

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))

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Проектирование силового масляного трансформатора собственных
нужд ОМН-2500/220»

Студент(ка)

П.В. Ерхов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

М.Н. Третьякова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

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

«____» _____ 2016 г.

Тольятти 2016

Аннотация

Данная выпускная квалификационная работа посвящена разработке однофазного силового масляного трансформатора ОМН-2500/220.

Работа состоит из семи основных разделов, в рамках которых выполняется обоснование и выбор основных размеров активной части трансформатора, проводятся электромагнитный, тепловой и электродинамический расчеты, а также определяется защитное заземление бака трансформатора.

В целом бакалаврская работа представлена пояснительной запиской на 51 листе и графической частью в объеме 6 чертежей формата А1.

Список литературы состоит из 20 источников, 5 из которых на английском языке.

Содержание

Введение	4
1 Анализ условий разработки однофазного высоковольтного трансформатора	6
2 Техничко-экономический расчёт оптимального варианта однофазного трансформатора	9
3 Оценка технической возможности выполнения оптимального варианта конструкции и предварительный выбор основных размеров трансформатора	15
4 Электромагнитный расчёт	
4.1 Расчет активного сечения стержня	18
4.2 Расчет напряжения одного витка, количества витков, напряжений и токов на всех ответвлениях обмотки РО	19
4.3 Выбор типа и расчет параметром обмоток	21
4.4 Расчет потерь короткого замыкания и напряжения короткого замыкания	29
5 Тепловой расчёт трансформатора	38
6 Расчет электродинамической стойкости	43
7 Расчет заземления бака трансформатора	46
Заключение	49
Список используемых источников	50

Введение

Транспортировку электроэнергии на большие расстояния целесообразно производить при высоком напряжении для уменьшения электрических потерь в сетях. В настоящее время используется напряжение порядка 220кВ, 330кВ и более. В тоже время потребитель использует энергию на пониженном напряжении, чаще всего не выше 0,4кВ. Поэтому процесс транспортировки электроэнергии до потребителя требует ее многократного преобразования. С этой целью применяются силовые трансформаторы. Количество их в сетях весьма велико [1–7, 11].

Трансформаторы размещаются на подстанциях. Для организации работы подстанции имеется система электроснабжения собственных нужд. Она используется, например, для питания компрессоров систем охлаждения, системы аварийного освещения и пожаротушения, дополнительных систем подогрева приводов и других агрегатов, а также для функционирования телемеханики и средств связи.

Эта система электроснабжения для обеспечения собственных нужд рассчитана на потребителей напряжением не более 10,5кВ. Обычно для получения напряжения класса 10,5кВ, например, с уровня 220кВ требуется как минимум 2-кратное преобразование электроэнергии:

- первая ступень: 220кВ на 110кВ;
- вторая ступень: 110 на 10,5кВ.

Для двухкратного преобразования электроэнергии нужно установить два весьма габаритных трёхфазных трансформатора. Стоимость каждого из них измеряется миллионами рублей. Если вместо двукратного преобразования энергии использовать однократное, то это позволит снизить затраты на собственные нужды понижающей подстанции. Поэтому производство силового трансформатора, преобразующего напряжения с 220кВ на 10,5кВ является весьма актуальным техническим решением [3].

Однако трёхфазный трансформатор с большим коэффициентом трансформации высокого класса напряжения и небольшой мощности трудно сконструировать, т.к. он при малых габаритах бака будет иметь очень большие вводы ВН в соответствие с их классом напряжения. Такие вводы невозможно разместить на крышке бака при ограниченных ее размерах. Установить их было бы можно, если многократно увеличить размеры бака, что не целесообразно. Так как это приведет к повышенному расходу масла, конструкционной стали, потерям и стоимости такого трансформатора в целом. Более рациональным решением было бы использование трех однофазных высоковольтных трансформаторов небольшой мощности вместо одного трехфазного. Это позволит осуществить изготовление трансформатора с большим коэффициентом трансформации и снизить уровень затрат для обеспечения собственных нужд понижающей подстанции в ходе эксплуатации.

Таким образом, целью данной бакалаврской работы является снижение затрат на обеспечение собственных нужд понижающей подстанции 220 на 10,5 кВ за счет разработки силового однофазного трансформатора.

1 Анализ условий разработки однофазного высоковольтного трансформатора

Производство трансформаторов и последующие их обслуживание требует весомых материальных и физических затрат [7]. Ввиду этого при проектировании должен быть выбран такой вариант конструкции, реализация которого позволит обеспечить надежную работу этого электромеханического преобразователя в течение всего периода эксплуатации, а капитальные и эксплуатационные затраты будут минимальными. Выбор оптимального варианта конструкции трансформатора требует проведения специального технико-экономического расчета.

Как известно проектирование и производство таких электромеханических преобразователей, каким является силовой масляный трансформатор, является многофакторной задачей. Поэтому при разработке новой модели возможна ситуация, когда самый выгодный на первый взгляд вариант конструкции может оказаться не самым надёжным, и даже непригодным к производству. Поэтому выбранный по минимуму приведенных затрат вариант основных размеров трансформатора должен быть проанализирован с точки зрения возможности производства.

При проектировании новой модели трансформатора следует обратить внимание также тот факт, что рыночная стоимость электротехнической стали, используемой при изготовлении стержней и ярм магнитной системы, гораздо дешевле, чем медь или алюминий, применяемых для производства обмоток трансформатора. К примеру, на данный момент времени один килограмм меди дороже стали примерно в пять раз. Поэтому есть вероятность того, что более рациональным конструкционным решением является такое, которое основано на уменьшении массы обмоточной меди при одновременном увеличении количества стали, используемой при изготовлении магнитопровода. Именно поэтому основным варьируемым критерием при проектировании трансформатора является диаметр стержня магнитопровода. Изменяя диаметр

стержня, можно так же, к примеру, значительно влиять на величину напряжения короткого замыкания, и, следовательно, на уровень электрических потерь в обмотках.

Совместно с изменением параметров стержня меняются внешние габариты бака трансформатора, которые отвечают за его механическую прочность. Так, если увеличить диаметр стержня трансформатора, то высота бака уменьшится. Он станет ниже и шире. Это повысит его механическую прочность и устойчивость к внешним воздействиям, таким как вибрации или ветровая нагрузка, при установке на месте эксплуатации.

Ещё одним немаловажным фактором, на который следует обратить внимание при проектировании силового масляного трансформатора, являются изоляционные промежутки, являющиеся элементом как внешней (между вводами и баком, между вводами различных фаз), так и внутренней изоляции (между активными частями) [9, 14]. Стандартизованные изоляционные промежутки между вводами различных фаз трансформатора класса напряжения 220кВ составляют 1600-1800мм[8-10]. При обеспечении этих расстояний в случае проектирования трёхфазного трансформатора значительно увеличиваются размеры бака, а вместе с этим и количество минерального масла, используемого для изоляции и охлаждения его активной части. В однофазной конструкции не требуется выполнение междуфазной изоляции, что является ещё одним преимуществом по сравнению с трехфазной моделью трансформатора для данного класса напряжения. Однако даже в этом случае требуется детальная проработка компоновки активной части в баке трансформатора.

Все изложенные выше условия могут быть учтены и проверены в ходе выполнения электромагнитного, теплового и электродинамического расчетов.

Как было отмечено ранее, данный трансформатор предполагается разместить на понижающей подстанции. Для обеспечения его безопасной эксплуатации он должен быть надежно заземлен, что требует специального расчета.

Таким образом, для достижения поставленной в предыдущем разделе цели необходимо выполнить следующие расчеты, которые являются основными задачами данной выпускной квалификационной работы:

- Технико-экономический расчёт оптимального варианта однофазного трансформатора;
- Оценка технической возможности выполнения оптимального варианта конструкции и предварительный выбор основных размеров трансформатора;
- Электромагнитный расчёт;
- Тепловой расчёт;
- Расчёт электродинамической стойкости;
- Расчёт заземления бака трансформатора.

2 Технико-экономический расчет оптимального варианта однофазного трансформатора

Одним и тем же номинальным данным чаще всего соответствуют несколько вариантов конструктивного исполнения трансформатора. Они могут различаться вложениями материалов в активную часть и отличаться друг от друга уровнем потерь в трансформаторе. Технико-экономический расчет позволяет выбрать такую конструкцию, которая будет соответствовать минимальным капитальным вложением на изготовление этого электромеханического преобразователя и наименьшим затратам на его обслуживание.

Данный расчет будем проводить по методике, изложенной в литературе [8, 12].

Основной задачей данного раздела является расчет оптимального коэффициента β который определит соотношение главных размеров нашего трансформатора. Следует выбирать такую величину $\beta_{\text{опт}}$, которая соответствует минимуму приведённых затрат $Z_{\text{прив}}$. Указанный расчет проводится для значений β в диапазоне от 0,6 до 4.

Технико-экономический расчет начнем с предварительного определения ширины катушки низшего напряжения (НН)

$$\begin{aligned} b_n &\cong \kappa_{B1} \cdot \kappa_{B2} \cdot (S_{\text{ном}} \cdot 10^{-6})^{\alpha_B} = \\ &= 0,12 \cdot 0,4 \cdot (2500000 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,0577 = 0,051 \text{ м} \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $\alpha_B = 0,0577$, $\kappa_{B1} = 0,12$ – для медных обмоток, $\kappa_{B2} = 0,4$ – эмпирические коэффициенты.

Затем определим ширину катушки высшего напряжения ВН

$$\begin{aligned} \vartheta_{\epsilon} &\cong \kappa_{B1} \cdot (S_{ном} \cdot 10^{-6})^{\alpha_B} - \vartheta_H = \\ &= 0,12 \cdot (2500000 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,0577 = 0,076 \text{ м} \end{aligned} \quad (2.2)$$

При этом ширина канала рассеяния равна

$$\vartheta_{K_{H-B}} = \frac{\vartheta_H + \vartheta_{\epsilon}}{3} + \vartheta_{H-\epsilon} = \frac{0,051 + 0,076}{3} + 0,08 = 0,122 \text{ м}, \quad (2.3)$$

где $\vartheta_{H-\epsilon}$ – расстояние между обмотками ВН и НН(см. таблицу 2.1).

