**Ташкентский Государственный**

**Технический Университет**

**им. Абу Райхон Беруний.**

**Курсовой проект по предмету**

**''Электрические машины''**

# Выполнил: студент 3-го курса

**заочного отделения**

**энергетического факультета**

**Огай В.Г.**

**Шифр: 1950402.**

**Приняла: Мешкова Е.А.**

**Ведение.**

Трансформаторы–это наиболее распространённые устройства в современной электротехнике. Трансформаторы большой мощности составляют основу систем передачи электроэнергии от электростанций в линии электропередачи. Они повышают напряжение переменного тока, что необходимо для экономной передачи электроэнергии на значительные расстояния. В местах распределения энергии между потребителями применяют трансформаторы, понижающие напряжение до требуемых для потребителей значений. Наряду с этим, трансформаторы являются элементами электроустановок, где они осуществляют преобразование напряжения питающей сети до значений необходимых для работы последних.

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более обмоток связанных индуктивно, и предназначенные для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока. Обмотку, присоединённую к питающей сети, называют первичной, а обмотку, к которой подсоединяется нагрузка–вторичной. Обычно все величины, относящиеся к первичной обмотке трансформатора помечают индексом 1, а относящиеся к вторичной–индексом 2.

Первичную обмотку трансформатора подсоединяют к питающей сети переменного тока. Ток первичной обмотки I1 имеет активную и индуктивную составляющие. При разомкнутой вторичной обмотке (холостой ход), вследствие действия индуктивной составляющей тока IОм, возникает магнитный поток, который намагничивает сердечник. Активная составляющая тока I определяется потерями, возникающими, в местах стали, при перемагничивании сердечника. Наибольшая часть потока Ф1 сцеплённого с первичной обмоткой, сцеплена также со всеми обмотками фазы и является потоком взаимоиндукции между обмотками, или главным рабочим потоком Ф. Другая часть полного потока Ф­1 сцеплена не со всеми витками первичной и вторичной обмоток. Её называют потоком рассеивания.

ЭДС обмотки пропорциональна числу её витков. Отношение ЭДС первичной и вторичной обмоток называется *коэффициентом трансформации,* который пропорционален отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток.

## Устройство силовых трансформаторов.

Трансформаторы имеют магнитопроводящие сердечники и токопроводящие обмотки. Для лучшего охлаждения сердечники и обмотки мощных трансформаторов погружаются в бак, наполненный маслом. Сердечники трансформаторов состоят из стержней, на которых размещаются обмотки, и ярм, которые служат для проведения потока между стержнями. Различают два вида сердечников: *стержневой* и *броневой*.

*Броневой сердечник* имеет разветвлённую магнитную систему, вследствие этого поток в ярме составляет половину от потока стержня, на котором расположены обмотки.

Трёхфазные трансформаторы выполняются обычно стержневыми. Их сердечники состоят из расположенных в одной плоскости трёх стержней, соединённых ярмами. Магнитная система таких трансформаторов несколько несимметрична, так как магнитная проводимость потока крайних стержней и среднего ­­– является неодинаковой.

Вследствие изменения потока, в контурах стали сердечника индуктируется ЭДС, вызывающая вихревые токи, которые стремятся замкнуться по контуру стали, расположенному в поперечном сечении стержня. Для уменьшения вихревых токов, сердечники трансформатора набираются (шихтуются) из изолированных прямоугольных пластин электротехнической стали толщиной 0.5мм или 0.35мм. Для уменьшения зазоров в местах стыков, слои сердечника, набранные различными способами, чередуются через один. После сборки, листы верхнего ярма вынимаются и на стержнях устанавливаются обмотки, после чего ярмо вновь зашихтовывается. Листы сердечника изолируются лаком или бумагой, имеющей толщину 0.03мм, и стягиваются при помощи изолированных шпилек.

В большинстве случаев в трансформаторах электропередач применяются так называемые концентрические обмотки, имеющие вид размещённых концентрически (одна в другой) полых цилиндров. Обычно ближе к сердечнику размещается обмотка низшего напряжения, требующая меньшей толщины изоляции сердечника.

По способу охлаждения трансформаторы разделяются на *масляные*, обмотки которых погружены в масло и *сухие*, охлаждаемые воздухом. Мощные силовые трансформаторы имеют масляное охлаждение. Трансформатор в большинстве случаев не является полностью твёрдым телом, а содержит большое количество жидкого масла, которое оказывает значительное влияние на теплопередачу.

В большинстве случаев в трансформаторах электропередач применяются так называемые *концентрические* обмотки, которые имеют вид размещённых концентрически полых цилиндров (одна в другой). Обычно ближе к сердечнику размещается обмотка низшего напряжения, требующая меньшей толщины изоляции сердечника.

В трансформаторах мощностью до 560 кВА концентрическая обмотка выполняется по типу цилиндрической обмотки, в большинстве случаев имеющей два слоя. Слои обмотки выполняются из провода круглого или прямоугольного сечения. Провод наматывается впритык по винтовой линии вдоль образующей цилиндра.

В трансформаторах больших мощностей концентрическая обмотка низшего напряжения выполняется по типу винтовой, в которой между двумя соседними по высоте витками оставляется канал.

