

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

Гайнуллина Данагул Азаматкызы

Повышение эффективности сборки трансформатора изменением конструкции магнитопровода

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

6B07101– Энергетика

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казакский национальный исследовательский тех-
нический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева

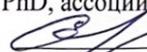
Кафедра «Энергетика»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева»
Институт энергетики
и машиностроения

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой «Энергетика»

PhD, ассоциированный профессор

 Е. А. Сарсенбаев

«18» 06 2024 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

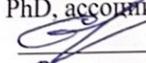
На тему: «Повышение эффективности сборки трансформатора изменением конструкции маг-
нитопровода»

6B07101– Энергетика

Выполнил:

Гайнуллина Д. А.

Рецензент
PhD, ассистент- профессор
АЛТ Университет им. М.Тынышпаева
 Ж.Ж. Калиев
«15» 06 2024 г.

Научный руководитель
PhD, ассоциированный профессор
 Е.А. Сарсенбаев
«18» 06 2024 г.

Алматы 2024

ГРАФИК
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Расчет основных размеров трансформатора	12.02.2024-26.02.2024	—
Расчет обмоток НН и ВН	26.02.2024-18.03.2024	—
Расчет потерь короткого замыкания	18.03.2024-01.04.2024	—
Расчет потерь холостого хода	01.04.2024-22.04.2024	—
Тепловой расчет и расчет систем охлаждения	22.04.2024-13.05.2024	—

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

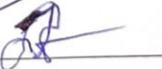
Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Расчетная часть	Е.А.Сарсенбаев, PhD, ассоциированный профессор	3.06.2024	
Экономическая часть	Е.А.Сарсенбаев, PhD, ассоциированный профессор	10.06.2024	
Нормоконтролер	А.О.Бердибеков, магистр, старший преподаватель	12.06.2024	

Научный руководитель



Е.А. Сарсенбаев

Задание принял к исполнению обучающийся



Д. А. Гайнуллина

Дата

" 25 " 01 2024 г.

АНДАТПА

Бұл дипломдық жобада практика жұмысы өткен мекемедегі «екі еселі пакет» бойынша жасалған трансформатордың қысқа тұйықталу және бос жүріс параметрлері есептелуі жасалды. Негізгі бөлімде төменгі кернеу мен жоғарғы кернеу бойынша орамдарының есебі жүргізілді. Соған орай қысқа тұйықталу шығындары, қысқа тұйықталу кернеуі, бос жүріс шығындары, бос жүріс тогы анықталды. Сонымен қатар трансформатор тенегінің жылулық есебі жасалынды.

АННОТАЦИЯ

В этой дипломной работе произведен расчет параметров короткого замыкания и холостого хода трансформаторов, выполненного по «двойному пакету» в предприятии, где проходила практическая работа. В основной части расчет обмоток проводился под низкое и высокое напряжение. Соответственно определялись потери короткого замыкания, напряжение короткого замыкания, потери холостого хода, ток холостого хода. Также был сделан тепловой расчет бака трансформатора.

ANNOTATION

In this diploma project, the short-circuit and no-load parameters of transformers are calculated according to the “double package” in the company where the practical work took place. In the main part of diploma project, the windings were calculated at low and high voltages. According, short-circuit losses, short-circuit voltage, no-load losses, no-load current were determined. Thermal calculation of the transformer tank was also done.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение.....	7
1	Сведения о предприятии ТОО УТЗ.....	8
1.1	Краткий технологический процесс.....	8
1.2	Величина трансформатора из «двойного пакета».....	8
2	Выявление главных размеров трансформатора.....	12
2.1	Конструктивная часть трансформатора и их выбор.....	12
2.2	Обмотки и их материал для данного трансформатора.....	13
2.3	Изоляционный материал для обмоток.....	14
2.4	Главные размеры трансформаторов.....	15
3	Начало вычисления обмотки.....	18
3.1	Позиционные утверждения для вычисления обмоток.....	18
3.2	Вычисление обмотки низкого напряжения.....	18
3.2.1	Вычисление 1-го варианта низкого напряжения обмоток.....	20
3.2.2	Вычисление 2-го варианта низкого напряжения обмоток	24
3.3	Вычисление обмотки высокого напряжения.....	28
3.3.1	Вычисление 1-го варианта высокого напряжения обмоток.....	29
3.3.2	Вычисление 2-го варианта высокого напряжения обмоток.....	33
4	Вычисление К.З.....	37
4.1	Вычисление потерь К.З.....	37
4.2	Вычисление напряжения К.З.....	40
5	Главная часть трансформатора- магнитная	42
5.1	Установление магнитной системы под «двойной пакет».....	42
5.2	Вычисление потерь Х.Х.....	45
5.3	Вычисление тока Х.Х.....	48
6	Выявление повышения эффективности сборки	52
6.1	Параметры холостого хода и их зависимость от эффективности сборки.....	52
7	Вычисление тепловой системы.....	54
7.1	Проверочное вычисление обмотки.....	54
7.2	Тепловое вычисление бака трансформатора.....	57
	Заключение.....	65
	Список использованной литературы.....	66

ВВЕДЕНИЕ

Трансформаторы играют не мало важную роль в сфере энергетики. Питание целых предприятия, жилых домов, городов и стран осуществляется с помощью трансформаторов. Распределение электрической энергии, экономия, эксплуатация все это зависит от силовых трансформаторов. Как мы все знаем трансформатор преобразует электрическую энергию определённого напряжения в другое значение напряжения. Есть понижающие и повышающие трансформаторы, по значению мощности в предприятии ТОО «УТЗ» есть от ТМГ 25 до ТМГ 2500, по повышению мощности растут и габариты трансформатора. По типу соединения проводов делятся на звезду, треугольник и зигзаг.

Параметры короткого замыкания и холостого хода является определяющими по допускам потери энергии. И потери энергии короткого замыкания возрастают пропорционально возрастанию плотности тока и массы обмотки, масса обмотки пропорциональна сечению витка. В вычислениях в данной работе рассмотрена различия между стандартным пакетом пластин трансформатора и трансформатором из «двойного пакета». «Двойной пакет» был введен в производство после выявления допуска из испытательной станции. Трансформаторы мощностью 1000 и 1600 кВА есть, допуск другим мощностям нет. Цель предприятия введения «двойного пакета» было- снижение времени сборки и также трудоемкости рабочих.

1 Сведения о предприятии-производителе оборудования

ТОО «Уральский трансформаторный завод» основан в 2015 году в рамках Государственной программы индустриально-инновационного развития. Общая стоимость проекта составило 5,5 млрд тенге. На сегодняшний день мощность завода предусматривает выпуск продукции в количестве 12 000 трансформаторов в год. Завод имеет ЦПП цех, цехи обмотки, цехи покраски, цехи сборки, испытательную часть, склад, и также офисы под ними. Трансформаторы производят для международного экспорта, такие как Россия, Грузия, Армения больше стран СНГ, меньшую доля составляет страны Европы как Франция, Италия. Вся доля держится на экспорте, но из-за частных браков усиливается и их риск расторжения договоров.

1.1 Краткий технологический процесс

Технологический процесс ТОО «УТЗ» содержит 10 этапов: 1) изготовление основания, каркаса и бака трансформаторов; 2) изготовление крышки трансформаторов; 3) изготовление рамы трансформаторов; 4) Покраска металлоконструкции трансформаторов; 5) изготовление магнитопровода трансформаторов; 6) изготовление обмоток НН трансформаторов; 7) изготовление обмоток ВН трансформаторов; 8) изготовление обмоток Р. Регулировочная зона ВН (ТМ(Г)-1000-2500); 9) сборка активной части (сборка и сварка отводов НН), (2 сборка); 10) Сборка трансформатора (3-сборка).

Все трансформаторы создаются согласно чертежам главного технического отдела, трансформаторы 25 кВ до 2500 кВ есть свои отдельные чертежи с подробными размерами и деталями. Чертеж состоит из магнитопровода, остова, установки обмоток и активной части. Чертежи все выполняются в программе КОМПАС- 3D.

В производстве сперва электротехническую сталь фирмы SOENEN ТИ 25006.00006, ТИ 25006.00007, ИБиОТ №200001.0013:

- 1) продольная резка анизотропной стали на линии SL-1000 «SOENEN»;
- 2) Линия поперечной анизотропной резки стали L.A.E.; Tuboly-Astronic AG.

Заготовки электрической стали складывают и с помощью шихтовки делают сборку магнитопровода. Сборка магнитопровода(шихтовка)- остова без верхнего ярма. Количество комплектов пластин, количество пластин, схема шихтовки указаны в чертеже. Допускаются зазоры в стыках стержневых и ярмовых пластин до 0,2 мм. Количество зазоров не должно превышать 5% от общего количество стыков магнитопровода. В итоге получаем остов трансформатора.

1.2 Величины трансформатора из «двойного пакета»

Нужно сделать расчет трехфазного двухобмоточного трансформатора используя следующие данные:

- S_H – 1000 кВА;
- $U_{ВН}$ – 10, кВ;
- $U_{НН}$ – 0,4, кВ;
- f_1 – 50 Гц;
- ΔP_0 – 2100 Вт;
- P_K – 10800 Вт;
- U_K – 5,5 %;
- i_0 – 1,4 %;
- Число ступеней- 5;
- Сечение стержня- 0,02961 м²;
- Диаметр стержня и ярма -0,206 м;
- Коэффициент заполнения- 0,97;
- Сечение ярма- 0,0333 м².

Основные объемы электроэнергии, используемые при расчете, включают:

- Мощности на одну фазу и на стержень;
- Номинальные линейные токи обмоток высшего напряжения (ВН) и низшего напряжения (НН);
- Номинальные фазные токи и напряжения обмоток ВН и НН;
- Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания;
- Испытательные напряжения для элементов обмоток ВН и НН.

Эти электрические значения определяются по следующим уравнением.

Мощность одной фазы трансформатора:

$$S_{\phi} = \frac{S_H}{m} \quad (1.1)$$

$$S_{\phi} = \frac{1000}{3} = 333,3 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

где S_H – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

m – число фаз.

Мощность на одном стержне:

$$S' = \frac{S_H}{c}, \quad (1.2)$$

где c – число активных (несущих обмоток) стержня магнитопровода трансформатора.

Для трехфазного ($m = 3$) трехстержневого ($c = 3$) трансформатора:

$$S_{\phi} = S' \quad (1.3)$$
$$S' = \frac{S_H}{3} = 333,3 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Номинальные линейные токи обмоток:

$$I_{ВН} = \frac{S_H \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}}, \quad (1.4)$$
$$I_{ВН} = \frac{1000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3} = 57,73 \text{ А}.$$

$$I_{НН} = \frac{S_H \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{НН}}, \quad (1.5)$$
$$I_{НН} = \frac{1000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 0,4 \times 10^3} = 1443,37 \text{ А}.$$

где $U_{ВН}$ и $U_{НН}$ – напряжение соответствующих обмоток ВН и НН при использовании нулевых ответвлений обмотки ВН, В.

Фазный ток обмотки одного стержня трехфазного трансформатора: при соединении обмоток в звезду или зигзаг

$$I_{\phi} = I, \quad (1.6)$$
$$I_{\phi} = 1443,37 \text{ А}.$$

при соединении обмоток в треугольник

$$I_{\phi} = \frac{I}{\sqrt{3}}, \quad (1.7)$$
$$I_{\phi} = \frac{57,73}{\sqrt{3}} = 33,3 \text{ А},$$

где I – номинальный ток обмотки: $I = I_{ВН}$ обмотки высокого напряжения, $I = I_{НН}$ обмотки низкого напряжения.

Фазное напряжение трёхфазного трансформатора: при соединении обмоток в звезду или зигзаг

$$U_{\Phi} = \frac{U}{\sqrt{3}}, \quad (1.8)$$

$$U_{\Phi} = \frac{0,4 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 230,9 \text{ В.}$$

при соединении обмоток фаз в треугольник:

$$U_{\Phi} = U, \quad (1.9)$$

$$U_{\Phi} = 10 \times 10^3 \text{ В.}$$

где U – номинальное линейное напряжение соответствующей обмотки:

$U = U_{\text{ВН}}$ обмотки высокого напряжения,

$U = U_{\text{НН}}$ обмотки низкого напряжения.

Таблица 1.1- При испытании при частоте пятьдесят Гц напряжение и составляющие его активная короткого замыкания для масляных

Класс напряжения, кВ	До 1000 В	6
$U_{\text{раб}}$, кВ	-	7.3
$U_{\text{исп}}$, кВ	5	25

$$U_a = \frac{P_k}{10 \cdot S_H}, \quad (1.10)$$

$$U_a = \frac{10800}{10 \times 1000} = 1,08 \%,$$

где P_k – мощность потерь к.з., Вт;

$$U_p = \sqrt{U_k^2 - U_a^2}, \quad (1.11)$$

$$U_p = \sqrt{5,5^2 - 1,08^2} = 5,39 \%.$$

где U_k – номинальное напряжение короткого замыкания.

2 Выявление главных размеров трансформатора

2.1 Конструктивная часть трансформатора и их выбор

Наиболее популярной в трансформаторостроении является ступенчатая плоская магнитная стержневая система, поперечное сечение стержня которой имеет форму круга, с цилиндрической обмоткой. Полосная магнитная система состоит из пластин электротехнической стали с наклонной стороной крайнего полюса и прямой стороной среднего полюса.

В заводе заказывают для магнитной системы трансформатора электротехническую холоднокатанную тонколистовую сталь марок толщиной 0,27мм, поставляемая в рулонах.

Для трансформатора мощностью 1000 кВ·А в основном используется сталь марки NV27S (марка СТО) или Т110-27S (марка ГОСТ 32482) с толщиной пластин 0,27 мм.

В таблице 2.1. рассмотрены предлагаемые величины индукции трансформаторных стержней.

Согласно техническим характеристикам, магнитная индукция данной марки - 0,97. Также приведены коэффициенты для выявления данного сечения. Рекомендуемое значение коэффициента заполнения площади круга- 0,925 при мощности трансформатора 1000 кВА.

Формула выявления коэффициента усиления ярма предоставлена ниже по соотношению сечению стали и ярм:

$$K_{\text{я}} = \frac{P_{\text{я}}}{P_{\text{с}}}, \quad (2.1)$$

Для стандартного трансформатора размеры пакетов пластин $K_{\text{я}} = 1,02 \div 1,03$:

$$K_{\text{я}} = \frac{0,0333}{0,02961} = 1,12.$$

Коэффициент усиления ярма 1,12 для двойного пакета при числе ступеней пять.