Таблица 2.1 – Изоляционные промежутки для основных классов напряжения

ПАРАМЕТР	КЛАСС НАПРЯЖЕНИЯ ОБМОТОК		
	110	150	220
$\vartheta_{H-\epsilon}, \text{ м}$	0,05	0,06	0,08
$\vartheta_{\epsilon-p}, \text{ м}$	0,05	0,06	0,08
$\vartheta_{M-\phi}, \text{ м}$	0,04	0,05	0,07
$h_{обм-\epsilon.я}, \text{ м}$	0,09	0,11	0,15
$h_{обм-Н.я}, \text{ м}$	0,08	0,1	0,12

Одним из основных параметров, рассчитываемых в этом разделе, является диаметр стержня $D_{СТ}$ [13].

Диаметр стержня магнитопровода рассчитываем по формуле:

$$\begin{aligned} D_{СТ} &= 0,0682 \cdot \sqrt[4]{\frac{S_{ном} \cdot \beta \cdot \vartheta_{K_{H-B}} \cdot K_{oc}}{f \cdot B_{СТ}^2 \cdot K_{3АП.КР}^2 \cdot U_{кз}}} = \\ &= 0,0682 \cdot \sqrt[4]{\frac{2500000 \cdot 1,2 \cdot 0,122 \cdot 0,95}{50 \cdot 1,6^2 \cdot 0,885^2 \cdot 10,5}} = 0,28 \text{ м}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

где $K_{\text{зап.кр}} = 0,885$ – коэффициент заполнения стержня листами активной стали;

$K_{\text{ос}} = 0,95$ – коэффициент, определяющий величину осевого поля рассеяния;

$B_{\text{ст}} = 1,6$ Тл – рекомендуемая величина индукции в стержне.

Предварительный расчет изоляционного канала между обмотками:

$$\begin{aligned} D_{\text{н-в}} &= (1 + 2 \cdot K_{\text{ст-о}}) \cdot D_{\text{ст}} + 2 \cdot (\delta_{\text{о-н}} + \delta_{\text{н}}) + \delta_{\text{н-в}} = \\ &= (1 + 2 \cdot 0,015) \cdot 0,28 + 2 \cdot (0,018 + 0,051) + 0,08 = 0,506 \text{ м} \end{aligned} \quad (2.5)$$

где $K_{\text{ст-о}} = 0,015$ – коэффициент определения величины прессующих бандажей;

$\delta_{\text{о-н}} = 0,018$ – размер изоляционного промежутка между стержнем и обмоткой.

Так же необходимо определить расстояние между центрами ярм и центром стержня

$$\begin{aligned} L_{\text{МО}} &= D_{\text{н-в}} + B_{\text{н-в}} + 2 \cdot (B_{\text{в}} + B_{\text{в-р}} + B_{\text{р}}) + B_{\text{м-ф}} = \\ &= 0,506 + 0,08 + 2 \cdot (0,076 + 0,08 + 0,0255) + 0,07 = 0,985 \text{ м} \end{aligned} \quad (2.6)$$

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

$B_{\text{м-ф}}$ и $B_{\text{в-р}}$ – изоляционные каналы по таблице 2.1.

Высоту окна магнитопровода рассчитываем по следующей формуле:

$$\begin{aligned} H_{\text{окн}} &= H_{\text{обм}} + h_{\text{ЕК}} + h_{\text{обм-в.я}} + h_{\text{обм-н.я}} + h_{\text{прес}} = 2,345 + 0,03 + 0,15 + \\ &+ 0,12 + 0,07 = 2,724 \text{ м}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

где $h_{\text{ЕК}} = 0,03$ м – высота емкостного кольца;

$h_{\text{обм-в.я}}, h_{\text{обм-н.я}}$ – изоляционное расстояние между обмоткой и нижним или верхним ярмом по таблице 2.1;

$h_{\text{прес}} = 0,07$ м – высота прессующих устройств;

$H_{обм} = 2,345$ м – взято из предварительного расчета в программе автоматизированного проектирования «SAPR-TON».

Далее необходимо просчитать ориентировочную массу электротехнической стали, затраченной на изготовление магнитопровода

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

$$= (3 \cdot 2,724 + 2 \cdot 0,28 + 4 \cdot 1,02 \cdot 1,018) \cdot 7,65 \cdot 10^3 \cdot 0,885 \cdot 3,14 \cdot 0,28^2 / 4 = 3490 \text{ кг}, \quad (2.8)$$

где $K_{ус.яр} = 1,02$;

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

Активные (полные) потери холостого хода в стали магнитопровода предварительно составляют:

$$P_{XX} = p_{XX} \cdot K_{ув.р} \cdot G_{ст} = 1,024 \cdot 1,4 \cdot 3497 = 5012 \text{ Вт}, \quad (2.9)$$

где $K_{ув.р} = 1,4$ – коэффициент, учитывающий повышение потерь в зависимости от конструкции магнитопровода;

$$p_{XX} = K_p \cdot B_{СТ}^{K_{вр}} = 0,296 \cdot 1,6^{2,64} = 1,024 \text{ Вт/кг}, \quad (2.10)$$

где $K_p = 0,296$, $K_{вр} = 2,64$ – поправочные коэффициенты для марки стали 3407 толщиной 0,3 мм и индукцией 1,6 Тл.

Реактивные потери холостого хода трансформатора возможно найти с помощью формулы:

$$Q_{XX} = K_{yв.Q} \cdot q_{xx} \cdot G_{ст} + n_{стык} \cdot q_{стык} \cdot K_{зан.KP} \cdot \pi \cdot D_{СТ}^2 / 4 =$$

$$= 1,2 \cdot 1,478 \cdot 3490 + 8 \cdot 27472 \cdot 0,885 \cdot 3,14 \cdot 0,28^2 / 4 = 19423 \text{ ВАР}, \quad (2.11)$$

где $K_{yв.Q} = 1,2$ – коэффициент, учитывающий увеличение реактивных потерь в зависимости от конструкции магнитопровода;

$n_{стык} = 8$ – количество стыков в схеме шихтовки.

$$q_{XX} = K_q \cdot B_{СТ}^{K_{вq}} = 0,137 \cdot 1,6^{5,06} = 1,478 \text{ ВАР/кг}, \quad (2.12)$$

где $K_q = 0.137$, $K_{вq} = 5.06$.

Определим удельную намагничивающую мощность в стыках

$$q_{стык} = K_{стык} \cdot B_{СТ}^{K_{в.стык}} 2620 \cdot 1,6^5 = 27472 \text{ ВАР/м}^2, \quad (2.13)$$

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

Значения коэффициентов K_p , $K_{вр}$, K_q , $K_{вq}$, $K_{стык}$, $K_{в.стык}$ зависят от марки стали и значения индукции, могут быть приняты указанные значения.

Ток холостого хода трансформатора составляет

$$i_{xx} = \frac{Q_{xx}}{S_{ном}} \cdot 100\% = \frac{19423}{2500000} \cdot 100\% = 0,78 \%. \quad (2.14)$$

Для корректной работы трансформатора среднее значение плотности тока в обмотках зададим равной $2,9 \text{ А/м}^2$, что позволительно и находится в допустимом диапазоне значений[14].

Экономически приведенная к стали масса активных материалов

$$G_{прив} = G_{СТ} + \frac{C_{np}}{C_{СТ}} \cdot K_{из} \cdot G_{np} = 3497 + \frac{500}{98} \cdot 1,065 \cdot 1250 = 10423 \text{ кг}, \quad (2.15)$$

где $C_{np} = 500$ руб/кг – оптовая цена медного провода;

$C_{ст} = 98$ руб/кг – цена электротехнической стали;

$K_{из} = 1,065$ – коэффициент увеличения массы медного провода с изоляцией.

Для данного расчета коэффициент $\beta_{онт}$ определен с помощью графика зависимости (Рисунок 2.1) затрат приведенных $Z_{прив}$ от ряда значений β , определяющих соотношение основных размеров проектируемого трансформатора. На графике видно, что минимальный уровень затрат соответствует значению $\beta = 1,2$.

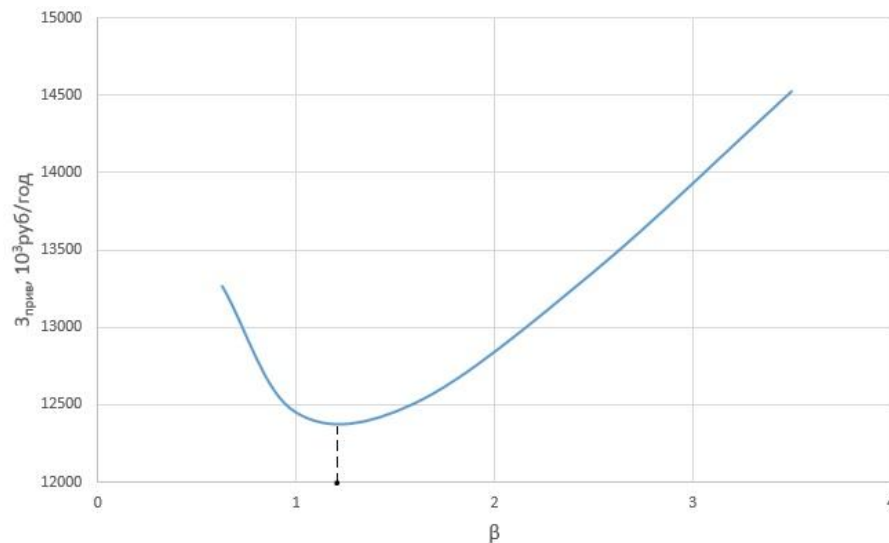


Рисунок 2.1 – Определение минимума приведенных затрат

3 Оценка технической возможности выполнения оптимального варианта трансформатора и предварительный выбор основных размеров

В результате технико-экономического расчета оптимального варианта конструкции трансформатора, выполненного в предыдущем разделе, выявлено, что наиболее рациональными являются размеры, соответствующие значению коэффициента $\beta_{onm} = 1,2$. Это такой вариант, при выполнении которого диаметр стержня равен 280мм и высота окна магнитопровода равна 2724мм.