В трансформаторах на напряжение 35 кВ и более применяют концентрическую обмотку, выполненную по типу непрерывной, в которой, отличие от винтовой, каждый виток состоит из нескольких концентрически намотанных витков обмотки. Катушки этой обмотки наматываются непрерывно одним проводом без пайки. При воздействии осевых сжимающих усилий, возникающих при внезапных коротких замыканиях, наиболее надёжными являются непрерывные обмотки.

**Дан трёхфазный двухобмоточный масляный трансформатор.**

|  |  |
| --- | --- |
| Номинальная мощность | Sн = 2500 кВА |
| Число фаз | m = 3 |
| Частота | F = 50 гЦ |
| Номинальные напряжения:  Обмотки ВН  Обмотки НН | Uн2= 35000 В  Uн1= 690 В |
| Схема и группа соединений | Звезда/треугольник– ║ |
| Напряжение короткого замыкания | Uк= 6.5% |
| Потери короткого замыкания | Pк= 26000 Вт |
| Потери холостого хода | Pх= 3900 Вт |
| Ток холостого хода | Iо=1.1% |
| Материал обмоток | Медь |

**Порядок расчёта.**

1. Расчёт основных электрических величин и изоляционных материалов.
2. Расчёт обмоток.
3. Расчёт параметров короткого замыкания.
4. Расчёт магнитной системы трансформатора и параметров холостого хода.
5. Тепловой расчёт трансформатора, расчёт системы охлаждения.

Расчёт основных электрических величин и изоляционных расстояний.

Расчёт проводим для трёхфазного трансформатора стержневого типа с концентрическими обмотками.

**Sф = S` = Sн/3 = 2500/3 =833.3 кВА**

Номинальные (линейные) токи на сторонах:

ВН: **I2=**= = =**41.24 А**



НН: **I1=** **= ==** **2092 А**



### Фазные токи обмоток (звезда/треугольник–║):

ВН: **Iф2 = I2 = 41.24 А**

НН: **Iф1 = I1/= 2092/= 1208 А**



Фазные напряжения обмоток:

ВН: **Uф2 = Uн2/= 35000/= 20207 В**



НН: **Uф1 = Uн1 = 690 В**

Испытательное напряжение обмоток смотрим по таблице 4.1 *(Л-1)*:

ВН: **Uисп.2 = 85 кВ**

НН: **Uисп.1 = 5 кВ**

По таблице 5.8 *(Л-1)*выбираем тип обмоток:

Обмотка ВН при напряжении 35 кВ и токе 41.24 А – непрерывная катушечная из прямоугольного провода.

Обмотка НН при напряжении 690 кВ и токе 1208 А – винтовая двухходовая из прямоугольного провода.

Для испытательного напряжения обмотки ВН, Uисп.2 = 85 кВ по таблице 4.5 *(Л-1)* находим изоляционные расстояния:

**a12` = 27 мм; l02` = 75 мм; a22` = 30 мм**

Для обмотки НН, Uисп.1 = 5 кВ

**a01` = 15 мм**

**Определение исходных данных расчёта.**

Мощность обмоток одного стержня:

**S`= 833,3 кВА**

Ширина приведённого канала рассеивания:

ap = a`12 + (a + a) / 3

(a1 +a2)/3 = K×10-2, где к=0.5 (из табл. 3.3), *(Л-1)*



(a1 +a2)/3 = 0.5×10-2 = 0.027 м



**ар** = а`12 + (a1+a2)/3 = 27×10-3 + 0.027 = **0.054 м**

Активная составляющая напряжения короткого замыкания:

**Uа =** Pк/10Sн = 26000Вт/10×2500 **= 1.04%**

Реактивная составляющая:**Uр**= = = **6,4 %**



Выбираем трёхфазную стержневую шихтованную магнитную систему с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми стыками на среднем стержне по рис.1.



### **Рис. 1** *Схема плоской магнитной системы трансформатора.*

Прессовка стержней бандажами из стеклоленты и ярм стальными балками. Материал магнитной системы – холоднакатная сталь марки 3404 толщиной

0.35 мм.

Индукция в стержне **Вс = 1.6** Тл. В сечении стержня 9 ступеней, коэффициент заполнения круга **Ккр = 0.929**, изоляция пластин – нагревостойкое изоляционное покрытие плюс однократная лакировка, **Кз = 0.965**, коэффициент заполнения сталью **kc =Ккр × Кз = 0.929 × 0.965 = 0.8965.**

### Ярмо многоступенчатое, число ступеней 7, коэффициент усиления ярма

**kя = 1.015**

индукция в зазоре:

**Вя = Вс/Кя = 1.6/1.015 = 1.576 Тл**

Число зазоров магнитной системы на косом стыке **= 4,** на прямом **= 3**. Индукция в зазоре на прямом стыке:

**Вз``** = Вс = **1.6 Тл**

На косом стыке:

**Вз`** = Вс/= 1.6/ = **1.132 Тл**



Удельные потери в стали **рс** = 1.295 Вт/кг; **ря** = 1.242 Вт/кг.

Удельная намагничивающая мощность **qc** = 1.795 ВА/кг, **qя** = 1.655 ВА/кг,

Для зазоров на прямых стыках **q``з** = 23500 ВА/кг,

для зазора на косых стыках **q`p** = 3000 ВА/м2 .

По таблице 3.6 *(Л-1)* находим коэффициент учитывающий отношение основных потерь в обмотках к потерям короткого замыкания, **кq** =0.91 и по таблице 3.4 и 3.5 *(Л-1)* находим постоянные коэффициенты для медных обмоток **a** = 1.40 и **b** = 0.31.

