##### Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

ЮЖНО-РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

(НОВОЧЕРКАССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ)

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

**ТРЕХФАЗНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Пособие

к курсовому проектированию

Новочеркасск 2008

УДК 621.313. (076.5)

Рецензент канд. техн. наук Е.А. Попов

Составители: Р.В. Ротыч, Л.Ф. Коломейцев, О.А. Васин.

Проектирование трехфазных силовых трансформаторов. Пособие к курсовому проектированию./Южно-Российский гос. тех. ун-т (НПИ).-Новочеркасск: ЮРГТУ 2008

Пособие предназначено для выполнения курсового проекта студентами очного обучения, изучающих дисциплины: «Электрические машины», «Конструкции, расчет, проектирование, потребительские свойства электромагнитных устройств и электромеханических преобразователей»

Южно-Российский государственный

технический университет (НПИ), 2008

Ротыч Р.В., Коломейцев Л.Ф., О.А. Васин

Задание

Тип трансформатора ТМ-1600/35.

Мощность трансформатора *S =*1600 кВ∙А;

число фаз *m =* 3;

частота *f =* 50 Гц.

Номинальные напряжения обмоток:

первичное – 35000 В;

вторичное – 690 В.

Схема и группа соединения Y/Δ – 11.

Переключение ответвлений без возбуждения (ПБВ).

Режим работы – продолжительный;

Установка – наружная.

# Расчет основных электрических величин

## Определение линейных и фазных токов и напряжений ВН и НН

Символы величин обмотки НН обозначаются с индексом “1”, обмотки ВН – с индексом “2” (обмотка НН размещается на стержнях магнитной системы, обмотка ВН - снаружи).

### *Мощность одной фазы и одного стержня*

### кВ∙А

### *Номинальные (линейные) токи на сторонах*

### НН А

### ВН А

### *Фазные токи при соединении Y/Δ*

**** А

**** А

*Фазные напряжения обмоток*

В

### В

***1.2 Определение активной и реактивной составляющих напряжений*** Uк%***.***

По методике [1] следует задаться потерями короткого замыкания Pк и напряжением короткого замыкания Uк%, которые выбираются из табл. П.1 и табл. П.2.

****Вт,%.

*Активная составляющая напряжения короткого замыкания*

**%**

*Реактивная составляющая*

**%**

## 1.3 Определение испытательных напряжений обмоток.

## Испытательные напряжения обмоток по табл. П.3

для обмотки ВН Uисп = 85 кВ;

для обмотки НН Uисп = 5 кВ.

# Определение основных размеров трансформатора

***2.1*** ***Выбор конструкции магнитной системы***

Согласно указаниям [1] выбираем трехфазную стержневую шихтованную магнитную систему с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми на средних стержнях. Для мощности 1600 кВА согласно табл. П.5 число ступеней в стержне принимаем 8, коэффициент заполнения круга ккр=0,928, число ступеней в ярме меньше на 2 и равно 6. Стержни магнитной системы скрепляются бандажами из стеклоленты, ярма прессуются профильными стальными балками (табл. П.4). Изоляция пластин — нагрево-стойкое изоляционное покрытие, с коэффициентом заполнения kз = 0,97.

Коэффициент заполнения сталью kс =kкр ∙kз =0,928 ∙ 0,97 =0,9.

Число зазоров в магнитной системе на косом стыке 4, на прямом 3.

Материал магнитной системы — холоднокатаная текстурированная рулонная сталь 3404 толщиной 0,35мм.

***2.2*** ***Определение диаметра и высоты стержня магнитной системы***

 м,

где *β* рекомендуется выбирать в интервале 1,8 ÷ 2,4 (например *β = 1,9*);

 м.

Значение а12 определить из табл.П.8 для Uисп = 85 кВ.

Значение *k* по табл. П.9.

Коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному kр 0,95;

Индукция в стержне (предварительная) Bc по табл. П.10.

По табл. П.12 принимаем стандартный диаметр d = 0,26 м.

*Активное сечение стержня*

 м2.

***2.3*** ***Выбор конструкции обмоток и изоляционных промежутков главной изоляции***

Выбираем типы обмоток по табл. П.6 для ВН при напряжении 35 кВ и токе

26,4 А – непрерывная катушечная из прямоугольного медного провода; для обмотки НН при напряжении 0,69 кВ и токе 773 А – цилиндрическая многослойная из прямоугольного медного провода.

*Средний диаметр обмоток НН и ВН*

** м,

где *а* выбирается в зависимости от значения напряжения обмотки ВН:

при 35 кВ принять *а = 1,4* [1].



Рис. 1. Основные размеры трансформатора

*Высота обмоток (предварительная)*

м.