В предусмотрительном вычислении, при стандартном пакете пластин активное сечение рассчитывается по данной формуле:

$$P'_{\text{с}} = k_{\text{с}} \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (2.2)$$

$$\Pi'_c = 0,925 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,206 \cdot 0,206}{4} = 0,0308 \text{ м}^2.$$

$$K_c = K_{кр} \cdot K_3, \quad (2.3)$$

$$k_c = 0,925 \cdot 0,95 = 0,87.$$

Таблица 2.1- Величины коэффициента k_3 стали

При толщине мм,	Тип изоляции покрытия	k_3
0,35	Нагревостойкое	0,97
0,27		0,95

Величина активного сечения ярма:

$$\Pi'_я = K_я \cdot \Pi'_c \quad (2.4)$$

$$\Pi'_я = 1,12 \cdot 0,0308 = 0,0344 \text{ м}^2.$$

Остов трансформатора — это не только магнитная система, но и ключевой элемент, который объединяет все его части. Чтобы обеспечить жесткость и прочность этой конструкции, пакеты магнитопровода объединяются вместе путем прессовки и стяжки. Этот процесс не только делает трансформатор более устойчивым, но и снижает вибрацию и уровень шума во время его работы.

Для более мощных трансформатор, мощностью от 400 кВА и выше, используется специальная техника прессовки с использованием стеклоленты для обеспечения дополнительной прочности.

Прессовка ярм у трансформаторов с мощностью до 6300 кВА осуществляется с помощью стальных ярмовых балок, которые стягиваются шпильками. Это гарантирует надежное соединение между частями трансформатора.

2.2 Обмотки и их материал для данного трансформатора

Электролитическая медь как проводящий материал обладает примерно в 1,5 раза меньшим удельным электрическим сопротивлением по сравнению с алюминием, более высокой механической прочностью, легче поддается обработке и более устойчива к коррозии. Однако из-за недостатка меди алюминиевые обмотки также очень широко используются.

Делая вывод из вышеперечисленного трансформаторы производят полностью из алюминиевых обмоток, все мощности подчистую.

2.3 Изоляционный материал для обмоток

Изоляции обмоток очень важны. Для предотвращения браков трансформаторов, для долгого служения, и безопасной эксплуатации изоляция должна изолировать части трансформатора, находящиеся под напряжением. Самые главные: обмотки, отводы-вводы, переключатели. Чтобы разряды между не было или перенапряжения частый случай, при рабочим напряжении на заземление. При расчете очень важно обозначить все изоляционные промежутки, они могут вызвать пробой. Для обеспечения уникальности системы трансформаторов используются различные типы изоляции:

1) Кабельная бумага - часто используют именно ее, она многослойная марки КМ-120 и КМ-170. Для провода обмотки используют именно ее.

2) Телефонная бумага марки КТ-50. Телефонная бумага раньше в «УТЗ» использовалась в качестве межслойной изоляции отвода.

3) Лакоткань электроизоляционная. Лакоткань часто используют при необходимости эластичности и механической прочности, в таких местах как пайка, изгиб и т.д.

4) Бумага электроизоляционная крепированная. Она успешно применяется вместо лакоткани для изоляции отводов в ленточном варианте.

5) Хлопчатобумажные ленты. Эти ленты при расчете изоляции во внимание не берут.

6) Картон электроизоляционный часто применяется для главной изоляции, то есть ярмовой изоляции, междукатушечных прокладок, реек.

Для вычисления изоляционных величин даны нормированные расстояния для твердой изоляции из электротехнического картона или кабельной бумаги. По опытным проверкам проверенные допустимые величины главной и продольной изоляции можно брать в расчет. Если же конструкция изоляции меняется, то опытная проверка намечается сразу же.

Подробные данные о размерах главной изоляции для НН и ВН обмоток указаны, а в таблицах 2.3.1 и 2.3.2

Эти расстояния нужны при выборе провода обмоток низкого и высокого напряжения.

Таблица 2.3.1- Для обмоток НН расстояние при данном трансформаторе 1000 кВА

Трансформатор	$U_{исп}$, кВ	Расстояние от ярм до обмоток l_{01} , мм.	Расстояния от стержней до обмоток, мм.			
			δ_{01}	$a_{ц1}$	a_{01}	$l_{ц1}$
ТМГ-1000 кВА	5	15	4	6	15	18

Таблица 2.3.2 – Для обмоток ВН расстояние изоляции при данном трансформаторе 1000 кВА

Трансформатор	$U_{исп}$, кВ	Расстояние от ярм до обмоток l_{02} , мм.		Расстояния от высокого напряжения до низкого напряжения обмотки мм.		$l_{ц2}$, мм.	a_{22} , мм.	δ_{22} , мм.
		l_{02}	$\delta_{ш}$	a_{12}	δ_{12}			
ТМГ-1000 кВА	18	50	-	20	4	20	18	-

2.4 Главные размеры трансформаторов

Магнитная система и обмотки трехфазного двухобмоточного трансформатора с плоской трехстержневой магнитной системой изображены на рис. 2.4.

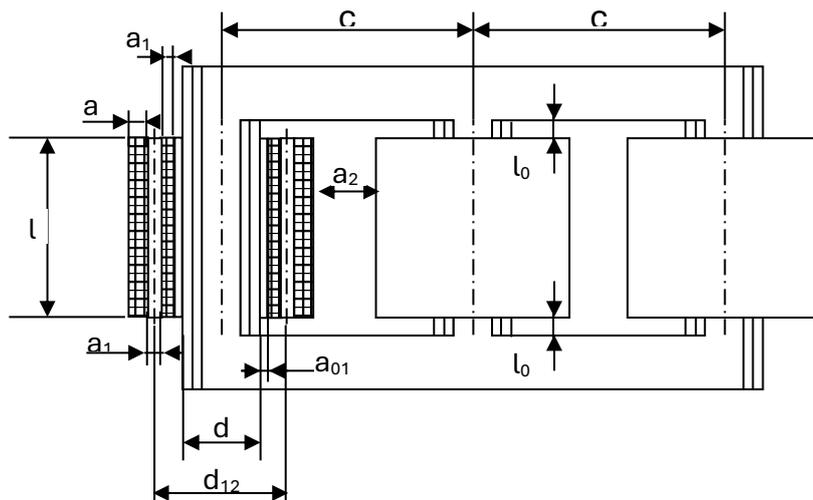


Рисунок 2.4 – Расстояния и величины активной части трансформатора

Вычисление расстояния трансформатора начинается с диаметра стержня который уже нам дань: $d = 0,206$ мм.

B'_C принимается 1,86 Тл : $\kappa_{кр} = 0,925$, $\kappa_3 = 0,95$, $\kappa_c = 0,87$.

По данной формуле находим средний: $a = 1,38 \cdot 1,06 = 1,4628$,

$$d'_{12} \approx a \cdot d_H, \quad (2.10)$$

$$d'_{12} \approx 1,4628 \cdot 0,206 = 0,3364 \text{ м.}$$

где a равен – 1,4 (оно определяется по мощности трансформатора в нашем случае 1000 кВА и по уровню потерь к.з.)

Высота обмотки:

$$l = \frac{\pi \cdot d'_{12}}{\beta_H}, \quad (2.11)$$

$$l = \frac{3,14 \cdot 0,3364}{2,019} = 0,52 \text{ м.}$$

Активные сечения стержня:

$$\Pi'_c = \kappa_c \cdot \frac{\pi \cdot d_H^2}{4}, \quad (2.13)$$

$$\Pi'_c = 0,87 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,23^2}{4} = 0,0361 \text{ м}^2.$$

Активные сечения ярма:

$$\Pi'_я = \kappa_я \cdot \Pi'_c, \quad (2.14)$$

$$\Pi'_я = 1,12 \cdot 0,0361 = 0,0404 \text{ м}^2,$$

где $\kappa_я = 1,12$.

Высота l_c :

$$l_c = l + 2 \cdot l_{02}, \quad (2.15)$$

$$l_c = 0,52 + 2 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 0,42 \text{ м,}$$

где $l_{02} = 50$ мм из таблицы 2.7.

Расстояние между осями соседних стержней:

$$C' = d'_{12} + a_{12} + 2 \cdot a_2 + a_{22}, \quad (2.16)$$

$$C' = 0,3364 + 20 \cdot 10^{-3} + 0,0747 + 18 \cdot 10^{-3} = 0,449 \text{ м.}$$

где $2 \cdot a_2$ – удвоенный радиальный размер обмотки ВН;

$$2 \cdot a_2 \approx b \cdot d_H, \quad (2.17)$$

$$2 \cdot a_2 \approx 0,325 \cdot 0,23 \approx 0,0747 \text{ м.}$$

где $a_{12} = 20$ мм, $a_{22} = 18$ мм, из таблицы 2.7.

$$b = 0,26 \cdot 1,25 = 0,325.$$

Таблица 2.7- Величина коэффициента b для по ГОСТ.

Мощность трансформатора, кВ·А	Класс напряжений, кВ	
	6,10	35
1000 – 6300	0,26 – 0,24	0,32 – 0,28

Примечание: Умножаем на 1,25 если обмотка проводов из алюминия.

Напряжение одного витка:

$$u'_B = 4,44 \cdot f_1 \cdot B'_C \cdot \Pi'_C, \quad (2.18)$$

$$u'_B = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,86 \cdot 0,0361 = 14,9 \text{ В.}$$

3 Начало вычисления обмотки

3.1 Позиционные утверждения для вычисления обмоток

Требования к обмоткам трансформатора делятся на два вида: 1) эксплуатационные и производственные. Эксплуатационным требованиям относятся надежность, механическая прочность, стойкость к нагревам трансформатора. Атмосферные перенапряжения и коммутационные тоже входят в состав эксплуатационным требованиям. Они возникают в сети, где заказчик будет использовать купленный трансформатор. Нагревание частей трансформатора такие как обмотки, из-за чего происходит потери, при перегрузках и коротких замыканиях, все они не должны приводить части трансформатора к износу, что может испортить срок службы трансформатора 25 лет. Но предприятие «УТЗ» дает гарантию службы трансформатора на 3 года. Что обычно случается браки раньше износа. Производственные требования «УТЗ» — это изготовить трансформаторы так чтобы приложить минимум усилий и денег. Вся суть «двойного пакета» в нем. Выбор обмоток будет проводиться по двум наиболее рекомендованных проводов, как и для обмотки низкого так и высокого напряжения. При их выборе важный параметр это плотность тока. От него зависит все, и масса, и размер, и параметры короткого замыкания и холостого хода, то есть потери в них.

Следующие главы про выбор обмоток между двумя вариантами наиболее подходящими:

Для низкого напряжения будут рассматриваться: обмотки из прямоугольного провода- первый вариант, и обмотки из алюминиевой ленты- второй вариант.

Для высокого напряжения будут рассматриваться: обмотки из круглого провода- первый вариант, и обмотки из круглого провода- второй вариант.

Из двух вариантов будет выбран тот, у кого масса и внешний диаметр меньше чем у другого варианта. Этот расчет показывает, что обмотки их масса сечение, имеет влияние на потери короткого замыкания и холостого хода, в следующих главах вычисления. Но самое главное, что эксплуатационные и производственные требования могут утвердиться при проекте «двойной пакет». Это утверждение будет доказано следующих главах.

3.2 Вычисление обмотки низкого напряжения

Вычисление начинается обмотки низкого напряжения, располагаемых у большинства трансформаторов между стержнем и обмоткой высокого напряжения. По этому эту обмотку считают первой. И все параметры и размеры обмотки НН и её элементов обозначают индексом «1»: $U_{ФНН} = U_{Ф1}$, $I_{ФНН} = I_{Ф1}$, и т. д.

Порядок вычисления:

1) Число витков одной фазы обмотки:

$$\omega'_1 = \frac{U_{\Phi 1}}{u'_B}, \quad (3.1)$$

$$\omega'_1 = \frac{230,9}{14,9} = 15,4,$$

$$\omega_1 = 16.$$

Полученное ω'_1 округляется до ближайшего целого числа чётного или нечётно. Для трёхфазного трансформатора ω_1 является также числом витков на один стержень.

2) Определяются уточнённые (изменённые в результате округления ω_1) значения напряжения одного витка и индукции в стержне:

$$u_B = \frac{U_{\Phi 1}}{\omega_1}, \quad (3.2)$$

$$u_B = \frac{230,9}{16} = 14,4 \text{ В.}$$

$$B_C = \frac{u_B}{4,44 \cdot f_1 \cdot \Pi'_c}, \quad (3.3)$$

$$B_C = \frac{14,4}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,0361} = 1,557 = 1,79 \text{ Тл.}$$

3) Средняя плотность тока в обмотках, обеспечивающая получения заданных потерь короткого замыкания определяется по выражениям:
для алюминиевых, А/м²

$$J_{CP} = 0,463 \cdot k_d \cdot \frac{P_k \cdot u_B}{S_H \cdot d'_{12}} \cdot 10^4, \quad (3.4)$$

$$J_{CP} = 0,463 \cdot 0,93 \frac{10800 \cdot 14,4 \cdot 10^4}{1000 \cdot 0,3364} = 1,99 \cdot 10^6 \text{ А/ м}^2.$$

где k_d – коэффициент, учитывающий добавочные потери в обмотке, потерь в отводах, стенках бака и других конструкциях от гистерезиса и вихревых токов, от воздействия полей рассеяния. Значения $k_d = 0,93$ из таблицы 3.1.

Таблица 3.1- Значения k_d для трехфазных трансформаторов

Номинальная мощность трансформатора, кВ·А	До 100	160 – 630	1000 – 6300
k_d	0,97	0,96 – 0,93	0,93 – 0,85

Сверить рассчитанное значение J_{CP} (с целью исключить ошибки в расчете) можно по данным таблицы 3.2. Из этой таблицы также выбирается J_{CP} , если потери короткого замыкания не заданы.

Таблица 3.2 - Средняя плотность тока в обмотках J_{CP} (МА/м²) для масляных трансформаторов с потерями короткого замыкания по ГОСТ

Номинальная мощность трансформатора, кВ·А	25 – 40	63 – 630	1000 – 6300
Медь	1,8 – 2,2	2,2 – 3,5	2,2 – 3,5
Алюминий	1,1 – 1,8	1,2 – 2,5	1,5 – 2,6

4) Ориентировочное сечение витка:

$$P'_B = \frac{I_{\Phi 1}}{J_{CP}}, \quad (3.5)$$

$$P'_B = \frac{1443,37}{1,99 \cdot 10^6} = 725 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 725 \text{ мм}^2,$$

умножением полученного результата на 10^6 сечение витка перевести в мм². Дальнейший ход расчёта зависит от типа выбранной обмотки.

3.2.1 Вычисление 1-го варианта низкого напряжения обмоток

Вычисление первого варианта – это цилиндрический многослойный прямоугольный провод. В этом проводе обмотки по своей высоте находится очень

плотно между собой. Количество параллельных проводов может зависеть от значения тока в данной витке, один или несколько параллельных определяется величиной тока витков. Плашмя или на ребро как укладывается прямоугольный провод позже, но все-таки лучше сделать плашмя, потому что, если укладывать на ребро обмотки ненадежна по сравнению с способом укладки плашмя. Укладка провода может быть осуществлена плашмя или на ребро.

Для требования безопасного охлаждения обмоток, нужно сделать так чтобы все слои обмотки омывался с одной стороны маслом.

Решение между выбором разных видов межслойной изоляции будет проводиться выяснением плотности теплового потока на месте охлаждения на ее поверхностной стороне, в сравнении ее с допущенным значением.