Принимаем **Кр ≤ 0.95.**

Диапазон изменения **β** от 1.5 до3.8, оптимальный вариант **β=1.8**.

Диаметр стержня **d=0.32 м.**

**Расчёт основных коэффициентов.**

**А** = 0.507 = 0.507 = **0.2467**



По таблице 3.12 *(Л-1)*

β = 1.8÷2.4

d = Ax ⇒ **x** = d/A = 0.32/0.2467 = **1,3**

**β** = x4 = **2,8** – принадлежит диапазону 1.8 ≤ β ≤ 2.4

**Определение основных размеров.**

Диаметр стержня: **d** = Ax = **0.32 м**

Активное сечение стержня:

**Пс** = 0.785kca2x2 = 0.785 × 0.8965 × 0.27742 × 1.15352 = **0.0721 м2**.

Средний диаметр обмоток:

**d12** = ad = 1.40×0.32 = **0.448 м**.

Высота обмоток:

**l** = πd12/β = 3.14×0.448/1.77 = **0.8 м**

Высота стержня:

**lc** = l+2l0 = 0.8+2×0.05 = **0.9 м**

Расстояние между осями стержней:

**С** = d12+a12+bd+a22 = 0.448+0.02+0.31+0.32+0.02 = **0.5872 м**

ЭДС одного витка

**uв** = 4.44fПСВС = 4.44×50×0.0721×1.6 = **25.6 В**

**Расчёт обмоток НН.**

Число витков обмоток НН:

**ω1** = Uф1/Uв = 690/25.6 = **27**

Напряжение одного витка **Uв** = Uф1/ω1 = 690/27 = **25.5 В**

Средняя плотность тока в обмотках :

**Jср** = 104×0.76kgPкUв/Sd12 = 104×0.746×0.91×26000×25.5/25000×0.448 =

= **401.86×104 А/м2 =** **3.67 МА/м2**

Сечение витка ориентировочно:

**П1** = П`в = Iф1/Jср = 1208/3,67×106 = **329.15×10-6 м2 = 330 мм2**

По таблице 5.8 по мощности 2500 кВА, току на один стержень 1208 А, номинальному напряжению одной обмотки 690 В и сечению витка 330 мм2 – выбираем конструкцию винтовой обмотки.

Размер радиального канала предварительно: **hк = 5 мм**.

**Число реек** по окружности обмотки – **12**.

Ширина между витковых прокладок: **bпр.=40 мм**

### Ориентировочный осевой размер витка:

**hв1** = + hк = – 0.005 = 0.0208 м **= 20.8 мм**



Ввиду того, что hв1>15 мм и по графикам рис. 5.34(а) *(Л-1)* при максимальном размере медного провода b=15 мм и плотности тока J=3.50 МА/м2 плотность теплового потока q=2400, что при естественном масляном охлаждении не допускается, выбираем двух ходовую винтовую обмотку с радиальными каналами в витках и между витками с равномерно распределённой транспозицией.

По полученным ориентировочным значениям П1 и hв1 в таблице 5.2 подбираем значение сечения витка из 12-ти параллельных проводов:

**ПБ12×**



Разделённых на две группы по шесть проводов с каналами по 5 мм между группами витка и между витками (рис.2).

Для частичной компенсации разрыва в обмотке ВН при регулировании напряжения размещаем в середине высоты обмотки НН **шесть радиальных каналов по 10 мм.**

Полное сечение витка: **П1** = 12×27.8 = 333.6 мм2 = **333.6×10-6 м2**

Плотность тока: **J1** = 1208×106/333.6 = **3.62 МА/м2**

По графику рис.5.34(а) *(Л-1)*, находим, что для J=3.6 МА/м2 и b=9,5 мм,

**q=1600 Вт/м2**

Высота обмотки:

**l1** = (27+1)×2×9.5×10-3+[(27×2+1-6)×5+10×6]×0.95×10-3 = 532×10-3+289,75×10-3

**≈ 0.82 м**

Радиальный размер обмотки: **а1** = 6×3.65×10-3 **= 0.022 м.**

По таблице 4.4 *(Л-1)* для Uисп.1=5 кВ, S=2500 кВА и винтовой обмотки находим **а01=15 мм**, обмотка наматывается на 12 рейках на бумажно-бакелитовом цилиндре размером

**×0.0,93 м**



3,65

9,5

5 **Рис. 2** *Сечение витка обмотки НН.*

9,5

22

Внутренний диаметр обмотки:

**D`1** = d+2a01 = 0.32+2×0.015 = **0.35 м**

Внешний диаметр обмотки по (7.19):

**D``1** = D`1+ 2f1 = 0.35+2×0.022 = **0.394 м**

Плотность теплового потока на поверхности обмотки по (7.19)

**q** = ×10-10 = ×10-10 ≈ **780 Вт/м2**



В обмотке предусматривается равномерно распределённая транспозиция параллельных проводов-12 транспозиций по принципиальной схеме рис. 5.29 *(Л-1)*. Первая транспозиция после первого витка, 11 последующих с шагом в два витка, т.е. после третьего витка, пятого витка и т.д. .

