**Содержание работы**

Аннотация

Введение

Аналитический обзор

Расчеты и основные результаты работы:

1. Техническое задание
2. Предварительный расчёт трансформатора
3. Расчёт обмотки низкого напряжения
4. Расчёт обмотки высокого напряжения
5. Расчёт параметров короткого замыкания
6. Расчёт магнитной системы трансформатора
7. Расчёт потерь и тока холостого хода
8. Тепловой расчет
9. Расчёт основных геометрических размеров бака трансформатора
10. Тепловой расчёт бака. Окончательный расчёт превышения температуры обмоток и масла
11. Определение массы масла и конструктивных материалов
12. Коэффициент полезного действия трансформатора

Заключение

Список используемой литературы

Приложения

**Аннотация**

Темников Ю.В. Трансформатор масляный герметизированный ТМВГ-630/6.

Страниц:

Иллюстраций:

Приложений:

Таблиц:

Представлены результаты расчета масляного трансформатора на мощность Sн=630 кВА, напряжение высокой стороны UВН=6300 В, напряжение низкой стороны UHH=690 В, при частоте питающей сети f=50 Гц.

Спроектирован вариант герметизированного трехфазного двухобмоточного масляного трансформатора с пространственной навитой магнитной системой из холоднокатаной анизотропной стали марки 3406. Сборка магнитной системы: магнитопровод состоит из трех овальных пакетов, собранных из стальной ленты переменной ширины. Обмотка НН из алюминиевой ленты, обмотка ВН – непрерывная катушечная из прямоугольного алюминиевого провода. Расчет выполнен в соответствии с рекомендациями, данными, изложенными в учебном пособии Тихомирова П.М. «Расчет трансформаторов», М.: Энергоатомиздат, 1996. – 528с.: ил.

**Введение**

Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

Принято различать трансформаторы малой мощности с выходной мощностью до 5 кВА для трехфазных сетей и силовые трансформаторы с выходной мощностью от 5 кВА и выше.

В данной работе спроектирован силовой трансформатор, мощностью 630 кВА.

Навитая магнитная система, использованная в проекте, позволила уменьшить массу используемой электротехнической стали, и улучшить характеристики холостого хода (подробнее в пункте 7). Герметизированная конструкция бака с волнами позволила отказаться от громоздких радиаторов, которые значительно увеличивали бы габариты трансформатора, и от расширителя, тем самым сэкономить на трансформаторном масле (подробнее в пунктах 10-12).

Современные способы изготовления витых магнитопроводов позволяют значительно сэкономить на их сборке. В настоящее время начинается применение лазеров в резке электротехнической стали. Исследования Бухановой И.Ф., Дивинского В.В и Журавеля В.Э – сотрудников НПЦ «Лазертерм» АО ВНИИЭТО – показали, что «одним из самых перспективных бесконтактных методов уменьшения потерь на перемагничивание анизотропной электротехнической стали, является лазерная обработка поверхности. При локальном лазерном нагреве в поверхностных слоях материала создаются термические напряжения, изменяющие характер доменной структуры в зонах, прилегающих к лазерной дорожке. Разработанный экологически чистый технологический процесс обработки поверхности электротехнической стали излучением непрерывного СО2-лазера позволяет обрабатывать трансформаторную сталь без нарушения изоляционного покрытия и создания дополнительных механических напряжений». Затраты на новую технологию окупятся на заводе менее чем за год, при увеличении стоимости трансформатора на 5%. При этом покупатель получает трансформатор немного дороже аналогичного, но более выгодного в эксплуатации. За первый же год эксплуатации покупатель экономит на электроэнергии сверх той суммы, что он переплатил за более современный трансформатор.

Аналогичный эффект можно получить при использовании навитой магнитной системы. Соответственно, при внедрении обеих технологий в трансформаторостроение можно получить внушительный экономический эффект. Подобная технология немного увеличит стоимость трансформатора, но значительно упростит его производство и улучшит его качество. Такой трансформатор более выгодный в эксплуатации, чем трансформатор, выполненный по старой технологии (в особенности трансформатор с плоской магнитной системой).

Также уменьшению потерь холостого хода способствует применение современных видов холоднокатаной анизотропной электротехнической стали, таких как 3408 и 3409. Удельные потери этих видов сталей меньше потерь устаревших 3404 и 3405. К сожалению, в настоящее время в нашей стране нет производителей качественной электротехнической стали, за исключением нескольких заводов. Этот фактор сказывается на ее цене. Более современная саль дороже, но обеспечивает снижение магнитных потерь в трансформаторе, в особенности, если сталь имеет малую толщину, например 0,27мм.

С учетом вышеописанных возможностей в данном проекте рассчитан трансформатор, имеющий пространственную навитую магнитную систему, изготовленную из стали 3406 (лучшую из описанных в доступной литературе).

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР**

Краткое описание конструкции трансформатора. Главной частью трансформатора является, так называемая, активная часть, включающая в себя магнитопровод и обмотки. Обмотки служат для трансформации электрической энергии в энергию магнитного поля. Магнитопровод служит для передачи энергии магнитного поля. Активная часть полностью погружена в трансформаторное масло, служащее изолятором и теплоотводом. Активная часть зафиксирована в баке при помощи подъемных шпилек. Бак полностью герметичен, масло заливается под вакуумом. Структура стенок бака позволила отказаться от расширителя масла. На баке установлены вводы – проходные изоляторы, для подключения нагрузки и сети. Внутри активной части расположено устройство ПБВ, переключатель которого находится на крышке бака. Также на крышке расположены коробка выводов, для подключения устройств автоматики, таких как термодатчик и мановакуумметр; пробка для заполнения маслом. Внизу бака имеется пробка для слива масла и зажим заземления. Ко дну бака приварены швеллеры с переставными катками, для транспортировки и установки трансформатора.