Последовательность вычисления:

1) Допустимый радиальный размер металла обмотки НН между охлаждаемыми маслом поверхностями:

$$A_{1\text{доп}} = \frac{q_{1\text{доп}} \cdot K_{3к}}{1,72 \cdot J_{\text{ср}}^2 \cdot 10^{-8}}, \quad (3.6)$$

$$A_{1\text{доп}} = \frac{800 \cdot 0,8}{1,72 \cdot (2,24 \cdot 10^6)^2 \cdot 10^{-8}} = 0,0074 \text{ м.}$$

где $q_{1\text{доп}}$ – допустимое значение плотности теплового потока; для цилиндрических обмоток из прямоугольного алюминиевого провода $q_{1\text{доп}} = 600 \div 800 \text{ Вт/м}^2$;

$K_{3к}$ – коэффициент, учитывающий закрытие охлаждающего канала рейками и изоляционными материалами: $K_{3к} = 0,75 \div 0,80$.

2) После определения сечения витка и допустимого значения радиального размера металла обмотки, для прямоугольной обмотки из алюминия по каталогу подбираем наиболее подходящий провод который соответствует следующим требованиям для трансформатора:

а) нужна упрощенная намотка обмотки в станке с которой возможен шанс получения компактного размещения на магнитной системе, поэтому рекомендовано применение крупное сечение провода.;

б) способ укладки намотки плашмя или на ребро выбираем, исходя из значений $A_{1\text{доп}}$ и размеров провода без изоляции: необходимо, чтобы получаемый размер металла одного слоя при намотке на ребро или двух трёх слоёв при намотке плашмя был примерно равен $A_{1\text{доп}}$;

в) число параллельных проводов $n_{в1}$ должно быть не более 4–6 при намотке плашмя и не более 6 – 8 при намотке на ребро;

г) все провода должны иметь одинаковые размеры поперечного сечения;

д) при $U_{\text{исп}} = 5 - 85$ кВ использовать прямоугольный провод с толщиной изоляции на две стороны $2\delta = 0,45$ (0,50)мм;

е) радиальные размеры всех параллельных проводов витка должны быть равны между собой;

ж) при намотке на ребро отношение радиального размера к осевому не менее 1,3 и не более 3;

з) расчетная высота обмотки должна быть на 5 – 15 мм меньше 1.

Подобранные размеры провода витка записываются по форме:

число параллельных проводов $\times \frac{\text{размеры провода без изоляции}}{\text{размеры провода с изоляцией}}$

или $n_{\text{в1}} \times \frac{a \times b}{a' \times b'}$

$$\text{АПБ} \times 6 \times \frac{7 \times 18}{7,5 \times 18,5}$$

так как $2a \approx A_{1\text{ДОП}}$ и отношение $b/a > 3$, то обмотку выполняем плашмя.

3) Находим полное сечение витка из $n_{\text{в1}}$ параллельных проводов:

$$P_{\text{в1}} = n_{\text{в1}} \cdot P_1'' \cdot 10^{-6}, \quad (3.7)$$

$$P_{\text{в1}} = 6 \cdot 125 = 750 \text{ мм}^2.$$

где P_1'' – сечение одного витка, мм^2 .

4) Находим плотность тока:

$$J_1 = \frac{I_{\Phi 1}}{P_{\text{в1}}}, \quad (3.8)$$

$$J_1 = \frac{1443}{750 \cdot 10^{-6}} = 1,9 \cdot 10^6 \text{ А/ м}^2.$$

5) Вычисляем осевой размер витка, м:

$$h_{\text{в1}} = n_{\text{в1}} \cdot b' \cdot 10^{-3}, \quad (3.9)$$

$$h_{\text{в1}} = 6 \cdot 18,5 \cdot 10^{-3} = 0,111 \text{ м}$$

6) Вычисляем по данной формуле число витков обмотки в одном слое:

$$w_{\text{сл1}} = \frac{l_1 - (0,005 \div 0,015)}{h_{\text{в1}}} - 1, \quad (3.10)$$

$$w_{\text{сл1}} = \frac{0,52 - 0,01}{0,111} - 1 = 3,5.$$

где l_1 – высота обмотки НН; $l_1 = l$ слагаемым (0,005÷0,015) учитывается возможность увеличения осевого размера из-за неплотности намотки.

7) Вычисляем нужное число слоёв обмотки:

$$n_{\text{сл1}} = \frac{w_1}{w_{\text{сл1}}}, \quad (3.11)$$

$$n_{\text{сл1}} = \frac{16}{3,5} = 4,5,$$

$$n_{\text{сл1}} = 5.$$

округляется до большего.

8) Вычисляем радиальный размер металла обмотки:

$$A_1 = a \cdot n_{\text{сл1}}, \quad (3.12)$$

$$A_1 = 7 \cdot 5 = 35 \text{ мм.}$$

где a – радиальный размер провода без изоляции, при намотке на ребро
 $a = b$.

Так как $A_1 > A_{1\text{доп}}$ – то обмотку делим на 4 катушки с радиальным размером металла в каждой $A'_{1\text{доп}} \leq A_{1\text{доп}}$, а между катушками выполняется охлаждающий масляный канал.

9) Радиальный размер межслойного канала; выбирается по условной изоляции $a_{11} \leq 4$ мм при $U_{1\phi} \leq 1$ кВ и проверяется по условиям отвода тепла по табл. 3.3; применяется наибольшее значение, определённое по этим условиям: $a_{11} = 8$ мм.

10) Изоляцию между слоями обмотки принимаем двумя слоями электроизоляционного картона толщиной по 0,5мм, следовательно $\Delta_{\text{И}} = 0,5 \cdot 2 = 1$ мм.

11) Радиальный размер обмотки с охлаждающим каналом:

$$a_1 = [a' \cdot n_{\text{сл1}} + a_{11} + \Delta_{\text{И}} \cdot (n_{\text{сл1}} - 1)] \cdot 10^{-3}, \quad (3.13)$$

$$a_1 = [7,5 \cdot 5 + 3 \cdot 8 + 1 \cdot (5 - 1)] \cdot 10^{-3} = 0,065 \text{ м.}$$

где a' – радиальный размер провода с изоляцией.

$\Delta_{И}$ – толщина межслойной изоляции.

a_{11} – ширина охлаждающего канала, так как принятое число катушек равно 4 то количество охлаждающих каналов равняется 3.

Таблица 3.3 - Минимальное ширина охлаждающих каналов в обмотках масляных трансформатор

Вертикальные каналы				Горизонтальные каналы	
Длина канала, мм 500-1000	Обмотка-обм, 6-8 мм	Обм–цилиндр, 5-6 мм	Обм–стержень, 6-8 мм	Длина кан, 60 - 70 мм	Обмотка-обм, 6 мм

12) Внутренний диаметр обмотки:

$$D'_1 = d_H + 2 \cdot a_{01} \cdot 10^{-3}, \quad (3.14)$$

$$D'_1 = 0,23 + 2 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 0,26 \text{ м.}$$

где a_{01} – ширина канала между обмоткой НН и стержнем; определяется из условий изоляции обмотки из таблицы 2.7, $a_{01} = 15$ мм.

13) Наружный диаметр обмотки:

$$D''_1 = D'_1 + 2 \cdot a_1, \quad (3.15)$$

$$D''_1 = 0,26 + 2 \cdot 0,065 = 0,39 \text{ м.}$$

14) Масса металла обмотки:

$$G_{01} = 8,47 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{CP} \cdot w_1 \cdot П_{В1} = 8,47 \cdot 10^3 \cdot c \cdot \frac{D'_1 + D''_1}{2} \cdot w_1 \cdot П_{В1}, \quad (3.16)$$

$$G_{01} = 8,47 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot \frac{0,26 + 0,39}{2} \cdot 16 \cdot 750 \cdot 10^{-6} = 99 \text{ кг.}$$

3.2.2 Вычисление 2-го варианта низкого напряжения обмоток

Вычисление второго варианта – это обмотки цилиндрический многослойный из алюминиевой ленты. Алюминиевые ленты имеют высокий уровень теплопроводности в направлении оси и радиальных направлении, также температура провода распределяется равномерно, направлении ширины и высоты чем

обмотки изолированных проводов. Алюминиевые ленты повода с такими характеристиками имеют значение $q = 1000 \div 1200 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Определив w_1 , J_{CP} и Π'_1 , и значения u_{B} , V_{C} вычисление обмотки продолжатся по определенном последовательности:

1) Находим ширину и толщину ленты в мм:

ширина $b_{\text{л}} = l_1$ с округлением до 10мм

$$b_{\text{л}} = 0,52 \text{ м} = 520 \text{ мм}$$

толщина $\Delta'_{\text{л}} = \frac{\Pi'_{\text{B1}}}{b_{\text{л}}}$ с округлением до 0,1 мм

$$\Delta'_{\text{л}} = \frac{725}{520} = 1,39 \text{ мм.}$$

2) Находим данную площадь сечения алюминиевой ленты или сеч.витка м^2 :

$$\Pi'_{\text{B1}} = \Pi_{\text{л}} = b_{\text{л}} \cdot \Delta'_{\text{л}} \cdot 10^{-6}, \quad (3.17)$$

$$\Pi'_{\text{B1}} = 520 \cdot 1,39 \cdot 10^{-6} = 764,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

3) Находим плотность тока в алюминиевой ленте, $\text{А}/\text{м}^2$:

$$J_1 = \frac{I_{\Phi 1}}{\Pi_{\text{B1}}}, \quad (3.18)$$

$$J_1 = \frac{1443,37}{764,5 \cdot 10^{-6}} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ А}/\text{м}^2.$$

4) Определяем допустимый радиальный размер металла обмотки:

$$A_{1\text{доп}} = \frac{q_{1\text{доп}} \cdot K_{\text{Зк}}}{1,72 \cdot J_{\text{CP}}^2 \cdot 10^{-8}}, \quad (3.19)$$

$$A_{1\text{доп}} \leq \frac{1200 \cdot 0,8}{1,72 \cdot 1,8^2 \cdot 10^{12} \cdot 10^{-8}} = 0,017 \text{ м.}$$

5) Вычисляем лимитное число витков, которое может помещаться в данный размер:

$$w_{\text{ПР}} = \frac{A_{1\text{доп}}}{\Delta_{\text{л}}} \cdot 10^3, \quad (3.20)$$

$$w_{\text{ПР}} = \frac{0,017}{1,22} \cdot 10^3 = 14.$$

Так как $w_{\text{ПР}} < w_1$, по этому обмотку необходимо делить на две катушки с числом витков, меньшим $w_{\text{ПР}}$, а между катушками выполнять осевой охлаждающий канал шириной:

$$a_{11} = 0,01 \cdot l_{1,,} \quad (3.21)$$

$$a_{11} = 0,01 \times 0,52 = 0,0052 \text{ м.}$$

$$w'_1 = 8, w''_1 = 8.$$

где w'_1 и w''_1 – число витков в катушках.

б) Радиальный размер катушек. Если витки обмоток находятся в двух катушках $w_1 = w'_1 + w''_1$, то

$$a'_1 = (w'_1 \cdot \Delta_{\text{л}} + (w'_1 - 1) \cdot \Delta_{\text{и}}) \cdot 10^{-3}, \quad (3.22)$$

$$a'_1 = (8 \cdot 1,39 + (8 - 1)2 \cdot 0,12) \cdot 10^{-3} = 0,012 \text{ м.}$$

$$a''_1 = (w''_1 \cdot \Delta_{\text{л}} + (w''_1 - 1) \cdot \Delta_{\text{и}}) \cdot 10^{-3}, \quad (3.23)$$

$$a''_1 = (8 \cdot 1,22 + (8 - 1)2 \cdot 0,12) \cdot 10^{-3} = 0,012 \text{ м.}$$

где $\Delta_{\text{и}}$ – толщина межвитковой изоляции; при выполнении изоляции одним слоем кабельной бумаги К-120:

$$\Delta_{\text{и}} = 0,12 \text{ мм, двумя слоями } \Delta_{\text{и}} = 2 \cdot 0,12 \text{ мм.}$$

7) Радиальный размер обмотки НН:

$$a_1 = a'_1 + a''_1 + a_{11}, \quad (3.24)$$

$$a_1 = 0,012 + 0,012 + 0,0052 = 0,0292 \text{ м.}$$

8) Диаметры обмотки:
внутренний

$$D'_1 = d_{\text{Н}} + 2 \cdot a_{01}, \quad (3.25)$$

$$D'_1 = 0,23 + 2 \cdot 0,015 = 0,26 \text{ м.}$$

внешний

$$D_1' = D_1' + 2 \cdot a_1, \quad (3.26)$$

$$D_1'' = 0,26 + 2 \cdot 0,0292 = 0,318 \text{ м.}$$

9) Масса металла обмотки:

$$G_{01} = 8,47 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{CP} \cdot w_1 \cdot \Pi_{B1} = 8,47 \cdot 10^3 \cdot c \cdot \frac{D_1' + D_1''}{2} \cdot w_1 \cdot \Pi_{B1}, \quad (3.27)$$

$$G_{01} = 8,47 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot \frac{0,26 + 0,318}{2} \cdot 16 \cdot 750 \cdot 10^{-6} = 88 \text{ кг.}$$

10) Плотность теплового потока на поверхности катушек:

$$q_1' = \frac{1,72 \cdot A_1' \cdot J_1^2 \cdot 10^{-8}}{K_{3K}}, \quad (3.28)$$

$$q_1' = \frac{1,72 \cdot 11,12 \cdot 10^{-3} \cdot 1,8^2 \cdot 10^{12} \cdot 10^{-8}}{0,8} = 777,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

$$q_1'' = \frac{1,72 \cdot A_1'' \cdot J_1^2 \cdot 10^{-8}}{K_{3K}}, \quad (3.29)$$

$$q_1'' = \frac{1,72 \cdot 11,12 \cdot 10^{-3} \cdot 1,8^2 \cdot 10^{12} \cdot 10^{-8}}{0,8} = 777,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

где A_1' , A_1'' - радиальные размеры металла катушек:

$$A_1' = w_1' \cdot \Delta_L, \quad (3.30)$$

$$A_1'' = w_1'' \cdot \Delta_L, \quad (3.31)$$

$$A_1' = 8 \cdot 1,39 = 11,12 \text{ мм,}$$

$$A_1'' = 8 \cdot 1,39 = 11,12 \text{ мм.}$$

Полученное q не должно быть выше рекомендуемых значений.

Принимаю обмотку из алюминиевой ленты, так как её внешний диаметр и масса обмотки имеют меньшее значение чем у обмотки из прямоугольного провода что имеет место в трансформаторостроении.

3.3 Вычисление обмотки высокого напряжения

При вычисления обмотки высокого напряжение в обязательном порядке учитывается удобное выполнение ответвления для регулировки напряжения.

