Методические указания

к курсовому проекту

по дисциплине

«Механика электрических машин»

Содержание

[Введение 3](#_Toc526767754)

[1 Определение основных электрических величин 5](#_Toc526767755)

[2 Расчет основных размеров трансформатора 7](#_Toc526767756)

[2.1 Выбор конструктивной схемы магнитной системы, марки стали и толщины листов, технологии изготовления 7](#_Toc526767757)

[2.2 Выбор материала и конструкции обмоток (предварительно) 10](#_Toc526767758)

[2.3 Выбор конструкции и определение размеров основных изоляционных промежутков главной изоляции обмоток 10](#_Toc526767759)

[2.4 Определение основных размеров трансформатора 11](#_Toc526767760)

[3 Расчет обмоток 17](#_Toc526767761)

[3.1 Общие вопросы расчёта обмоток 17](#_Toc526767762)

[3.2 Расчёт обмоток НН 17](#_Toc526767763)

[3.2.1 Расчёт цилиндрических обмоток из прямоугольного провода 19](#_Toc526767764)

[3.2.2 Расчёт цилиндрической многослойной обмотки из алюминиевой ленты 23](#_Toc526767765)

[3.3 Расчёт обмоток ВН 25](#_Toc526767766)

[3.3.1 Расчёт цилиндрической многослойной обмотки из прямоугольного провода 26](#_Toc526767767)

[3.3.2 Расчёт многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода 29](#_Toc526767768)

[4 Определение параметров короткого замыкания 32](#_Toc526767769)

[4.1 Определение потерь короткого замыкания 32](#_Toc526767770)

[4.2 Расчёт напряжения короткого замыкания 35](#_Toc526767771)

[4.3 Определение механических сил в обмотках и нагрева обмоток при коротком замыкании 35](#_Toc526767772)

[4.3.1 Проверка обмоток на механическую прочность при коротком замыкании 36](#_Toc526767773)

[4.4 Способы снижения сил в обмотках при коротком замыкании 40](#_Toc526767774)

[Список литературы 41](#_Toc526767775)

# Введение

Целью выполнения курсового проекта является [определение основных электрических величин](#_Toc499023141) трансформатора, расчет его основных размеров, расчет обмоток ВН и НН, определение потерь короткого замыкания.

Задача курсового проекта: по расчетным данным спроектировать двухобмоточный трехфазный трансформатор.

Электрическую энергию, вырабатываемую электростанциями, передают за сотни и тысячи километров, в объединенную энергетическую систему, в промышленные центры и непосредственно к потребителю.

Чтобы уменьшить потери при передаче электроэнергии, увеличивают напряжение и соответственно снижают силу тока с помощью трансформатора. Трансформатор, повышая напряжение, пропорционально уменьшает силу тока, поэтому передаваемая мощность остается без изменения, а потери в проводах ЛЭП резко уменьшаются. Например, при увеличении напряжения передаваемой энергии в 10 раз потери снижаются в 100 раз.

Трансформатор – статический электромагнитный аппарат для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения, той же частоты. Трансформаторы применяют в электрических цепях при передаче и распределении электрической энергии, а также в сварочных, нагревательных, выпрямительных электроустановках и многом другом. Трансформаторы различают по числу фаз, числу обмоток, способу охлаждения. В основном используются силовые трансформаторы, предназначенные для повышения или понижения напряжения в электрических цепях.

Трансформатор во время своей работы, вследствие возникающих в нем потерь нагревается. Чтобы температура нагрева трансформатора не превышала допустимого значения, необходимо правильно подобрать сечение обмоток трансформатора, магнитопровода и обеспечить достаточное охлаждение при помощи масла.

Задание

на выполнение

курсового проекта по дисциплине

**«Механика электрических машин»**

Вариант № \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_гр. \_\_\_\_\_\_\_

Тема: «Расчет трехфазного двухобмоточного трансформатора \_\_\_\_\_\_\_»

Данные для расчета:

Назначение –

Полная мощность , кВ·А –

Номинальное напряжение обмоток ВН , кВ –

Номинальное напряжение обмоток НН , кВ –

Частота питающей сети , Гц –

Потери холостого хода , Вт –

Потери короткого замыкания ,Вт –

Напряжение короткого замыкания , % –

Ток холостого тока , % –

Схема и группа соединений обмотки –

Тип регулирования напряжения –

Глубина регулирования –

Режим нагрузки –

Способ охлаждения –

Магнитная система –

Климатическое использование и категория размещения –

# 1 Определение основных электрических величин

К основным электрическим величинам, значения которых используются в расчетах трансформаторов, относятся:

* 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 величины определяются по нижеприводимым формулам.

Мощность одной фазы трансформатора:



где – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

 – число фаз.

Мощность на одном стержне:

,

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

Для трехфазного (= 3) трехстержневого (= 3) трансформатора

.

Номинальные линейные токи обмоток:





где  и  – 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:



- при соединении обмоток в треугольник:



где I – номинальный ток обмотки:  обмотки ВН,  обмотки НН.