Масса метала обмотки по (7.6) *(Л-1)*:

**G01** = 28×103cDсрω1П1 = 28×103×3×0.372×27×333.6×10-6 = **281.5 кг**

Масса провода по таблице 5.5 *(Л-1)*

**G пр1** = 281.5 ×1,02 = **287,13 кг**

**Расчёт обмотки ВН.**

Выбираем схему регулирования по рис. 3 (6.14) *(Л-1)* с выводом концов всех трёх фаз обмотки к одному трёх фазному переключателю. Контакты переключателя рассчитываются на рабочий ток 41,24 А. Наибольшее напряжение между контактами переключателя в одной фазе:

рабочее: %U2, т.е. **2020 В**



испытательное: %U2, т.е. **4040 В.**



для получения на стороне В различных напряжений необходимо соединять

|  |  |
| --- | --- |
| Напряжение, В | Ответвления обмотки |
| 36 750 | A2 A3 B2 B3 C2 C3 |
| 35 875 | A3 A4 B3 B4 C3 C4 |
| 35 000 | A4 A5 B4 B5 C4 C5 |
| 34 125 | A5 A6 B5 B5 C5 C6 |
| 33 250 | A6 A7 B6 B7 C6 C7 |

Число витков в обмотке ВН при номинальном напряжении:

**ωH**=ω1 = 27× = **790 витков**



Число витков на одной ступени регулирования:

**ωр** = = **19 витков**



Для пяти ступеней

|  |  |
| --- | --- |
| Напряжение, В | Число витков на ответвлениях |
| 36 750 | 790+2×19=828 |
| 35 875 | 790+19=809 |
| 35 000 | 790 |
| 34 125 | 790-19=771 |
| 33 250 | 790-2×19=752 |

Ориентировочная плотность тока

**J2** ≈ 2×Jср.– J1= 2×3.67×106 – 3.62×106 = **3.72 МА/м2**

Ориентировочное сечение витка

**П`2**≈ = 11×10-6 м2 = **11 мм2**



По таблице 5,8 *(Л-1)* выбираем непрерывную катушечную обмотку из медного прямоугольного провода (S=2500 кВА; I2= 41.24 A; U2= 35000 B; П`2 = 11 мм2). По сортаменту медного обмоточного провода (табл. 5,2) выбираем провод марки ПБ.

**ПБ–1× сечением П2 = 11,2 × 10-6 м2**



Плотность тока в обмотке: **J2** = = **3.68 МА/м2.**



При J2 = 3.68 МА/м2 и b=7.1 мм по графикам рис. 5,34 (а) находим

**q = 1000 Вт/м2**

Принимаем конструкцию обмотки **с радиальными каналами по 4,5** мм между всеми катушками. Две крайние катушки вверху и внизу катушки отделены **каналами по** **7,5 мм** (см. табл. 4,10) *(Л-1)*.

Схема регулирования напряжения (по рис. 6,14) *(Л-1)*, канал в месте разрыва обмотки **hкр = 12 мм** (см. табл.4,9) *(Л-1)*.

**Основной размер катушки 7,6 мм.**

Число катушек на стержне ориентировочно:

**Nкат.2**≈ = 77,6 ≈ **77 катушек**.



Число витков в катушке ориентировочно:

**ωкат** ≈ = **10,75**



Радиальный размер: **а`2** = 2,10 × 11 = 23,1 ≈ **23 мм**

Общее распределение витков по катушкам:

**62** основные катушки В по **11** витков……………………682 витков

**7** основных катушек Г по **10** витков……………………….70 витков

**8** регулировочных катушек Д по **9,5** витков………………76 витков

##### **Всего: 77 катушек…………………………………………...828 витков**

Расположение катушек на стержне и размеры радиальных каналов приняты по рис. 3 (а).

Осевой размер обмотки:

***l***= ∑hкат + ∑hкан = [7,6×77+0,95×(12,1+4×75)] × 10-3 ≈ **0,880 м**

По испытательному напряжению Uисп.= 85 кВ и мощности трансформатора S=2500, канал между обмотками ВН и НН ……………………....**а`12 = 27 мм**

Толщина цилиндра ……………………………………………….…**δ`12 = 5 мм**

Выступ цилиндра за высоту обмотки …………………………..…***l*`11 = 55 мм**

Расстояние между обмотками ВН двух соседних стержней ……**а`22 = 30 мм**

Толщина междуфазной перегородки ………………………………**δ`22 = 3 мм**

Расстояние от обмотки ВН до ярма ……………………………...…***l*`0 = 75 мм**

Согласно параграфу 4,3 *(Л-1)* принимаем размеры бумажно-бакелитового цилиндра, на котором на 12 рейках наматывается обмотка диаметром:

× 0,93



основные размеры обмоток трансформатора показаны на рис. 3 (б).

Плотность теплового потока на поверхности обмотки для катушки Г по (7,19) *(Л-1)*:

q2 = × 10-10



**q2** = ×10-10 = × 10-4 = **719 Вт/м2**



Масса металла обмотки ВН:

**G02** = 28×103×c×Dср×*w*1×П1= 28×103×3×0,473×790×11,2×10-6 = **351,5 кг**

Масса провода в обмотке ВН с изоляцией:

**Gпр 2** = 1,03×351,5 кг = **362 кг**

Масса металла (меди) обмоток НН и ВН:

**Gо** = Gо1 + Gо2 = 281,5+351,5 = **633 кг**

Масса провода двух обмоток:

**Gпр** = Gпр1 + Gпр2 = 287,13+362 = **649,13 кг**

###### Рис. 3 *Обмотка трансформатора.*

**(а)** Катушки

##### 4Г 31В 4Д 4Д 31В 3Г

2×7,5мм 34×4мм 1×12мм 34×4мм 2×7,5мм

Каналы

**(б)**

15 22 27 25 30

75

55

4 5 3

**Расчёт токов короткого замыкания.**

Потерями короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называются потери, возникающие в трансформаторе при номинальной частоте и установленной в одной из обмоток тока, соответствующего его номинальной мощности при замкнутой накоротко второй обмотки.

