**Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования**

**«Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»**

Курсовая работа

по расчету трансформатора

|  |
| --- |
| **Руководитель:**  **Палилов И.А.**  **Выполнили студенты 3 курса 21хx группы:**  **Сироткин Е.А.** |

**Иваново 2022г.**

ЗАДАНИЕ НА РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА.

Номинальная мощность трансформатора: Sн = 500 кВА.

Напряжение на стороне ВН:

Напряжение на стороне НН:

Потери холостого хода:

Потери короткого замыкания:

Напряжение короткого замыкания:

Ток холостого хода:

Число фаз: m = 3

Номинальная частота: f=50 Гц

ПБВ на стороне ВН +- 2х2.5%

Схема и группа соединения: Δ / Y

**Введение.**

Силовой трансформатор является одним из важнейших элементов каждой электрической сети. Передача электрической энергии на большие расстояния от места ее производства до места потребления требует в современных сетях не менее чем пяти-шестикратной трансформации в повышающих и понижающих трансформаторах.

Определяя место силового трансформатора в электрической сети, следует отметить, что по мере удаления от электростанции единичные мощности трансформаторов уменьшаются, а удельный расход материалов на изготовление трансформатора и потери, отнесенные к единице мощности, а также цена 1кВт потерь возрастают.

Одной из важнейших задач в настоящее время является задача существенного уменьшения потерь энергии в трансформаторах, т.е потерь холостого хода и потерь короткого замыкания.

Уменьшение потерь холостого хода достигается главным образом путем все более широкого применения холоднокатанной рулонной электротехнической стали улучшенными магнитными свойствами - низкими и особо низкими удельными потерями и низкой удельной намагничивающей мощностью. Применение этой стали, обладающей анизотропией магнитных свойств и очень чувствительной к механическим воздействиям при обработке - продольной и поперечной резке рулона на пластины; к толчкам и ударам при транспортировке пластин; к ударам, изгибам и сжатию пластин при сборке магнитной системы и остова, сочетается с существенным изменением конструкций магнитных систем, а также с новой прогрессивной технологией заготовки и обработки пластин и сборки магнитной системы и остова.

Новые конструкции магнитных систем характеризуются применением косых стыков пластин в углах системы, стяжкой стержней и ярм кольцевыми бандажами вместо сквозных шпилек в старых конструкциях и многоступенчатой формой сечения ярма в плоских магнитных системах. Находят все более широкое применение стыковые прстранственные магнитные системы со стержнями, собранными из плоских пластин, и с ярмами, навитыми из ленты холоднокатанной стали. Это конструкция позволяет уменьшить расход активной стали и потери холостого хода при увеличении тока холостого хода.

Уменьшение потерь короткого замыкания достигается главным образом понижением плотности тока за счет увеличения массы металла в обмотках.

Сокращение расхода изоляционных материалов, трансформаторного мосла и металла, употребляемого на изготовление баков и систем охлаждения трансформаторов, достигается путем снижения испытательных напряжений и уменьшения изоляционных расстояний при улучшении изоляционных конструкций на основе совершенствования технологии обработки езоляции и применения новых средств защиты трансформаторов от перенапряжений. Большой эффект в деле экономии конструктивных материалов дает также применение новых систем форсированного охлаждения трансформаторов с направленной форсированной циркуляцией масла в каналах обмоток и эффективных охладителях.

1. **РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.**

**1.1 Определение линейных и фазных токов и напряжений обмоток ВН и НН.**

Мощность одной фазы рассчитываемого трансформатора составляет:

Мощность обмоток одного стержня трансформатора при трёх активных (несущих обмотки) стержня:

Номинальный (линейный) ток обмотки ВН и НН трехфазного трансформатора для соединения Δ / Y определяется по формуле:

На стороне ВН:

На стороне НН:

Определяем фазные токи

Для ВН:

Для НН:

Определяем фазные напряжения

Для ВН:

Для НН:

Напряжение и потери короткого замыкания

Ток холостого хода не более Потери холостого хода

**1.2 Определение испытательных напряжений обмоток.**

Значения испытательных напряжений для обмоток трансформатора (при нормальных атмосферных условиях) выбирается по табл.4-1[стр 169] в соответствии с классом напряжения соответстующей обмотки.