Фазное напряжение трёхфазного трансформатора:

- при соединении обмоток в звезду или зигзаг:



- при соединении обмоток фаз в треугольник:



где U – номинальное линейное напряжение соответствующей обмотки:  обмотки ВН,  обмотки НН.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Класс напряжения,  кВ | До1  кВ | 6  кВ | 10  кВ |
| Наибольшее рабочее напряжение,  кВ | - | 7,2 | 12 |
| Испытательное напряжение, Uисп.,  кВ | 5 | 25 | 35 |

Таблица 1.1 - Испытательные напряжения промышленной частоты (50 Гц) для масляных силовых трансформаторов

Активная составляющая напряжения короткого замыкания, %:



где– мощность потерь короткого замыкания, Вт; дана в задании.

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %:



где– номинальное напряжение короткого замыкания (из задания).

# 2 Расчет основных размеров трансформатора

## 2.1 Выбор конструктивной схемы магнитной системы, марки стали и толщины листов, технологии изготовления

Основой конструкции трансформатора является магнитная система, так как её основные размеры вместе с основными размерами обмоток определяют главные размеры активной части и всего трансформатора.

Наибольшее распространение в трансформаторостроении получили плоские магнитные системы стержневого типа со ступенчатой формой поперечного сечения стержня, вписанного в окружность, и с обмотками в виде цилиндров. Стержневые магнитные системы шихтуются из листов электротехнической стали с косыми сторонами на крайних стержнях и с прямыми на среднем стержне.

Материалом для магнитной системы силовых трансформаторов служит электротехническая холоднокатаная тонколистовая сталь марок 3404, 3405, 3406, 3407 и 3408 толщиной 0,35, 0,30 и 0,27 мм, поставляемая в рулонах.

В трансформаторах мощностью до 1000 кВ·А используется, в основном, сталь марки 3404 с толщиной пластин 0,35 мм.

В таблице 2.1 приведены рекомендуемые значения индукции в стержнях трансформаторов из этих сталей.

Таблица 2.1 - Рекомендуемая индукция в стержнях масляных трансформаторов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Марка стали | Номинальная мощность трансформаторов,  кВ·А | | |
| До 16 | 25-100 | 160 и более |
| 3404, 3405, 3406 | 1,50-1,55 | 1,55-1,60 | 1,55-1,65 |

Чистое сечение стали в поперечном сечении стержня называется активным сечением стержня. Отношение площади сечения стержня к площади круга диаметром называется коэффициентом заполнения площади круга - . В таблице 2.2 приведены рекомендуемые значения числа ступеней и получающиеся при этом значения  и .

Таблица 2.2 - Число ступеней в сечении стержня трёхфазных масляных трансформаторов мощностью 400-6300 кВ·А

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Показатель | | Прессовка стержня бандажами, сечение стержня диаметром 0,63м и выше имеет продольные каналы | | | | | |
| Мощность трансформатора, кВ·А | | 400-630 | | 1000-1600 | | 2500-6300 | |
| Ориентировочный диаметр стержня ,  м | | 0,18,  0,19 | 0,21,  0,22 | 0,23-0,26 | 0,27-0,30 | 0,32-0,34 | 0,36-0,38 |
| Без прессующей пластины | Число ступеней | 6 | 8 | 8 | 8 | 9 | 9 |
| Коэффициент | 0,915 | 0,929 | 0,925 | 0,928 | 0,929 | 0,913 |

Примечание - В коэффициенте  учтено наличие охлаждающих каналов в сечении стержня, если они выполняются.

Отношение активного сечения ярма  к активному сечению стержня  называется коэффициентом усиления ярма:

.

Для нормализованных размеров пакетов пластин .

В предварительном расчёте активное сечение стержня определяется по выражению:

,

где  - коэффициент заполнения сталью;

,

где  - коэффициент заполнения площади ступенчатой фигуры сечения стержня чистой сталью; значения  определяется по таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Значения коэффициента  для рулонной холоднокатаной стали

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Марка стали | Толщина,  мм | Вид изоляционного покрытия |  |
| 3404, 3405, 3406 | 0,35  0,30 | Нагревостойкое | 0,97  0,96 |
| 3404, 3405, 3406 | 0,35  0,30 | Нагревостойкое плюс однократная лакировка | 0,965  0,955 |

Предварительное значение активного сечения ярма:

;

Остов трансформатора – магнитная система со всеми деталями для соединения её отдельных частей – должен быть жестким и механически прочным. Для этого пакеты стержней и ярм шихтованного магнитопровода стягиваются (прессуются) и скрепляются в единую конструкцию. Помимо придания жёсткости и прочности прессовка и стяжка исключают вибрацию пластин и снижает уровень шума при работе трансформатора.

Стержни трансформаторов мощностью от 400 кВ·А и выше ( > ) прессуются наложением бандажей из стеклоленты на расстояниях 0,12-0,15м один от другого.

Прессовка ярм трансформаторов мощностью до 6300 кВ·А выполняется стальными ярмовыми швеллерными балками, стягиваемыми шпильками. Шпильки располагаются вне ярм. При этом между балками и пластинами крайних пакетов устанавливаются изолирующие прокладки, шпильки изолируются от балок.