Обмотка высокого напряжения расположена после обмотки низкого напряжения по расположению стержня. Поэтому обмотку высокого напряжения считают второй и все параметры этой обмотки и её элементов обозначают индексом «2»: $U_{\text{ФВН}} = U_{\text{Ф2}}$; $I_{\text{ФВН}} = I_{\text{Ф2}}$.

Последовательность вычислений:

1) Определение числа витков, нужное для получения номинального напряжения:

$$w_{H2} = w_1 \cdot \frac{U_{\text{Ф2}}}{U_{\text{Ф1}}}, \quad (3.32)$$

$$w_{H2} = 16 \cdot \frac{10000}{230,9} = 692,9,$$

$$w_{H2} = 693.$$

2) Вычисляем число витков на одной ступени регулирования напряжения при соединении фазных обмоток высокого напряжения в треугольник:

$$w_p = \frac{\Delta U}{u_B}, \quad (3.33)$$

$$w_p = \frac{250}{14,4} = 17,3,$$

$$w_p = 17.$$

где ΔU – напряжение на одной ступени регулирования (разность напряжений двух соединённых ответвлений). Если ступень регулирования составляет 2,5%, то

$$\Delta U = 2,5 \cdot \frac{U_{\text{Ф2}}}{100}, \quad (3.34)$$

$$\Delta U = 2,5 \cdot \frac{10000}{100} = 250 \text{ В.}$$

3) Вычисляем число витков обмотки на ответвлениях:
на верхних ступенях напряжения

$$w_2 = w_{H2} + 2 \cdot w_P, \quad (3.35)$$

$$w_2 = 693 + 2 \cdot 17 = 727.$$

$$w_2 = w_{H2} + w_P, \quad (3.36)$$

$$w_2 = 693 + 17 = 710.$$

на основной ступени напряжения

$$w_2 = w_{H2}, \quad (3.37)$$

$$w_2 = 693.$$

на нижних ступенях напряжения

$$w_2 = w_{H2} - w_P, \quad (3.38)$$

$$w_2 = 693 - 17 = 676.$$

$$w_2 = w_{H2} - 2 \cdot w_P, \quad (3.39)$$

$$w_2 = 693 - 2 \cdot 17 = 659.$$

Для трёхфазного трансформатора найденное число витков является числом витков на один стержень.

4) Находим ориентировочную плотность тока, $\frac{A}{m^2}$:

$$J'_2 \approx 2 \cdot J_{CP} - J_1, \quad (3.40)$$

$$J'_2 \approx 2 \cdot 1,99 \cdot 10^6 - 1,8 \cdot 10^6 = 2,18 \cdot 10^6 \frac{A}{m^2}.$$

5) Находим ориентировочное сечение витка, m^2 (mm^2):

$$\Pi'_{B2} = \frac{I_{\Phi 2}}{J'_2}, \quad (3.41)$$

$$\Pi'_{B2} = \frac{57,73}{2,18 \cdot 10^6} = 26,4 \cdot 10^{-6} m^2.$$

3.3.1 Вычисление 1-го варианта высокого напряжения обмоток

Последовательность вычислений:

1) По Π'_{B2} выбирается провод марки АПБ сечением $\Pi_{B2} \geq \Pi'_{B2}$ с толщиной изоляции на обе стороны $2\delta=0,45$ (0,50) мм и записываются его обозначения по форме, приведённой в п. 3.2.1.

Допустимое значение плотности теплового потока радиального размера металла в обмотки:

$$A_{2\text{доп}} = \frac{K_{3K} \cdot q_{2\text{доп}}}{1,72 \cdot J_2^2 \cdot 10^{-8}}, \quad (3.42)$$

$$A_{2\text{доп}} = \frac{0,8 \cdot 900}{1,72 \cdot 2,18^2 \cdot 10^4} = 0,0088 \text{ м.}$$

где $q_{2\text{доп}}$ – допустимое значение плотности теплового потока на поверхности $q_{2\text{доп}} = 900 \text{ Вт/м}^2$.

$$\text{АПБ} \times 1 \times \frac{2,24 \times 12,5}{2,74 \times 13} \Pi'_{B2} = 27,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

2) Находим плотность тока $\frac{A}{\text{м}^2}$:

$$J_2 = \frac{I_{\Phi 2}}{\Pi_{B2}}, \quad (3.43)$$

$$J_2 = \frac{57,73}{27,6 \cdot 10^{-6}} = 2,09 \cdot 10^6 \frac{A}{\text{м}^2}.$$

3) Находим осевой размер обмотки:

$$l_1 = l_2 = 0,52 \text{ м.}$$

4) Находим осевой размер витка, м:

$$h_{B2} = n_{B2} \cdot b' \cdot 10^{-3}, \quad (3.44)$$

$$h_{B2} = 1 \cdot 13 \cdot 10^{-3} = 0,013 \text{ м.}$$

Число витков обмотки в одном слое:

$$w_{\text{сл}2} = \frac{l_1 - (0,005 \div 0,015)}{h_{B2}} - 1, \quad (3.45)$$

$$w_{\text{СЛ2}} = \frac{0,52-0,01}{0,013} - 1 = 38.$$

5) Находим нужное число слоёв в обмотке:

$$n_{\text{СЛ2}} = \frac{w_2}{w_{\text{СЛ2}}}, \quad (3.46)$$

$$n_{\text{СЛ2}} = \frac{727}{38} = 19.$$

где w_2 – число витков обмотки на верхней ступени напряжения: $w_2 = w_{\text{Н2}} + 2 \cdot w_{\text{Р}}$; $n_{\text{СЛ2}}$ округляется до большего ближайшего числа.

6) Вычисляем рабочее напряжение двух слоёв:

$$U_{\text{МСЛ}} = 2 \cdot w_{\text{СЛ2}} \cdot u_{\text{В}}, \quad (3.47)$$

$$U_{\text{МСЛ}} = 2 \cdot 38 \cdot 14,4 = 1094,4 \text{ В.}$$

По $U_{\text{МСЛ}}$ из таблицы 3.4 выбирается число слоёв и общая толщина кабельной бумаги в изоляции между двумя слоями обмотки.

Таблица 3.4 - Нормальная межслойная изоляция в многослойных цилиндрических обмотках

Суммарное рабочее напряжение двух слоёв обмотки, В	Число слоёв кабельной бумаги на толщину листов, мм	Выступ межслойной изоляции на торцах обмотки (на одну сторону), мм
До 1000	2×0,12	10
от 1001 до 2000	3×0,12	16
от 2001 до 3000	4×0,12	16
от 3001 до 4000	5×0,12	16

Примечание: При мощности от 1000 кВ·А межслойную изоляцию применять 4×0,12 мм, а выступ изоляции 20 мм.

7) Общий радиальный размер металла в обмотке ВН:

$$A_2 = a \cdot n_{\text{СЛ2}}, \quad (3.48)$$

$$A_2 = 2,24 \cdot 19 \cdot 10^{-3} = 0,042 \text{ м.}$$

число катушек помещаемых в этот размер равно 2,
где a – радиальный размер провода без изоляции.

Если $A_2 > A_{2\text{доп}}$, то обмотку необходимо разделить на концентрические катушки так, чтобы радиальный размер каждой из катушек был меньше или равным $A_{2\text{доп}}$. Между катушками устраиваются охлаждающие осевые масляные каналы, ширина которых по условиям охлаждения выбирается по таблице 3.3. при $U_{\text{мсл}} = 1 \div 6$ кВ – масляный канал шириной 6 – 8 мм и два слоя из картона толщиной 1 мм.

8) Определяются числа слоёв обмотки в каждой катушке. При их неравенстве большее число слоёв должны иметь наружные катушки

- от обмотки НН: 1 катушка – 9 слоёв;
- 2 катушка – 10 слоёв;

9) Радиальный размер обмотки:

$$a_2 = [a' \cdot n_{\text{сл}2} + \delta_{\text{мсл}} \cdot (n_{\text{сл}2} - 1) + a'_{22} \cdot n_{\text{к}}] \cdot 10^{-3}, \quad (3.49)$$

$$a_2 = [2,74 \cdot 19 + 4 \cdot 0,12(19 - 1) + (8 + 2)1] \cdot 10^{-3} = 0,07 \text{ м.}$$

где $\delta_{\text{мсл}}$ – толщина межслойной изоляции по таблице 3.4;

a'_{22} – принятая ширина охлаждающего канала;

$n_{\text{к}}$ – число охлаждающих каналов в обмотке.

11) Вычисляем внутренний диаметр обмотки:

$$D'_2 = D_1'' + 2 \cdot a_{12} \cdot 10^{-3}, \quad (3.50)$$

$$D'_2 = 0,318 + 2 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0,358 \text{ м.}$$

где a_{12} – размер осевого канала между обмотками низкого и высокого напряжения и толщина изоляционного цилиндра; выбирается $U_{\text{мсл}}$ обмотки высокого напряжения.

12) Находим наружный диаметр обмотки:

$$D_2'' = D'_2 + 2 \cdot a_2, \quad (3.51)$$

$$D_2'' = 0,358 + 2 \cdot 0,07 = 0,498 \text{ м.}$$

13) Вычисляем поверхность охлаждения:

$$P_{02} = c \cdot n \cdot k_{3K} \cdot \pi \cdot (D'_2 + D''_2) \cdot l_2, \quad (3.52)$$

$$P_{02} = 3 \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot 3,14(0,358 + 0,498) \cdot 0,52 = 6,7 \text{ м}^2.$$

при числе катушек $n = 2$, $k_{3K} = 0,8$.

14) Вычисляем массу металла обмотки:

$$G_{02} = 8,47 \cdot 10^3 \cdot c \cdot \frac{D'_2 + D''_2}{2} \cdot w_2 \cdot P_{B2}, \quad (3.53)$$

$$G_{02} = 8,47 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot \frac{0,358 + 0,498}{2} \cdot 727 \cdot 27,6 \cdot 10^{-6} = 218,2 \text{ кг.}$$

3.3.2 Вычисление 2-го варианта высокого напряжения обмоток

Эта обмотка далее рассчитывается в следующей последовательности.

1) По ориентировочному сечению витка P'_{B2} и по каталогу или справочникам проводов из алюминия для трансформаторов выбираем провод подходящего сечения или в единичных случаях два параллельных одинаковых провода.

$$P'_{B2} = 26,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Выбранные размеры провода записываются так:

$$\text{Марка провода} \times n_{B2} \times \frac{d_2}{d'_2} \text{ АПБ} \times 2 \times \frac{4,25}{4,65}.$$

где n_{B2} – число параллельных проводов;

d_2 – диаметр провода без изоляции;

d'_2 – диаметр изолированного провода:

$$d'_2 = d_2 + 2\delta, \quad d'_2 = 4,25 + 0,4 = 4,65 \text{ мм.}$$

2δ – размер двухсторонней изоляции; для провода круглого сечения при $U_{исп} = 5 \div 85 \text{ кВ}$, $2\delta = 0,3 \cdot (0,4) \text{ мм}$.

2) Вычисляем полное сечение витка:

$$P_{B2} = n_{B2} \cdot P''_2, \quad (3.54)$$

$$P_{B2} = 2 \times 14,2 = 28,4 \text{ мм}^2.$$

где P''_2 – сечение одного провода.

3) Находим плотность тока, $A/\text{мм}^2$:

$$J_2 = \frac{I_{\Phi 2}}{P_{B2}}, \quad (3.55)$$

$$J_2 = \frac{57,73}{28,4 \cdot 10^{-6}} = 2,03 \cdot 10^6 \frac{A}{m^2}.$$

4) Находим осевой размер витка, м:

$$h_{B2} = n_{B2} \cdot d'_2 \cdot 10^{-3}, \quad (3.56)$$

$$h_{B2} = 2 \cdot 4,65 \cdot 10^{-3} = 0,0093 \text{ м.}$$

5) Вычисляем число витков в слое:

$$w_{сл2} = \frac{l_2}{h_{B2}} - 1, \quad (3.57)$$

$$w_{сл2} = \frac{0,52}{0,0093} - 1 = 55.$$

6) Также вычисляем число слоёв в обмотке:

$$n_{сл2} = \frac{w_2}{w_{сл2}}, \quad (3.58)$$

$$n_{сл2} = \frac{727}{55} = 13.$$

$n_{сл2}$ округляется до большего числа.

7) Находим рабочее напряжение двух слоёв:

$$U_{мсл} = 2 \cdot w_{сл2} \cdot u_B, \quad (3.59)$$

$$U_{мсл} = 2 \cdot 55 \cdot 14,4 = 1584 \text{ В.}$$

8) По $U_{мсл}$ из таблицы 3.3 выбирается число слоёв и общая толщина изоляции кабельной бумаги в изоляции между слоями обмотки:

$$\delta_{мсл} = 4 \times 0,12 \text{ мм.}$$

9) Вычисляем общий радиальный размер металла обмотки:

$$A_2 = d_2 \cdot n_{сл2}, \quad (3.60)$$

$$A_2 = 4,25 \cdot 13 = 55,25 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

10) Допустимое значение плотности теплового потока радиального размера металла обмотки, м (мм):

$$A_{2\text{доп}} = \frac{K_{3\text{к}} \cdot q_{2\text{доп}}}{1,72 \cdot J_2^2 \cdot 10^{-8}}, \quad (3.61)$$

$$A_{2\text{доп}} = \frac{0,8 \cdot 900}{1,72 \cdot 2,03 \cdot 2,03 \cdot 10^{12} \cdot 10^{-8}} = 0,01 \text{ м.}$$

11) При $A_2 > A_{2\text{доп}}$ обмотку каждого стержня необходимо разделить на концентрические катушки с осевым масляным каналом между ними.

Число катушек принимаем по отношению $A_2/A_{2\text{доп}}$, принимаем равному трем.

12) Минимальная ширина масляного канала a'_{22} определяется по таблице 3.2 и проверяется по уравнению изоляции (см. 3.2.1). $a'_{22} = 8 \text{ мм.}$

13) Вычисляем радиальный размер обмотки:

$$a_2 = [d'_2 \cdot n_{\text{сл}2} + \delta_{\text{мсл}} \cdot (n_{\text{сл}2} - 1) + a'_{22} \cdot n_{\text{к}}] \cdot 10^{-3}, \quad (3.62)$$

$$a_2 = [4,65 \cdot 13 + 4 \cdot 0,12(13 - 1) + 8 \cdot 2] \cdot 10^{-3} = 0,08 \text{ м.}$$

Число каналов $n_{\text{к}} = 2$.

14) Минимальный радиальный размер a_{12} осевого канала между обмотками низкого и высокого напряжения:

$$a_{12} = 20 \text{ мм.}$$

15) Вычисляем внутренний диаметр обмотки:

$$D'_2 = D_1'' + 2 \cdot a_{12} \cdot 10^{-3}, \quad (3.63)$$

$$D'_2 = 0,318 + 2 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0,358 \text{ м.}$$

16) Находим наружный диаметр обмотки:

$$D_2'' = D'_2 + 2 \cdot a_2, \quad (3.64)$$

$$D_2'' = 0,358 + 2 \cdot 0,08 = 0,518 \text{ м.}$$

17) Вычисляем массу металла обмотки:

$$G_{02} = 8,47 \cdot 10^3 \cdot c \cdot \frac{D_2' + D_2''}{2} \cdot w_2 \cdot \Pi_{B2}, \quad (3.65)$$

$$G_{02} = 8,47 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot \frac{0,358 + 0,518}{2} \cdot 727 \cdot 28,4 \cdot 10^{-6} = 230 \text{ кг.}$$

По результатам сравнения вариантов принимается обмотка ВН.