Потери короткого замыкания согласно параграфу 7.1 *(Л-1)*:

Основные потери в обмотках по параграфу 7.3, при t = 75° C.

Обмотка НН:

**Росн.1** = 2,4×10-12×J12×Gоб.1 = 2,4×10-12×3,622×281,5 = **8853,3 Вт**

Обмотка ВН:

**Росн.2** = 2,4×10-12×J22×Gоб.2 = 2,4×10-12×3,682×351,5 = **11424,4 Вт**

Принимаем **kр = 0,95**

Добавочные потери в обмотке НН: **kД1 = 1,038**

Добавочные потери в обмотке ВН: **kД2 = 1.005**

Основные потери в отводах рассчитываются следующим образом:

Длина отводов определяется приближённо по (7,21) *(Л-1)*:

***l*отв** = 7.5×*l* = 7.5×0.82 = **6.15 м**

Масса отводов НН: (при плотности меди отводов γ = 8900 кг/м3)

**Gотв.1** = *l*отв.×Потв.1× γ = 6,15×333,6×10-6×8900 = **18,26 Вт**

Потери в отводах НН: (при k = 2,4×10-12)

**Ротв.1** = k×J12×Gотв.1 = 2,4×10-12×3,622×1012×18,26 = **574,3 Вт**

Масса отводов ВН: (при плотности меди отводов γ = 8900 кг/м3)

**Gотв.2** = *l*отв.×Потв.2× γ = 6,15×11,2×10-6×8900 = **0,613 Вт**

Потери в отводах НН: (при k = 2,4×10-12)

**Ротв.2** = k×J22×Gотв.2 = 2,4×10-12×3,682×1012×0,613 = 19,92 **≈** **19 Вт**

Потери в стенках бака и других элементах конструкции до выяснения размеров бака определяем приближённо, по (7,25) и табл. 7,1 *(Л-1)*:

**Рб** = 10kS = 10×0,03×2500 = **750 Вт**

Полные потери короткого замыкания:

**Рк** = Росн.1×kД1 + Росн.1×kД1 + Ротв.1 + Ротв.2 + Рб =

=8853,3×1,038 + 11424,4×1,005 + 574,3 + 19 + 750 = **22014,5 Вт**

Для номинального напряжения обмотки ВН:

**Рк** = 22014,5 – 0,05×11481,522 = **21440 Вт**

или = **82,5 %**



Напряжение короткого замыкания рассчитывается согласно параграфу 7,2 *(Л-1)*:

Активная составляющая:

**uа** = = = **0,8576 %**



Реактивная составляющая:

uр =



где: f = 50 Гц

S`= 833.3 кВА

β = 2,83

ар = а12 + =0,0426



kp = 0.95

kq = 1.031

**up** = × 10-1 = **5.93 %**



Напряжение короткого замыкания:

**uк** = = **5.99 %**



или 5,99×100/6,5 = 92,15 % заданного значения.

Установившийся ток короткого замыкания на обмотке ВН по (7,38) и табл. 7,2 *(Л-1)*:

**Iк.у.** = = **687,34 А**



Мгновенное максимальное значение тока короткого замыкания:

***i*к.max** = 1,41kmax ×Iк.у. = 2,32×687,34 = **1594,63 А**

при =6,9,



по табл. 7,3 *(Л-1)*: kmax×=2.32



Радиальная сила по (7,43) *(Л-1)*:

**Fp** = 0.628 × (*iк.max* × *w*)2 × β × kp × 10-6 = 0.628×(1594.63×790)2×2.83×0.95× ×10-6 = **267 944 Н**

Температура обмотки через *tк* = 5 сек. после возникновения короткого замыкания по (7,54) *(Л-1)*:

**Θ** = + Θн = + 90 = × 90 =



= **209,13° С**

**Расчёт магнитной системы трансформатора.**

**Определение размеров магнитной системы и массы стали по параграфу 8,1.**

Принята конструкция трёхфазной плоской шихтованной магнитной системы, собираемой из пластин холоднокатаной текстурованной стали марки 3404,0,35 мм по рис 4. Стержни магнитной системы скрепляются бандажами из стеклоленты, ярма прессуются ярмовыми балками. Размеры пакетов выбраны по табл. 8.4 *(Л-1)*, для стержня диаметром ,0320 м без прессующих пластин. Число ступеней в сечении стержня 9, в сечении ярма 7.

### Размеры пакетов в сечении стержня и ярма по табл. 8.4

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № пакета | Стержень, мм | Ярмо (в половине поперечного сечени), мм |
| 1 | 310×40 | 310×40 |
| 2 | 295×22 | 295×22 |
| 3 | 270×24 | 270×24 |
| 4 | 25014 | 25014 |
| 5 | 230×11 | 230×11 |
| 6 | 215×7 | 215×7 |
| 7 | 195×8 | 195×8 |
| 8 | 155×12 | – |
| 9 | 135×5 | – |

Общая толщина пакетов стержня (ширина ярма): 0,286 м.