Для того чтобы магнитная система была достаточно устойчивой, могла выдержать механические усилия, возникающие в обмотках при коротких замыканиях, не разваливалась при подъёме остова или активной части, верхние и нижние ярма магнитной системы должны быть надёжно соединены между собой. Такое соединение в масляных трансформаторах с напряжением обмотки ВН классов 6, 10, 35 и 110 кВ выполняется стягиванием между собой верхних и нижних прессующих балок вертикальными шпильками.

## 2.2 Выбор материала и конструкции обмоток (предварительно)

Электролитическая медь, как проводниковый материал, по сравнению с алюминием имеет примерно в 1,5 раза меньше удельное электрическое сопротивление, большую механическую прочность, легко обрабатывается, более стойка к коррозии. Но из-за дефицитности меди алюминиевые обмотки также находят весьма широкое использование.

Поэтому все новые серии трансформаторов общего применения мощностью до 16000 кВ·А проектируются исключительно с алюминиевыми обмотками.

## 2.3 Выбор конструкции и определение размеров основных изоляционных промежутков главной изоляции обмоток

Силовой трансформатор может быть представлен состоящим из трёх систем:

- системы частей, находящихся при включенном трансформаторе под напряжением (обмотки, контакты переключателей ступеней напряжения, отводы, проходные шины и шпильки вводов, защитные экраны);

- системы заземлённых частей (магнитная система со всеми металлическими деталями, бак и система охлаждения);

- системы изоляции, разделяющей первые две системы и отдельные части, находящиеся под напряжением.

Изоляция подразделяется на главную и продольную. Главная изоляция отделяет токоведущие части от заземлённых, а продольная служит для изоляции разных точек токоведущих частей (витков, слоёв обмотки и т.п.).

В трансформаторах используется маслобарьерная главная изоляция, состоящая из комбинации масляных каналов или промежутков с барьерами в виде бумажно-бакелитовых, электрокартонных и кабельно-бумажных цилиндров, плоских и угловых шайб.

Размеры выступов цилиндров за высоту обмоток ( и ) обеспечивают отсутствие разрядов по поверхности цилиндра между обмотками и с обмоток на стержни магнитопровода. Значения размеров главной изоляции обмоток НН и ВН указаны в таблице 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4 - Главная изоляция. Минимальные изоляционные расстояния обмоток НН

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Мощность трансформатора, кВ·А | Uисп для обмоток НН,  кВ | Обм. НН от ярма l01, мм | Обм. НН от стержня,  мм | | | |
| δ01 | ац1 | а01 | lц1 |
| 1000 – 2500 | 5 | 15  принимается равным найденному по испытательному напряжению обмотки ВН | 4 | 6 | 15 | 18 |

Таблица 2.5 - Главная изоляция. Минимальные изоляционные расстояния ВН

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Мощность трансформатора кВ·А | для ВН,  кВ | ВН от ярма, мм | | Между ВН и НН,  мм | | Выступ цилиндра ,  мм | Между ВН и НН,  мм | |
|  |  |  |  |  |  |
| 1000 - 6300 | 18,25 и 35 | 50 | - | 20 | 4 | 20 | 18 | - |

## 2.4 Определение основных размеров трансформатора

Магнитная система и обмотки трехфазного двухобмоточного трансформатора с плоской трехстержневой магнитной системой изображены на рисунке 2.1.

с

с

l

d12

d

l0

l0

a22

a12

a2

a1

a01

Рисунок 2.1 - Активная часть трёхфазного двухобмоточного трансформатора с плоской трёхстержневой магнитной системой

Расчет основных размеров активной части трансформатора следует начинать с определения диаметра стержня магнитопровода:



где – ширина приведенного канала рассеянья трансформатора:



Значение  выбирается по таблице 2.5.

На этом этапе расчета размеры  и  неизвестны; поэтому



рассчитывается по приближенной формуле:



где – коэффициент, зависящий от мощности трансформатора, металла обмоток, класса напряжения обмоток ВН и мощности потерь короткого замыкания. Значения  выбираются из таблицы 2.6.

Таблица 2.6 - Значение коэффициента  для масляных трёхфазных двухобмоточных трансформаторов с ПБВ с медными обмотками и потерями короткого замыкания по ГОСТ 12022-76 и ГОСТ 11920-85

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Мощность трансформатора,  кВ·А | Класс напряжений,  кВ | |
| 10 | 35 |
| 1000 – 6300 | 0,51 – 0,43 | 0,52 – 0,48 |

Примечание - Для обмоток из алюминиевого провода значение , найденные из таблицы 2.6 увеличить в 1,25 раза.

 – отношение средней длины окружности канала между обмотками НН и ВН к высоте обмотки:



Таблица 2.7 - Рекомендуемые значения  для масляных трансформаторов

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Мощность, кВ·А | Алюминий | | Медь | |
| 6/10  кВ | 35  кВ | 6/10  кВ | 35  кВ |
| 1000 – 6300 | 1,3 – 1,7 | 1,2 – 1,6 | 2,0 – 2,6 | 1,8 – 2,4 |

Примечание – Рекомендуемые значения  приведены для трёхфазных масляных трансформаторов классов напряжений 6, 10 и 35 кВ, отвечающих требованиям ГОСТ 12022 – 76 и ГОСТ 11920 – 85.