Проанализируем, как будет выглядеть активная часть трансформатора при использовании таких размеров. На рисунке 3.1 показан эскиз для определения ориентировочной высоты бака трансформатора, который будет иметь указанные габариты при использовании соотношения между основными размерами при коэффициенте $\beta_{onm} = 1,2$, соответствующего минимуму приведенных затрат.

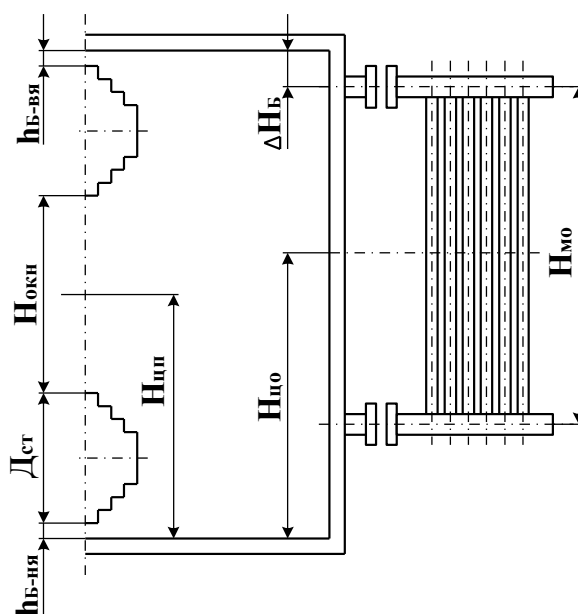


Рисунок 3.1 – Эскиз варианта бака трансформатора при $\beta_{onm} = 1,2$

На крышке бака должны быть установлены вводы обмотки ВН и НН. Ввод ВН класса напряжения 220кВ имеет высоту 4855мм. Использование

такого ввода (модель – BRIT.90-220-1050/2000) приведет к тому, что габаритный размер трансформатора по высоте будет превышать 8 метров при ширине менее 2-х метров.

Таким образом, при экономически выгодном диаметре стержня в $D_{CT} = 280$ мм размеры бака выглядят непропорциональными. В частности высота бака превышает максимально-допустимое значение в 4м. Это негативно влияет на устойчивость трансформатора и может привести к его опрокидыванию при внешних механических воздействиях. Кроме того, такая высота бака превышает допустимые возможные размеры для изготовления трансформатора на производстве. Ввиду этого целесообразно увеличить диаметр стержня до 350 мм, что позволит вернуться к допустимым габаритным размерам бака, сделав его ниже и шире, что хорошо повлияет на устойчивость трансформатора в целом.

При выбранном диаметре стержня коэффициент, связывающий основные размеры трансформатора будет оптимальным по техническим соображениям и равен $\beta_{opt} = 2$. В этом случае получим примерно следующие габаритные размеры бака:

Ширина бака: 1,676м;

Длина бака: 3,854м;

Высота бака: 2,964м.

Результаты расчета для выбранного значения $\beta_{opt} = 2$ приведены в таблице 3.1. Из анализа полученных данных видно, что приведённые затраты на изготовление увеличились не критично. Однако основные размеры изменились таким образом, что обеспечивают возможность изготовления трансформатора с заданными техническими характеристиками.

Таким образом, при выборе основных размеров активной части трансформатора отказываемся от оптимального варианта конструкции активной части, соответствующего минимуму приведенных затрат, в пользу более надежного и технологичного решения.

Таблица 3.1 – Результаты расчетных данных для $D_{cm} = 350 \text{ мм}$

Наименование параметра	Результаты расчета
β	2
$D_{cm}, \text{ м}$	0,350
$D_{н-г}, \text{ м}$	0,578
$L_{м-о}, \text{ м}$	1,090
$H_{обм}, \text{ м}$	1,744
$H_{окн}, \text{ м}$	2,114
$G_{cm}, \text{ кг}$	4100
$P_{xx}, \text{ Вт}$	5875,9
$Q_{xx}, \text{ ВАР}$	33721,7
$i_{xx}, \%$	1,35
$j, \text{ А/м}^2$	2900000

4 Электромагнитный расчет

4.1 Расчет активного сечения стержня

Ступенчатое сечение стержня образуется пакетами пластин, вписанных в диаметр стержня. Количество и размер пакетов стали выбирается из стандартизованного ряда так, чтобы максимально заполнить площадь сечения стержня магнитопровода [12, 13]. Размеры пластин, использованных при заполнении стержня $D_{cm} = 350$ мм приведены в таблице 4.1.

Площадь этой многоступенчатой фигуры называется геометрическим сечением стержня и рассчитывается по формуле:

$$F_{ст.геом} = 2 \cdot \sum_1^{n_{ступ}} B_{\kappa} \cdot t_{\kappa} = 2 \cdot 0,05128 = 0,10255 \text{ м}^2, \quad (4.1)$$

где $n_{ступ}$ – количество пакетов в половине сечения стержня;

B_{κ} – ширина пакета, t_{κ} – толщина пакета.

Активное сечение стержня

$$F_{ст} = k_{зан} \cdot F_{ст.геом} = 0,96 \cdot 0,10255 = 0,0884 \text{ м}^2, \quad (4.2)$$

где $k_{зан} = 0,96$ – коэффициент заполнения пакета с изоляцией.

Коэффициент заполнения площади круга

$$K_{зан.КР} = \frac{F_{СТ}}{\frac{\pi}{4} \cdot D_{СТ}^2} = \frac{0,0884}{\frac{3,14}{4} \cdot 0,35^2} = 0,91 \quad (4.3)$$

При рационально спроектированном сечении стержня соблюдается неравенство:

$$K_{зан.КР} \geq 0,885$$

$$0,91 \geq 0,885 .$$

Сечение стержня для выбранного диаметра показано на листе 16.13.03.02.024.006.003П.

Таблица 4.1 – Параметры пакетов, вписанных в стержень

Номер пакета	Ширина пакета Вк, м	Толщина пакета тк, м	Площадь пакета, м ²
1	0,335	0,051	0,01709
2	0,325	0,014	0,00455
3	0,295	0,029	0,00856
4	0,27	0,017	0,00459
5	0,23	0,02	0,0046
6	0,195	0,013	0,00254
7	0,135	0,016	0,00216
8	0,8	0,009	0,0072
			$\Sigma=0,05128$

4.2 Расчет напряжения одного витка, количества витков, напряжений и токов на всех ответвлениях обмотки РО

В первую очередь необходимо определить предварительное значение напряжения в одном витке обмотки:

$$U_{B0} = 4,44 \cdot f \cdot B_{CT0} \cdot F_{CT} = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 0,0884 = 31,4 \text{ В}, \quad (4.4)$$

где $B_{CT0} = 1,6 \text{ Тл}$ – предварительно выбранная величина индукции в стержне магнитопровода.

После этого можно рассчитать число витков в обмотке НН:

$$W_{HH} = \left[\frac{U_{HH_ф_ном}}{U_{B0}} \right]_{ц} = \left[\frac{10500}{31,4} \right]_{ц} = 334 , \quad (4.5)$$

где $U_{HH_ф_ном} = U_{HH} = 10500$.

Значения в квадратных скобках с индексом «ц» необходимо округлять до ближайшего целого числа.

Зная точное количество витков, вычислим уточнённое напряжение каждого

$$U_B = \frac{U_{HH_ф_ном}}{W_{HH}} = \frac{10500}{334} = 31,43 \text{ В.} \quad (4.6)$$

Так же рассчитаем точное значение индукции

$$B_{CT} = \frac{U_B}{4,44 \cdot f \cdot F_{CT}} = \frac{31,43}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,0884} = 1,6019 \text{ Тл.} \quad (4.7)$$

Количество витков обмотки ВН

$$W_{BH_ном} = \left[\frac{U_{BH_ф_ном}}{U_B} \right]_{ц} = \left[\frac{132791}{31,43} \right]_{ц} = 4224 , \quad (4.8)$$

где $U_{BH_ф_ном} = U_{BH_ном} / \sqrt{3} = 230000 / 1,732 = 132791$.

Число витков регулировочной обмотки, на каждой ступени регулирования

$$W_{\text{ступ}} = \left[\frac{U_{\text{ступ_ВН_}\phi}}{U_B} \right]_{\text{ц}} = \left[\frac{2363}{31,43} \right]_{\text{ц}} = 76, \quad (4.9)$$

$$\text{где } U_{\text{ступ_ВН_}\phi} = U_{\text{ВН_}\phi_ном} \cdot \frac{U_{\text{ступ}}\%}{100} = 132791 \cdot \frac{1,78}{100} = 2363; U_{\text{ступ}} = 1,78\%.$$

Завершим данный раздел расчетом номинальных токов обмоток НН и ВН:

$$I_{\text{ВН_}\phi_ном} = \frac{S_{ном} \cdot \sqrt{3}}{U_{ВН}} = \frac{2500000 \cdot \sqrt{3}}{230000} = 18,83 \text{ A} \quad (4.10)$$

$$I_{\text{НН_}\phi_ном} = \frac{S_{ном}}{U_{НН}} = \frac{2500000}{10500} = 238 \text{ A} \quad (4.11)$$

4.3 Выбор типа и расчет параметров обмоток

Прежде чем рассчитывать параметры обмотки НН, нужно определить её тип. Обмотка может быть непрерывной или винтовой. Критерием выбора её типа является соотношение:

$$\begin{aligned} h_{np} &= \left[\frac{H_{обм} \cdot W_{кат}}{W_{НН} \cdot m_B} - h_{кан.мш_{НН}} \cdot (1 - k_{yc}) - t_{ВНН} \right] = \\ &= \left[\frac{1,74 \cdot 1}{334 \cdot 1} - 3 \cdot 10^{-3} \cdot (-0,1) - 0,5 \cdot 10^{-3} \right] = 0,002, \end{aligned} \quad (4.12)$$

где h_{np} – высота провода;

$W_{кат}$ – количество витков в катушке (предварительно $W_{кат} = 1$);

$m_B = 1$ – число параллельных ветвей обмотки;

$h_{кан.миннн} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – минимальная высота радиального канала;

$k_{ус} = 0,1$ – коэффициент усадки обмоток;

$t_{B.НН} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – толщина изоляции.