Описание основных материалов, используемых в трансформаторе.

Материалы, применяемые для изготовления трансформатора, разделяются на активные, т.е. сталь магнитной системы, металл обмоток и отводов; изоляционные, применяемые для электрической изоляции обмоток и других частей трансформатора, например электроизоляционный картон, фарфор, дерево, трансформаторное масло и др.; конструкционные, идущие на изготовление бака, различных крепежных частей и т.д., и прочие материалы, употребляемые в сравнительно небольших количествах.

Одним из основных активных материалов трансформатора является тонколистовая холоднокатаная анизотропная электротехническая сталь. Это сталь с определённой ориентировкой доменов, имеющая значительно меньшие удельные потери и более высокую магнитную проницаемость по сравнению с горячекатаной сталью.

Одной из существенных особенностей холоднокатаной стали является анизотропия её магнитных свойств, т.е. различие этих свойств в различных направлениях внутри листа стали. Наилучшие магнитные свойства эта сталь имеет в направлении прокатки. Магнитные свойства существенно ухудшаются, если вектор индукции магнитного поля направлен под углом, отличающимся от 00, к направлению прокатки.

Другой активный материал трансформатора - металл обмоток. В трансформаторах средней мощности чаще применяется алюминий. Плотность алюминия 2700 кг/м3. Таким образом, алюминий примерно в 3,5 раза легче меди. При этом стоимость алюминия значительно меньше стоимости меди, которой в электромашиностроении применяются лишь несколько видов.. Температура плавления 657 0С, удельное сопротивление 0,5 мкОмּм., предел прочности при растяжении σР=160-170 МПа.

Главным изоляционным материалом в силовых трансформаторах является трансформаторное масло (ГОСТ 982-80) - жидкий диэлектрик, сочетающий высокие изоляционные свойства со свойствами активной охлаждающей среды и теплоносителя. В данном проекте использовано масло ТК-1500.

Кабельная бумага (ГОСТ 23436-83) изготовляется из сульфатной небелёной целлюлозы и выпускается в рулонах шириной 500, 650, 670, 700, 750 и 1000 мм (±3 мм) при диаметре рулона от 450 до 800 мм. В трансформаторах применяется бумага главным образом марки К-120 толщиной 120 мкм для изоляции обмоточного провода; в виде полос разной ширины для межслойной изоляции и в многослойных цилиндрических обмотках класса напряжения 6, 10 ,20 и 35 кВ; в виде полосок шириной 20-40 мм, наматываемых вручную.

Картон электроизоляционный (ГСТ494-83) марки Г – картон средней плотности с повышенным сопротивлением к расслаиванию, применяется для получения склеенного картона и изготовления изоляционных деталей. Плотность 1000 кг/м3, толщина листа, используемого в проекте – 0,50мм, ширина рулона 1000мм.

Трубки электротехнические бумажно-бакелитовые (ГОСТ 8726-80). Изготавливаются путем намотки из электроизоляционной пропиточной или намоточной бумаги, предварительно покрытой пленкой бакелитового лака с последующей лакировкой и полимеризацией лака. Выпускаются трубки марки ТБ. Длительно допустимые рабочие температуры от -60 до +105 0С. Трубки обладают высокой электрической и механической прочностью.

Дерево (бук). В масляных трансформаторах применяется для реек, прокладываемых между слоями обмоток при рабочем напряжением не свыше 10кВ. В данном проекте, также используется в качестве опоры для остова. Многослойные плиты из шпона используются в качестве прессующих колец

Фарфор, использован во вводах.

К конструкционным материалам можно отнести тонколистовую сталь, из которой изготовлен бак, и сталь, из которой изготовлены швеллеры; чугун, из которого изготовлены катки; стеклолента, используемая при стяжке навитых полуколец.

В настоящее время трансформаторы с навитой пространственной магнитной системой и герметичным баком встречаются крайне редко, это обусловлено консерватизмом в трансфоматоростроении. Поэтому данные для сравнения отсутствуют. В настоящее время на рынке можно найти лишь один трансформатор подобного исполнения – ТМВГ – 250/10. В виду схожести конструкции рассчитываемый трансформатор относим к той же серии.

**РАСЧЕТЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

**1. Техническое задание**

S =630 кВ А - полная мощность;

m =3 - число фаз трансформатора;

f=50 - частота сети;

U1Н /U2Н =6.3/0.69 кВ - номинальное напряжение;

Δ/Y -11 - схема и группа соединения;

uк =5.0% - напряжение короткого замыкания;

i0 =1.5% - ток холостого хода;

P =1.3 кВт - потери холостого хода;

P =7.2 кВт - потери короткого замыкания;

n =5 - число ступеней переключения напряжения;

способ охлаждения - масляное, естественное;

установка - наружная.