Принимаю обмотку из алюминиевого прямоугольного провода, так как его внешний диаметр меньше чем у обмотки из круглого провода, что имеет место в трансформаторостроении.

4 Вычисление К.З.

4.1 Вычисление потерь К.З.

Потери в режиме короткого замыкания P_K разделяются на несколько компонентов:

$P_{ОСН1}$ и $P_{ОСН2}$ – основные потери соответственно в обмотках низкого и высокого напряжения, вызванные рабочим током этих обмоток;

$P_{Д1}$ и $P_{Д2}$ – добавочные потери в обмотках низкого и высокого напряжения, то есть потери от вихревых токов, наведённых полем рассеяния обмоток;

$P_{ОТВ1}$ и $P_{ОТВ2}$ – основные потери в отводах от обмоток;

$P_{ОТВ.Д1}$ и $P_{ОТВ.Д2}$ – добавочные потери в отводах, вызванные полями рассеяния отводов;

P_B – потери в стенках бака и других металлических элементах трансформатора, вызванные полями рассеяния обмоток и отводов.

$$P_K = P_{ОСН1} + P_{Д1} + P_{ОТВ1} + P_{ОТВ.Д1} + P_{ОСН2} + P_{Д2} + P_{ОТВ2} + P_{ОТВ.Д2} + P_B, \quad (4.1)$$

Обычно добавочные потери учитывают увеличением основных потерь путём умножения последних на коэффициент учёта добавочных потерь $k_{ДП} > 1$, то есть $P_{ОСН} + P_{Д} = k_{ДП} \cdot P_{ОСН}$ тогда

$$P_K = k_{ДП1} \cdot P_{ОСН1} + k_{ДП.ОТВ1} \cdot P_{ОТВ1} + k_{ДП2} \cdot P_{ОСН2} + k_{ДП.ОТВ2} \cdot P_{ОТВ2} + P_B, \quad (4.2)$$

Вычисляем основные потери по формулам:
в обмотке из алюминиевого провода (ленты):

$$P_{ОСН} = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot J^2 \cdot G_0, \quad (4.3)$$

для низкого напряжения:

$$P_{ОСН1} = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot 1,8^2 \cdot 10^{12} \cdot 88 = 3635 \text{ Вт.}$$

для высокого напряжения:

$$P_{ОСН2} = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot 2,09^2 \cdot 10^{12} \cdot 218,2 = 5814,4 \text{ Вт.}$$

где J – плотность тока в проводах обмотки;

G_0 – масса металла обмотки.

Средний коэффициент учёта добавочных потерь при частоте 50Гц для обмоток:

из алюминиевого прямоугольного провода (ленты):

$$\kappa_{\text{дп}} = 1 + 0,037 \cdot 10^8 \cdot t^2 \cdot a^4 \cdot n^2, \quad (4.4)$$

для низкого напряжения: $\kappa_{\text{дп1}} = 1 + 0,037 \cdot 10^8 \cdot 0,95^2 \cdot 1,34^4 \cdot 16^2 \cdot 10^{-12} = 1,002$.

для высокого напряжения: $\kappa_{\text{дп2}} = 1 + 0,037 \cdot 10^8 \cdot 0,014^2 \cdot 2,24^4 \cdot 19^2 \cdot 10^{-12} = 1,00001$.

где a – размер металла прямоугольного проводника в направлении, перпендикулярном линиям магнитной индукции поля рассеяния по радиусу обмотки;

n – число проводников обмотки в направлении, перпендикулярном направлению линиям магнитной индукции поля рассеяния;

$$t = \frac{b \cdot m}{l} \cdot \kappa_{\text{р}}, \quad (4.5)$$

где t - для прямоугольного провода (ленты).

для низкого напряжения: $t = \frac{520 \cdot 1}{0,52} \cdot 0,95 \cdot 10^{-3} = 0,95$.

для высокого напряжения: $t = \frac{12,5 \cdot 2}{0,52} \cdot 0,95 \cdot 10^{-3} = 0,04$.

b – размер металла проводника в направлении, параллельном линиям магнитной индукции поля рассеяния по оси обмотки;

m – число проводников обмотки в направлении, параллельном направлению линий индукции поля рассеяния;

l – высота обмотки.

Вычисление основных потерь в отводах сводится к определению длины отводов и массы металла в них.

Обычно сечения отвода принимается равным сечению витка обмотки, и по этому плотность тока в проводниках отвода равна плотности тока в проводах обмотки.

Основные потери в отводах выполненных алюминиевым проводом (лентой):

$$P_{\text{отв}} = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot J^2 \cdot G_{\text{отв}}, \quad (4.6)$$

для низкого напряжения: $P_{\text{ОТВ1}} = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot 1,8^2 \cdot 10^{12} \cdot 8 = 330 \text{ Вт.}$

для высокого напряжения: $P_{\text{ОТВ2}} = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot 2,09^2 \cdot 10^{12} \cdot 0,5 = 27,8 \text{ Вт.}$

где $G_{\text{ОТВ}}$ – масса металлов проводов отводов:

$$G_{\text{ОТВ}} = l_{\text{ОТВ}} \cdot \Pi_{\text{ОТВ}} \cdot \gamma, \quad (4.7)$$

для низкого напряжения: $G_{\text{ОТВ1}} = 3,9 \cdot 764,5 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 = 8 \text{ кг.}$

для высокого напряжения: $G_{\text{ОТВ2}} = 7,28 \cdot 26,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 = 0,5 \text{ кг.}$

Где $l_{\text{ОТВ}}$ – общая длина проводов отводов:
при соединении в звезду:

$$l_{\text{ОТВ}} \approx 7,5 \cdot l, \quad (4.8)$$

$$l_{\text{ОТВ1}} \approx 7,5 \cdot 0,52 = 3,9 \text{ м.}$$

в треугольник:

$$l_{\text{ОТВ}} \approx 14 \cdot l, \quad (4.9)$$

$$l_{\text{ОТВ1}} \approx 14 \cdot 0,52 = 7,28 \text{ м.}$$

$\Pi_{\text{ОТВ}}$ – сечение отвода, м^2 ;

γ – плотность металла отвода (для алюминия $\gamma_a = 2700 \text{ кг/м}^3$).

В силовых трансформаторах общего назначения ($P_{\text{ОТВ1}} + P_{\text{ОТВ2}} \leq 0,08 \cdot P_{\text{К}}$ а ($P_{\text{ОТВ.д1}} + P_{\text{ОТВ.д2}} \leq 0,05 \cdot (P_{\text{ОТВ1}} + P_{\text{ОТВ2}})$). Поэтому, как правило, добавочные потери в отводах не учитываются.

При рациональной конструкции трансформатора потери в ферромагнитных конструктивных его элементах составляют незначительную долю $P_{\text{К}}$ и их можно определить по формуле:

$$P_{\text{Б}} \approx 10 \cdot k_{\text{П}} \cdot S_{\text{Н}}, \quad (4.10)$$

$$P_{\text{Б}} \approx 10 \cdot 0,025 \cdot 1000 = 250 \text{ Вт.}$$

где $k_{\text{П}}$ – коэффициент, значение которого принимается по таблице 4.1
 $k_{\text{П}} = 0,025.$

Таблица 4.1-Значение коэффициента k_{Π}

Мощность трансформатора, кВ·А	До 1000	1000-4000
k_{Π}	0,015-0,02	0,025-0,04

Полные потери короткого замыкания:

$$P_K = k_{\text{ДП1}} \cdot P_{\text{ОСН1}} + P_{\text{ОТВ1}} + k_{\text{ДП2}} \cdot P_{\text{ОСН2}} + P_{\text{ОТВ2}} + P_{\text{Б}}, \quad (4.11)$$

$$P_K = 1,002 \cdot 3635 + 330 + 1,00001 \cdot 5814,4 + 27,8 + 250 = 10064,5 \text{ Вт.}$$

Отношением $(P_K/P_{K,\text{Зад}}) \cdot 100\%$ сравниваются фактические расчётные потери короткого замыкания с заданными: расчётные потери короткого замыкания не должны отличаться более, чем на $\pm 5\%$.

$$\frac{10064,5}{10800} \cdot 100\% = 93,1 \text{ \% заданного значения.}$$

4.2 Вычисление напряжения К.З.

Вычисляем активную составляющую напряжения короткого замыкания в процентах номинального напряжения по формуле:

$$u_a = \frac{P_K}{10 \cdot S_H}, \quad (4.12)$$

$$u_a = \frac{10064,5}{10 \cdot 1000} = 1\%.$$

Вычисляем реактивную составляющую напряжения короткого замыкания в процентах номинального напряжения:

$$u_p = \frac{0,79 \cdot f_1 \cdot S' \cdot \beta_H \cdot a_p \cdot k_p}{u_B^2}, \quad (4.13)$$

где a_p – уточнённые значения ширины приведенного канала рассеяния:

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}, \quad (4.14)$$

$$a_p = 0,02 + \frac{0,0292+0,07}{3} = 0,053 \text{ м.}$$

где a_1 , a_2 , a_{12} – реальные размеры рассчитанных обмоток трансформатора:

$$k_p = 1 - \delta \cdot \left(1 - e^{\frac{-1}{\delta}}\right), \quad (4.15)$$

где

$$\delta = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi \cdot l}, \quad (4.16)$$

$$\delta = \frac{0,02 + 0,0292 + 0,07}{3,14 \cdot 0,52} = 0,07,$$

$$k_p = 1 - 0,07 \left(1 - e^{\frac{-1}{0,07}}\right) = 0,93.$$

Вычисляем реактивную составляющую напряжения короткого замыкания в процентах номинального напряжения:

$$u_p = \frac{0,79 \cdot 50 \cdot 333,3 \cdot 2,09 \cdot 0,053 \cdot 0,95}{14,4^2} = 6,6\%.$$

Находим расчётное напряжение короткого замыкания в процентах от номинального напряжения:

$$u_k = \sqrt{u_a^2 + u_p^2}, \quad (4.17)$$

$$u_k = \sqrt{1 + 6,6^2} = 6,67\%.$$

Определяется отношение $(u_k/u_{к.зад}) \cdot 100\%$:

$$\frac{6,67}{5,5} \cdot 100\% = 121\% \text{ заданного значения.}$$

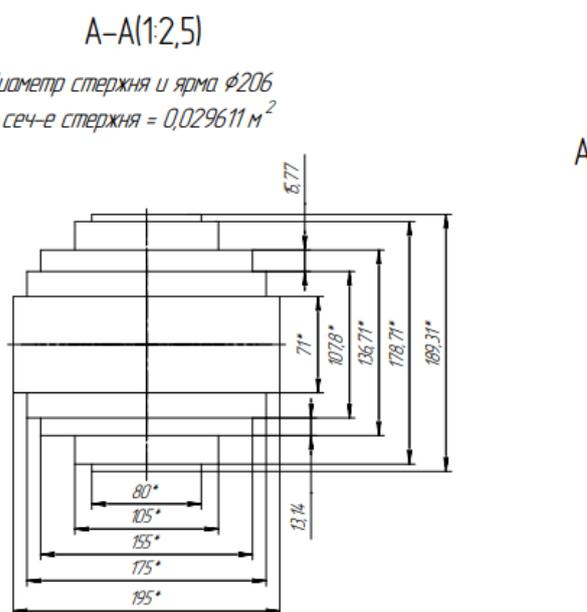
Отклонение расчётного значения u_k от заданного не должно быть большим $\pm 5\%$.

5 Главная часть трансформатора- магнитная

В конечном расчете магнитной системы, после расчетов обмоток низкого и высокого а также расчета короткого замыкания решается: число ступеней в активной части трансформатора, размеры пакетов остова то есть ширина, толщина, полные и активные сечения стержня и ярма, их высота, масса расстояние между осями, полная масса магнитной системы и в конце потери и ток Х.Х трансформатора.

5.1 Установление магнитной системы под «двойной пакет»

Ниже в рисунке 5.1 показан «двойной пакет». Суть данного 10 пластине в пакете стержня сделать так чтобы число и размеров пакетов в сечении стержня плоской магнитной системы должен быть сделан так, чтобы площадь ступенчатой фигуры его поперечного сечения, вписанного в окружность, была максимально возможной. Для рассчитываемого в п. 2.4 d_H , из таблицы определяются размеры пакетов в половине сечения стержня и ярма и записываются в следующей форме:



10 пластин в пакете

Тип трансформатора ТМГТ-1000 стандартный (2-модерн)						
Ширина пластин, мм	80	105	155	175	195	Масса, кг
Количество пакетов, шт	4	16	11 (6/5)	14	27	879,2
Количество пластин в пакете 10 шт Шаг 5 мм						

Рисунок 5.1 – Стержень трансформатора

Таблица 5 – Размеры пакетов в стержне трансформатора

№ пакета	Стержень, мм	Ярмо, мм
1	195×135	195×135
2	175×70	175×70
3	155×55	155×55
4	105×80	105×80
5	80×20	80×20

Полные площади ступенчатых фигур поперечных сечений стержня $P_{\text{ФС}}$ и ярма $P_{\text{ФЯ}}$ для плоских шихтованных магнитных систем и объёмы одного угла магнитной системы V_y приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1- Площадь сечения стержня $P_{\text{ФС}}$ и ярма $P_{\text{ФЯ}}$ объема угла V_y плоской шихтованной магнитной системы при выбранных размерах пакетов.

d_H , м	$P_{\text{ФС}}$, см ²	$P_{\text{ФЯ}}$, см ²	V_y , см ³	d_H , м	$P_{\text{ФС}}$, см ²	$P_{\text{ФЯ}}$, см ²	V_y , см ³
0,13	121,9	124,9	1299	0,22	353,0	360,5	6460
0,14	141,5	144,0	1620	0,23	387,7	394,0	7482
0,15	161,7	165,9	2040	0,24	419,3	425,6	8428
0,16	183,5	188,3	1470	0,25	456,2	462,6	9532
0,17	208,5	214,1	2908	0,26	490,6	507,1	10746
0,18	232,8	237,6	3452	0,27	532,6	543,4	12018
0,19	262,8	267,3	4118	0,28	570,9	591,1	13738
0,20	288,4	296,2	4811	0,29	612,4	622,8	14858
0,21	319,2	327,2	5680	0,30	657,2	675,2	16556

Находим активное сечение стержня:

$$P_c = k_3 \cdot P_{\text{ФС}}, \quad (4.18)$$

$$P_c = 0,965 \cdot 387,7 = 374,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Находим активное сечение ярма:

$$P_y = k_3 \cdot P_{\text{ФЯ}}, \quad (4.19)$$

$$P_y = 0,965 \cdot 394 = 380 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Вычисляем объем стали угла магнитной системы:

$$V_{\text{уст}} = K_3 \cdot V_{\text{у}}, \quad (4.20)$$

$$V_{\text{уст}} = 0,965 \cdot 7482 = 7220 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Вычисляем длину стержня:

$$l_c = l + (l'_0 + l''_0) \cdot 10^{-3}, \quad (4.21)$$

где l'_0 и l''_0 - расстояния от обмотки до верхнего и нижнего яра.