При $h_{пр.мин} = 4,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ справедливо неравенство $0,002 \leq h_{пр.мин}$. Так как соотношение $h_{пр} \geq h_{пр.мин}$ не выполняется, то выбираем непрерывную обмотку.

Далее, зная тип обмотки НН, необходимо рассчитать ее параметры.

Из возможных вариантов исполнения непрерывной обмотки выбираем наиболее оптимальный с двумя параллельными проводами $n_{нар} = 2$ и высотой провода $h_{пр} = 0,0132 \text{ м}$.

Расчет начинается с определения числа прокладок

$$n_{прок} = \left(\frac{\pi \cdot D_{н-в}}{\varphi_{кат} \cdot l_{пол}} \right) \cdot \varphi_{кат} = \left(\frac{3,14 \cdot 0,578}{2 \cdot 0,12} \right) \cdot 2 = 14 \quad (4.13)$$

где $\varphi_{кат} = 2$ – это кратность количества катушек

$l_{поля} = 0,12 \text{ м}$ – расстояние между прокладками.

Предварительная величина сечения обмотки

$$F_{обм0} = \frac{I_{НН\phi}}{J} = \frac{238}{2,9 \cdot 10^6} = 82,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (4.14)$$

Ширина провода

$$b_{пр} = \frac{F_{обм0}}{k_{зан.пр} \cdot h_{пр} \cdot n_{нар}} = \frac{82,1 \cdot 10^{-6}}{0,985 \cdot 0,0132 \cdot 2} = 3,15 \cdot 10^{-3} \text{ м} . \quad (4.15)$$

Для того, чтобы удостовериться в правильности выбранных размеров, определим отношение высоты провода к его ширине. Допустимое значение должно находиться в следующем интервале $2 \leq \left[\frac{h_{np}}{b_{np}} \right]_{max} \leq 6$.

$$\frac{h_{np}}{b_{np}} = \frac{0,0132}{0,00315} = 4,19 \quad , \quad (4.16)$$

что соответствует указанным рекомендациям.

Сечение провода

$$F_{np} = k_{зан.пр} \cdot h_{np} \cdot b_{np} = 0,985 \cdot 0,0132 \cdot 0,00315 = 41 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad . \quad (4.17)$$

Сечение обмотки

$$F_{обм} = n_{нар} \cdot F_{np} = 2 \cdot 41 \cdot 10^{-6} = 81,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad . \quad (4.18)$$

Плотность тока

$$j = \frac{I_{HH\phi}}{F_{обм}} = \frac{238}{81,9 \cdot 10^{-6}} = 2,9 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \quad . \quad (4.19)$$

Индукция осевого поля рассеяния

$$B_{ос} = \frac{1,78 \cdot 10^{-6} \cdot I_{HH\phi} \cdot W_{HH} \cdot K_{ос}}{H_{обм}} = \frac{1,78 \cdot 10^{-6} \cdot 238 \cdot 334 \cdot 0,95}{1,744} = 0,077 \text{ Тл} \quad . \quad (4.20)$$

Добавочные потери, вызванные осевым полем рассеяния

$$P_{доб.ос\%} = 54,8 \cdot \left(\frac{f}{\rho_{np}} \right)^2 \cdot \left(\frac{b_{np} \cdot B_{oc}}{j} \right)^2 = 54,8 \cdot \left(\frac{50}{2,13 \cdot 10^{-8}} \right)^2 \cdot \left(\frac{0,00315 \cdot 0,077}{2,9 \cdot 10^6} \right)^2 = 2,1 \% \quad (4.21)$$

что допустимо.

Высота катушки

$$h_{кат} = h_{np} + t_{B_{HH}} = 0,0132 + 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,0137 \text{ м} . \quad (4.22)$$

Число катушек

$$n_{кат} = \frac{H_{обм}}{(h_{кат} + h_{кан.миг_{HH}}) \cdot (1 - k_{yc})) \cdot \varphi_{кат}} = \frac{1,744}{(0,0137 + 3 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,1)) \cdot 2} \cdot 2 \approx 212 \quad (4.23)$$

Число витков в катушке

$$W_{кат} = \frac{W_{HH} \cdot m_B}{n_{кат}} = \frac{334 \cdot 1}{212} = 1,57 \approx 1 \frac{8}{14} . \quad (4.24)$$

Ширина катушки

$$b_{кат} = 1,03 \cdot (b_{np} + t_{B_{ВН}}) \cdot \frac{n_{nap}}{m_B} \cdot (W_{кат})_{ц.б.} = 1,03 \cdot (3,15 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{2}{1} \cdot 2 = 0,015 \text{ м} . \quad (4.25)$$

Аналогично проведем расчет для обмотки ВН. Результатные данные сведены в таблицу 4.2. Откуда видно, что обмотка ВН также является непрерывной.

Проверка отклонения рассчитанного напряжения короткого замыкания $U_{K3.p}$ от заданного $U_{K3} = 10,5\%$ проводится в следующем порядке.

Для выполнения данной проверки необходимо сначала вычислить средний диаметр между обмотками НН и ВН, а так же средний диаметр каждой из этих обмоток по формулам (4.26), (4.27) и (4.28) соответственно.

$$\begin{aligned} D_{H-B} &= D_{CT} \cdot (1 + 2 \cdot K_{CT-O}) + 2 \cdot (b_{O-H} + b_H) + b_{H-B} = \\ &= 0,35 \cdot (1 + 2 \cdot 0,015) + 2 \cdot (0,018 + 0,015) + 0,08 = 0,506 \text{ м} ; \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$D_{H.cp} = D_{H-B} - b_H - b_{H-B} = 0,506 - 0,015 - 0,08 = 0,411 \text{ м} ; \quad (4.27)$$

$$D_{B.cp} = D_{H-B} + b_B + b_{H-B} = 0,506 + 0,073 + 0,08 = 0,66 \text{ м} . \quad (4.28)$$

Так же необходимо рассчитать предварительный размер диаметра бака:

$$\begin{aligned} D_B &= \frac{b_H}{3} \cdot D_{H.cp} + b_{H-B} \cdot D_{H-B} + \frac{b_B}{3} \cdot D_{B.cp} = \\ &= \frac{0,015}{3} \cdot 0,411 + 0,08 \cdot 0,506 + \frac{0,073}{3} \cdot 0,66 = 0,0587 \text{ м} \end{aligned} \quad (4.29)$$

Реактивная составляющая напряжения к.з.

$$U_{K3.p} = \frac{2,48 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot S_{ном} \cdot D_B \cdot K_{oc}}{m_\phi \cdot U_B^2 \cdot H_{обм}} = \frac{2,48 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot 0,0587 \cdot 0,95}{1 \cdot 31,43^2 \cdot 1,744} = 10,03 \% \quad (4.30)$$

Расчётный уровень $U_{K3.p}$, определённый по формуле не разнится с заданным при проектировании $U_{K3} = 10,5\%$ более, чем на 5%, следовательно, полученная реактивная составляющая напряжения короткого замыкания вполне приемлема для нашего расчёта.

Теперь рассчитаем параметры регулировочной обмотки. В качестве регулировочной выбираем слоевую многовинтовую обмотку без осевых каналов с числом заходов $m_{зах} = n_{ступ. PO} = 12$, с одним параллельным проводом $n_{нар} = 1$ и количеством слоёв $n_{сл} = 2$ [12, 15-16].

Определим высоту регулировочной обмотки

$$H_{обм. PO} = H_{обм} - \Delta H_{po} = 1,744 - 0,18 = 1,564 \text{ м}, \quad (4.31)$$

где $\Delta H_{po} = 0,18$.

Зная высоту обмотки, рассчитаем высоту провода

$$h_{np} = \frac{n_{сл} \cdot H_{обм. PO}}{W_{ступ} \cdot m_{зах} \cdot m_{в. po}} - t_{в. сл} = \frac{2 \cdot 1,564}{76 \cdot 12 \cdot 1} - 2,95 \cdot 10^{-3} = 4,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (4.32)$$

где $m_{в. PO} = 1$ – число параллельных ветвей обмотки PO;

$t_{в. сл} = 2,95 \cdot 10^{-3}$ м – толщина изоляции провода.

Предварительный расчет сечения обмотки

$$F_{обм0} = \frac{I_{BH. \phi}}{j_{BH}} = \frac{18,82}{2,83 \cdot 10^6} = 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (4.33)$$

Ширина провода

$$b_{np} = \frac{F_{обм0}}{\kappa_{зан. np} \cdot n_{нар. PO} \cdot h_{np}} = \frac{6,65 \cdot 10^{-6}}{0,985 \cdot 1 \cdot 4,75 \cdot 10^{-3}} = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (4.34)$$

Допустимое отношение высоты провода к его ширине так же должно иметь значение в интервале $2 \leq \left[\frac{h_{np}}{b_{np}} \right]_{\max} \leq 6$

$$\frac{h_{np}}{b_{np}} = \frac{4,75 \cdot 10^{-3}}{1,25 \cdot 10^{-3}} = 3,8, \quad (4.35)$$

Данное значение соответствует допустимому.

Сечение провода

$$F_{np} = \kappa_{зап.пр} \cdot h_{np} \cdot b_{np} = 0,985 \cdot 4,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} = 5,85 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (4.36)$$

Сечение обмотки

$$F_{обм} = F_{np} \cdot n_{нар.РО} = 5,85 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 5,85 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (4.37)$$

Плотность тока в регулировочной обмотке

$$j = \frac{I_{ВНФ}}{F_{обм}} = \frac{18,82}{5,85 \cdot 10^{-6}} = 3,2 \cdot 10^6 \text{ А / м}^2. \quad (4.38)$$

Ширина слоя обмотки

$$b_{сл} = \frac{(b_{np} + t_{в.сл}) \cdot n_{нар.РО}}{m_{\epsilon}} = \frac{(1,25 \cdot 10^{-3} + 2,95 \cdot 10^{-3}) \cdot 1}{1} = 0,0042 \text{ м}. \quad (4.39)$$

Ширина обмотки

$$b_{обм} = b_{сл} \cdot n_{сл} + b_{мс} \cdot (n_{сл} - 1) = 0,0042 \cdot 2 + 0,015 \cdot (2 - 1) = 0,023 м. \quad (4.40)$$

Основные параметры обмоток НН, ВН, и РО приведены в таблице 4.2.
Расположение обмоток в окне магнитопровода показано на рисунке 4.1.