**2. Предварительный расчет трансформатора**

2.1. Расчет основных электрических величин

2.1.1. Мощность одной фазы и одного стержня:

SФ=SН/3=630/3=210 кВА

2.1.2. Номинальные токи:

на стороне ВН (Δ): IВНЛ==57,74 А

на стороне НН (Y): IННЛ==527,15 А

2.1.3. Фазные токи:

на стороне ВН (Δ): IВНФ= 33,34 А

на стороне НН (Y): IННФ=IННЛ=527,15 А

2.1.4. Фазные напряжения:

на стороне ВН (Δ): UВНФ=UВНЛ=6300 В

на стороне НН (Y): UННФ==398,37 B

2.1.5. Испытательные напряжения (определяются по табл.4.1 [1]):

на стороне ВН (Δ): UВНисп=25 кВ

на стороне НН (Y): UННисп=5 кB

2.1.6. Для испытательного напряжения обмотки ВН (UВНисп=25 кВ) находим изоляционные расстояния (по табл.4.5 [1])

Таблица 1. Изоляция обмоток ВН для масляных трансформаторов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Uисп для ВН, кВ | ВН от ярма, l0, мм | Между ВН и НН, мм | Между ВН и ВН, мм |
| a12 | δ12 | lЦ2 | a22 | δ22 |
| 25 | 30 | 9 | 3 | 15 | 10 | - |

2.1.7. Для испытательного напряжения обмотки НН (UННисп=5 кВ) находим изоляционные расстояния (по табл.4.4 [1]):

Таблица 2. Изоляция обмоток НН для масляных трансформаторов

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Uисп для НН, кВ | НН от ярма, l0, мм | НН от стержня, мм |
| ац2 | δ01 | lЦ1 | а01 |
| 25 | 30 | - | Картон 2х0,5 | - | 5 |

2.1.8. Активная составляющая напряжения короткого замыкания, %:

Uка=1,14%

2.1.9 Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %:

Uкр==4,87%

2.2. Выбор марки стали и конструкции магнитной системы.

Выбираем пространственную навитую неразрезную трехфазную магнитную систему, состоящую их трех навитых колец. Сечение каждого полукольца вписано в окружность. Прессовка стержней осуществляется стеклолентой шириной 20мм. Ярма не прессуются. Эскиз на рисунке 1.

Материал магнитной системы – холоднокатаная анизотропная электротехническая сталь марки 3406, толщина листа 0,27мм. Изоляционное покрытие - нагревостойкое без лакировки. Индукция в стержне Вс = 1,6Тл (по табл.2.4 [1]). Коэффициент заполнения сталью kз=0,95 (по табл.2.2 [1]), коэффициент заполнения круга kкр=0,904 (стр.371 [1]).

Коэффициент заполнения круга сталью – kc=kкр ·kз=0,95 · 0,904=0,859.

рис.1. Эскиз магнитопровода трансформатора.

2.3. Расчет основных коэффициентов.

ap=, где а12=0,009м (табл.1),

k=0,53 ·1,25 (табл. 3,3 [1]),

SI=210 кВА – мощность на один стержень,

ap=мм –

ширина приведенного канала рассеяния.

Kp=0,95 - коэффициент Роговского, приводит идеализированного поля рассеяния к реальному.

При анализе влияния коэффициента β на основные параметры трансформатора, было выявлено, что оптимальным, с точки зрения минимизации потерь, является значение β = 1,326. Значение всех коэффициентов и величин при β = 1,0, 1,326, 1,5, 1,8 приведены в таблице 3. Окончательное значение коэффициента было скорректировано так, чтобы диаметр стержня d=0,19м.

Таким образом, принимаем: β = 1,326.

x=

,

где f - частота сети;

400,246 кг, где а = 1,4 · 1,06 (по табл.3.4 [1]);

= 29,1 кг, где l0=0,03м (табл.1);

198,43 кг, где b=0,4·1,25 (по табл.3.5 [1]);

=10,736кг;

K0=1,2⋅10-2 - для алюминия (стр. 132 [1]);

264.769 кг,

где kд = 0,93 – коэффициент добавочных потерь (по табл.3.6 [1]);

41,811;

 МПа;

2.4. Масса стержней:

Gc==406,494 кг;

2.5. Масса ярем:

Gя=257,56 кг;

2.6. Масса стали:

Gcт=Gc+Gя = 406,494+257,56=664,053 кг

2.7. Определим потери холостого хода (по пункту 8.2 [1]):

Активные потери в стали:

Pх=kпт·kпи·pс·Gст , где kпт= 1,06 – коэффициент, учитывающий технологические факторы;

kпи=1,33 – коэффициент, учитывающий искажение

формы кривой магнитного потока и индукции;

pc=1.080 Вт/кг – удельные потери в стали 3406 при индукции 1,6 Тл;

Pх=kпт·kпи·pс·Gст = 1,06·1,33·1,080·664,053=1011 Вт, что составляет примерно 78% от заданного значения (1011·100/1300 = 77,77%);

2.8. Полная намагничивающая мощность:

Qx=kтт·kти·qc·Gcт , где kтт=1,15 –коэффициент, учитывающий несовершенство

технологии и отжига;

kти=1,50 – коэффициент, учитывающий искажение

формы кривой магнитной индукции;

qc=1.560 ВА/кг – полная удельная намагничивающая

мощность в стали 3406 при индукции 1,6 Тл;

Qx=kтт·kти·qc·Gcт=1,15·1,50·1,560·664,053=1787 ВА;

2.9. Относительное значение тока холостого хода:

i0= 0,284%,

что составляет примерно 18,9% от заданного значения (0,284·100/1,5 = 18,933%);

i0a= 0,16% -

активная составляющая тока холостого хода.