Применяемые марки стали 3404 и 3405 при толщине листа 0,35 и 0,30 мм при индукциях .

 – коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному (коэффициент Роговского); значение  при концентрическом расположении обмоток и равномерном расположении витков по их высоте колеблется от 0,93 до 0,98; при определении основных размеров можно принять ;

 – частота питающей сети (по заданию);

 – индукция в стержне магнитной системе; для выбранной марки стали для трансформатора в заданной мощности предварительное значение  принимается из таблицы 2.1;

 – коэффициент заполнения сталью;  значения  выбираются из таблицы 2.2 и 2.3, а  – из таблицы 2.4:

Если полученный диаметр отличается от нормализованного значения (см. пп. 2.1), то следует принять ближайший диаметр по нормативной шкале -  и пересчитать значение  на это значение по формуле:



Средний диаметр канала между обмотками (предварительное значение) может быть определен по формуле:



где  – коэффициент, значения которого зависит от мощности, класса напряжений и принятого уровня потерь короткого замыкания; ориентировочные значения  для трансформаторов с магнитопроводами из холоднокатаной стали приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 - Ориентировочные значения коэффициента  для медных обмоток

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Мощность трансформатора, кВ·А | Уровень потерь короткого замыкания | Значения  при классе напряжения обмотки ВН,  кВ | |
| 6,10 | 35 |
| От 1000 до 6300 | 1,2 Рк по ГОСТ  Рк по ГОСТ  0,8 Рк по ГОСТ | 1,35  1,38  1,42 | 1,37  1,40  1,44 |

Примечание - Для обмоток из алюминия значения , полученные из таблицы, умножить на 1,06.

Высота обмоток трансформатора:



Значения других размеров и параметров, необходимых для полного расчета обмоток и окончательного расчета магнитной системы:

- радиальный размер обмоток НН:



где – коэффициент, значения которого могут быть приняты для трансформаторов с плоской магнитной системой мощностью 1000-6300 кВ·А класса напряжения 10 кВ – 1,4:



- активное сечение стержня:



- активное сечение ярма:



- высота стержня:



где  выбирается из таблицы 2.5.

- расстояние между осями соседних стержней:



где - удвоенный радиальный размер обмотки ВН;



где ,  из таблицы 2.5;

 – коэффициент, зависящий от мощности класса напряжения трансформатора, материала обмотки и типа переключателя; в табл. 2.9 приведены ориентировочные значения коэффициента .

Таблица 2.9 - Ориентировочные значения коэффициента  для масляных двухобмоточных трансформаторов с ПБВ с медными обмотками и потерями короткого замыкания по ГОСТ

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

Примечание - Для обмоток из алюминиевого провода значение , полученное из таблицы, умножить на 1,25.

Напряжение одного витка (предварительно)рассчитывается по формуле:

,

# 3 Расчет обмоток

## 3.1 Общие вопросы расчёта обмоток

Большое значение при выборе типа обмоток и расчёте их параметров имеет плотность тока в проводах обмоток: от неё зависят размеры масса обмоток, основные потери в них.

Другим важным показателем при расчёте обмоток и выборе их конструкции является плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности - , т.е. потери в обмотке, отнесённые к единице площади охлаждаемой поверхности. Для каждого типа обмоток установлены допустимые значения , используя которые можно определить максимальный радиальный размер металла обмотки  между охлаждаемыми поверхностями.

В качестве вариантов могут быть рассмотрены:

1 Для обмоток НН:

- цилиндрическая из прямоугольного провода двухслойная или многослойная;

- цилиндрическая многослойная из алюминиевой ленты.

2 Для обмоток ВН:

- цилиндрическая многослойная из прямоугольного провода;

- цилиндрическая многослойная из круглого провода.

## 3.2 Расчёт обмоток НН

Расчёт обмоток начинается с обмотки НН, располагаемых у большинства трансформаторов между стержнем и обмоткой ВН. По этому эту обмотку считают первой. И все параметры и размеры обмотки НН и её элементов обозначают индексом «1»: ,  и т. д.

Порядок расчёта.

1 Число витков одной фазы обмотки:

,

Полученное  округляется до ближайшего целого числа чётного или нечётного. Для трёхфазного трансформатора  является также числом витков на один стержень.

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



,

3 Средняя плотность тока в обмотках, обеспечивающая получения заданных потерь короткого замыкания определяется по выражениям:

- для алюминиевых, А/м2

,

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

Таблица 3.1 - Значения  для трехфазных трансформаторов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Номинальная мощность трансформатора,  кВ⋅А | До 100 | 160 – 630 | 1000 – 6300 |
|  | 0,97 | 0,96 – 0,93 | 0,93 – 0,85 |

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

Таблица 3.2 - Средняя плотность тока в обмотках  (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, м2

,

умножением полученного результата на 106 сечение витка перевести в мм2.