Таблица 4.2– Основные параметры обмоток

Параметр	Ед. изм	Непрерыв ная НН	Непрерыв ная ВН	Регулировоч- ная РО
Высота обмотки, $H_{обм}$	м	1,744	1,744	1,564
Номинальный ток, I_{ϕ}	А	238	18,82	
Плотность тока, $J \cdot 10^6$	А/м ²	2,9	2,83	3,2
Число витков в катушке, $W_{кат}$	-	$1\frac{8}{14}$	25	-
Число параллельных проводов, $n_{пар}$	-	2	1	1
Число катушек, $n_{кат}$	-	212	168	-
Высота провода, $h_{пр}$	м	0,0132	0,0045	0,00475
Ширина провода, $b_{пр}$	м	0,00315	0,0015	0,00125
Отношение $h_{пр}/b_{пр}$	-	4,2	3	3,8
Сечение обмотки, $F_{обм}$	м ²	$8,19 \cdot 10^{-5}$	$6,65 \cdot 10^{-6}$	$5,85 \cdot 10^{-6}$
Ширина обмотки, $b_{кат}$	м	0,015	0,073	0,0234
Добавочные потери от осевого поля рассеяния, $P_{доб.ос}$	%	2,1	-	-

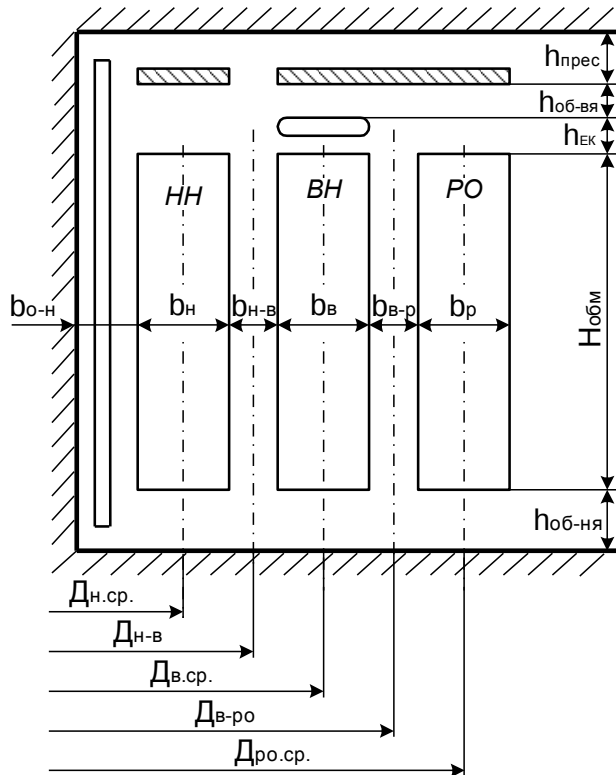


Рисунок 4.1 – Разрез обмоток в окне магнитопровода трансформатора

$$\begin{aligned}
 b_H &= 0,015 \text{ м}; & b_B &= 0,073 \text{ м}; & b_P &= 0,0234 \text{ м}; \\
 b_{O-H} &= 0,018 \text{ м}; & b_{H-B} &= 0,08 \text{ м}; & b_{B-P} &= 0,08 \text{ м}; \\
 D_{H-B} &= 0,578 \text{ м}; & D_{B.ср.} &= 0,66 \text{ м}. & D_{H.ср.} &= 0,41 \text{ м}; \\
 H_{обм} &= 1,744 \text{ м};
 \end{aligned}$$

4.4 Расчет потерь короткого замыкания и напряжения короткого замыкания

Расчет сопротивлений обмотки НН постоянному току и массы обмоточного провода

Активное сопротивление провода обмотки считаем по формуле:

$$R_{обмНН} = \rho_{np} \cdot \frac{L_{напНН}}{F_{обм}} = 2,13 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{431,6}{8,19 \cdot 10^{-5}} = 0,112 \text{ Ом}, \quad (4.41)$$

где $L_{нар.НН} = \pi \cdot D_{обм.ср} \cdot W_{обм} = 3,14 \cdot 0,411 \cdot 334 = 431,6$ – максимальная длина провода;

$D_{обм.ср.}$ – диаметр рассчитываемой обмотки (см. раздел 4.4).

Так же необходимо определить массу обмоточного провода катушек обмотки НН, через которые проходит ток при работе на номинальном ответвлении

$$G_{пр.НН} = m_{\phi} \cdot L_{нар.НН} \cdot F_{обм} \cdot \gamma_{пр} = 1 \cdot 431,6 \cdot 8,19 \cdot 10^{-5} \cdot 8,89 \cdot 10^3 = 314,3 \text{ кг.} \quad (4.42)$$

Расчет сопротивлений обмотки ВН и массы обмоточного провода производится аналогично НН, по формулам, изложенным выше. Результирующие данные приведены в таблице 4.3.

Основные потери, рассчитанные с помощью тока и сопротивления обмотки

$$P_{осн} = m_{\phi} \cdot I_{\phi.ном}^2 \cdot R_{обм} = 1 \cdot 238^2 \cdot 0,112 = 6362,33 \text{ Вт.} \quad (4.43)$$

Основные потери, рассчитанные с помощью плотности тока и массы провода

$$P_{осн} = \frac{\rho_{пр}}{\gamma_{пр}} \cdot j_{обм}^2 \cdot G_{пр} = \frac{2,13 \cdot 10^{-8}}{8,89 \cdot 10^3} \cdot (2,9 \cdot 10^6)^2 \cdot 314,3 = 6362,33 \text{ Вт} \quad (4.44)$$

Совпадение результатов косвенно подтверждает точность определения массы провода и сопротивления обмоток.

Аналогичный расчет проводим для обмотки ВН.

Таблица 4.3 – Результаты расчета основных потерь в обмотках НН и ВН

ПАРАМЕТР	Обмотка	
	НН	ВН
$L_{\text{пар}}, \text{ М}$	431,6	8753,3
$R_{\text{обм}}, \text{ Ом}$	0,112	28,04
$G_{\text{пр}}, \text{ кг}$	314,3	517,4
$P_{\text{осн}} = f(I, R), \text{ Вт}$	6362,33	9938,78
$P_{\text{осн}} = f(j, G_{\text{пр}}), \text{ Вт}$	6362,33	9938,78

Расчет добавочных потерь в обмотках проводим в следующем порядке.

Добавочные потери в обмотках вызваны действием полей рассеяния и складываются из добавочных потерь от вихревых токов, вызванных осевой $P_{\text{в.ос}}$ и радиальной составляющей поля рассеяния $P_{\text{в.рад}}$ и добавочных потерь от циркулирующих токов, вызванных осевой $P_{\text{ц.ос}}$ и радиальной составляющей поля рассеяния $P_{\text{ц.рад}}$.

$$P_{\text{доб.обм}} = P_{\text{в.ос}} + P_{\text{в.рад}} + P_{\text{ц.ос}} + P_{\text{ц.рад}}$$

Индукция осевого поля рассеяния

$$\begin{aligned}
 B_{\text{осНН}} &= \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot I_{\text{обмННф}} \cdot W_{\text{обм}} \cdot K_{\text{ос}}}{H_{\text{обм}}} = \\
 &= \frac{\sqrt{2} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 238 \cdot 334 \cdot 0,95}{1,744} = 0,0769 \text{ Тл} ;
 \end{aligned}
 \tag{4.45}$$

$$\begin{aligned}
 B_{\text{осВН}} &= \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot I_{\text{обмВНф}} \cdot W_{\text{обм}} \cdot K_{\text{ос}}}{H_{\text{обм}}} = \\
 &= \frac{\sqrt{2} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 18,82 \cdot 4224 \cdot 0,95}{1,744} = 0,0769 \text{ Тл} ,
 \end{aligned}
 \tag{4.46}$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость воздуха.

Индукция осевого поля рассеяния B_{oc} , рассчитанная через параметры НН и ВН, должна иметь одинаковые значения.

Удельные потери от осевой составляющей поля рассеяния в обмотках НН и ВН

$$p_{в.ос.НН} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot b_{np}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{oc}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,00315^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,0769^2 = 0,425 \text{ Вт/кг} \quad ; \quad (4.47)$$

$$p_{в.ос.ВН} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot b_{np}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{oc}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,0015^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,0769^2 = 0,096 \text{ Вт/кг} \quad . \quad (4.48)$$

Полные потери от осевой составляющей поля рассеяния в обмотках НН и ВН

$$P_{в.ос.НН} = p_{в.ос.НН} \cdot G_{np.НН} = 0,425 \cdot 314,3 = 133,5 \text{ Вт} \quad ; \quad (4.49)$$

$$P_{в.ос.ВН} = p_{в.ос.ВН} \cdot G_{np.ВН} = 0,096 \cdot 517,4 = 49,8 \text{ Вт} \quad . \quad (4.50)$$

Далее определим радиальную составляющую индукции поля рассеяния. Для этого достаточно рассмотреть половину высоты обмотки. При этом она разбивается на 2 участка: участок 1-2 равный $0,05 \cdot H_{обм}$ и участок 2-3 с высотой равной $0,45 \cdot H_{обм}$ (наглядно изображено на рисунке 4.2). Индукция на данных участках определяется на основе следующих выражений:

$$B_{pa\partial 1-2} = \sqrt{B_{pa\partial 1}^2 + B_{pa\partial 1} \cdot B_{pa\partial 2} + B_{pa\partial 2}^2} = \sqrt{0,03^2 + 0,03 \cdot 0,0077 + 0,0077^2} = 0,035 Tл; \quad (4.51)$$

Потери, возникающие в обмотках от радиальной составляющей поля рассеяния определяются для обмоток НН и ВН таким образом:

$$p_{в.ра\partial} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot h_{np}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{pa\partial}^2, \text{ Вт/кг}.$$