По табл. 8.7 *(Л-1)*

Площадь ступенчатой фигуры сечения стержня: **Пф.с** = 746,2 см2 = **0,07462 м2**;

Площадь ступенчатой фигуры сечения ярма: **Пф.я** = 762,4 см2 = **0,07624 м2;**

Объём угла магнитной системы: **Vу** = 20 144 см3 = **0,020144 м3**

Активное сечение стержня:

**Пс** = kз×Пф.с = 0,97×0,07462 = **0,07238 м2**

**Рис. 4** 215

195

155

135

5

12

8

7 11

14

24

22

40

528 528

Активное сечение ярма:

**Пя** = kз×Пф.я = 0,97×0,07624 = **0,07395 м2**

Объём стали угла магнитной системы:

**Vу.ст** = kз× Vу = 0,97×0,020144 = **0,019539 м3**

Длина стержня:

***l*с** = 0,820+2×0,075 = **0,97 м**

Высота ярма прямоугольного сечения:

**hя** = = = **0,316**



Расстояние между осями стержней:

**С** = D2`` + a22`×10-3 = 0.498+0.030 = **0.528 м**

Массы стали в стержнях и ярмах магнитной системы рассчитываем по (8,6), (8,8)–(8,13) *(Л-1)*:

Масса стали угла магнитной системы:

Gу = Vу.ст.×γст ; где **γст = 7650 кг/м3**

**Gу** = 0,019539×7650 = **149,5 кг**

Масса стали ярм:

**Gя** = **Gя` + Gя``** = 2Пя ×2Сγст + 2Gу = 2×0,07395 + 2×0,528×7650 + 2×149,5 = **1194,79+299** = 1493,79 ≈ **1493,8 кг**

Масса стали стержней:

**Gс** = Gс` + Gс`` = 1611,3 + 66,45 = **1677,75 кг**

где **Gс`** = 3×*l*с×Пс×γст = 3×0,97×0,07238×7650 = **1611,3 кг**

**Gс``**= 3×(Пс×а1я×γст  – Gу) = 3 (0,07238× 0,31×7650 – 7650 –149,5) = **66,45 кг**

Общая масса стали:

**Gст** = Gя + Gс = 1493,8 + 1677,75 = **3137,5 кг**

Расчёт потерь холостого хода.

Расчёт потерь холостого хода производим по параграфу 8.2

Индукция в стержне:

**Вс** = = =**1,59 Тл**



Индукция в ярме:

**Вя** = = =**1,56 Тл**



Индукция на косом стыке

**Вкос**. = = = **1,124 Тл**



Площади сечения немагнитных зазоров на прямом стыке среднего стержня равны соответственно активным сечениям стержня и ярма.

Площадь сечения стержня на косом стыке:

**Пкос**. = Пс = 1,41×0,07238 = **0,1024 м2**



Удельные потери для стали стержней, ярм и стыков по табл. 8.10 *(Л-1)* для стали марки 3404 толщиной 0,35 мм при шихтовке в две пластины:

При **Вс = 1,59 Тл, рс = 1,269 Вт/кг; рз = 974 Вт/м2**

При **Вя = 1,56 Тл, ря = 1,207 Вт/кг; рз = 934 Вт/м2**

При **Вкос. = 1,124 Тл, ркос = 445 Вт/м2**

Для плоской магнитной системы с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми стыками на среднем стержне, с многоступенчатым ярмом, без отверстий для шпилек, с отжигом пластин после резки стали и удаления заусенцев для определения потерь применим выражение (8,32) *(Л-1).*

На основании параграфа 8,2 и табл. 8,12 принимаем:

**kп.р. = 1,05; k п.з. = 1;. k п.я. = 1; k п.п. = 1,03; k п.ш. = 1,05.**

По таблице 8,13 *(Л-1)* находим коэффициент **k п.у. = 10,18**.

Тогда потери холостого хода:

**Рх** = **[**kп.р× k п.з.×(рсGс + ряGя` – 4ряGу + ×k п.у.× Gу) + 4×Пкос.×ркос + + 1×Пс×рз + 2×Пя×рз**]** ×k п.я × k п.п. × k п.ш.



**Рх** = [1,05×1×( 1,269×1677,75+1,207×1194,79-4×1,207×149,5+ ×



×10,18×149,5) + 4×0,1024×445+1×0,07238×974+2×0,07395×934**]** ×1×1,03×1,05 = = [1,05×5094,4+182,272+70,5+ +138,14] × 1,0815 = 5740×1,0815 = **6207,8 Вт**

Или ×100 = **159 %** от заданного



**Расчёт тока холостого хода.**

Расчёт тока холостого хода производим по параграфу 8.3.

По таблице 8,17 *(Л-1)* находим удельные намагничивающие мощности:

При **Вс = 1,59 Тл, qс = 1,715 ВA/кг; qс.з = 18480 ВA/м2**

При **Вя = 1,56 Тл, qя = 1,575 ВA/кг; qя.з = 20700 Вт/м2**

При **Вкос. = 1,124 Тл, qкос = 2620 ВА/м2**

Для принятой конструкции магнитной системы и технологии её изготовления используем (8.43), в котором по параграфу 8.3 и таблице 8.12 и 8.21 принимаем коэффициенты:

**kт.р. = 1,18; k т.з. = 1,0; k т.пл. = 1,20; k т.я. = 1,0; k т.п. = 1,05;**

**k т.ш. = 1,06.**

По таблице 8,20 *(Л-1)* находим коэффициент **k п.у. = 10,18**.