Дальнейший ход расчёта зависит от типа выбранной обмотки.

## 3.2.1 Расчёт цилиндрических обмоток из прямоугольного провода

В цилиндрической обмотке витки (по высоте обмотке) плотно прилегают друг к другу. При этом в зависимости от величины тока витки могут выполняться одним или несколькими параллельными проводами. Укладка провода может быть осуществлена плашмя или на ребро.

Во всех случаях для обеспечения нормального охлаждения каждый слой обмотки хотя бы с одной стороны должен омываться маслом.

Вопрос выбора того или другого вида межслойной изоляции решается путём определением плотности теплового потока на поверхности охлаждения обмотки по результатам сравнения её с допустимой.

Продолжение расчёта цилиндрической обмотки следует проводить в следующей последовательности:

1 Допустимый радиальный размер металла обмотки НН между охлаждаемыми маслом поверхностями



где  допустимая плотность теплового потока; для цилиндрических обмоток из прямоугольного алюминиевого провода –  = (600 ÷ 800) Вт/м2 ;

кзк – коэффициент учитывающий закрытие охлаждающего канала рейками и изоляционными материалами: = 0,75÷0,8.

2 По полученным значениям и  по сортаменту обмоточного провода для трансформаторов подбираются подходящие провода с соблюдением следующих правил:

а) с целью упростить намотку обмотки на станке и получить компактное ее размещение на магнитопроводе желательно применять наиболее крупные сечения проводов;

б) способ намотки (плашмя или на ребро) выбирается, исходя из значений  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 ;

в) число параллельных проводов  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 =5–85 кВ использовать прямоугольный провод с толщиной изоляции на две стороны  =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 l.

Подобранные размеры провода витка записываются по форме:



так как  и отношение , то обмотку выполняем плашмя.

3 Полное сечение витка из параллельных проводов:



где  – сечение одного витка, мм2.

4 Полученная плотность тока, А/м2:

,

5 Осевой размер витка, м:



6 Число витков обмотки в одном слое:



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

7 Необходимое число слоёв обмотки:



округляется до большего.

8 Радиальный размер металла обмотки:



где  - радиальный размер провода без изоляции, при намотке на ребро .

Так как - то обмотку делим на 4 катушки с радиальным размером металла в каждой , а между катушками выполняется охлаждающий масляный канал.

9 Радиальный размер межслойного канала; выбирается по условной изоляции мм при кВ и проверяется по условиям отвода тепла по таблице 3.3; применяется наибольшее значение, определённое по этим условиям:

10 Изоляцию между слоями обмотки принимаем двумя слоями электроизоляционного картона толщиной по 0,5мм, следовательно:

.

11 Радиальный размер обмотки (с охлаждающим каналом):

,

где - радиальный размер провода с изоляцией;

- толщина межслойной изоляции;

- 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 | Обмотка – обмотка, мм | Обмотка – цилиндр, мм | Обмотка – стержень, мм | Длина канала,  мм | Обмотка – обмотка, мм |
| 500-1000 | 6-8 | 5-6 | 6-8 | 60-70 | 6 |

12 Внутренний диаметр обмотки:

,

где  – ширина канала между обмоткой НН и стержнем; определяется из условий изоляции обмотки из таблицы 2.7:

13 Наружный диаметр обмотки:

,

14 Масса металла обмотки:

,

## 3.2.2 Расчёт цилиндрической многослойной обмотки из алюминиевой ленты

Обмотки этого типа обладают высокой теплопроводностью в осевом и радиальном направлениях, имеют более равномерное распределение температуры по высоте и ширине по сравнению с обмотками из изолированного провода. Поэтому значения  для них выше и составляет 1000÷1200 Вт/м2.

После определения ,  и  уточнения значений ,  (см. п. 3.2) расчёт обмотки выполняется в следующем порядке:

1 Определяются размеры ленты в мм:

- ширина с округлением до 10 мм:

- толщина  с округлением до 0,1 мм:

2 Рассчитывается сечение витка (площадь сечения ленты), м2:

,

3 Плотность тока в ленте, А/м2 :

,

4 Определяется допустимый радиальный размер металла обмотки:

,

5 Рассчитывается предельное число витков, помещаемое в этот размер:

.

Так как , по этому обмотку необходимо делить на две катушки с числом витков, меньшим , а между катушками выполнять осевой охлаждающий канал шириной: ,

Если  – число нечётное, то в первую катушку (по отношению к сердечнику магнитопровода) следует поместить число витков, меньше полвины, так как она имеет несколько худшие условия охлаждения.

,

где  и  – число витков в катушках.

6 Радиальный размер катушек. Если витки обмоток находятся в двух катушках:

,

то





где  – толщина межвитковой изоляции; при выполнении изоляции одним слоем кабельной бумаги К-120, = 0,12 мм, двумя слоями мм.

7 Радиальный размер обмотки НН:

,

8 Диаметры обмотки:

- внутренний:

,

- внешний:

,

9 Масса металла обмотки:

.