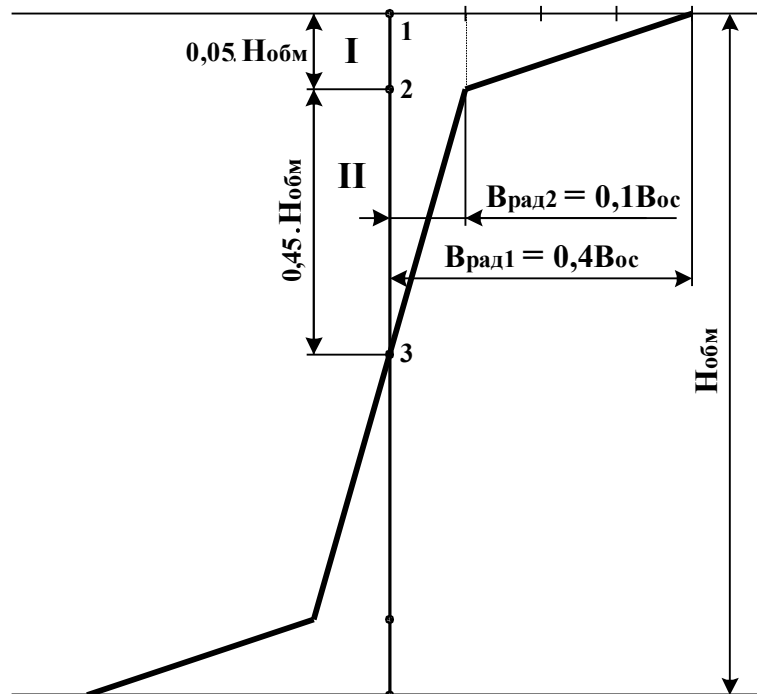


Рисунок 4.2 Распределение индукции радиального поля вдоль высоты обмотки

$$B_{pa\partial 1} = 0,4 \cdot B_{oc} = 0,03; \quad B_{pa\partial 2} = 0,1 \cdot B_{oc} = 0,0077 T, \quad B_{pa\partial 2-3} = 0,0077 Tл$$

Расчет для участков 1-2 и 2-3:

$$P_{\text{в.ра\delta.НН.1-2}} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot h_{np}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{\text{ра\delta}}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,0132^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,035^2 = 1,566 \text{ Вт/кг} \quad (4.52)$$

$$P_{\text{в.ра\delta.НН.2-3}} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot h_{np}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{\text{ра\delta}}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,0132^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,0077^2 = 0,074 \text{ Вт/кг} \quad (4.53)$$

$$P_{\text{в.ра\delta.ВН.1-2}} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot h_{np}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{\text{ра\delta}}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,0045^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,035^2 = 0,182 \text{ Вт/кг} \quad (4.54)$$

$$P_{\text{в.ра\delta.ВН.2-3}} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot h_{np}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{\text{ра\delta}}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,0045^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,0077^2 = 0,0087 \text{ Вт/кг} \quad (4.55)$$

Полные потери от радиальной составляющей поля рассеяния в обмотке НН на участках 1-2 и 2-3:

$$P_{\text{в.ра\delta.1-2}} = P_{\text{в.ра\delta.1-2}} \cdot G_{np.1-2} = 1,566 \cdot 15,7 = 24,6 \text{ Вт}, \quad (4.56)$$

$$P_{\text{в.ра\delta.2-3}} = P_{\text{в.ра\delta.2-3}} \cdot G_{np.2-3} = 0,074 \cdot 141,4 = 10,5 \text{ Вт}, \quad (4.57)$$

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

Таким же образом ведется расчет для катушки ВН.

Потери от радиальной составляющей поля рассеяния в обмотках НН и ВН:

$$P_{\text{в.ра\delta.НН}} = 2 \cdot (P_{\text{в.ра\delta.1-2}} + P_{\text{в.ра\delta.2-3}}) = 2 \cdot (24,6 + 10,5) = 70,32 \text{ Вт}, \quad (4.58)$$

$$P_{\text{в.ра\delta.ВН}} = 2 \cdot (P_{\text{в.ра\delta.1-2}} + P_{\text{в.ра\delta.2-3}}) = 2 \cdot (4,7 + 2,01) = 13,45 \text{ Вт}. \quad (4.59)$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 4.3.

Далее рассчитываются добавочные потери в металлоконструкциях.

Добавочные потери появляются в некоторых деталях конструкции трансформатора и имеют довольно небольшую величину, поэтому могут быть рассчитаны приближенно. Для начала необходимо определить приблизительные размеры бака трансформатора.

Таблица 4.3– Результаты расчетов добавочных потерь

ПАРАМЕТР			Обмотка	
			НН	ВН
B_{oc}	Тл		0,077	0,077
$P_{\epsilon, oc}$	Вт/кг		0,425	0,096
$P_{\epsilon, oc}$	Вт		133,5	49,82
B_{pad}	1	Тл	0,03	0,03
	2		0,0077	0,0077
	1-2		0,035	0,182
	2-3		0,0077	0,0087
$P_{\epsilon, pad}$	1-2	Вт/кг	1,566	0,182
	2-3		0,074	0,008
G_{np}	1-2	кг	15,7	25,9
	2-3		141,4	232,8
$P_{\epsilon, pad}$	1-2	Вт	24,6	4,7
	2-3		10,5	2,01
$\Sigma P_{\epsilon, об. pad}$		Вт	70,32	13,45

Расчет необходимо начинать с уточнения межосевого расстояния, где параметры обмоток берем из пункта 4.3:

$$L_{MO} = D_{H-B} + \epsilon_{H-\epsilon} + 2 \cdot (\epsilon_{\epsilon} + \epsilon_{\epsilon-po} + \epsilon_{po}) + \epsilon_{M-\phi} =$$

$$= 0,578 + 0,08 + 2 \cdot (0,076 + 0,08 + 0,025) + 0,07 = 1,089 \text{ м} \quad (4.60)$$

Затем следует вычисление наружного диаметра обмоток

$$D_{po.nap} = D_{e-po} + e_{e-po} + 2 \cdot e_{po} = 0,816 + 0,08 + 2 \cdot 0,051 = 0,946 \text{ м}, \quad (4.61)$$

где $D_{e-po} = D_{e.cp} + e_e + e_{e-po}$ – средний диаметр между обмотками ВН и РО.

Ширину бака находим по формуле:

$$B_B = D_{po.nap} + 2 \cdot e_{обм-Б} = 0,946 + 2 \cdot 0,365 = 1,676 \text{ м}, \quad (4.62)$$

где $e_{обм-Б} = 0,365 \text{ м}$ – усредненный промежуток между стенкой бака и наружной обмоткой.

Далее вычислим длину бака

$$L_B = 2 \cdot L_{mo} + D_{po.nap} + 2 \cdot e_{обм-Б} = 2 \cdot 1,089 + 0,946 + 2 \cdot 0,365 = 3,854 \text{ м}. \quad (4.63)$$

После того, как мы узнали ширину и длину бака, есть возможность найти его периметр

$$\Pi_B = 4 \cdot (L_{mo} + B_B) = 2 \cdot (L_B + B_B) = 11,06 \text{ м} \quad (4.64)$$

и средний радиус

$$R_B = \frac{(L_B + B_B - 2L_{MO})}{4} = \frac{(3,854 + 1,676 - 2 \cdot 1,089)}{4} = 0,838 \text{ м}. \quad (4.65)$$

Добавочные потери в металлоконструкциях могут быть рассчитаны приближенно по формуле

$$P_{\text{доб.конст}} \approx \frac{\kappa \cdot U_{\text{кз.р}}^2 \% \cdot \Phi_{\text{ст}}^2 \cdot H_{\text{об.м}}^3 \cdot 10^4}{\Pi_B \left[H_{\text{об.м}} + 2 \cdot \left(R_B - \frac{D_{\text{н-в}}}{2} \right) \right]^2} =$$

$$= \frac{2,20 \cdot 10,03^2 \cdot 0,141^2 \cdot 1,744^3 \cdot 10^4}{11,06 \left[1,744 + 2 \cdot \left(0,838 - \frac{0,578}{2} \right) \right]^2} = 2503 \text{ Вт}, \quad (4.66)$$

где $\kappa = 2,20$ при $U_{\text{кз.р}} \leq 11,5\%$;

$\Phi_{\text{СТ}} = F_{\text{СТ}} \cdot B_{\text{СТ}} = 0,0884 \cdot 1,6 = 0,141$ – магнитный поток стержня, Вб.

Общие потери короткого замыкания

$$P_{\text{к.з.}} = \Sigma P_{\text{осн}} + \Sigma P_{\text{доб.об.м.}} + P_{\text{доб.конст.}} = P_{\text{осн.НН}} + P_{\text{осн.ВН}} + P_{\text{в.радНН}} + P_{\text{в.радВН}} +$$

$$+ P_{\text{восНН}} + P_{\text{в.ос.ВН}} + P_{\text{доб.конст.}} = 6362,3 + 9938,8 + 70,3 + 13,5 +$$

$$+ 133,5 + 49,8 + 2503 = 19071 \text{ Вт} \quad (4.67)$$

Значение этих потерь не должно превышать заданного более, чем на 5%.

Расчет напряжения короткого замыкания проводим в следующем порядке. Активная составляющая напряжения к.з. вычисляется по формуле

$$U_{\text{кз.а}} = \frac{P_{\text{кз}}}{S_{\text{ном}}} \cdot 100\% = \frac{19071}{2500000} \cdot 100\% = 0,76\% \quad (4.68)$$

Значение полного напряжения короткого замыкания равно:

$$U_{\text{кз}} = \sqrt{U_{\text{кз.р}}^2 + U_{\text{кз.а}}^2} = \sqrt{10,03^2 + 0,76^2} = 10,06\% \quad (4.69)$$

где реактивная составляющая напряжения короткого замыкания $U_{\text{кз.р}}$ из формулы (4.30).