для обмотки ВН класс напряжения 10 кВ, наибольшее рабочее напряжение 12 кВ, испытательное напряжение 35 кB.

для обмотки НН класс напряжения 3 кВ, наибольшее рабочее напряжение 3,6 кВ, испытательное напряжение 18 кB.

### **1.3 Определение активной и реактивной составляющей напряжения короткого замыкания.**

### активная составляющая напряжения короткого замыкания :

### реактивная составляющая напряжения короткого замыкания при заданном :

**2.РАСЧЁТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА.**

**2.1 Определение изоляционных расстояний**.

Минимально допустимые изоляционные расстояния принимаются по рекомендациям табл.4-4[1], 4-5[1], в которых учтен необходимый запас прочности изоляции.

Между обмотками ВН и НН

Между обмоткой НН и стержнем

Расстояние обмоток ВН от ярма

Расстояние обмоток НН до ярма

Между наружными обмотками ВН соседних стержней

**2.2 Выбор схемы и конструкции магнитной системы, а также марки и толщины листов стали.**

Приведенный радиальный размер обмоток определяется по формуле:

Значение коэффициента k выбираем по табл.3-3(стр 121): k=0,63

Ширина приведенного канала рассеяния :

Коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному полю (стр.120):

Согласно указаниям параграфа 2.3 [1, стр. 78] выбираем трехфазную стержневую шихтованную магнитную систему с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми на среднем стержне. Прессовка ярма вертикальными шпильками, расположенными вне ярма. Материал магнитной системы – холоднокатанная текстурированная рулонная сталь марки 3404 толщиной 0,3 мм. (см.рис.1) .



Рис.1 Схема плоской магнитной цепи с косыми стыками в четырех углах.

**2.3. Выбор индукции в магнитной системе.**

Рекомендуемое значение индукции в стержне трансформатора принимается по табл.2-4 (стр.78) в соответствии с типом трансформатора (масляный), принятой маркой электротехнической стали и его мощностью - 500 кВА:

В сечении стержня трансформатора принимаем 6 ступеней в соответствии с рекомендациями по табл2-5 (стр.82).

Коэффициент заполнения сечения стержня (ярма) сталью по табл.2-2 (стр.77) для нагревостойкого изоляционного покрытия при толщине листа 0.3 мм составляет:

Общий коэффициент заполнения сталью площади круга, описанного около сечения стержня:

Ярмо многоступенчатое, число ступеней 5, коэффициент усиления ярма(по табл.2-8 (стр.92))равен:

Индукция в ярме:

Число зазоров в магнитной системе на косом стыке 4, на npямом 2.

Индукция в зазоре на прямом стыке , на косом стыке



Рис.2. Прессовка стрежней стальными бандажами и ярма полубандажами.

**2.4. Предварительный расчет основных размеров трансформатора.**

По табл. 3-12 (стр. 159) для трансформатора с обмотками, выполненными из медного провода принимаем соотношение основных размеров:

Предварительное значение диаметра стержня при этом составляет:

0,192 м.

Выбираем ближайший нормализованный диаметр стержня [1, стр. 87]

Уточняем значение b, соответствующее полученному диаметру:

Определяем предварительно радиальный размер обмотки НН:

k1 = 1.1 согласно рекомендациям,

Определим средний диаметр канала между обмотками :

Высота обмотки:

Активное сечение стержня (чистое сечение стали):

Электродвижущая сила одного витка:

**3. Расчет обмоток трансформатора.**

Выбираем тип обмоток по таблице 5.8 [1, стр. 258]

- для обмотки ВН при напряжении 10500 В и токе А цилиндрическая многослойная из круглого медного провода

- для обмотки НН при напряженииВ и токе А цилиндрическая многослойная из прямоугольного медного провода

**3.1 Расчет обмотки низшего напряжения (НН).**

Число витков обмотки НН:

принимаем w1 = 206 витка

Напряжение одного витка:

Если обмотка НН выполнена в 4 слой , то число витков в одном слое:

Ориентировочный осевой размер витка:

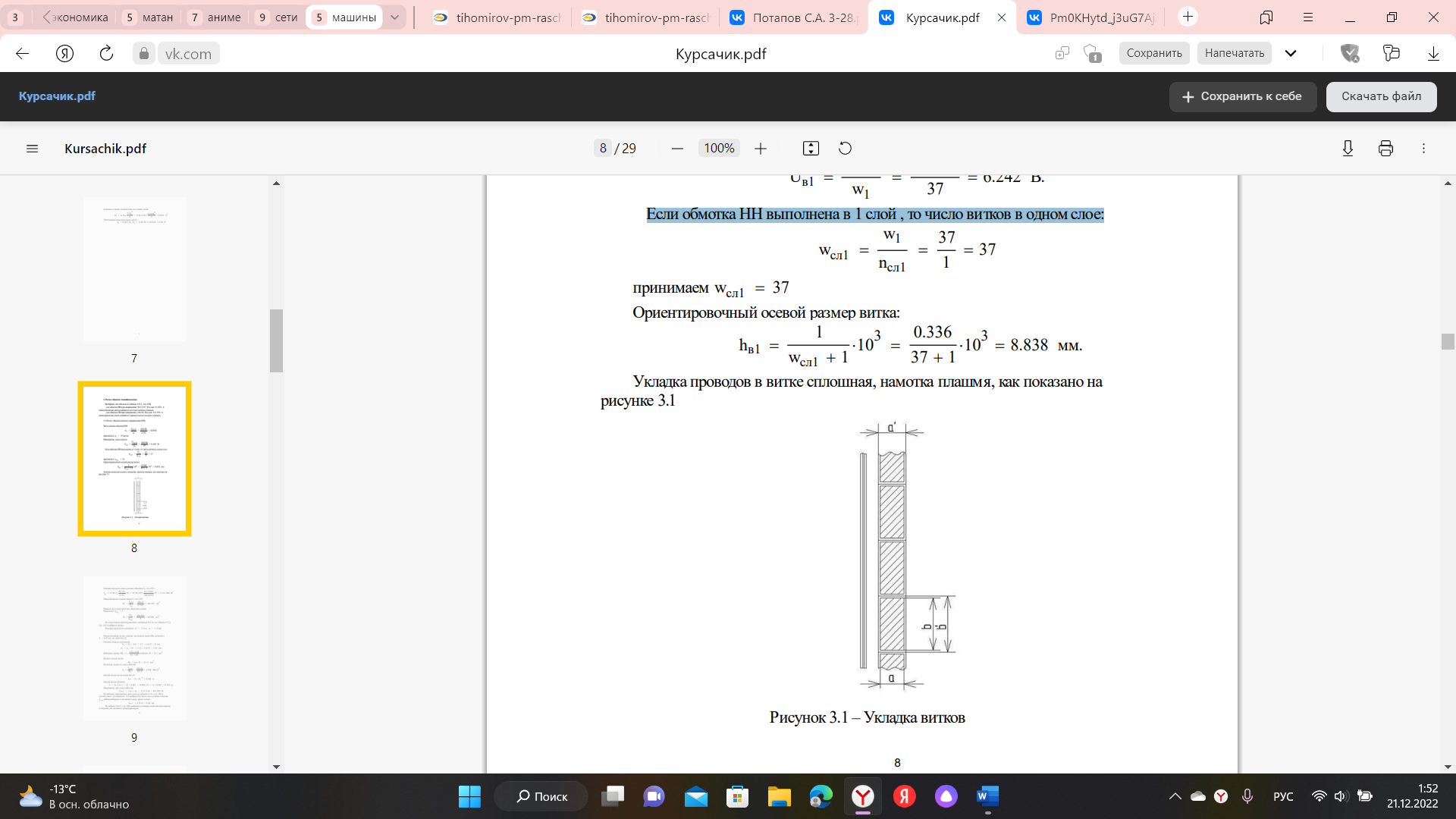


Рис.3-Укладка витков

Средняя плотность тока в медных обмотках [1, стр. 255]