**Qх** = **[**kт.р× k т.з.× (qсGс + qяGя` – 4qяGу + ×k т.у.×k т.пл.×Gу)+4.×qкос× ×Пз.кос + 1×Пс×qс.з + 2×Пя×qя.з**]** ×k т.я × k т.п. × k т.ш.



**Qх** = [1,18×1×(1,715×1677,75+1,575×1194,8-4×1,575×149,5+× ×42,45×1,20×149,5) + 4×2620×0,1024+1×18480×0,07238+2×20700×0,07395]× ×1×1,05×1,06 = [1,18×(2877,34125+1881,81-941,85+50110,1874)+1073,152+ +1337,5824+3061,53]×1,113 = [1,18×53927,48865+5472,2644]×1,113 = 69106,701007×1,113 = 16915,75822079 ≈ **76 915,8 ВА**



### Ток холостого хода

***i*0** = Qx/10S = 76915,8/10×2500 = **3,077 %**

или = **279 %** заданного значения.



Активная составляющая тока холостого хода:

***i*0а** = = **0,248 %**



Реактивная составляющая тока холостого хода:

***i*0р** = = **3,067 %**



**Тепловой расчёт обмоток.**

Тепловой расчёт обмоток производится согласно параграфу 9.5 *(Л-1)*.

Внутренний перепад температуры

Обмотка НН по (9.9) и по рис. 9.9 *(Л-1)*.

**Θ01** = = = **1,15° С**



где **δ** – толщина изоляции провода на одну сторону, **δ = 0,25×10-3 м;**

**q** – плотность теплового потока на поверхности обмотки;

**λиз** – теплопроводность бумажной, пропитанной маслом изоляции провода по табл. 9.1 *(Л-1)*, λиз = 0,17 Вт/(м×°С);

Обмотка ВН по (9.9) и рис 9.9 *(Л-1)*;

**Θ02** = = = **1,06° С**



Перепад температуры на поверхности обмоток:

Обмотка НН:

**Θо, м1** = *k*1× *k*2× *k*3×0,35×*q*0,6 = 1×1,1×0,8×0,35×7800,6 = **16,7° С**

где *k*1 = 1 – для естественного масляного охлаждения;

*k*2 = 1,1 – для внутренней обмотки НН;

*k*3 = 0,8 – по таблице 9.3 *(Л-1)* для hk/a = 5/22 = 0.23.

Обмотка ВН:

**Θо, м2** = *k*1× *k*2× *k*3×0,35×*q*0,6 = 1×1×0,85×0,35×7190,6 = **15,4° С**

где *k*1 = 1 – для естественного масляного охлаждения;

*k*2 = 1,1 – для внешней обмотки ВН;

*k*3 = 0,8 – по таблице 9.3 *(Л-1)* для hk/a = 4,5/25 = 0.18.

Полный средний перепад температуры от обмотки к маслу:

Обмотка НН:

**Θо, м. ср.** =Θо1 + Θо, м1 = 1,15+16,7 = **17,9° С**

Обмотка ВН:

**Θо, м. ср.** =Θо2 + Θо, м2 = 1,06+15,4 = **16,46° С**

Тепловой расчёт бака.

Тепловой расчёт бака проводится согласно параграфу 9.6.

По таблице 9.4 *(Л-1)*, в соответствии с мощностью трансформатора выбираем конструкцию S = 2500 кВА, выбираем конструкцию гладкого бака с навесными радиаторами и прямыми трубами по рис. 9.16 *(Л-1)*. Минимальные внутренние размеры бака – по рис. 9.18, (а) и (б), *(Л-1)*.

Изоляционные расстояния отводов определяем до прессующей балки верхнего ярма и стенки бака. До окончательной разработки конструкции внешние габариты прессующих балок принимаем равными внешнему габариту обмотки ВН.

|  |  |
| --- | --- |
| **S1 = 40 мм** | **S3 = 23 мм** |
| **S2 = 42 мм** | **S4 = 90 мм** |
| **d2 = 10 мм** | **d1 = 20 мм** |

Минимальная ширина бака по рис. 9.18, (а) и (б), *(Л-1)*.

**В** = D2``+(S1 + S2 + d2 + S3 + S4 + d1) × 10-3 = 0.5+(40+42+20+25+90+10) × ×10-3 = **0.727 м**

Принимаем **В = 0,76**, при центральном положении активной части трансформатора в баке.

Длина бака:

**А** = 2С+В = 2×0,53+0,76 = **1,82 м.**

Высота активной части по (9.24) *(Л-1)*:

**На.ч**. = *l*с + 2hя + n × 10 = 0,97+2×0,316+0,05 = **1,65 м.**

uде n = 0,05 м – толщина бруска между дном бака и нижним ярмом

Принимаем расстояние от верхнего ярма до крышки бака при горизонтальном расположении над ярмом переключателя ответвлений обмотки ВН по табл. 9.5 *(Л-1)*.