5 Тепловой расчет трансформатора

Задачей данного расчета является определение превышения температуры обмоток над температурой окружающей среды и выбор системы охлаждения, которая не допустит перегрева выше допустимого уровня в 65 °С [9, 12, 17].

Превышение температуры обмоток над охлаждающим воздухом складывается из превышения температуры катушки над маслом $Q_{кат.мс}$ и превышения температуры масла над воздухом $Q_{мс.ср}$:

$$Q_{кат} = Q_{кат.мс} + Q_{мс.ср}.$$

Первым делом необходимо рассчитать тепловую нагрузку поверхности катушки

$$\begin{aligned} q_{кат} &= \frac{\rho_{пр} \cdot j \cdot I_{обм} \cdot W_{кат} \cdot K_{закр.кат} \cdot (1 + K_{доб.кат})}{2 \cdot m_{\phi} \cdot (b_{кат} + h_{кат})} = \\ &= \frac{2,13 \cdot 10^{-8} \cdot 2,9 \cdot 10^6 \cdot 238 \cdot 334 \cdot 1,76 \cdot (1 + 0,032)}{2 \cdot 1 \cdot (0,015 + 0,0137)} = 934,24 \text{ Вт/м}^2 \end{aligned} \quad (5.1)$$

где $K_{закр.кат}$ – коэффициент закрытия изоляционными прокладками части поверхности катушки, определяется выражением:

$$K_{закр.кат} = \frac{\pi \cdot D_{обм.ср}}{\pi \cdot D_{обм.ср} - n_{прокл} \cdot b_{прокл}} = \frac{3,14 \cdot 0,41}{3,14 \cdot 0,41 - 14 \cdot 0,04} = 1,76, \quad (5.2)$$

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

$K_{доб.кат}$ – коэффициент, учитывающий действие добавочных потерь.

Для трансформатора с системой охлаждения М тепловая нагрузка теплоотдающей поверхности катушки не должна превышать $1500 \text{ Вт} / \text{м}^2$.

Расчет превышения температуры катушки над маслом

$$Q_{\text{кат.мас}} = f_1 \cdot q_{\text{кат}}^{K_{\text{кат}}} + f_2 \cdot q_{\text{кат}} = 0,131 \cdot 934,24^{0,7} = 15,8^\circ\text{C}, \quad (5.3)$$

где $f_1 = 0,147 \cdot [1 + (5 \cdot b_{\text{кат}} - 0,18)]$;

$$f_2 = 2,75 \cdot (t_g - 0,55 \cdot 10^{-3});$$

$$K_{\text{кат}} = 0,7.$$

Здесь второй член равенства, учитывающий перепад температур в изоляции, не учитывается, если катушка не имеет дополнительной изоляции.

Расчет превышения температуры обмотки над температурой масла производится аналогично.

Превышения температуры масла над воздухом определяется двумя способами, исходя из норм нагрева масла (5.4) и норм нагрева обмоток (5.9).

Рассмотрим первый случай:

$$Q_{\text{мас.ср}} = \frac{[Q_{\text{в.сл.м}}]}{1,2 \cdot K_{\text{мц}}} = \frac{60}{1,2 \cdot 1,38} = 36,1^\circ\text{C}, \quad (5.4)$$

где $K_{\text{мц}}$ – коэффициент тепловых центров трансформатора:

$$\begin{aligned} K_{\text{мц}} &= 1,179 \cdot \alpha_{\text{мц}}^2 - 1,375 \cdot \alpha_{\text{мц}} + 1,473 = \\ &= 1,179 \cdot 1,098^2 - 1,375 \cdot 1,098 + 1,473 = 1,38 \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\alpha_{ти} = \frac{H_{цп}}{H_{цo}} = \frac{D_{CT} + h_{Б-ня} + \frac{1}{2} \cdot H_{окн}}{H_{окн} + 2 \cdot D_{CT} - \frac{1}{2} \cdot H_{мо}} = \frac{0,350 + 0,05 + \frac{1}{2} \cdot 2,114}{2,114 + 2 \cdot 0,350 - \frac{1}{2} \cdot 2,6} = 1,098 \quad (5.6)$$

Определим высоту окна и высоту бака:

$$\begin{aligned} H_{окн} &= H_{обм} + h_{ЕК} + h_{обм-ня} + h_{обм-вя} + h_{прес} = \\ &= 1,744 + 0,03 + 0,12 + 0,15 + 0,07 = 2,114 \text{ м} \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} H_{Б} &= 2 \cdot D_{CT} + H_{окн} + h_{Б-ня} + h_{Б-вя} = \\ &= 2 \cdot 0,350 + 2,114 + 0,12 + 0,15 = 2,964 \text{ м} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Высота выбранного радиатора должна быть ориентировочно на 300мм меньше высоты бака, поэтому выбор пал на радиатор типа Мо - 2600 высотой, соответственно, 2600мм с теплоотдающей поверхностью $F_{рад} = 46 \text{ м}^2$ и массой масла 295 кг.

Превышения температуры масла над воздухом исходя из норм нагрева обмоток

$$Q_{м.с.р} = [Q_{обм}] - Q_{(кат.мс)макс} = 36,1 - 15,8 = 20,3^\circ\text{C} \quad (5.9)$$

где $Q_{(кат.мс)макс}$ — превышения температуры наиболее нагретой обмотки над маслом.

Теперь определим необходимое количество радиаторов для охлаждения проектируемого трансформатора с системой охлаждения типа М.

Система охлаждения предназначена для отвода от трансформатора тепла, равного потерям в трансформаторе.

Расчетные потери трансформатора

$$P_{расч} = P_{xx} + P_{к.з} = 4000 + 19071 = 23071 \text{ Вт} \quad (5.10)$$

Теплоотдающей поверхностью трансформатора является площадь радиатора и всех стенок с крышкой бака, дно бака здесь не играет особую роль. С помощью экспериментальных зависимостей в области среднего превышения температуры масла над воздухом, находим тепловые потоки, способствующие отведению тепла от бака и радиаторов трансформатора [9, 12, 14, 17].

Удельную тепловую нагрузку поверхности бака и радиатора определяем следующим образом:

$$q_B = \left(\frac{Q_{м.с.ср}}{0,262} \right)^{1,25} = \left(\frac{20,3}{0,262} \right)^{1,25} = 230 \text{ Вт/м}^2, \quad (5.11)$$

$$q_{рад} = \left(\frac{Q_{м.с.ср}}{K_{охл}} \right)^{1,25} = \left(\frac{20,3}{0,42} \right)^{1,25} = 127,5 \text{ Вт/м}^2, \quad (5.12)$$

где $K_{охл} = 0,42$ для системы охлаждения М.

Затем рассчитаем тепловые потоки, которые необходимо отвести баку и радиатору:

$$\begin{aligned} Q_B &= q_B \cdot \left[H_B \cdot \Pi_B + \left(2 \cdot L_{мо} \cdot B_B + \frac{\pi \cdot B_B^2}{4} \right) \cdot 0,75 \right] = \\ &= 230 \cdot \left[2,964 \cdot 11,06 + \left(2 \cdot 1,089 \cdot 1,676 + \frac{3,14 \cdot 1,676^2}{4} \right) \cdot 0,75 \right] = 8933 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$Q_{pad} = P_{расч} - Q_B = 23071 - 8933 = 16444 \text{ Вт} \quad (5.14)$$

Зная величину теплового потока, с которым должна справляться система охлаждения, можем вычислить необходимое число радиаторов

$$n_{pad} = \left[\frac{Q_{pad}}{F_{pad} \cdot q_{pad}} \right]_y = \left[\frac{16444}{46 \cdot 127,5} \right]_y = 2 \quad (5.15)$$

6 Расчет электродинамической стойкости

Данный расчет начнем с отношения ударного тока к.з. к номинальному

$$K_{к.з} = \frac{I_{к.з.уд}}{I_{ном}} = \sqrt{2} \cdot K_{уд} \cdot K_{кз.уст} = \sqrt{2} \cdot 1,78 \cdot 9,94 = 25. \quad (6.1)$$

где $K_{кз.уст} = 100 / U_{к.з}$ – кратность установившегося тока к.з.;

$$K_{уд} = \left(1 + \exp \left[- \frac{\pi \cdot U_{кз.а}}{U_{кз.р}} \right] \right) \text{— ударный коэффициент учитывающий наличие}$$

апериодической составляющей при увеличении тока к.з.

Ударный ток к.з., в каждом витке катушек НН и ВН:

$$I_{к.з.удНН} = I_{ном} \cdot K_{к.з} = 238 \cdot 25 = 5967 \text{ А}; \quad (6.2)$$

$$I_{к.з.удВН} = I_{ном} \cdot K_{к.з} = 18,82 \cdot 25 = 471,8 \text{ А}. \quad (6.3)$$

Расчет механических напряжений в обмотках от радиальных сил, возникающих при взаимодействии проходящего через проводник тока к.з. с осевым полем рассеяния[18].

Расчет радиальных сил ведется для обмоток НН и ВН:

Радиус обмотки НН

$$R_{cp} = \frac{1}{2} \cdot D_{cp.обм} = \frac{1}{2} \cdot 0,41 = 0,205 \text{ м}. \quad (6.4)$$

Величина индукции осевого поля рассеяния при к.з.

$$B_{oc.c.p.kz} = K_{y\partial} \cdot K_{kz.yct} \cdot \frac{B_{oc}}{2} = 1,78 \cdot 9,94 \cdot \frac{0,077}{2} = 0,683 \text{ Тл.} \quad (6.5)$$

Напряжение растяжения или сжатия в проводнике катушки

$$G_{pad} = \frac{B_{oc.c.p.kz} \cdot I_{kz.y\partial} \cdot R_{cp}}{F_{обм}} = \frac{0,683 \cdot 5967 \cdot 0,205}{81,9 \cdot 10^{-6}} = 10,2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2. \quad (6.6)$$

Расчет механических напряжений в обмотках от осевых сил, возникающих при взаимодействии проходящего через проводник тока к.з. с радиальным полем рассеяния.

