,05 \cdot [1,9 \cdot (27 - 16,5) \cdot 10^3 + 1244] = 34400. \end{aligned} \quad (181)$$

Стандарт объемов расширителей ГОСТ 8032-56. Диаметр расширителя определяется с помощью выбранных объемов. Позиция длины расширителей к их диаметру состоит в рубееже от 1,5 до 4 [12].

Сам расширитель оснащается индикатором уровня масла и на нём изображаются три проверочные черты, зависящие уровню масла в выключенном трансформаторе при температурах воздуха  $-45$ ,  $+15$  и  $+40^{\circ}\text{C}$  [13].

## 6 Описание конструкции трансформатора

С каждым годом улучшается конструкция трансформаторов и закладываются новые технические решения. Магнитная часть трансформатора стержневая сделанная из высококачественной стали марки Э3409. Применение электротехнической стали с меньшими удельными потерями и полного косоугольного стыка в магнитопроводе, а также усовершенствование главной изоляции изменило к значительному снижению потерь холостого хода. Прессовка стержней производится специальными бандажами, сделанные из стеклоленты, а верхнее и нижнее ярмо, охватывают стальные полу-бандажи [15].

Размещение обмоток трансформаторов концентрическое. Обмотки сделаны из медного провода марок ПБПУ, ПТБУ. Применение транспонированного провода с эпоксидным покрытием элементарных проводников увеличивает электродинамическую стойкость обмоток при коротком замыкании и уменьшение потерь короткого замыкания. К переключателю подведены ответвления регулировочной обмотки. Для переключения ответвлений под нагрузкой в трансформатор встраивается переключающее устройство производства «Гольяттинский Трансформатор», Россия. Трансформатор и данное переключающее устройство вида РПН между собой объединены в одну активную часть, расположенную в общий бак с маслом марки ГК [14].

Данная конструкция трансформатора ТРДЦН – 125000/330, принадлежит к разработке нового поколения. Вместо огромных ярмовых балок, которые применяются для прессовки ярм и стальных прессующих колец используется простая конструкция ярмовых балок, которые используются только для фиксации обмоток. Сборка блока всех обмоток выполняется нижним и верхним одинаковым кольцом из многослойного деревянного пластика, так же часто используется малоусадочный электротехнический картон, регулирование обмоток при их сушке и прессовке. Вводы НН, вводы нейтрале ВН – маслоподпорные; вводы 330 кВ с твердой изоляцией фирмы HSP. Бак

трансформатора выполняется с нижним разъемом. Система охлаждения трансформаторов «ДЦ» – принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла, осуществляется через охладители, обдуваемые вентиляторами. Трансформаторы обеспечены арматурой, защитными устройствами, термосифонным фильтром, приборами контроля уровня и температуры масла. Устройства контроля системы охлаждения и приспособления для заземления в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52719 – 2007 [16].



## Заключение

В результате проектирования трансформатора получены следующие данные:

- номинальная мощность  $S_{ном} = 125 \cdot 10^6$  кВт;
- номинальное напряжение центра НН  $U_{НН\_ном} = 10500$  В;
- номинальное напряжение центра ВН  $U_{ВН\_ном} = 330000$  В;
- номинальный ток центра НН  $I_{НН\_ном} = 3968$  А;
- номинальный ток центра ВН  $I_{ВН\_ном} = 218$  А;
- напряжения короткого замыкания  $U_{кз} = 13,24\%$ ;
- потери холостого хода  $P_{хх} = 82247$  Вт;
- ток холостого хода  $i_{хх} = 0.13\%$ ;
- потери короткого замыкания  $P_{к.з.} = 381069$  Вт;
- стоимость трансформатора  $C_{тр} = 187545$  руб;
- затраты приведенные  $Z_{прив} = 92286$  руб/год.

В результате использования электротехнической стали, марки Э3409, потери холостого хода будут определено выше, чем в стали под маркой 30ZH95, где  $P_{хх} = 66620$  Вт. Исходя из этих результатов, видно, что используя сталь марки 0ZH95, потери холостого хода будут примерно на 19% меньше.

Цель данной работы достигнута.