По табл.3-6 (стр.131)

Ориентировочно сечение витка [1, стр. 255]:

Примем число параллельных проводов в витке:

Радиальное

По полученным ориентировочным значениям П и hв1 по таблице 5.2 [1, стр. 212] подбираем провод:

Размеры провода без изоляции:

Размер изоляции на две стороны для провода марки ПБ составляет:

по (табл 4.6 [1])

Размеры провода в изоляции:

Полное сечение витка:

Расчетная плотность тока в обмотке:

Осевой размер витка определяется:

Осевой размер обмотки:

Напряжение двух слоев обмотки:

По рабочему напряжению двух слоев по таблице 4.7 [1, стр. 190] в соответствии с указаниями п. 4.5 выбираются число слоев и общая толщина кабельной бумаги в изоляции между двумя слоями:

По таблице 9.2а [1, стр. 426] выбирается ширина охлаждающих каналов в обмотках для масляных трансформаторов:

Радиальный размер обмотки:

Внутренний диаметр обмотки:

Наружный диаметр обмотки:

Полная охлаждаемая поверхность обмотки НН для всего трансформатора:

**3.2 Расчет обмотки высшего напряжения (ВН).**

Регулирование напряжения трансформатора будет производиться переключением ответвлений обмотки без возбуждения (ПБВ) после отключения всех обмоток трансформатора от сети, как изображено на рисунке 3.2. Предусмотрено выполнение четырех ответвлений +5; +2,5; - 2,5; - 5 % номинального напряжения помимо основного зажима с номинальным напряжением. Переключение ответвлений обмоток будет производиться специальными переключателями, встроенными в трансформатор, с выведенными из бака рукоятками управления.



Рис. 4 – Схема выполнения ответвлений в обмотке ВН при регулировании напряжения без возбуждения ПБВ

Число витков при номинальном напряжении:

Напряжение на одной ступени регулирования:

Число витков на одной ступени регулирования напряжения:

Число витков обмотки на ответвлениях на четырех ступенях: - верхние ступени напряжения:

- нижние ступени напряжения

Плотность тока в обмотке ВН предварительно определяется:

Сечение витка обмотки ВН предварительно определяется:

Осевой размер обмотки ВН принимается ранее определенному осевому размеру обмотки НН:

Если обмотка ВН выполнена в 8 слоев , то число витков в одном слое:

Ориентировочный осевой размер витка:

По полученным ориентировочным значениям П2 и hв2 по таблице 5.1 [1, стр. 212] подбираем провод

Размеры провода без изоляции:

Размеры провода в изоляции:

Полное сечение витка:

Расчетная плотность тока в обмотке:

Осевой размер витка определяется:

Осевой размер обмотки:

Разница между ранее рассчитанной высотой обмотки НН и полученным значением высоты обмотки ВН:

Так как разница между высотами обмоток ВН и НН небольшая, при дальнейших расчетах размеров стержня трансформатора будет использоваться высота обмотки ВН:

Напряжение двух слоев обмотки:

По рабочему напряжению двух слоев по таблице 4.7 [1, стр. 190] в соответствии с указаниями п. 4.5 выбираются число слоев и общая толщина кабельной бумаги в изоляции между двумя слоями:

По таблице 9.2а [1, стр. 426] выбирается ширина охлаждающих каналов в обмотках для масляных трансформаторов:

Радиальный размер обмотки:

Внутренний диаметр обмотки:

Наружный диаметр обмотки:

Поверхность охлаждения:

Где k = 0.8 - коэффициент, учитывающий закрытые части поверхности обмотки изоляционными деталями и число внутренних и наружных поверхностей. Значение определяется исходя из рекомендаций [1, стр. 285].