2.10. Масса обмоток:

Gо= кг - масса металла обмоток;

Gпр=1,13·Go=1,13·229,93=259,82 кг - масса провода с изоляцией;

2.11. Плотность тока в обмотках:

J= 1.511 A/мм2, где k1=12,75 – для алюминия;

2.12. Растягивающее напряжение в проводе обмотки:

σ=М·х3=6,435·1,0733=7,952 МПа;

2.13. Диаметр стержня:

d=A·x=0,177·1,073=0,19 м;

2.14. Расстояние между стержнями:

С=a·A·x+a12+a22+b·A·x=1,484·0,177·1,073+0,009+0,01+0,5·0,177·1,073= =0,396 м;

2.15. Высота обмотки:

Lo= 0,668 м;

2.16. Сечение стержня:

Пс= =0,024 м2;

2.17. Сечение ярма:

Пя=Пс/2=0,012 м2;

2.18. Напряжение витка:

uv=4,44·f·Вс·Пс=4,44·50·1,6·0,024=8,644 В;

2.19. Относительная стоимость активных материалов:

Сакт=kос·Gпр+Gст=1,61·259,82+664,053=1082.

2.20. Сведем полученные значения в таблицу 3:

Таблица 3. Предварительный расчет трансформатора типа ТМВГ-630/6, с навитой пространственной магнитной системой и алюминиевыми обмотками.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| β | 1,0 | 1,2 | 1,326 | 1,5 | 1,8 |
| x=  | 1,000 | 1,047 | 1,073 | 1,107 | 1,158 |
|  | 400,246 | 382,412 | 372,985 | 361,663 | 345,548 |
| А2·х2=29,1·х2 | 29,100 | 31,877 | 33,509 | 35,64 | 39,041 |
| Gc= + А2·х2 | 429,346 | 414,289 | 406,494 | 397,303 | 384,590 |
| B1·x3=198,43·х3 | 198,430 | 227,506 | 245,197 | 268,953 | 308,363 |
| B2·x2=10,736·х2 | 10,736 | 11,760 | 12,363 | 13,149 | 14,404 |
| Gя= B1·x3+ B2·x2 | 209,166 | 239,267 | 257,560 | 282,101 | 322,766 |
| Gcт=Gc+Gя | 638,512 | 653,556 | 664,053 | 679,404 | 707,356 |
| Pх=1,06·1,33·1,080·Gст | 972,19 | 995,10 | 1011,00 | 1034,00 | 1077,00 |
| Qx=1,15·1,5·1,560·Gcт | 1718 | 1759 | 1787 | 1828 | 1903 |
| i0=  | 0,273 | 0,279 | 0,284 | 0,290 | 0,302 |
| Gо=  | 264,769 | 241,700 | 229,930 | 216,183 | 197,347 |
| Gпр=1,13·Go | 299,189 | 273,121 | 259,820 | 244,287 | 223,002 |
| Сакт=kос·Gпр+Gст | 1120 | 1093 | 1082 | 1073 | 1066 |
| J=  | 1,408 | 1,474 | 1,511 | 1,559 | 1,631 |
| σ=М·х3=6,435· х3 | 6,435 | 7,378 | 7,952 | 8,722 | 10,000 |
| d=A·x=0,177·х | 0,177 | 0,185 | 0,190 | 0,196 | 0,205 |
| Lo=  | 0,825 | 0,720 | 0,668 | 0,609 | 0,531 |
| С=a·A·x+a12+a22+b·A·x | 0,370 | 0,387 | 0,396 | 0,408 | 0,426 |

Проанализируем таблицу. Допуск на потери холостого хода +7,5%, на значение тока холостого хода +15%, рекомендованная плотность тока 1,2-2,5 А/мм2, допустимое σ=25 МПа. Перечисленные величины, при взятых выше β лежат в пределах допусков.

Целью данного проекта является расчет трансформатора, имеющего минимальные потери на ХХ и минимальный расход стали. Однако должна также учитываться масса обмоток и стоимость активных материалов. В связи с этим, считаю оптимальным значение β равным примерно 1,3-1,4. Примем диаметр стержня равным 0,19м и получим β=1,326. Дальнейший расчет трансформатора ведем с применением этого значения.

**3. Расчет обмотки низкого напряжения.**

Для удобства расчетов примем высоту обмоток Lo=0,665м, тогда значение β=1,332.

3.1 Число витков обмотки НН:

WHH= витков, округлим полученное число до целого:

WHH=46

Тогда: uv= =8,66 В;

3.2. Сечение витка:

ПНН= =348,8 мм2;

Выбираем тип обмотки из алюминиевой ленты, шириной 665мм и толщиной b=0,5мм, сечением ПННВ=332,5 мм2;

3.3. Плотность тока:

JНН=1,585 А/мм2;

Принимаем плотность теплового потока на поверхности обмотки:

 q=1000 Вт/м2;

3.4. Максимальный радиальный размер катушки обмотки:

bp=0,0185 м, где k3=0,8 для цилиндрических обмоток;

В этот размер можно уложить не более 37 витков. Разбиваем обмотку на две катушки по w=23 витка в каждой с изоляцией из кабельной бумаги К-120 и охлаждающим каналом, между катушками 6мм.

3.5. Радиальный размер обмотки:

Размер одной катушки:

23·0,5+22·0,12=14,14 мм

Итак, радиальный размер обмотки примерно d1 = 34мм.

3.6. Внутренний и внешний диаметры обмоток:

D1внутр=d+2·а01=0,19+2·0,005=0,200м;

D1внеш= D1внутр +2·d1=0,20+2·0,034=0,268 м.

3.7. Плотность теплового потока:

qHH= =663,168Вт/м2, где k3 – коэффициент закрытия поверхности,

kД – коэффициент добавочных потерь, определен в пункте 5.2.1.