10 Плотность теплового потока на поверхности катушек:

 ,

 ,

где ,  - радиальные размеры металла катушек:

,

,

Полученное  не должно быть выше рекомендуемых значений.

## 3.3 Расчёт обмоток ВН

При выборе типа обмотки ВН необходимо обязательно учитывать удобство выполнения ответвлений для регулирования напряжения.

Обмотка ВН располагается по отношению к стержню после обмотки НН. Поэтому обмотку ВН считают второй и все параметры этой обмотки и её элементов обозначают индексом «2»: ;  и так далее.

Порядок расчёта:

1. Определяется число витков, необходимых для получения номинального напряжения:

,

2. Рассчитывается число витков на одной ступени регулирования напряжения при соединении фазных обмоток ВН в треугольник:

,

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

,

3. Определяются числа витков обмотки на ответвлениях:

- на верхних ступенях напряжения:

;

;

- на основной ступени напряжения:

;

- на нижних ступенях напряжения:

;

;

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

4. Ориентировочная плотность тока, А/м2:

 .

5. Ориентировочное сечение витка, м2 (мм2):

.

## 3.3.1 Расчёт цилиндрической многослойной обмотки из прямоугольного провода

Расчет продолжается в следующем порядке:

1 По  выбирается провод марки АПБ сечением  с толщиной изоляции на обе стороны 2δ=0,45 (0,50) мм и записываются его обозначения по форме, приведённой в п. 3.2.1.

Допустимый по плотности теплового потока радиальный размер металла в обмотки:

,

где  – допустимое значение плотности теплового потока на поверхности; можно принять = 900 Вт/м2.

2 Плотность тока (уточнённое значение), А/м2:

 ,

3 Осевой размер обмотки:



4 Осевой размер витка, м:



Число витков обмотки в одном слое:



5 Необходимое число слоёв в обмотке:

,

где  – число витков обмотки на верхней ступени напряжения:

;

 округляется до большего ближайшего числа.

6 Рабочее напряжение двух слоёв:

,

По  из таблицы 3.4 выбирается число слоёв и общая толщина кабельной бумаги в изоляции между двумя слоями обмотки.

Таблица 3.4 - Нормальная междуслойная 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  от 1001 до 2000  от 2001 до 3000  от 3001 до 4000 | 20,12  30,12  40,12  50,12 | 10  16  16  16 |

Примечание - данные таблицы использовать для трансформаторов мощностью до 630 кВ∙А включительно. При мощности от 1000 кВ∙А межслойную изоляцию применять по таблице, но не менее 40,12 мм, а выступ изоляции не менее 20 мм.

7 Общий радиальный размер металла в обмотке ВН:

,

Число катушек помещаемых в этот размер равно 2,

где – радиальный размер провода без изоляции.

Если ,то обмотку необходимо разделить на концентрические катушки так, чтобы радиальный размер каждой из катушек был меньше или равным . Между катушками устраиваются охлаждающие осевые масляные каналы, ширина которых по условиям охлаждения выбирается по таблице 3.3. при  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 – 5 слоев;

- от обмотки ВН:

2 катушка – 5 слоев.

9 По таблице 3.5 определяется размер добавочных потерь в обмотке

Таблица 3.5 - Предельные радиальные размеры провода a, мм, цилиндрических обмоток из алюминиевого провода прямоугольного сечения при добавленных потерях, не превышающих 5, 10, 15 и 20 %

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Число слоёв обмотки | Добавочные потери до | | | |
| 5% | 10% | 15% | 20% |
| 1 | 11,8 | 13,2 | 15,0 | 16,0 |
| 2 | 8,0 | 10,0 | 10,6 | 11,8 |
| 3 | 6,7 | 8,0 | 8,5 | 9,5 |
| 4 | 5,6 | 6,7 | 7,5 | 8,0 |
| 5 | 5,0 | 6,0 | 6,7 | 7,5 |
| 6 | 4,75 | 5,6 | 6,0 | 6,7 |
| 7 | 4,5 | 5,0 | 5,6 | 6,0 |
| 8 | 4,0 | 4,75 | 5,6 | 5,6 |
| 9 | 3,75 | 4,5 | 5,0 | 5,6 |
| 10 | 3,75 | 4,5 | 5,0 | 5,6 |

Добавочные потери в обмотке при ,  составляют ±5%.

10 Радиальный размер обмотки:

,

где  – толщина межслойной изоляции по таблице 3.4;

 – принятая ширина охлаждающего канала;

 – число охлаждающих каналов в обмотке.

11 Внутренний диаметр обмотки:

,

где  – размер осевого канала между обмотками НН и ВН и толщина изоляционного цилиндра; выбирается  обмотки ВН по таблице 2.7.

12 Наружный диаметр обмотки:

,

13 Поверхность охлаждения:

,

при числе катушек , .

14 Масса металла обмотки:



## 3.3.2 Расчёт многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода

Эта обмотка далее рассчитывается в следующей последовательности.