**4. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.**

**4.1 Расчет потерь короткого замыкания.**

**4.1.1 Основные потери в обмотках.**

Средний диаметр обмотки НН:

Масса металла обмотки НН:

Основные потери в обмотке НН:

Средний диаметр обмотки ВН:

Масса металла обмотки ВН:

Основные потери в обмотке НН:

Основные потери в обмотках:

**4.1.2 Добавочные потери в обмотках.**

Число проводников обмотки НН в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния:

Размер проводника обмотки НН, параллельной направлению линий магнитной индукции рассеяния:

Коэффициент, учитывающий отклонение реального потока рассеяния от нормального:

Число проводников обмотки BН в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния:

Размер проводника обмотки ВН, параллельной направлению линий магнитной индукции рассеяния:

Коэффициент, учитывающий отклонение реального потока рассеяния от нормального:

Коэффициент добавочных потерь в обмотке НН для медного провода:

Коэффициент добавочных потерь в обмотке ВН для медного провода:

Длина отводов при соединении Δ / Y:

Масса отводов:

Потери в отводах:

Потери в стенках бака и других элементах конструкции:

Где k = 0.02 по таблице 7.1 [1, стр. 319]

Полные потери короткого замыкания:

Полные потери КЗ не должны значительно отклоняться от гарантийного значения, заданного ГОСТ. Это отклонение должно составлять не более 5- 10%. Отклонение потерь короткого замыкания:

Полученное значение отклонения потерь короткого замыкания находится в допустимых пределах.

**4.2 Определение напряжение короткого замыкания.**

Ширина приведенного канала рассеяния в тех случаях, когда радиальные размеры обмоток равны или мало отличаются друг от друга в трансформаторах мощностью S < 10000 кВА:

Соотношение, определяющее распределение активных материалов в трансформаторе:

Реактивная составляющая напряжения:

Активная составляющая напряжения:

Напряжение короткого замыкания:

Отклонение заданного напряжения короткого замыкания от заданного:

Согласно ГОСТ 11677-85 напряжение КЗ готового трансформатора на основномответвлении не должно отличаться от гарантийного значения более чем на 10%. Полученное отклонение не превышает допустимого значения.

**4.3 Определение механических сил в обмотках.**

Мощность КЗ принимается по таблице 7.2 [1, стр. 329]:

Действующее значение установившегося тока короткого замыкания определяется согласно ГОСТ 11677-85 с учетом сопротивления питающей сети для основного ответвления обмотки:

Коэффициент, учитывающий максимально возможную апериодическую составляющую тока КЗ:

Мгновенное максимальное значение тока КЗ:

Суммарная радиальная сила, действующая на наружную обмотку и стремящаяся растянуть ее (такая же, но направленная прямо противоположно сила, действующая на внутреннюю обмотку, стремящаяся сжать ее):

Напряжения сжатия в обмотке:

Полученные значения напряжений в обмотках существенно меньше допустимого – 30 МПа для трансформаторов с медными обмотками. Следовательно, усилия не приведут к опасным деформациям в обмотках и их дальнейшему разрушению. Осевая сила:

Число прокладок по окружности обмоток принимается 4. Ширина прокладки из электроизоляционного картона принимается 0,04 м. Тогда осевые силы:

Полученные значения существенное меньше допустимых значений – 18-20 МПА для трансформаторов мощностью до 6300 кВА. Следовательно, механическая прочность проектируемого трансформатора обеспечивается.

**4.4 Расчет температуры обмоток при коротком замыкании.**

Расчет температуры обмоток при коротком замыкании проводится для установившегося тока короткого замыкания при предположении, что вследствие кратковременности процесса отдачи тепла, обусловленного возникновением тока короткого замыкания, от обмотки к маслу не успевает установиться и все это тепло накапливается в обмотке, повышая ее температуру.

Предельная условная температура обмотки, рассчитываемая при предположении линейного ее нарастания, согласно [1] при учете теплоемкости металла обмотки и изоляции провода через tk с после возникновения короткого замыкания может быть определена по формуле для медных обмоток: Конечная температура обмотки НН:

Полученное значение температур обмоток меньше допустимого 250 для трансформаторов с медными обмотками и масляным охлаждением (по табл. табл.7.6). Следовательно, трансформатор при коротком замыкании не будет нагреваться до опасных температур.