3.8. Масса алюминиевой ленты и изоляции:

Основываясь на эскизе обмотки НН (рис. 2) определим массу алюминия и кабельной бумаге (плотность алюминия γА=2700 кг/м3, а бумаги γбум= 750 кг/м3):

Объем алюминия и изоляции:

Vал=11250 мм2;

Vбум=2595 мм2;

Масса алюминия и изоляции:

GHH=3· Vал · γА =3·11250·2700=91,1 кг;

Gизол=3· Vбум· γбум=3·2595·750=5,8 кг.

рис.2. Структура обмотки НН.

С торцов обмотки кабельная бумага выступает на 10мм, к этим частям бумаги приклеиваются ленты картона, для придания жесткости торцевым частям обмотки и дополнительной изоляции.

**4. Расчет обмотки высокого напряжения.**

Обмотка ВН соединена в треугольник, соответственно регулировочные витки располагаем в середине (рис.3) катушки, так как при другом расположении витков контакты переключающего устройства попадают под номинальное напряжение. С учетом этого обстоятельства возможно применение только непрерывной катушечной обмотки (в случае применения механического переключателя).

Обмотку выполняем из прямоугольного алюминиевого провода марки АПБ.

4.1. Число витков при номинальном напряжении:

WВH=витков;

Округлим: WВH=727 витков.

4.2. Число витков на одной ступени регулирования (+/- 5%):

N=UВНф·0,05=6300·0,05=315

wp=36 витков

4.3. Число витков на 5 ступенях регулирования:

|  |  |
| --- | --- |
| Напряжение, В | Число витков |
| 6612 | 727+36=**763** |
| 6456 | 727+0,5·36=**745** |
| 6300 | **727** |
| 6144 | 727-0,5·36=**709** |
| 5988 | 727-36=**691** |

4.4. Плотность тока в обмотке ВН:

JВН=2·J-JHH=2·1,511-1,585=1,437

4.5. Сечение витка:

ПВН=23,191 мм2;

Выбираем (по табл.5.2 [1]):

АПБ сечением ПВН =20,8мм2.

4.6. Уточненная плотность тока в обмотке ВН:

JВН =1,602 А/мм2.

4.7. Число катушек:

nкат= 44,04 катушки, где

b/ - ширина провода с изоляцией, м;

hk – осевой канал между катушками, м.

Принимаем nкат=43.

4.8. Число витков в катушке:

W =, принимаем 18.

4.9. Данные катушек:

Таблица 4. Данные катушек обмотки ВН

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Данные | Условные обозначения катушек | Всего |
| А | Б | В |
| Назначение катушки | Основная | Основная | Регулир. | - |
| Число катушек | 11 | 26 | 6 | 43 |
| Число витков в катушке | 17 | 18 | 18 | - |
| Всего витков | 187 | 486 | 108 | 763 |
| Радиальный размер, ap, мм | 45\* | 45 | 45 | - |

\* - вплетаются полосы картона до радиального размера 45мм.

рис.3. Схема выполнения ответвлений в обмотке НН при ПБВ.

Размер масляного канала в месте разрыва обмотки 8мм. В обмотке 31 осевой канал шириной 4,5мм и 10 каналов 4мм. Итого:

L=43·11,1+31·4,5+10·4+8=664,8 мм – высота обмотки.

рис.4. Структура обмотки ВН.

4.10. Плотность теплового потока:

qВH= =392,14 Вт/м2, меньше значения из графика 5.34 [1].

Между обмотками ВН и НН помещаем бумажно-бакелитовый цилиндр толщиной 3мм, внутренним диаметром 137мм.

4.11. Масса алюминия (формула 7.7 [1]):

GВН=8,47·103·с·Dср·w·ПВН=8,47·103·3·331·763·20,8=133,5 кг, где

с – число стержней;

Dcp – средний диаметр обмотки;

4.12. Внутренний и внешний диаметры обмоток:

D2внутр= D1внутр +2·а12=0,268+2·0,009=0,286м;

D2внеш= D2внутр +2·ар=0,286+2·0,045=0,376 м.

4.13. Масса обмоток:

Go=GHH+GВН=91,1+133,5=224,6кг.

Алюминиевого провода потребовалось на 5,3кг меньше, чем было рассчитано в пункте 2.10.

**5. Расчет параметров короткого замыкания**

5.1. Потери КЗ:

На низкой стороне:

PоснНН=12,75·JHH·GHH=12,75·1,585·91,1=2920 Вт (при t0 обмоток 750С);

На высокой стороне:

PоснВН=12,75·JВH·GВH=12,75·1,602·133,5=4371 Вт.

5.2. Добавочные потери:

5.2.1. Добавочные коэффициенты:

На низкой стороне:

kд=1+0,037·10-4·β2·a4·n2 – коэффициент добавочных потерь, где

β=,

где b – осевой размер проводника,

l – осевой размер обмотки;

а – радиальный размер проводника;

n – число витков.

β== =0,95

kдНН=1+0,037·10-4·β2·a4·n2=1+0,037·10-4·0,952·0,54·462=1,0004

На высокой стороне:

β== =0,651,

где m – число проводников в радиальном направлении

kдВН=1+0,037·10-4·β2·a4·n2=1+0,037·10-4·0,6512·2,04·432=1,008

5.2.2. Потери в отводах:

На низкой стороне:

Длина провода при соединении в звезду:

lотв=7,5Lo=7,5·0,665=4,988м;

Масса отвода:

GотвНН=lотв·ПНН·γА=4,988·332,5·2700·10-6=4,478 кг;

Потери:

PотвНН=12,75·JНH2·GотвНН=12,75·1,5852·4,478=143,5 Вт.