1 По ориентировочному сечению витка  и сортаменту обмоточного провода для трансформаторов подбирается провод подходящего сечения или в редких случаях два параллельных одинаковых провода - 

Выбранные размеры провода записываются так:



где  – число параллельных проводов;

 – диаметр провода без изоляции;

 – диаметр изолированного провода:



 – размер двухсторонней изоляции;

2 Полное сечение витка:



где  – сечение одного провода.

3 Плотность тока, А/м2 :



4 Осевой размер витка, м:



5 Число витков в слое:



6 Число слоёв в обмотке:



 округляется до большего ближайшего числа.

7 Рабочее напряжение двух слоёв:



8 По  из таблицы 3.4 выбирается число слоёв и общая толщина изоляции кабельной бумаги в изоляции между слоями обмотки:

9 Общий радиальный размер металла обмотки:



10 Допустимый по плотности теплового потока радиальный размер металла обмотки, м (мм):



11 При  обмотку каждого стержня необходимо разделить на концентрические катушки с осевым масляным каналом между ними.

Число катушек принимаем по отношению , принимаем равному трем.

12 Минимальная ширина масляного канала  определяется по таблице 3.2 и проверяется по уравнению изоляции (см. 3.2.1).

13 Радиальный размер обмотки:



где число каналов =2.

14 Минимальный радиальный размер осевого канала между обмотками НН и ВН определяется аналогично 3.2.1 п. 12.

15 Внутренний диаметр обмотки:



16 Наружный диаметр обмотки:



17 Масса металла обмотки:



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 Определение параметров короткого замыкания

Для определения параметров трансформатора искусственно создаётся режим короткого замыкания – режим, когда обмотка НН замкнута накоротко, а к обмотке ВН подводится такое пониженное напряжение, при котором токи в обмотках имеют номинальные значения.

## 4.1 Определение потерь короткого замыкания

Потери в режиме короткого замыкания Pк имеют следующие составляющие:

-  и  – основные потери соответственно в обмотках НН и ВН, вызванные рабочим током этих обмоток;

-  и  – добавочные потери в обмотках НН и ВН, то есть потери от вихревых токов, наведённых полем рассеяния обмоток;

- и  – основные потери в отводах от обмоток;

-  и  – добавочные потери в отводах, вызванные полями рассеяния отводов;

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



Обычно добавочные потери учитывают увеличением основных потерь путём умножения последних на коэффициент учёта добавочных потерь , то есть  тогда



Основные потери рассчитываются по формулам: для НН: и ВН:

- в обмотке из алюминиевого провода (ленты):



где  – плотность тока в проводах обмотки;

 – масса металла обмотки.

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

- из алюминиевого прямоугольного провода (ленты) для НН и ВН:

,

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

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

 - для прямоугольного провода (ленты) для НН и ВН:

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

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

 – общий размер в направлении, параллельном линиям магнитной индукции поля рассеяния (высота обмотки).

Расчёт 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) для НН: и ВН:



где  – масса металлов проводов отводов для НН и ВН:



где  – общая длинна проводов отводов:

- при соединении в звезду:



- в треугольник:



 – сечение отвода, м2;

 – плотность металла отвода ( для алюминия  кг/м3).

В силовых трансформаторах общего назначения  а . Поэтому, как правило, добавочные потери в отводах не учитываются.

При рациональной конструкции трансформатора потери в ферромагнитных конструктивных его элементов составляют незначительную долю  и их можно определить по приближенной формуле:

,

где  – коэффициент, значение которого принимается по таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Значение коэффициента 

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Мощность трансформатора,  кВ·А | До 1000 | 1000-4000 |
|  | 0,015-0,02 | 0,025-0,04 |

Полные потери короткого замыкания:

,

Отношением  сравнивается фактические расчётные потери короткого замыкания с заданными: расчётные потери короткого замыкания не должны отличатся более, чем на ±5 %.

Пример: заданного значения.

Следовательно, потери короткого замыкания составляют 2,83 % от заданной мощности короткого замыкания, т.е. входит в пределы нормы.

## 4.2 Расчёт напряжения короткого замыкания

Активная составляющая напряжения короткого замыкания в процентах номинального напряжения по выражению:

,

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания в процентах номинального напряжения:



где  – уточнённые значения ширины приведенного канала рассеяния

,

где , ,  – реальные размеры рассчитанных обмоток трансформатора;



где

,

Расчётное напряжение короткого замыкания в процентах от номинального напряжения:

,

Определяется отношение 

Отклонение расчётного значения от заданного не должно быть большим - ±5%.

## 4.3 Определение механических сил в обмотках и нагрева обмоток при коротком замыкании

Короткое замыкание трансформатора при рабочих напряжениях является аварийным режимом, так как сопровождается много кратным увеличением токов в обмотках по сравнению с номинальными их значениями, повышенным нагревом обмоток и ударными механическими силами, действующие на обмотки и их части.

## 4.3.1 Проверка обмоток на механическую прочность при коротком замыкании

Эта проверка включает:

- определение наибольшего установившегося и наибольшего ударного тока короткого замыкания;

- определение механических сил между обмотками и их частями;

- определение механических напряжений в изоляционных опорах и межкатушечных конструкциях и в проводах обмоток.