**5 Расчет магнитной системы трансформатора.**

**5.1 Определение размеров магнитной системы.**

Ранее была выбрана п. 2.2 трехфазную стержневую шихтованную магнитную систему с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми на среднем стержне. Материал магнитной системы – холоднокатанная текстурированная рулонная сталь марки 3404 толщиной 0,3 мм

Размеры пакетов выбираются по таблице 8.2 [1, стр. 357] для стержня диаметром без прессующей пластиной и их параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Размеры пакетов при 6 ступенях

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № пакета | Ширина пакета а, мм | Толщина пакета b, мм |
| *1* | 180 | 30 |
| *2* | 165 | 17 |
| *3* | 145 | 14 |
| *4* | 130 | 8 |
| *5* | 115 | 7 |
| *6* | 100 | 5 |
| *7* | 75 | 7 |

Определение суммарной толщины пакетов (ширины стержня и ярма):

Площадь сечения ступенчатой фигуры стержня определяется по таблице 8.6 [1, стр. 364] и для диаметра стержня 0,19 м и без прессующей пластины:

Активное сечение стержня:

Площадь сечения ярма выбирается по таблице 8.7 [1, стр. 365] и для диаметра 0,19 м и без прессующей пластины:

Активное сечение ярма:

Длина стержня:

Расстояние между осями соседних стержней:

Высота ярма принимается равной ближайшей ширине пластины нормализованного ряда:

**5.2 Определение массы стержней, ярм и массы стали.**

Плотность холоднокатанной стали

Объем угла плоской шихтованной магнитной системы без прессующей пластины принимается по таблице 8.6 [1, стр. 364] и для диаметра 0,19 м:

Масса стали угла при многоступенчатой форме сечения:

Масса стали ярм определяется, как масса частей ярм, заключенных между осями крайних стержней:

Полная масса двух ярм:

Масса стали стержней в пределах окна магнитной системы:

Масса стали в местах стыка пакетов стержня и ярма:

Полная масса стали стержней:

Полная масса стали плоской магнитной системы:

**5.3 Определение потерь холостого хода.**

Магнитная индукция в стрежне:

Магнитная индукция в ярме:

Магнитная индукция в зазорах:

Удельные потери для стали стержней, ярм и стыков по таблице 8.10 [1, стр. 376] для стали марки 3404 толщиной 0,3 мм при шихтовке в две пластины:

Для определения потерь холостого хода по формуле 8.33 [1] определяются: коэффициент добавочных потерь по таблице 8.14 [1, стр. 383] для неотоженной стали марки 3404

,

коэффициент увеличения потерь в углах принимается по таблице 8.13 [1, стр. 382] и для принятого сочетания числа углов со стыками ,

Тогда потери холостого хода:

Потери холостого хода не превышают регламентируемого ГОСТом 11677-85 значения 15%.

**5.4 Определение тока холостого хода.**

При расчете тока холостого хода трансформатора отдельно определяют его активную и реактивную составляющие. По таблице 8.17 [1, стр. 390] находятся удельные намагничивающие мощности:

По табл. 8-17 (стр. 390[1]) находим удельные намагничивающие мощности:

Для вычисления полной намагничивающей мощности определяются следующие коэффициенты:

- коэффициент, учитывающий форму сечения ярма;

- коэффициент, учитывающий перешихтовку верхнего ярма;

- коэффициент, учитывающий прессовку магнитной системы по табл. 8-12;

- коффициент, учитывающий влияние срезания заусенцев;

- коэффициент, учитывающий увеличение намагничивающей мощности в углах магнитной системы по табл. 8-20;

- коэффициент, учитывающий влияние резки полосы рулона на пластины;

- коэффициент, учитывающий ширину пластин в углах магнитной системы по табл 8-21;

Полная намагничивающая мощность:

Активная составляющая тока холостого хода:

Реактивная составляющая тока холостого хода:

Ток холостого хода:

Отклонение тока холостого хода:

Отклонение расчетного тока холостого хода от заданного не превышает половину допуска 30%, разрешенного ГОСТ 11677-85.