На высокой стороне:

Длина провода при соединении в треугольник:

lотв=14·Lo=14·0,665=9,31м;

Масса отвода:

GотвВН=lотв·ПВН·γА=9,31·20,8·2700·10-6=0,523 кг;

Потери:

PотвВН=12,75·JВH2·GотвВН=12,75·1,6022·0,523=17,1 Вт.

5.2.3. Потери в стенках бака:

Pбак=10·k·S=10·0,015·630=94,5 Вт , где k по табл.7.1 [1].

5.3. Полные потери.

Pk=PоснНН·kдНН+PоснВН·kдВН+PотвНН+PотвВН+Pбак= =2920·1,0004+4371·1,008+143,5+17,1+94,5=7581 Вт.

Для номинального напряжения:

Pk=7581 – 0,05·PоснВН·kдВН=7581 – 0,05·4371·1,008=7361 Вт;

=2,24% - отклонение от заданного значения.

5.4. Напряжение короткого замыкания.

Активная составляющая напряжения короткого замыкания:

ua=1.168%;

kp=1 – σ(1 – e-1/σ) – коэффициент, учитывающий отклонение реального поля рассеяния от идеализированного;

σ= ;

kp=1 – σ(1 – e-1/σ)= 1 – 0,042(1 – e-1/0,042)=0,958;

ар=а12+= 0,009+=0,035мм;

up/===4,938%

kq=1+=1+1,001;

Реактивная часть напряжения КЗ:

up=kq·up/=1,001·4,828=4.943%

Напряжение КЗ:

uk= = =5,079%

=1,6% - отклонение от заданного значения.

5.5. Определение механических сил в обмотках

Для трансформаторов мощностью менее 1,0 МВА действующее значение наибольшего установившегося тока КЗ:

IкуВН=656,291 А;

kmax= – по таблице 7.3 [1], коэффициент учитывающий максимально возможную апериодическую составляющую тока КЗ;

ikmax= =2,1·656,291=1378 А – ударный ток короткого замыкания;

Радиальная сила:

Fp=0,628·(ikmax·WBH)2·β·kp·10-6=0,628·(1378·727)2·1·0,958·10-6=80420 Н;

Напряжение сжатия:

На низкой стороне:

σsHH = МПа;

На высокой стороне:

σsВH = МПа;

 от предельно допустимого значения 25МПа;

Осевые силы:

F/ос= Н;

F//ос= Н,

где l// - расстояние от стержня до стенки бака;

m - по рисунку 7.11 [1];

Сжимающие силы:

По рисунку 7.11 [1]:

Рис.5. Сжимающие силы в обмотке ВН.

FсжВН= F/ос - F//ос=20690 – 13230=7464 Н – на высокой стороне;

Рис.6. Сжимающие силы в обмотке НН.

FсжНН= F/ос + F//ос=20690 + 13230=33920 Н – на низкой стороне;

σсжНН=МПа, где

 - средний диаметр обмотки НН;

а/ - радиальный размер алюминиевых лент (суммарный);

Обмотки после сборки прессуются силой, близкой к 34кН.

5.6. Температура обмоток спустя 5с после возникновения КЗ:

Θ===156 0С,

где J – средняя плотность тока.

Температура соответствует допустимой норме - 2000С.

**6. Расчет магнитной системы**

6.1. Полное сечение стержня:

Пфс=м2;

Активное сечение стержня:

Пс=k3Пфc=0,95·0,026=0,024м2;

6.2. Определение размеров кольца:

Рис.7. Полукольцо магнитопровода.

Длина стержня:

Lст=Lo+2lтех=0,665+2·0,03=0,725м,

где lтех – отступ необходимый для разъемного диска, который фиксирует два кольца при вращении (намотка стеклоленты, обмотки);

Размер «окна» между двумя стержнями:

C=D2внеш+0,014=0,39м;

Прочие размеры:

А=С+0,71·d=0,39+0,71·0,19=0,525м;

В=0,75·d=0,75·0,19=0,142м;

b=0,113м;

Координата центра тяжести сечения стержня:

ац=0,342·d=0,342·0,19=0,065м;

r=0,02м – радиус сопряжения ярмо-стержень;

R==0,374м;

Длина средней линии кольца по положению центра тяжести:

α=arcsin0,251 рад =14,4о;

Lcp==

==1,99м;

6.3. Масса стали навитой магнитной системы:

γст=7650 кг/м3 – плотность электротехнической стали (холоднокатаной);

Gст=1,5·Lcp·Пс·γст=1,5·1,99·0,024·7650=555,8 кг.

Масса стали получилась на 109,8кг меньше рассчитанной в предварительном расчете. Однако, это делает некоторые преимущества, например, уменьшились и потери холостого хода, ток холостого хода, уменьшилась стоимость трансформатора, так как сталь марки 3406 дорогостоящая (уменьшение массы стали дает большую экономию, чем уменьшение массы обмоток), трансформатор стал значительно легче, что в наше время является важным фактором.

Сечение полукольца можно рассматривать состоящим из 4 пакетов. На самом деле магнитопровод навивается из ленты стали переменной ширины. Чтобы отходов стали было как можно меньше, ленту сваривают из 4 отрезков точечной сваркой. В данном случае имеем:

Рис.8. Сечение стержня.