При наличии колец расстояние до верхнего яра для трансформаторов мощностью 1000-6300 кВ·А увеличивается на 45 мм.

$$l''_0 = 50 \text{ мм}, l'_0 = 50 + 45 = 95 \text{ мм},$$

$$l_c = 0,52 + (50 + 95) \cdot 10^{-3} = 0,66 \text{ м}.$$

Находим расстояние между осями соседних стержней:

$$C = D_2'' + a_{22} \cdot 10^{-3}, \quad (4.22)$$

$$C = 0,518 + 18 \cdot 10^{-3} = 0,536 \text{ м}.$$

Масса стали в стержнях и ярах плоской шихтованной магнитной системы определяется суммированием масс прямых участков и углов. Плотность холоднокатаной стали $\gamma_{\text{СТ}} = 7650 \text{ кг/м}^3$.

Вычисляем массу стали угла при много ступенчатой форме сечения:

$$G_{\text{у}} = V_{\text{СТ}} \cdot \gamma_{\text{СТ}} \cdot 10^{-6}, \quad (4.23)$$

$$G_{\text{у}} = 7220 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 55 \text{ кг}.$$

Вычисляем массу стали яра:

$$G_{\text{я}} = G'_{\text{я}} + G''_{\text{я}}, \quad (4.24)$$

$$G_{\text{я}} = 623 + 110 = 733 \text{ кг},$$

где:

$$G'_{\text{я}} = 2 \cdot (c - 1) \cdot C \cdot \Pi_{\text{я}} \cdot \gamma_{\text{СТ}}, \quad (4.25)$$

$$G'_{\text{я}} = 2(3 - 1)0,536 \cdot 380 \cdot 10^{-4} \cdot 7650 = 623 \text{ кг.}$$

$$G''_{\text{я}} = 2 \cdot G_{\text{Y}}, \quad (4.26)$$

$$G''_{\text{я}} = 2 \cdot 55 = 110 \text{ кг.}$$

Вычисляем масса стали стержней:

$$G_{\text{с}} = G'_C + G''_C, \quad (4.27)$$

$$G_{\text{с}} = 566 + 23 = 589 \text{ кг,}$$

где:

$$G'_C = c \cdot \Pi_{\text{с}} \cdot l_{\text{с}} \cdot \gamma_{\text{СТ}}, \quad (4.28)$$

$$G'_C = 3 \cdot 374,1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,66 \cdot 7650 = 566 \text{ кг.}$$

$$G''_C = c \cdot (\Pi_{\text{с}} \cdot a_{1\text{я}} \cdot \gamma_{\text{СТ}} \cdot 10^{-3} - G_{\text{Y}}), \quad (4.29)$$

$$G''_C = 3 \cdot (374,1 \cdot 10^{-4} \cdot 220 \cdot 10^{-3} \cdot 7650 - 55) = 23,8 \text{ кг,}$$

где $a_{1\text{я}}$ – ширина пластин среднего пакета ярма.

Вычисляем полную массу стали магнитной системы:

$$G_{\text{СТ}} = G_{\text{с}} + G_{\text{я}}, \quad (4.30)$$

$$G_{\text{СТ}} = 589 + 733 = 1322 \text{ кг.}$$

5.2 Вычисление потерь Х.Х.

Для плоской трёхфазной многослойной магнитной системы с взаимным расположением стержней и ярма, собранной из пластин холоднокатаной анизотропной стали, она может быть скреплена внутренними обмотками или бандажами потери холостого хода рассчитываются по формуле:

$$P_0 = \left[k_{\text{ПР}} \cdot k_{\text{ПЗ}} \cdot \left(p_{\text{с}} \cdot G_{\text{с}} + p_{\text{я}} \cdot G'_{\text{я}} - 4 \cdot p_{\text{я}} \cdot G_{\text{Y}} + \frac{p_{\text{с}} + p_{\text{я}}}{2} \cdot k_{\text{ПУ}} \cdot G_{\text{Y}} \right) + \sum p_{\text{з}} \cdot n_{\text{з}} \cdot \Pi_{\text{з}} \right] \cdot k_{\text{ПЯ}} \cdot k_{\text{ПП}} \cdot k_{\text{ПШ}}, \quad (4.31)$$

где $k_{\text{ПР}}$ – коэффициент увеличения удельных потерь в результате осуществления резки ленты стали на пластины; для отожженной данной стали марки можно принять $k_{\text{ПР}} = 1,05$;

$k_{\text{ПЗ}}$ – коэффициент увеличения удельных потерь из-за наличия заусенцев; если заусенцы удалялись при помощи ножа, то для отожженных пластин $k_{\text{ПЗ}} = 1$;

p_c , $p_{\text{я}}$, p_z – удельные потери для стали стержней, ярм и стыков (зазоров), определяемые по индукциям соответственно в стержне, ярме и на косом стыке.

Вычисляем индукцию в стержне:

$$B_c = \frac{u_B}{4,44 \cdot f_1 \cdot \Pi_c}, \quad (4.32)$$

$$B_c = \frac{14,4}{4,44 \cdot 50 \cdot 374,1 \cdot 10^{-4}} = 1,73.$$

Вычисляем индукцию в ярме:

$$B_{\text{я}} = \frac{u_B}{4,44 \cdot f_1 \cdot \Pi_{\text{я}}}, \quad (4.33)$$

$$B_{\text{я}} = \frac{14,4}{4,44 \cdot 50 \cdot 380 \cdot 10^{-4}} = 1,7.$$

Вычисляем индукцию в косых стыках (зазоров) по ярму:

$$B_{\text{кос}} = \frac{B_c}{\sqrt{2}}, \quad (4.34)$$

$$B_{\text{я}} = \frac{1,73}{\sqrt{2}} = 1,22.$$

Находим удельные потери для стали стержней:

$$p_c = 1,168 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}.$$

Находим удельные потери в зоне шихтованного стыка по стержню:

$$p_{z.c} = 600 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Находим удельные потери стали ярма:

$$p_{я} = 1,134 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$$

Находим удельные потери в зоне шихтованного стыка по ярму:

$$p_{з.я} = 585 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Находим удельные потери в зоне шихтованного стыка (зазора):

$$p_з = \frac{265 + 375}{2} = 320 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$k_{\text{ПУ}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение потерь в углах магнитной системы; при четырёх углах с косыми стыками и двух углах с прямыми стыками для стали с толщиной листов 0,27 мм при $B = 0,9 \div 0,7 \text{ Тл}$ среднее значение $k_{\text{ПУ}} = 10,18$;

$n_з$ – число стыков разного вида:

4 – косых по ярму,

1 – прямой по стержню,

2 – прямых по ярму.

$P_з$ – площадь стыков:

Прямого по стержню - $P_з = P_c, P_з = 374,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Прямого по ярму - $P_з = P_{я}, P_з = 380,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Косого - $P_з = \sqrt{2} \cdot P_c, P_з = 2 \cdot 374,1 \cdot 10^{-4} = 529 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

$k_{\text{ПЯ}}$ – коэффициент увеличения потерь, зависящий от формы ярма; если число ступеней ярма отличается на одну две ступени от числа ступеней в сечении стержня, то $k_{\text{ПЯ}} = 1$.

$k_{\text{ПП}}$ – коэффициент, учитывающий влияние прессовки на потери холостого хода; при прессовке стержней расклиниванием с обмоткой и бандажами из стекло ленты, ярм–ярмовыми балками без бандажей для отоженной стали $k_{\text{ПП}} = 1,03$.

$k_{\text{ПШ}}$ – коэффициент, учитывающий увеличения потерь из-за перешихтовки верхнего ярма остова при установке обмоток; при мощности трансформаторов. 1000-6300 кВ·А $k_{\text{ПШ}} = 1,04 \div 1,08$.

Вычисляем потери холостого хода:

$$P_0 = \left[1,05 \cdot 1 \left(1,168 \cdot 589 + 1,134 \cdot 623 - 4 \cdot 1,134 \cdot 55 + \frac{1,168 + 1,134}{2} 10,18 \cdot 55 \right) + 4 \cdot 320 \cdot 529 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 600 \cdot 374,1 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 585 \cdot 380 \cdot 10^{-4} \right] \cdot 1 \cdot 1,03 \cdot 1,04 = 2156,8 \text{ Вт.}$$

$$\frac{2156,8 - 2100}{2100} \cdot 100 = 2,7\%.$$

Расчётные потери холостого хода могут отличаться от заданных не более чем на +7,5%.

5.3 Вычисление тока Х.Х.

Намагничивающая мощность холостого хода трансформатора с плоской шихтованной трёхстержневой магнитной системой, собранной из пластин, с прессовкой стержней расклиниванием с внутренней обмоткой или бандажами, а ярм – ярмовыми балками без сквозных шпилек в стержнях и ярмах рассчитывается по формуле:

$$S_0 = \left[k_{ТР} \cdot k_{ТЗ} \left(q_c \cdot G_c + q_y \cdot G'_y - 4 \cdot q_y \cdot G_y + \frac{q_c + q_y}{2} \cdot k_{ТУ} \cdot k_{ТПЛ} \cdot G_y \right) + \sum q_z \cdot n_z \cdot \Pi_z \right] \cdot k_{ТЯ} \cdot k_{ТП} \cdot k_{ТШ}, \quad (4.35)$$

где $k_{ТР}$ – коэффициент, учитывающий влияние резки полосы рулона на пластины; для отожженной стали $k_{ТР} = 1,18$.

$k_{ТЗ}$ – коэффициент, учитывающий влияние заусенцев; если заусенцы сняты, то для отожженных пластин $k_{ТЗ} = 1$.

q_c , q_y , q_z – удельные намагничивающие мощности для стали стержней, ярм и зазоров (стыков); определяются по индукциям B_c , B_y и B_z для прямых и косых стыков;

$$q_c = 1,48 \text{ В} \cdot \frac{\text{А}}{\text{кг}}, \quad q_{з.с} = 19320 \text{ В} \cdot \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

Для шихтовки в одну пластину:

$$q_{з.с} = 19320 \cdot 0,82 = 15842,4 \text{ В} \cdot \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

$$q_y = 1,408 \text{ В} \cdot \frac{\text{А}}{\text{кг}}, \quad q_{з.я} = 17790 \text{ В} \cdot \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

Для шихтовки в одну пластину:

$$q_{з.я} = 17790 \cdot 0,82 = 14727,2 \text{ В} \cdot \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

$$q_з = \frac{1000+4000}{2} = 2500 \text{ В} \cdot \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

Для шихтовки в одну пластину:

$$q_{зз} = 2500 \cdot 0,82 = 2050 \text{ В} \cdot \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

$k_{ту}$ – коэффициент, учитывающий увеличение намагничивающей мощности в углах магнитной системы, его значение для трёхстержневой магнитной системы из стали толщиной 0,27 мм для разных индукций приведены в таблице 5.4. $k_{ту} = 41,7$.

Таблица 5.4 - Значение коэффициента $k_{ту}$ для углов с косыми и прямыми стыками пластин из стали с толщиной 0,27 мм при $f_1 = 50$ Гц

Число углов со стыками		Магнитная индукция В, Тл				
Косыми	Прямыми	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
4	2	38,5	41,7	42,45	40,3	33,66

$k_{тпл}$ – коэффициент, учитывающий увеличение намагничивающей мощности в углах магнитной системы в зависимости от ширины пластины второго пакета.

$k_{тя}$ – коэффициент, учитывающий форму сечения ярма; для ярма многоступенчатого сечения $k_{тя} = 1$.

$k_{тп}$ – коэффициент, учитывающий прессовку магнитной системы; при прессовке стержней бандажами из стеклоленты, ярм – ярмовыми балками без бандажей для отожженной стали $k_{тп} = 1,05$.

$k_{тш}$ – коэффициент, учитывающий перешихтовку верхнего ярма для установки обмоток: $k_{тш} = k_{пш}$, $k_{тш} = 1,04$.

$$S_0 = \left[1,18 \cdot 1 \cdot \left(1,4 \cdot 589 + 1,408 \cdot 623 - 4 \cdot 1,408 \cdot 55 + \frac{1,4+1,408}{2} 40,3 \cdot 1,3 \cdot 55 \right) + 2050 \cdot 4 \cdot 529 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 15842 \cdot 374,1 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 14727 \cdot 380,2 \cdot 10^{-4} \right] \cdot 1 \cdot 1,05 \cdot 1,04 = 9303 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Находим полный фазный ток холостого хода:

$$I_0 = \frac{S_0}{3 \cdot U_{ФН}}, \quad (4.36)$$

$$I_0 = \frac{9303}{3 \cdot 230,9} = 13,4 \text{ A.}$$

Вычисляем относительное значение тока холостого хода (в процентах номинального тока):

$$i_0 = \frac{S_0}{10 \cdot S_H}, \quad (4.37)$$

$$i_0 = \frac{21789}{10 \cdot 1000} = 0,93 \text{ \%}.$$

Вычисляем активную составляющую фазного тока холостого хода:

$$I_{0.a} = \frac{P_0}{3 \cdot U_{\Phi H}}, \quad (4.38)$$

$$I_{0.a} = \frac{2156,8}{3 \cdot 230,9} = 3,11 \text{ A},$$

или в процентах номинального тока:

$$i_{0.a} = \frac{P_0}{10 \cdot S_H}, \quad (4.39)$$

$$i_{0.a} = \frac{2156,8}{10 \cdot 1000} = 0,215 \text{ \%}.$$

Вычисляем реактивную составляющую фазного тока холостого хода:

$$I_{0.P} = \sqrt{I_0^2 - I_{0.a}^2}, \quad (4.40)$$

$$I_{0.P} = \sqrt{13,4^2 - 3,11^2} = 13 \text{ A},$$

или в процентах номинального тока:

$$i_{0.P} = \sqrt{i_0^2 - i_{0.a}^2}, \quad (4.41)$$

$$i_{0.P} = \sqrt{0,93^2 - 0,215^2} = 0,9 \text{ \%}.$$

Находим коэффициент мощности при работе трансформатора в режиме холостого хода при номинальном напряжении:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{S_0}, \quad (4.42)$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{2156,8}{9303} = 0,23.$$

6 Выявление повышения эффективности сборки

Выявление повышения эффективности сборки трансформатора, сделанного из «двойного пакета» по производству, определяет время сборки. По изготовленным трансформатором и повышения количества трансформаторов в месяц или день в производстве наблюдалось. Повышение эффективности выражается также наименьшим механическим повреждением, что обуславливается меньшим временем сборки рабочих, быстрая сборка меньше воздействий на электротехническую сталь. Электротехническая сталь очень чувствительна к механическим нагрузкам вызванными рабочими: изгибы удары резки, перемещении по цеху случайных ударов и падений, все они ухудшают качество стали. То есть разрушая магнитную проницаемость, увеличивая потери и ток х.х. трансформатора. Поэтому при «двойном пакете» можно эффективно снизить все эти повреждения изоляции пластин в магнитной системе. По испытании трансформаторов двух видов 1000 кВА и 1600 кВА результаты параметров допусков были пройдены.