## Список используемых источников

1. Дымков, А.М. Расчет и конструирование трансформаторов / А.М. Дымков. – Москва: Изд-во Высшая школа, 2013. – 264 с.
2. Игнатович, В.М. Электрические машины и трансформаторы / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. – Т., 2016. – 182 с.
3. Быстрицкий, Г.Ф. Электроснабжение. Силовые трансформаторы / Г.Ф. Быстрицкий, Б.И.Кудрин. – М., 2016. – 261 с.
4. Дрозд, В. Трансформаторы. Книга 2. Трансформаторы силовые. Технические характеристики и область применения / В. Дроздов. – Москва: Изд-во Альвис, 2015. – 704 с.
5. Бики, М.А. Проектирование силовых трансформаторов. Расчеты основных параметров / М.А. Бики. – Москва: Изд-во Знак, 2013. – 612 с.
6. Привалов, Е.Е. Диагностика оборудования силовых масляных трансформаторов / Е.Е. Привалов. – Москва: Изд-во Директ-Медиа, 2015. – 82 с.
7. Кацман, М.М. Электрические машины / М.М. Кацман. – Москва: Изд-во Высшая школа, 2013. – 463 с.
8. Вольдек, А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб., 2012. – 320 с.
9. Балдин, М.Н., Карапетян И.Г. Основное оборудование электрических сетей / М.Н. Балдин, И.Г. Каоапетян. – М., 2014. – 208 с.
10. Гончарук, А.И. Охлаждающие устройства масляных трансформаторов / А.И. Гончарук, – Москва: Энергия, 2012. – 152 с.
11. Киш, Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / Л. Киш, – Москва: Изд-во Энергия, 2013. – 179 с.
12. Котеленец, Н.Ф., Акимова Н.А., Антонов М.В. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин / Н.Ф. Котеленец, Н.А. Акимова, М.В. Антонов. – М., 2015. – 384 с.

13. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов / П.М. Тихомиров. – Москва: Изд-во: Леланд, 2014. – 544 с.
14. Лейтес, Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л.В. Лейтес. – Москва: Изд-во Энергия, 2014. – 392 с.
15. Дрозд, В.В. Трансформаторы. Книга 1. Часть 1. Трансформаторы измерительные. Технические характеристики и область применения / В.В. Дрозд. – М. "Альвис", 2014. – 672 с.
16. Бики, М.А. Проектирование силовых трансформаторов. Расчеты основных параметров / М.А. Бики. – М. "Знак", 2013. – 612 с.
17. Привалов, Е.Е. Диагностика оборудования силовых масляных трансформаторов: учеб. пособие / Е.Е. Привалов. – М. "Директ-Медиа", 2015. – 82 с.
18. Минскер, Е.Г. Сборка масляных трансформаторов / Е.Г. Минскер, В.Ш. Аншин. – М. "Высшая школа", 2012. – 255 с.
19. Серебряков, А.С. Трансформаторы: учеб. пособие / А.С. Серебряков. – М. Издательский дом МЭИ, 2014. – 360 с.
20. Тарле, Г.Е. Ремонт и модернизация систем охлаждения силовых масляных трансформаторов / Г.Е. Тарле. – М.: "Энергия", 2014. – 192 с.
21. Mohns, E. An AC Power Standard for Loss Measurement Systems for Testing Power Transformers / E. Mohns, P. Rather, H. Badura // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2017. – №99. С. 1 - 8.
22. Moisiadis, Y. A methodology for integrated transformer compact modeling / Y. Moisiadis, K. Nikelis, P. Papadopoulos // MOCAST. – 2017. – №99. С. 1 - 12.
23. Lopez, Z. Modeling of Transformer Windings for Fast Transient Studies: Experimental Validation and Performance Comparison / Z. L. Lopez, P. Gomez, P. Fermin // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2016. – №32. С. 1852 - 1860.
24. Bagheri, M. Frequency response analysis and short-circuit impedance measurement in detection of winding deformation within power transformers /

- M. Bagheri, M.S. Naderi, T. Blackburn, T. Phung // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2013. – №3. C. 355 - 386
25. Nerys, J.W. Additional Loss in the Core of Three Phase Transformers Feeding Non Linear Loads // J.W. Nerys, L.R. Lisita, A.M. Oliveira // IEEE Latin America Transactions. – 2014. – №1. C. 1 - 19.