1 отрезок ленты: ширина от 26,8мм до 78,2мм; 165 слоев;

2 отрезок ленты: ширина от 78,2мм до 94,7мм; 87 слоев;

3 отрезок ленты: ширина от 94,7мм до 109,4мм; 176 слоев;

2 отрезок ленты: ширина от 109,4мм до 94,9мм; 128 слоев.

Между полукольцами укладывается изоляция из электрокартона в 1 слой – 0,5мм. Полукольца подвергаются отжигу. Скрепление двух полуколец осуществляется стеклолентой шириной 20мм.

**7. Расчет потерь холостого хода и тока холостого хода.**

7.1. Расчет потерь холостого хода:

В рассматриваемой пространственной системе следует учитывать, что при расчетной индукции в стержне Вс, первая гармоническая составляющая индукции, в отдельных частях магнитопровода, может достигать значения в 1,15 раза больше. При этом возникает гармоническая составляющая потока, которая уменьшает значение индукции в 1,14 раз. Соответственно максимальным значение индукции в системе можно считать принятое Вс. Понятие угла в данной системе не имеет места, однородность каждого кольца позволяет не разделять его на стержни и ярма.

Активные потери в стали:

Pх=kпт·kпи·pс·Gст ,

где kпт= 1,06 – коэффициент, учитывающий технологические факторы;

kпи=1,33 – коэффициент, учитывающий искажение формы кривой магнитного потока и индукции;

pc=1.080 Вт/кг – удельные потери в стали 3406 при индукции 1,6 Тл;

Pх=kпт·kпи·pс·Gст = 1,06·1,33·1,080·555,8=846,2 Вт, что составляет примерно 65% от заданного значения (846,2·100/1300 = 65,1%).

7.2. Расчет тока холостого хода:

Полная намагничивающая мощность:

Qx=kтт·kти·qc·Gcт ,

где kтт=1,15 –коэффициент, учитывающий несовершенство технологии и отжига;

kти=1,50 – коэффициент, учитывающий искажение формы кривой магнитной индукции;

qc=1.560 ВА/кг – полная удельная намагничивающая мощность в стали 3406 при индукции 1,6 Тл;

Qx=kтт·kти·qc·Gcт=1,15·1,50·1,560·555,8=1496 ВА;

Относительное значение тока холостого хода:

i0= 0,237%, что составляет примерно 15,8% от заданного значения (0,237·100/1,5 = 15,827%);

i0a= 0,134% - активная составляющая тока холостого хода.

**8. Тепловой расчет трансформатора.**

8.1. Обмотка низкого напряжения:

Потери, выделяющиеся в 1 м3 общего объема обмотки:

pa=69730 Вт, где а – толщина ленты;

δиз – толщина изоляции;

 0,439 Вт/м·0С – средняя теплопроводность обмотки;

Внутренний перепад температуры:

Θ0НН=3,89 оС;

Средний перепад температуры:

Θ0ННср=2·Θ0НН/3=2·3,89/3=5,187 оС;

Перепад на поверхности обмотки:

ΘомНН=0,285·qНН0,6=0,285·663,160,6=14,055 0С;

Среднее превышение температуры над средней температурой масла:

Θом.срНН=Θ0ННср+ΘомНН=5,187+14,055=19,241 оС.

8.2. Обмотка высокого напряжения:

Внутренний перепад температуры:

Θ0ВН=0,583 оС;

Средний перепад температуры:

Θ0ВНср=2·Θ0ВН/3=2·0,583/3=0,388 оС;

Перепад на поверхности обмотки:

ΘомВН=k1k2k3·qВН0,6=1,0·1,0·1,05·0,35·392,140,6=13,3 0С , где (коэффициенты взяты в пункте 9.5 [1]):

k1 – учитывает скорость движения масла внутри обмотки;

k2 – учитывает затруднение конвекции масла в каналах;

k3 – учитывает влияние на конвекцию масла горизонтальных каналов;

Среднее превышение температуры над средней температурой масла:

Θом.срВН=Θ0ВНср+ΘомВН=0,583+13,3=13,692 оС.

**9. Расчет основных геометрических размеров бака трансформатора**

Расстояние от обмотки ВН до стенки бака:

Отвод НН изготавливаем из алюминиевой шины сечением 32х10мм; шина приваривается точечной сваркой к концу обмотки НН; шина не изолируется. Отвод ВН делаем из того же провода, из которого сделана обмотка.

По табл.4.11 [1] определяем расстояние от обмотки до стенки бака:

S3=25мм – расстояние от обмотки до отвода;

S4=25мм – расстояние от отвода до стенки бака;

Толщина отвода – 10мм;

Расстояние от обмотки до стенки бака – 60мм.

Подкладку под ярмо изготавливаем из буковых досок толщиной 50мм.

Расстояние от ярма до крышки принимаем 140мм (меньше приведенного в табл.9.5 [1], так как ярмо пространственной системы имеет совершенно иную конструкцию, чем ярмо плоского магнитопровода).

Итак, высота стенки бака Нбак=1280мм.

**10. Тепловой расчет бака. Окончательный расчет превышений температуры обмоток и масла**

10.1. Тепловой расчет бака.

Рис.9. Эскиз стенки бака, вид сверху.

Системой охлаждения трансформатора является его волнистые стенки (см рис.9). Параметры системы охлаждения:

Число волн, m: 74;

Глубина волны: 130мм;

Ширина волны: 12мм (снаружи);

Расстояние волн: 25мм;

Толщина стенки: 1мм;

Высота волн, Нв: 1170мм.