Длина расчетного пролета

$$l_o = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{cp}}{n_{прокл}} - b_{прокл} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,205}{14} - 0,00315 = 0,089 \text{ м.} \quad (6.7)$$

Средняя величина индукции радиального поля рассеяния при к.з. по высоте обмотки

$$B_{pad.c.p.kz} = K_{y\partial} \cdot K_{kz.yct} \cdot 0,17 \cdot B_{oc} = 1,78 \cdot 9,94 \cdot 0,17 \cdot 0,077 = 0,232 \text{ Тл.} \quad (6.8)$$

Напряжение изгиба в каждом проводнике катушки

$$G_{oc} = \frac{B_{pad.c.p.kz} \cdot I_{kz.y\partial} \cdot l_o^2}{2 \cdot n_{нар} \cdot b_{np} \cdot h_{np}^2} = \frac{0,232 \cdot 5967 \cdot 0,089^2}{2 \cdot 2 \cdot 0,00315 \cdot 0,0132^2} = 5,02 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2. \quad (6.9)$$

Проверка механической прочности обмоток на превышение суммарных напряжений в проводнике над допустимым напряжением

$$G = G_{pad} + G_{oc} \leq [G]$$

$$G = 10,2 \cdot 10^6 + 5,02 \cdot 10^6 \leq [G]$$

допустимые напряжения для медного провода $[G] = 1,18 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$.

Обмотка НН, которая подвергается сжатию, должна так же соответствовать критерию $G_{рад} \leq G_k$. Дополнительная проверка проводится только для обмотки НН.

Для этого необходимо определить коэффициент устойчивости круговой арки

$$K_y = \left(\frac{n_{пок}}{2} \right)^2 - 1 = \left(\frac{14}{2} \right)^2 - 1 = 48. \quad (6.10)$$

Критическое напряжение в проводнике

$$G_k = \frac{K_y \cdot E_{np} \cdot b_{np}^2}{12 \cdot R_{cp}^2} = \frac{48 \cdot 1,15 \cdot 10^{11} \cdot 0,00315^2}{12 \cdot 0,205^2} = 1,07 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2. \quad (6.11)$$

Критерий устойчивостью обмотки $G_{рад} \leq G_k$ соблюдается, т.к. $10,2 \cdot 10^6 \leq 1,07 \cdot 10^8$.

7 Расчет заземления бака трансформатора

Бак трансформатора не является токоведущей частью, но ввиду пробоя или повреждения изоляции он может оказаться под напряжением. Для защиты людей от удара током при прикосновении к баку трансформатора необходимо заземление бака, т.е. преднамеренное его соединение с землей.

Целью данного расчета является определение количества и параметров заземляющих элементов, непосредственно соприкасающихся с землей. Заземлители располагаются в ряд относительно заземляемого оборудования. Определяется допустимое сопротивление заземляющего устройства $R_d \leq 4 \text{ Ом}$ [20].

Затем определяется удельное сопротивление грунта ρ , в котором предполагается размещение заземляющих элементов.

$\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – для грунта типа суглинок;

$\rho_{\text{расч}} = \rho \cdot K_c = 100 \cdot 1,45 = 145 \text{ Ом} \cdot \text{м}; K_c = 1,45$

$l_{\text{ст}} = 3 \text{ м}$ – длина вертикального электрода;

$d_{\text{ст}} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – диаметр электрода;

$t = 0,7 \text{ м}$ – расстояние от поверхности грунта до стержня;

Выбираем заземлитель трубчатого типа в грунте.

Сопротивление растекания тока с одного заземлителя

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{\text{ст}}} \left(\ln \frac{2l_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}}} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + 1}{4t - 1} \right) = \\ &= \frac{145}{2 \cdot \pi \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{15 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 0,7 + 1}{4 \cdot 0,7 - 1} \right) = 48,9 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (7.1)$$

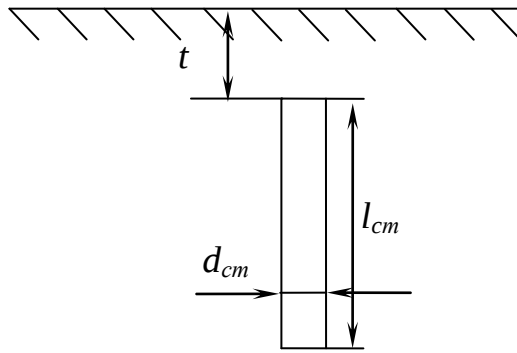


Рисунок 7.1 – Эскиз заземлителя

Необходимое количество параллельно соединенных заземлителей

$$n = \frac{R_1}{R_{\text{д}}} = \frac{48,9}{4} = 13. \quad (7.2)$$

Для соединения вертикальных стержней используются горизонтальные электроды длиной L

$$L = 1.05 \cdot m \cdot (n - 1) = 1.05 \cdot 0.3 \cdot (13 - 1) = 3.78 \text{ м}. \quad (7.3)$$

Сопротивление растекания тока горизонтального электрода:

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{\text{ст}}} \ln \frac{l_{\text{ст}}^2}{d_{\text{ст}} \cdot t} = \frac{145}{2 \cdot \pi \cdot 4} \ln \frac{3.78^2}{15 \cdot 10^{-3} \cdot 0.7} = 44 \text{ Ом}. \quad (7.4)$$

Суммарное сопротивление растекания тока искусственных заземлителей

$$R_b = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 \cdot \eta_{\text{г}} + R_2 \cdot n \cdot \eta_{\text{в}}} = \frac{48,9 \cdot 44}{48,9 \cdot 0,85 + 44 \cdot 13 \cdot 0,88} = 3,89 \text{ Ом}, \quad (7.5)$$

$\eta_r = 0,85$ – коэффициент использования горизонтального электрода с учетом вертикальных электродов;

$\eta_B = 0,88$ – коэффициент использование вертикальных электродов, с учетом их взаимного экранирования.

При необходимости возможно уменьшения сопротивления растекания тока искусственных заземлителей путем увеличения диаметра стержней и расстояния между ними.

Заключение

В данной бакалаврской работе разработан однофазный силовой масляный трансформатор с естественной циркуляцией воздуха и масла, с регулированием напряжения под нагрузкой.

Разработка трансформатора основана на технико-экономическом расчете оптимального варианта конструкции. Однако в него внесены коррективы, вызванные технологическими и производственными ограничениями. В результате использован вариант конструкции, характеризующийся значением конструктивного коэффициента равного $\beta = 2$, которому соответствует значения диаметра стержня $D_{СТ} = 0,35 м$ и высота обмоток $H_{об.м} = 1,74 м$. Благодаря принятому техническому решению удалось спроектировать высоковольтный (220кВ) однофазный трансформатор небольшой мощности (2500 кВА), удовлетворяющий техническим заданиям и стандартам в области трансформаторостроения. Таким образом, цель выпускной квалификационной работы достигнута.

Список используемых источников

1. Three Phase Transformer, 2015, Leona Lee, 22015, <http://www.electronicshub.org/three-phase-transformer>
2. Вольдек, А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы / А.И. Вольдек, В.В. Попов.- М.: Высшая школа, 2008. — 320 с
3. Emergency and Standby Power Systems for Buildings, 2014, Yunfei Xu, Xiangning Xiao, Yamin Sun, 20330, <http://www.archtoolbox.com/materials-systems/electrical/emergency-power-systems-for-buildings>
4. Using Single-Phase Transformers to Create 3-Phase Systems, 2009, Gary Arthurs, 10201, <http://ecmweb.com/basics/using-single-phase-transformers-create-3-phase-systems>
5. Three Phase to Single Phase, 2015, Richard Hewitt, 9705, http://carroll-meynell.com/cms/page/view/page_id/12/
6. Single phase vs three phase power systems, 2014, 11095, <http://federalpacific.com/training/transformer-basics/chapter-3>
7. Беспалов, В. Я. Электрические машины : учеб. пособие для вузов / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. - Гриф УМО. - Москва : Академия, 2006. - 313с.
8. Дымков, А.М. Расчет и конструирование трансформаторов / А.М. Дымков.- М.: Высш. школа, 2006.- 264 с.
9. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов / П.М. Тихомиров. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 2006. – 528 с.
10. ГОСТ Р 52719-2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.- Минск, 2007.— 47 с.
11. Игнатович, В. М. Электрические машины и трансформаторы: учеб. пособие / В. М. Игнатович, Ш.С. Ройз.- Томский политехнический университет. - 6-е изд., испр. - Томск : ТПУ, 2013. - 181 с.

12. Терентьева, М.А. Расчет силовых масляных трансформаторов. Методические указания к курсовому проектированию / М. А. Терентьева, Ю. И. Борю, Е.М. Леунова. – Тольятти: ТГУ, 2006.- 120 с.
13. РД16.257-85 Трансформаторы силовые. Стержни и ярма магнитных систем. Размеры.
14. Гончарук, А. И. Расчет и конструирование трансформаторов : учеб. для техникумов / А. И. Гончарук. - Москва : Высшая школа, 2006. - 257 с.
15. Терентьева, М.А. Трансформатор силовой масляный : альбом чертежей : учеб. наглядное пособие для изучения дисц. "Конструкции, расчет, проектирование, потребительские свойства электромаг. устройств и электромех. преобразователей энергии" и "Электромеханика" студ. электротехн. спец. / М. А. Терентьева, Е. М. Леунова. - ТГУ. - Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012. - 60 с.
16. Терентьева, М. А. Расчет силовых масляных трансформаторов : практикум по дисц. "Электромеханика" и "Проектирование электромех. преобразователей энергии" / М. А. Терентьева, Е. М. Леунова.- Тольятти: ТГУ, 2008. - 58 с.
17. РД16.418-88 «Тепловой расчет отводов».
18. Лазарев, В.И. Руководство по проведению расчетов электродинамической стойкости обмоток трансформаторов при коротком замыкании / В.И. Лазарев. –Запорожье: изд-во ЗЭТЗ, 2006.- 231 с.
19. В. Ш. Аншин, З. И. Худяков Сборка трансформаторов / Аншин В.Ш., З.И. Худяков.- М.: Высшая школа, 2006.- 238 с.
20. Горина, Л.Н. Безопасность и экологичность объекта дипломного проекта. Методические указания к дипломному проектированию/ Л.Н.Горина.– Тольятти: изд-во ТГУ, 2006. – 17с.