Допуски трансформаторов приведены ниже в таблице 6.

Таблица 6 - Допуск на стандартные трансформаторы ТМ(Г)-1000-2500/10(6)-0,4кВ

Тип трансформатора	I_0 %	P_0 Вт	$P_{к.з.}$ Вт	U_k %
ТМ(Г)-1000	1,04	1690,5	13420	4,95-6,05
ТМ(Г)-1000	0,78	2001	16500	5,4-6,6
ТМ(Г)-1600	0,65	2012,5	19800	5,4-6,6
ТМ(Г)-2000	0,65	2990	27500	5,4-6,6
ТМ(Г)-2500	0,52	3185,5	30800	5,85-7,15

6.1 Параметры холостого хода и их зависимость от эффективности сборки трансформатора.

Выявленные параметры холостого хода это - потери холостого хода 2156,8 Вт, ток холостого хода 0,93%. При заданных значениях 2100 Вт потери холостого хода и 1,4% тока холостого хода проценты изменения не превышают нормализованного. Причины ухудшения таких параметров зависят от производственных отклонений при сборке. Используемая холоднокатанная сталь как уже говорилось очень чувствительна к механическим нагрузкам. При резке продольно и поперечно, штамповке, перегибов, изгибов ухудшаются ее магнитные свойства. До сборки пластины подвергаются высокотемпературному отжигу,

восстанавливающие их магнитные характеристики. Однако при сборке, а именно расшихтовке можно повредить ее снова, поэтому в этих операциях сборщик должен проявить особую аккуратность, не допуская повреждения пластин. Но аккуратность сборщика не эффективна, так как сборщики могут меняться, могут не проявлять внимательность, так как нет надзора или контроля в этих операциях сборки. Поэтому «двойной пакет» служить оптимальным решением для повышения эффективности сборки и ее повышения качества также.

7 Вычисление тепловой системы

Вычисление тепловой системы трансформатора делают в конце всех расчетов. При правильном выборе электромагнитных нагрузок и правильном распределении и выборе размеров охлаждающих масляных каналов внутренние температуры обмоток и магнитной системы оказываются не выше допустимых значений. По этому вычислению сводится к определению перепадов температур внутри и обмоток и на их поверхности.

7.1 Проверочное вычисление обмотки

Проверочное тепловое вычисление обмоток будет проводиться следующим образом:

Потери, выделяющиеся в 1 м^3 общего объема обмотки:
для обмотки из алюминиевого провода (ленты)

$$p_A = \frac{3,44 \cdot J^2 \cdot a \cdot b}{(a' + \delta_{MC}) \cdot b'} \cdot 10^{-8}, \quad (7.1)$$

Для высокого напряжения:

$$p_A = \frac{3,44 \cdot 2,09^2 \cdot 10^{12} \cdot 2,36 \cdot 12,5 \cdot 10^{-6}}{(2,86 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 0,12 \cdot 10^{-3}) \cdot 13 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^{-8} = 102000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3},$$

Для низкого напряжения:

$$p_A = \frac{3,44 \cdot 1,8^2 \cdot 10^{12} \cdot 520 \cdot 1,39 \cdot 10^{-6}}{(0,6 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,12 \cdot 10^{-3}) \cdot 520 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^{-8} = 184433 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}.$$

В данной формуле a и a' - размеры провода без изоляции и с изоляцией в направлении движения тепла (м).

b и b' - то же, но в направлении перпендикулярном движению тепла (м),
 δ_{MC} выражены в (м), J - в А/м^2 .

Выясним среднюю условную теплопроводность обмотки без учёта межслойной изоляции:

$$\lambda = 266 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})}.$$

Находим среднюю условную теплопроводность обмотки:

$$\lambda_{\text{CP}} = \frac{\lambda \cdot \lambda_{\text{MC}} \cdot (a' + \delta_{\text{MC}})}{\lambda \cdot \delta_{\text{MC}} + \lambda_{\text{MC}} \cdot a'}, \quad (7.2)$$

для высокого напряжения:

$$\lambda_{\text{CP}} = \frac{226 \cdot 0,17 \cdot (2,86 \cdot 10^{-3} + 0,48 \cdot 10^{-3})}{226 \cdot 4 \cdot 0,12 \cdot 10^{-3} + 0,17 \cdot 2,86 \cdot 10^{-3}} = 1,18 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}).$$

для низкого напряжения:

$$\lambda_{\text{CP}} = \frac{226 \cdot 0,17 \cdot (1,39 \cdot 10^{-3} + 0,24 \cdot 10^{-3})}{226 \cdot 4 \cdot 0,12 \cdot 10^{-3} + 0,17 \cdot 1,39 \cdot 10^{-3}} = 0,57 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Находим полный внутренний перепад температуры:

$$\theta = \frac{p \cdot A}{8 \cdot \lambda_{\text{CP}}}, \quad (7.3)$$

для высокого напряжения:

$$\theta_0 = \frac{102000 \cdot 22,4^2 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 1,18} = 5,42^\circ\text{C},$$

для низкого напряжения:

$$\theta_0 = \frac{184433 \cdot 11,2^2 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 0,57} = 5,07^\circ\text{C}.$$

A - радиальный размер катушки, м; при наличии в обмотке осевого охлаждающего канала размер A равен ширине наиболее широкой из катушек;

Находим среднее значение внутреннего перепада температуры в обмотке:

$$\theta_{0,\text{CP}} = \frac{2}{3} \cdot \theta_0, \quad (7.4)$$

для высокого напряжения:

$$\theta_{0,\text{CP}} = \frac{2}{3} \cdot 5,42 = 3,61^\circ\text{C},$$

для низкого напряжения:

$$\theta_{0,CP} = \frac{2}{3} \cdot 5,07 = 3,38^{\circ}\text{C}.$$

Таблица 7.1 - Удельные теплопроводимости изоляционных и других материалов

Материалы	λ , Вт/(м·°С)
Электроизоляционный картон	0,17
Алюминий	226

Вычисляем перепад температур на поверхности цилиндрических обмоток из круглого или прямоугольного провода или алюминиевой ленты:

$$\theta_{0,М} = k \cdot q^{0,6}, \quad (7.5)$$

для высокого напряжения:

$$\theta_{0,М} = 0,285 \cdot 867,8^{0,6} = 16,51^{\circ}\text{C},$$

где:

$$q = \frac{P_{0CH2}}{\Pi_{02}} = \frac{5814,4}{6,7} = 867,82 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

для низкого напряжения:

$$\theta_{0,М} = 0,285 \cdot 777,6^{0,6} = 15,46^{\circ}\text{C},$$

где: $k = 0,285$.

Находим среднее превышение температуры обмотки над температурой масла:

$$\theta_{0,М,CP} = \theta_{0,CP} + \theta_{0,М}, \quad (7.6)$$

для высокого напряжения:

$$\theta_{0,М,CP} = 3,61 + 16,51 = 20,12^{\circ}\text{C},$$

для низкого напряжения:

$$\theta_{0.м.ср} = 3,38 + 15,46 = 18,84^{\circ}\text{C}.$$

7.2 Тепловое вычисление бака трансформатора

Тепловое вычисление бака трансформатора обуславливается тем что бак должен иметь хорошую теплоотдачу, быть механически прочным, простым в изготовлении, иметь малые габариты. Тип бака выбирается по мощности трансформатора.

Таблица 7.2- Типы баков силовых масляных трансформаторов

Тип бака	Вид охлаждения	Пределы применения по мощности, кВ·А
Бак с вваренными охлаждающими гнутыми трубами (трубчатый)	М	От 40-63 до 1600
Бак с навесными радиаторами с прямыми трубами	М	От 100 до 6300
Бак с навесными радиаторами с гнутыми трубами	М	От 2500 до 10000

Примечание: при современных технологиях изготовления более технологичными являются баки с навесными радиаторами с прямыми трубами.

Выберем бак с навесными радиаторами с прямыми трубами.

Для расчета размеров бака необходимо определить следующие изоляционные расчеты расстояния и размеры (рис. 7.1):

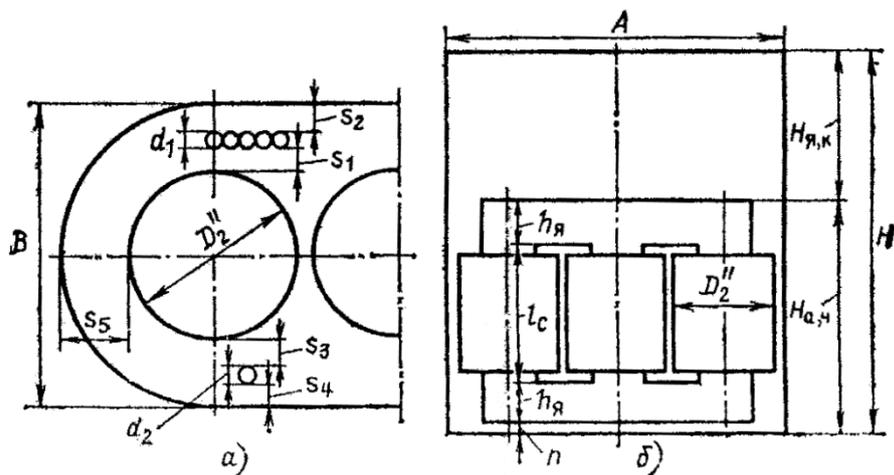


Рисунок 7.1 – К определению основных размеров бака

S_1 – изоляционное расстояние от изолированного отвода обмотки высокого напряжения до собственной обмотки (по табл. 7.3), $S_1 = 22$ мм;

S_2 – изоляционное расстояние от изолированного отвода обмотки высокого напряжения до стенки бака (по табл. 7.3), $S_2 = 22$ мм;

d_1 – диаметр изолированного отвода обмотки высокого напряжения: при классах напряжения 10 и 35 кВ при мощности трансформатора до 10000 кВ·А $d_1 = 20$ мм, а при больших мощностях $d_2 = 25$ мм, $d_1 = 20$ мм;

S_3 – изоляционное расстояние от отвода обмотки низкого напряжения до обмотки высокого напряжения; $S_3 = 25$ мм;

S_4 – изоляционное расстояние от изолированного отвода обмотки низкого напряжения до стенки бака (по табл. 7.3); $S_4 = 22$ мм;

d_2 – диаметр изолированного отвода от обмотки низкого напряжения, равный d_1 , или размер неизолированного отвода низкого напряжения (шины), равный 10-15 мм. $d_2 = 12$ мм.

Таблица 7.3 - Минимально допустимые расстояния от отводов до заземлённых частей

Испытательное напряжение отвода, кВ	Толщина изоляции на одну сторону, мм	Диаметр отвода, мм	Расстояние от гладкой стенки бака или собственной обмотки, мм
До 25	Собств.	<6	25
	Собств.	>6	22
	2	—	20

Примечания:1. Для отводов с $U_{исп} \leq 35$ кВ используется медный или алюминиевый провод, изолированный кабельной бумагой или бумажно-бакелитовыми трубками.

Вычисляем минимальную ширину бака:

$$B = D_2'' + (S_1 + S_2 + d_1 + S_3 + S_4 + d_2) \cdot 10^{-3}, \quad (7.7)$$

$$B = 0,498 + (22 + 22 + 20 + 25 + 22 + 12) \cdot 10^{-3} = 0,621 \text{ м.}$$

Находим минимальную длину бака:

$$A = 2 \cdot C + D_2'' + 2 \cdot S_5 \cdot 10^{-3}, \quad (7.8)$$

$$A = 2 \cdot 0,47 + 0,498 + 2 \cdot 59 \cdot 10^{-3} = 1,55 \text{ м.}$$

где S_5 – расстояние от обмотки высокого напряжения до стенки бака; при испытательных напряжениях до 85 кВ S_5 может быть принят таким же, как и расстояние от неизолированного отвода обмотки до обмотки высокого напряжения (табл. 7.4), т. е. $S_5 = S_3$; чаще принимают $S_5 = S_3 + d_2 + S_4$, $S_5 = 25 + 12 = 22 = 59$.

Внутренние размеры бака B и A , рассчитанные по вышеперечисленным формулам, обычно оказываются достаточными и по условиям теплоотдачи.

Глубина бака определяется высотой активной части и минимальным расстоянием от верхнего ярма до крышки бака, необходимым для размещения внутренних частей проходных изоляторов, отводов и переключателей:

$$H = H_{АЧ} + H_{ЯК}, \quad (7.9)$$

$$H = 1,14 + 0,16 = 1,3 \text{ м.}$$

где $H_{АЧ}$ – высота активной части:

$$H_{АЧ} = l_c + 2 \cdot h_{я} + n \cdot 10^{-3}, \quad (7.10)$$

$$H_{АЧ} = 0,66 + 2 \cdot 220 \cdot 10^{-3} + 40 \cdot 10^{-3} = 1,14 \text{ м.}$$

где $h_{я}$ - ширина среднего листа ярма, $h_{я} = 220 \cdot 10^{-3}$ м,
 n – толщина подкладки под нижнее ярмо; $n = 30 \div 50$ мм;

$H_{\text{ЯК}}$ – расстояние от верхнего ярма магнитопровода до крышки бака; выбирается из таблицы 7.5, $H_{\text{ЯК}} = 0,16$ м.

Таблица 7.5 - Минимальное расстояние от ярма до крышки бака

Класс напряжения трансформатора, кВ	Минимальное расстояние, м
6,10	0,16
20	0,30
35	0,40

В любом случае для установки радиаторов необходимая глубина бака:

$$H_{\text{Б}} = A_{\text{Р}} + C_1 + C_2, \quad (7.11)$$

$$H_{\text{Б}} = 1400 \cdot 10^{-3} + 0,085 + 0,10 = 1,585 \text{ м} = 1,6 \text{ м.}$$

где $A_{\text{Р}} = 1,400$ – расстояние между осями патрубков радиатора (табл. 7.6); C_1 и C_2 – расстояние осей фланцев радиатора от нижнего и верхнего срезов стенки бака (табл. 7.6).

Должно быть $H \geq H_{\text{Б}}$. В противном случае необходимо принять $H = H_{\text{Б}}$.

Для радиаторов с двумя рядами труб $B_{\text{Р}} = 505$ мм, $C_{\text{Р}} = 253$ мм. Данные трубчатых радиаторов с прямыми трубами приведены в табл. 7.6.