Поверхность излучения стенки (по эскизу):

Пив=П·Нбак=3549·1170·10-6=4,152 м2 ,

где П – периметр волнистой стенки;

Поверхность верхней рамы:

Пр=0,1·t·n=0,1·0,037·74=0,274 м2 , где t – шаг волн;

Площадь крышки по эскизу:

Пкр=0,555м2;

Полная поверхность излучения:

Пи=Пив+Пр+0,5·Пкр=4,152+0,274+0,5·0,555=4,7 м2;

Поверхность конвекции стенки:

Пкв=m·lв·kв·Hв=74·(268,85+25)·0,973·1170·10-6=24,755 м2,

где lв – периметр одной волны;

Полная поверхность конвекции:

Пк=Пкв+Пр+Пкр·0,5=24,755+0,247+0,5·0,555=25,3 м2.

10.2. Окончательный расчет превышений температуры обмоток и масла.

Среднее превышение температуры стенки бака над температурой окружающего воздуха:

Θбв=43,8 оС;

Среднее превышение температуры масла вблизи стенки над температурой стенки бака:

Θмб=1,0·0,1655,4 оС;

Превышение температуры масла в верхних слоях над температурой окружающего воздуха:

Θмвв=1,2(Θмб+Θбв)=1,2·(43,8+5,4)=59 oC, что меньше нормы – 60оС.

Превышение температуры обмоток над температурой окружающего воздуха для обмотки НН:

ΘовНН=Θ0ННср+Θом+Θмб+Θбв=5,187+14,055+5,4+43,8=68,4 оС;

Превышение температуры обмоток над температурой окружающего воздуха для обмотки ВН:

ΘовВН=Θ0ВНср+Θом+Θмб+Θбв=0,388+13,3+5,4+43,8=62,8 оС.

**11. Определение массы масла и конструктивных материалов.**

11.1. Масса конструктивных материалов.

Волнистая часть бака изготовлена из стали толщиной 1мм. По эскизу определили периметр волнистой стенки: 21,9м; примем плотность конструкционной стали 7850 кг/м3, тогда масса волнистой стенки:

21,9·7850·0,001·Нв=201 кг.

Сверху (50мм) и снизу (60мм) гладкие участки стенки бака изготовлены из стали толщиной 4мм, аналогично получим массу этой части стенки бака: 9,5кг.

Днище изготавливаем из стали толщиной 6мм, масса днища: 26,2кг.

Крышку изготавливаем из стали толщиной 8мм, масса крышки: 34,8кг.

Таким образом, приблизительная масса стального бака:

Gбак=201+9,5+26,2+34,8=271,5кг.

Площадь одной волны: 0,0013м2;

Объем бака: Vбак= 0,555·1,280+0,0013·74·1,17=822 л.

11.2. Масса масла.

Масса активной части:

1,2·(Gст+Gпр)=954кг;

Объем активной части (среднюю плотность активной части принимаем 5500кг/м3):

Vact=954/5500=173л;

Плотность масла: 900кг/м3;

Масса масла:

Gм= 900·(Vбак-Vact)=582кг.

Приблизительная масса трансформатора:

582+954+271,5=1808 кг, с учетом наличия различных устройств, например, вводов, термодатчиков и тп, швеллеров и катков, можно принять приблизительную массу трансформатора 1900кг.

**12. Расчет КПД трансформатора**

η=98,714%

Полученный КПД является достаточно высоким для трансформатора такой мощности, что свидетельствует о правильности расчета.

Стоимость стали 3406 в настоящее время приблизительно 100р/кг, стоимость провода АПБ примем 80р/кг, масла – 35р/кг, стоимость конструкционной стали - 30р/кг. Тогда можно рассчитать приблизительную стоимость этих материалов, используемых в трансформаторе:

Gст·100=555,8·100=55580 руб – приблизительная стоимость стали 3406;

Gпр·80=239·80=19140 руб – приблизительная стоимость провода АПБ;

GМ·35=582·35=20370 руб – приблизительная стоимость масла;

Gбак·30=271,5·30=8145 руб – приблизительная стоимость тонколистовой стали.

Итого: 103600 руб.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данном курсовом проекте был рассчитан трехфазный трансформатор с пространственной навитой магнитной системой, герметичного исполнения ТМВГ-630/6,3. В процессе расчета были выявлены преимущества данной магнитной системы над плоской:

* Меньший расход электротехнической стали;
* Меньше потери холостого хода;
* Меньше ток холостого хода;
* Меньше масса трансформатора;
* Больше КПД;
* Меньше стоимость.

В подтверждение – сравнение задания на расчет и его результаты:

|  |  |
| --- | --- |
| Задание на проектирование | Полученные результаты |
| uк =5.0%i0 =1.5%Pх =1.3 кВтPк =7.2 кВт | uк =5.079%i0 =0,237%Pх =0,846 кВтPк =7.381 кВт |

Трансформаторы данной серии незаслуженно вышли из производства. При внедрении необходимых технологических особенностей в производство трансформаторов, есть возможность создавать трансформаторы этой серии, в основном малой и средней мощности.

**Список литературы**

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 528 с.: ил.
2. Антонов М.В. Технология производства электрических машин. – М.: Энергоиздат, 2002. – 592 с.: ил.
3. Гончарук А.И. расчет и конструирование трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 256 с.: ил.
4. Сапожников А.В. Конструирование трансформаторов. – М.: Госэнергоиздат, 1999. – 360 с.: ил.
5. ГОСТ 11677 – 85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
6. ГОСТ 16110 – 85. Трансформаторы силовые. Термины и определения.