Действующее значение установившегося тока короткого замыкания с учётом сопротивления питающей сети для основного ответвления обмотки определяется по выражению (согласно ГОСТ 11677-85):



где  – номинальный ток соответствующей обмотки;

 – номинальная мощность трансформатора, МВ·А (1МВ·А=103кВ·А);

 – мощность короткого замыкания электрической сети, МВ·А;  принимается из таблицы 4.1.

Таблица 4.2 - Мощности короткого замыкания электрической сети

|  |  |
| --- | --- |
| Класс напряжения обмотки ВН,  кВ | 6-10 |
| Мощность короткого замыкания электрической сети ()  МВ·А | 500 |

В начальный момент вследствие наличия апериодической составляющей ток короткого замыкания может значительно превысить установившийся ток. Это наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания – ударный ток короткого замыкания определяется по формуле:



где  – коэффициент, учитывающий максимально возможную апериодическую составляющую тока короткого замыкания:

,

При расчёте и конструировании трансформаторов необходимо учитывать механические силы, возникающие между обмотками и их частями при коротком замыкании трансформатора. Эти силы могут вызвать разрушение обмотки, деформацию или обрыв витков, разрушение опорных конструкций.

Продольное поле рассеяния (линии его индукции направлены параллельно оси обмоток) вызывает радиальные силы.

Суммарная радиальная сила, действующая на наружную обмотку и стремящая растянуть её:



где  – ударный ток короткого замыкания в обмотке ВН;

 – число витков обмотки ВН на основной ступени.

Такая же сила, но противоположно направленная, действует на обмотку НН, стремясь сжать её. Обе силы равномерно распределены по окружности обеих обмоток

Для оценки механической прочности обмотки определяются напряжения сжатия во внутренней обмотке (обмотке НН) и напряжения растяжения в наружной обмотке (обмотке ВН), возникающие под воздействием радиальных сил.

Среднее сжимающее напряжение в проводе обмотки НН:

,

Среднее растягивающее напряжение в проводе обмотки ВН:

.

Поперечное поле рассеяния (линии его индукции расходятся радиально) вызывают осевые силы, сжимающие обмотки в осевом направлении. Для обмоток с плотным прилеганием витков (многослойные цилиндрические или из алюминиевой ленты) осевая сила может быть рассчитана по формуле:



где  – коэффициент осевой силы;

 ;

 ;

 ;

Значения  определяется из таблицы 4.3.

Таблица 4.3 – Типы обмоток

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Мощность трансформатора,  кВ·А | Тип обмотки НН | ,  % |
| 25-100  160-1000 | Двухслойная и многослойная цилиндрическая |  |

,

Для обмоток с регулировочными витками, симметрично расположенными относительно середины высоты обмоток на каждой ступени .

Осевые силы действуют на обе обмотки: в верхней половине обмотки они направлены вниз, а в нижней – вверх. Наибольшее значение осевой силы в середине высоты обмотки НН.

Сжимающее напряжение:

,

где  – суммарный радиальный размер металла обмотки НН; при намотке плашмя:

,

Для трансформаторов мощностью до 6300 кВ·А необходимо ≤18÷20 МПа.

Расчёт температуры обмоток при коротком замыкании проводится для установившегося тока короткого замыкания при предположении, что вследствие быстротечности процесса всё выделяющееся тепло идёт на нагрев обмоток.

Температура обмоток через время  после возникновения короткого замыкания:

- для алюминиевых обмоток для ВН и НН:

 ,

где  – наибольшая продолжительность короткого замыкания на выводах масляного трансформатора; при коротком замыкании на сторонах с номинальным напряжением 35 кВ и ниже принимается °C;

– начальная температура обмотки; принимается °C.

Предельно допустимые температуры при коротком замыкании приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Предельно допустимые температуры обмоток при коротком замыкании масляных трансформаторов

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Металл обмоток | Медь | Алюминий |
| Класс изоляции | A | A |
| Допустимая температура,  °C | 250 | 200 |

## 4.4 Способы снижения сил в обмотках при коротком замыкании

При проектировании трансформаторов принимаются меры для ограничения возможных радиальных и осевых сил, возникающих при коротких замыканиях, и для увеличения механической прочности обмоток:

1) ограничение токов короткого замыкания за счёт увеличения напряжения короткого замыкания. За счёт этой меры снижаются как радиальные, так и осевые силы;

2) для уменьшения осевых сил необходимо выдерживать осевые размеры обмоток одинаковыми, располагать регулировочные витки равномерно по высоте обмотки ВН или середине её высоты;

3) для повышения механической стойкости обмоток при воздействии токов короткого замыкания применяется прессовка обмоток при помощи стальных разрезных или пластиковых неразрезных колец; прессующие кольца рекомендуется устанавливать в трансформаторах с РПН с мощностью более 630 кВ·А, с ПБВ мощностью 1000-6300 кВ·А.

# Список литературы

1. Копылов И.П. Электрические машины: Учеб. для вузов/ И.П.Копылов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2002-607 с.

2. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов/П.М.Тихомиров – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.