Таблица 7.6 Основные данные трубчатых радиаторов с прямыми трубами

Размер $A_{\text{Р}}$, мм	Поверхность $P_{\text{К.ТР}}$, м ²	Масса, кг		Размер $A_{\text{Р}}$, мм	Поверхность $P_{\text{К.ТР}}$, м ²	Масса, кг	
		Стали	масла			стали	масла
С одним рядом труб							
710	0,746	12,9	8,5	1400	4,333	53,94	46
900	0,958	15,3	10,9	1615	4,961	67,14	53
				1800	5,613	73,94	57
С двумя рядами труб							
710	2,135	34,1	24	2000	6,253	81,89	64
900	2,733	41,1	30	2200	6,892	89,18	72
1150	3,533	50,1	38	2400	7,533	95,68	78

Примечание: 1. $P_{\text{К.ТР}}$ – поверхность конвекции труб;

$\Pi_{\text{К.К}}$ – поверхность конвекции двух коллекторов; $\Pi_{\text{К.К}} = 0,34 \text{ м}^2$ при двух рядах труб; $\Pi_{\text{К.Р}}$ – поверхность конвекции радиатора:

$$\Pi_{\text{К.Р}} = \Pi_{\text{К.ТР}} + \Pi_{\text{К.К}}, \quad (7.12)$$

$$\Pi_{\text{К.Р}} = 4,333 + 0,34 = 4,673 \text{ м}^2.$$

Минимальные расстояния осей фланцев радиатора от нижнего и верхнего срезов стенки бака: $C_1 = 0,085 \text{ м}$; $C_2 = 0,1 \text{ м}$.

Превышение средней температуры масла над температурой окружающей среды для наиболее нагретой обмотки или катушки:

$$\theta_{\text{М.В}} = \theta_{\text{О.В.ДОП}} - \theta_{\text{О.М.СР}}, \quad (7.13)$$

$$\theta_{\text{М.В}} = 65 - 18,84 = 46,16^\circ\text{С}.$$

где $\theta_{\text{О.В.ДОП}}$ – длительное допустимое среднее превышение температуры обмоток над воздухом при номинальной нагрузке; для обмоток масляных трансформаторов по ГОСТ 11677-85 $\theta_{\text{О.В.ДОП}} = 65^\circ\text{С}$.

Максимальное превышение температуры стенки бака над температурой окружающей среды (пренебрегая перепадом температуры между маслом и стенкой бака) $\gamma \cdot \theta_{\text{Б.В}} \leq 60^\circ\text{С}$.

где γ – коэффициент, равный отношению максимального и среднего превышений температуры масла; можно применять $\gamma = 1,2$;

Вычисляем $\theta_{\text{Б.В}}$ – среднее превышение температуры стенки бака над воздухом:

$$\theta_{\text{Б.В}} \approx \theta_{\text{М.В}} \approx 46,16^\circ\text{С},$$

$$1,2 \cdot 46,16 = 55,39 \leq 60^\circ\text{С}.$$

60°С – превышение температуры верхних слоёв масла над воздухом для трансформаторов герметическое или с расширителем.

По выбранным размерам бака рассчитывается поверхность гладких стенок бака при овальном его сечении в плане:

$$\Pi_{\text{К.ГЛ}} = H \cdot [2 \cdot (A - B) + \pi \cdot B], \quad (7.14)$$

$$\Pi_{\text{К.ГЛ}} = 1,6 \cdot [2 \cdot (1,51 - 0,5736) + 3,14 \cdot 0,5736] = 6 \text{ м}^2.$$

Поверхность излучения бака с навесными радиаторами:

$$\Pi_{И} \approx k \cdot \Pi_{К.ГЛ}, \quad (7.15)$$

$$\Pi_{И} \approx 1,8 \cdot 6 = 11 \text{ м}^2.$$

где k – коэффициент, учитывающий отношение поверхности излучения к поверхности гладкой части бака; для бака с навесными радиаторами $k = 1,5 \div 2$.

Необходимая поверхность конвекции для получения найденного выше значения среднего превышения температуры наружных стенок бака над температурой воздуха $\theta_{Б.В}$:

$$\Pi'_{К} = \frac{1,05 \cdot (P_{К} + P_{0})}{2,5 \cdot \theta_{Б.В}^{1,25}} - 1,12 \cdot \Pi_{И}, \quad (7.16)$$

$$\Pi'_{К} = \frac{1,05 \cdot (10064,5 + 2156,8)}{2,5 \cdot 46,16^{1,25}} - 1,12 \cdot 11 = 55 \text{ м}^2.$$

Эта поверхность должна быть обеспечена элементами системы охлаждения масляного трансформатора (стенками бака, крышкой и навесными радиаторами), т. е. должно быть выполнено условие:

$$(\Pi_{К.ГЛ} + \Pi_{К.КР} + n_{Р} \cdot \Pi_{КР.ПРИВ}) \geq \Pi'_{К}, \quad (7.17)$$

где $\Pi_{КР}$ – поверхность конвекции крышки бака.

$$\Pi_{К.КР} = 0,5 \cdot \left[(A - B) \cdot (B + 0,16) + \pi \cdot \frac{(B + 0,16)^2}{4} \right], \quad (7.18)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{К.КР} &= 0,5 \cdot \left[(1,51 - 0,5736) \cdot (0,5736 + 0,16) + 3,14 \cdot \frac{(0,5736 + 0,16)^2}{4} \right] \\ &= 0,55 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

0,5 – коэффициент, учитывающий закрытие поверхности крышки вводами и арматурой;

0,16 – удвоенная ширина верхней рамы бака;

$n_{Р}$ – число навесных радиаторов;

$\Pi_{КР.ПРИВ}$ – приведенная поверхность конвекции радиатора.

$$\Pi_{КР.ПРИВ} = K_{Ф.Р} \cdot \Pi_{КР}, \quad (7.19)$$

$$P_{\text{кр.прив}} = 1,26 \cdot 4,673 = 5,89 \text{ м}^2.$$

$k_{\text{ф.р}}$ – коэффициент, учитывающий улучшение теплоотдачи конвекцией навесного радиатора по сравнению с гладкой стенкой (коэффициент приведения поверхности конвекции радиатора к поверхности конвекции гладкой стенки), $k_{\text{ф.р}} = 1,26$.

Необходимое число радиаторов (предварительно):

$$n'_p \geq \frac{P'_K - P_{\text{к.гл}} - P_{\text{к.кр}}}{P_{\text{кр.прив}}}, \quad (7.20)$$

$$n'_p \geq \frac{55 - 6 - 0,55}{5,89} = 8,2, \quad n_p = 9.$$

Значение n'_p округляется до ближайшего целого числа с учётом схемы расположения радиаторов на баке.

Уточнённое значение поверхности конвекции бака (изменённое в результате округления n_p):

$$P_K = P_{\text{к.гл}} + P_{\text{к.кр}} + n_p \cdot P_{\text{кр.прив}}, \quad (7.21)$$

$$P_K = 6 + 0,55 + 9 \cdot 5,89 = 60 \text{ м}^2.$$

Уточнённое среднее превышение температуры стенки бака над температурой окружающего воздуха:

$$\theta_{\text{б.в}} = \left[\frac{k \cdot (P_K + P_0)}{2,8 \cdot P_{\text{и}} + 2,5 \cdot P_K} \right]^{0,8}, \quad (7.23)$$

$$\theta_{\text{б.в}} = \left[\frac{1,05 \cdot (10064,5 + 2156,8)}{2,8 \cdot 11 + 2,5 \cdot 60} \right]^{0,8} = 30^\circ\text{C}.$$

Где $k = 1,05 \div 1,10$.

Среднее превышение температуры масла вблизи стенки над температурой стенки бака для трансформатора с естественным масляным охлаждением:

$$\theta_{\text{м.б}} \approx 0,165 \cdot \left[\frac{k \cdot (P_K + P_0)}{\Sigma P_K} \right]^{0,6}, \quad (7.24)$$

$$\theta_{\text{м.б}} \approx 0,165 \cdot \left[\frac{1,05 \cdot (10064,5 + 2156,8)}{46} \right]^{0,6} = 5^\circ\text{C}.$$

где:

$$\begin{aligned}\sum P_K &= P_{K.ГЛ} + P_{K.КР} + n_P \cdot P_{K.ТР}, & (7.25) \\ \sum P_K &= 6 + 0,55 + 9 \cdot 4,333 = 46 \text{ м}^2.\end{aligned}$$

Вычисление превышения температур масла в верхних слоях над температурой окружающего воздуха:

$$\begin{aligned}\theta_{M.B.B} &= \gamma \cdot (\theta_{B.B} + \theta_{M.B}), & (7.26) \\ \theta_{M.B.B} &= 1,2(30 + 5) = 42^\circ\text{C}.\end{aligned}$$

Вычисление превышения температур обмоток над температурой окружающего воздуха рассчитывается для обмоток высокого и низкого напряжения отдельно по формуле:

$$\theta_{O.B} = \theta_{O.CP} + \theta_{O.M} + \theta_{M.B} + \theta_{B.B}, \quad (7.27)$$

для высокого напряжения:

$$\theta_{O.B} = 3,61 + 16,51 + 5 + 30 = 55,12^\circ\text{C}.$$

для низкого напряжения:

$$\theta_{O.B} = 3,38 + 15,46 + 5 + 30 = 53,84^\circ\text{C}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой дипломной работе рассмотрен трансформатор с измененным количеством пакетов в осто́ве магнитопровода. По данным «УТЗ» ТМГ 1000/10-0,4 имеет двойной пакет. Предоставлена чертеж магнитопровода, степеней стержня и диаметр стержня. По этим данным был расчет трансформатора по потерям короткого замыкания, напряжению короткого замыкания, по потерям холостого хода. Выявленные данные: Потери короткого замыкания составляют 93,1 % данного значения, по потерям холостого хода расчетные отличаются на 2,7 %. Расчётное напряжение короткого замыкания в процентах от номинального напряжения 6,6 %. Провода в напряжения НН и ВН были выбраны по наименьшему внешнему диаметру и массы. По стороне НН цилиндрическая многослойная обмотка из алюминиевая лента, по стороне ВН цилиндрический многослойная обмотка из прямоугольного провода.

Вывод по данному расчету эффективность сборки трансформатора изменением пакета осто́ва, основана на трудоемкости рабочих, и наименьшей затраты времени. Холоднокатаная сталь очень чувствительна к механическим нагрузкам: изгибы и наклеп от резки ударов и других воздействий повреждают изоляцию, ухудшают магнитную проницаемость, увеличивают потери и ток холостого хода трансформатора. Поэтому при изготовлении магнитных систем и сборке трансформаторов необходимо избегать любых повреждений изоляции пластин и их механических нагрузок. Изменение количества пакета в магнитной системе позволяет меньше воздействовать на пластины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: Учеб.пособие для вузов. -5-е изд., перераб. И доп.- М.: Энергоатомиздат, 1986–528 с.
- 2 Серебряков А. С. Трансформаторы: Учебное пособие для вузов.-М: Издательский дом МЭИ, 2013–360 с.
- 3 Аншин А.Ш., Худяков З.И Сборка трансформаторо: Учеб.пособие для ПТУ 2-е изд., перераб.и доп.- М: Высш.шк., 1991-288 с.
- 4 Лизунова С. Д., Лоханина А.К. Силовые трансформаторы: Справочная книга: -М: Энергоиздат, 2004.-616 с.
- 5 Гончарук А. И. Расчет и Конструирование трансформаторов: Учеб. Для техникумов. - М.: Энергоатомиздат. 1990.-256 с.
- 6 СТ КазНИТУ-09-2023. Работы учебные. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию текстового и графического материала. Алматы: КазНИТУ, 2023.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Гайнуллина Данагул Азаматқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Повышение эффективности сборки трансформатора изменением конструкции магнитопровода

Научный руководитель: Ерлан Сарсенбаев

Коэффициент Подобия 1: 2.6

Коэффициент Подобия 2: 0.9

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 2

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрывтия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

Дата 08.06.2024

Заведующий кафедрой Энергетики

Сарсенбаев ЕА

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Гайнуллина Данагүл Азаматқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Повышение эффективности сборки трансформатора изменением конструкции магнитопровода

Научный руководитель: Ерлан Сарсенбаев

Коэффициент Подобия 1: 2.6

Коэффициент Подобия 2: 0.9

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 2

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

Дата 28.06.2022

проверяющий эксперт

Сарсенбаев Е.А.


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на дипломную работу
**«Повышение эффективности сборки трансформатора изменением конструкции
магнитопровода»**

Гайнуллина Данагүл

6B07101 – «Энергетика»

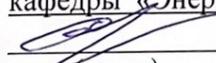
В данной дипломной работе студентка Гайнуллина Данагүл, произвела расчет по трансформатору, выпущенный в производство предприятия «УТЗ» где проводилась практика. Предоставлены расчеты короткого замыкания. Холостого хода, тепловой расчет трансформатора, и выявление повышения эффективности сборки. В работе была поднята тема зависимости холостого хода от качества сборки трансформатора.

Гайнуллина Д. проявила высокий уровень теоретической подготовки и оперативности при выполнении дипломной работы. Она показала способность сочетать теорию с практикой и успешно решала поставленные задачи, демонстрируя организованность и умение.

Дипломная работа студента на тему «Повышение эффективности сборки трансформатора изменением конструкции магнитопровода» выполнена в полном объеме. Тема дипломной работы раскрыта полностью. Были небольшие ошибки в расчетах напряжения короткого замыкания, которые были устранены в ходе работы.

В целом, дипломная работа Гайнуллины Данагүл Азаматқызы на тему «Повышение эффективности сборки трансформатора изменением конструкции магнитопровода» заслуживает оценки «хорошо» (80 балла), а сам студент присвоения академической степени бакалавра по образовательной программе 6B07101 - «Энергетика».

Научный руководитель
PhD, ассоциированный профессор
кафедры «Энергетика»


Е.А. Сарсенбаев

(подпись)
«15» 06 2024 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу
(наименование вида работы)

Гайнуллина Данагүл Азаматқызы
(Ф.И.О. обучающегося)

6В07101 - Энергетика
(шифр и наименование специальности)

На тему: **«Повышение эффективности сборки трансформатора
изменением конструкции магнитопровода»**

В дипломной работе проводится вычисление параметров трансформатора произведенный из проекта «двойной пакет». Были произведены расчеты короткого замыкания и холостого хода, и тепловой расчет трансформатора. Также было поднята тема эффективности сборки трансформатора предприятия, где проводилась практика. Сделан расчет по выбору обмотке низкого и высокого напряжения. Напряжение короткого и ток холостого хода были найдены.

Замечания к работе

В качестве замечания можно отметить, что были допущены местами ошибки в расчете напряжения короткого замыкания. В общем, дипломная работа написана в соответствии с требованиями, и тема раскрыта полностью.

Оценка работы

Дипломная работа Гайнуллиной Данагүл заслуживает оценки «хорошо» (80 балла), а сам студент присвоения академической степени бакалавра по образовательной программе 6В07101 – «Энергетика».

Рецензент

PhD, ассистент- профессор

Кафедра «Энергетика»

АлТ Университет им.

М.Тынышпаева

Калиев Ж.Ж.



202 г
ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