**6 Тепловой расчет трансформатора.**

**6.1 Проверочный тепловой расчет обмоток**

Плотность теплового потока определяется по формуле для обмотки НН:

Внутренний перепад температуры для обмотки НН:

Где

Плотность теплового потока обмотки ВН:

Внутренний перепад температуры для обмотки ВН:

Для определения перепада температуры на поверхности обмоток при осевых охлаждающих каналах определяются следующие коэффициенты: коэффициент, учитывающий скорость движения масла внутри обмотки для естественного масляного охлаждения;

коэффициент, учитывающий затруднение конвекции масла в каналах внутренних обмоток

НН и СН

коэффициент, учитывающий влияние на конвекцию масла относительно ширины (высоты) горизонтальных масляных каналов

Перепад температуры на поверхности обмотки НН:

Перепад температуры на поверхности обмотки ВН:

Среднее превышение температуры обмотки НН над средней температурой масла:

Среднее превышение температуры обмотки ВН над средней температурой масла:

**6.2 Тепловой расчет бака.**

По таблице 9.4 [1, стр. 429] в соответствии с мощностью трансформатора выбирается бак со стенками в виде волн. Изоляционные расстояния:

Минимальная ширина бака:

Минимальная длина бака:

Высота активной части бака:

Где n = 0.05 м – толщина подкладки под нижнее ярмо.

Общая глубина бака:

Где = 0.4 м – расстояние от верхнего ярма до крышки бака, принимается по таблице 9.5 [1, стр. 431].

Среднее превышение температуры масла, омывающего обмотки:

Превышение температуры масла в верхних слоях:

Так как превышение температуры масла в верхних слоях в этом случае будет меньше 60 градусов, то найденное среднее превышение может быть допущено.

Принимая предварительно перепад на внутренней поверхности стенки бака 6 градусов и запас в 2 градуса, находим среднее превышение температуры стенки бака над воздухом:

Поверхность конвекции гладкой части бака:

Коэффициент, учитывающий отношение периметра поверхности излучения к поверхности гладкой части бака:

k = 2, т.к. бак с навесными радиаторами.

Ориентировочная поверхность излучения бака трансформатора:

Необходимая поверхность конвекции:

Поверхность конвекции крышки бака:

Для расчета бака с радиаторами в соответствии с таблицей 9.9 [1, стр. 442] выбираются минимальные расстояния осей фланцев радиатора от нижнего и верхнего срезов стенки бака:

По таблице 9.9 [1 стр. 442] принимается размер радиатора с двумя рядами труб и поверхность:

Поверхность конвекции одной пары коллекторов радиатора:

Необходимая поверхность конвекции радиаторов:

теплоотдачи конвекцией для данной формы.

Поверхность конвекции радиаторов, приведенная к поверхности гладкой стенки:

Число радиаторов для обеспечения требуемой конвекции:

Принимается

Поверхность конвекции коллекторов:

Для определения конвекции бака с радиаторами принимаются по таблице 9.6 [1, стр. 432] следующие коэффициенты:

Поверхность конвекции бака с радиаторами:

Среднее превышение температуры стенки бака:

Среднее превышение температуры масла вблизи стенки бака над температуройстенки:

Превышение средней температуры масла над температурой окружающего воздуха:

Превышение температуры масла в верхних слоях:

Превышение температуры обмоток ВН и НН над воздухом:

Полученные значения температур обмоток трансформатора являются допустимыми (не превышают 65 °C), следовательно при работе трансформатора не будет возникать опасного перегрева масла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: Учеб. по-собие для вузов.-5-е изд., перера. и доп.-М.: Энергоатомиздат,1986.-528 с.: ил.

2. Тихонов А. И., Лапин А. Н. Проектирование силовых трансформаторов: Учеб. по-собие / ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина". - Иваново, 2011. -160 с.