**Ня.к**. = 400 мм = **0,4 м.**

Глубина бака:

**Нб** = На.ч+ Ня.к. = 1,65+0,4 = **2,05 м.**

Для развития должной поверхности охлаждения целесообразно использовать радиаторы с прямыми трубами по рис. 9.16 *(Л-1)*.

Расстояние между осями фланцев по табл. 9.9 *(Л-1)*:

**Ар = 2000 мм**

Поверхность конвекции труб:

**Пк.тр. = 6,253 м2**

Поверхность конвекции двух коллекторов при двух рядах:

**Пк.к = 0,34 м2**

Минимальные расстояния осей фланцев радиатора:

От нижнего среза стенки бака **с1 = 0,085 м**

От верхнего среза стенки бака **с2 = 0,1 м**

Для установки этих радиаторов глубина бака должна быть принята:

**Нб** = Ар + с1 + ­с2 = 2,000 + 0,085+0,1 = **2,2 м**

Допустимое превышение средней температуры масла над температурой окружающего воздуха для наиболее нагретой обмотки НН по (9.32) *(Л-1)*:

**Θм.в** = 65-Θо.м.ср. = 65-17,9 ≈ **47° С**

найденное среднее превышение может быть допущено, так как превышение температуры масла в верхних слоях в этом случае будет

**Θм.в.в** = δ×Θм.в = 1,2×47 = **56,4° С** < 60° С

Принимая предварительно перепад температуры на внутренней поверхности стенки бака **Θм.б. = 5°С** и запас **2° С**, находим среднее превышение температуры наружной стенки бака над температурой воздуха:

**Θб.в**. = Θм.в + Θм.б = 47-5-2 = **40° С**

Для выбранного размера бака рассчитываем поверхность конвекции гладкой стенки бака:

**Пк.гл**. = Нб [2(А-В) +πВ] = 2×[2×(1,82-0,76)+3,14×0,76] = **9 м2**

Ориентировочная поверхность излучения бака с радиаторами по (9.35) *(Л-1)*:

**Пи** = *k*×Пк.гл. = 1,5×9 = **18 м2**

Ориентировочная необходимая поверхность конвекции для заданного значения Θб.в. = 40° С по (9.30) *(Л-1)*:

**Пк`** = – 1,12×Пи = – 1,12×18 = **104,67 м2**



Поверхность конвекции составляется из:

Поверхности гладкого бака: Пк.гл. = 9 м2

Поверхности крышки бака:

**Пк.кр**. = 0,5 [(А-В)×(В+0,16) + ] = 0,5×[(1,82-0,76)×(0,76+ +0,16) +3,14×] = **0,82 м2**



Где 0,16 – удвоенная ширина верхней рамы бака; коэффициент 0,5 учитывает закрытие поверхности крышки вводами и арматурой.

Поверхность конвекции радиаторов:

**∑Пкр.** = Пк` - Пк.гл – Пк.кр. = 104,67-9-0,82 = **94,85 м2**

поверхность конвекции радиаторов, приведённая к поверхности гладкой стенки (табл.9.6) *(Л-1)*:

**Пк.р**. = Птр.×*k*ф+Пк.к = 6,253×1,26+0,34 = **8,22 м2**

Необходимое число радиаторов:

= 94.85/8.22 ≈ **11.5**



**Принимаем 12 радиаторов** с расположением по рис. 5.

**Рис. 5.** *Расположение радиаторов на стенке бака.*

Поверхность конвекции бака:

**Пк** = ∑Пк.р. + Пк.гл. + Пк.кр. = 12×8,22+9+0,82 = **108,46 м2**

Поверхность излучения: **Пи = 18 м2**

Определение превышения температуры масла и обмоток над температурой охлаждающего воздуха по параграфу 9.7.

Среднее превышение температуры наружной поверхности трубы над температурой воздуха по (9.49) *(Л-1)*:

**Θ б.в** = = = **39° С**



среднее превышение температуры масла вблизи стенки над температурой внутренней поверхности стенки трубы по (9.50) *(Л-1)*:

**Θ м.б** = 0,165 × = 0,165 × = =**5,6° С**



Превышение средней температуры масла над температурой воздуха:

**Θм.в**. = Θм.б + Θб.в = 5,6+39 = **44,6° С**

Превышение температуры масла в верхних слоях над температурой воздуха:

**Θм.в.в** = *k*×Θм.в = 1,2×44,6 = **53,52° С** < 60° С

Превышение средней температуры обмоток над температурой воздуха:

Обмотки НН;

**Θо.в1** = Θо1 + Θо.м1 + Θм.в = 1,15+16,7+44,6 = **62,45° С** < 65° С

Обмотки ВН;

**Θо.в2** = Θо2 + Θо.м2 + Θм.в = 1,15+16,7+44,6 = **62,45° С** < 65° С

Превышения температуры масла в верхних слоях **Θм.в.в < 60° С** и обмоток **Θо.в < 65° С** лежат в пределах допустимого нагрева по ГОСТ 11677-85.

**ЛИТЕРАТУРА.**

*(Л-1)* – Тихомиров П.М. ''Расчёт трансформаторов'', издательство Москва, энергоатомиздат 1986 г.

**Все ссылки (формулы и таблицы), используемые в составлении данной курсовой работы даны на учебник Тихомирова П.М. ''Расчёт трансформаторов'', издательство Москва, энергоатомиздат 1986 г.**