По испытательному напряжению обмотки ВН Uисп = 85 кВ находим из табл. П.8 изоляционные расстояния (рис. 1): мм, мм,  мм.

Для обмотки НН при Uисп = 5 кВ по табл. П.7 находим мм.

1. **Расчет обмоток**

***3.1 Расчет обмотки НН***

Конструкция обмотки НН определяется мощностью и напряжением согласно рекомендациям табл. П.6. Выбрана цилиндрическая многослойная конструкция из прямоугольного медного провода. Обмотка НН расположена ближе к стержню магнитопровода, т.е. является внутренней и расчет всегда начинается с неё.

*ЭДС одного витка*

В.

*Число витков обмотки НН*

. Принимаем *w*1= 40 витков.

*Напряжение одного витка*

UВ = 690/40 = 17,25 В.

*Средняя плотность тока в обмотках*

** МА/м2,

где *k*Д из табл. П.14.

*Сечение витка ориентировочно*

**м2 = 213,5 мм2.

По полученному ориентировочному значению  выбираем по табл. П.13 сечение витка из N = 6 параллельных проводов марки ПБ класса нагревостойкости “В” с намоткой на ребро (для провода марки ПСД и ПСДК см. табл. П.15, для круглого провода марки ПБ см. табл. П.17). Рекомендуется число *N* выбирать минимальным.

Для прямоугольного провода марки ПБ

 (в числителе размеры провода без изоляции, в знаменателе с изоляцией рис. 2 и 3).

 сечением 37,2·10-6 м2 каждого провода (по табл. П.15);

Для круглого провода , по табл. П. 17, рис. 3.

*Общее сечение витка* *из прямоугольного провода*

** м2.

*Общее сечение витка* *из круглого провода*

**

*Осевой размер витка из N параллельных проводов:*

*для прямоугольного провода*

 м.

*для круглого провода*



*Число витков в слое*

**

*Число слоев обмотки*

**.

*Плотность тока*

**МА/м2.





Рис. 2. Размеры провода в изоляции

Рис Рис. 3. Поперечное сечение одного витка в изоляции из N проводников

*Осевой размер обмотки*

**м.

*Предварительный радиальный размер обмотки без каналов между слоями*

** м,

где  - толщина изоляции между слоями (выбран электрокартон толщиной , можно использовать кабельную бумагу толщиной 0,2 мм в   
3 слоя) [1]. Кабельная бумага .

*Предварительная плотность теплового потока на поверхности обмотки*



Вт/м2,

где *nсл1 –* число слоев обмотки; *b* – размер провода, которым он уложен перпендикулярно к стержню; *a* (*a´* – в изоляции) *-*  размер провода, которым он уложен параллельно стержню;

*k*з – коэффициент закрытия поверхности распорными планками, *k*з  0,75;

*k*д – коэффициент, учитывающий отношение основных потерь к потерям короткого замыкания, по табл. П.16, *k*д = 0,91.

Расчетное значение  Вт/м2 больше допустимого значения Вт/м2, поэтому для увеличения поверхности охлаждения используем канал между частями обмотки шириной *ак1= 7,5* мм и определяем *q1* для каждой части обмотки. В данном варианте каждая часть обмотки содержит число слоев *n=1.*

Следовательно  Вт/м2, что допустимо.

*Окончательный радиальный размер обмотки*

**м.

В случае круглого провода плотность теплового потока рассчитывать по формуле



*Диаметры обмотки:*

внутренний  м;

внешний  м.

*Масса металла обмотки*

**

кг,

где м *—* средний диаметр обмотки.

*Масса провода* по табл. П.17 и П.18.

** кг.

***3.2*** ***Расчет обмотки ВН.***

По рекомендациям табл. П.6 выбрана непрерывная катушечная обмотка из прямоугольного медного провода с радиальными каналами.

Выбираем схему регулирования по рис. 4 с выводом концов всех трех фаз обмотки к одному трехфазному переключателю по рис. 4. Контакты переключателя рассчитываются на ток 30 А. Эта схема применяется для всех конструкций обмоток (табл. П.6).

*Число витков обмотки ВН при номинальном напряжении* .

Принимаем *w*1= 1176 витков.

*Напряжение одного витка*

UВ = 20207/1176 = 17,18 *В*.

Согласно ГОСТ 11920 – 85 регулирование напряжения переключением ответвлений обмотки без возбуждения (ПВБ) предусматривается четыре ответвления (+5, +2.5, -2.5 и -5)%*Uн* и основной зажим с номинальным напряжением.

*Напряжение ступени регулирования*

 *В*.

*Число витков на одной ступени регулирования в фазной обмотке*

витков.

Для получения на стороне ВН различных напряжений необходимо соединить:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Напряжение, В | Число витков на ответвлениях | Ответвления обмотки | | |
| 36750 | 1176 + 2·29 = 1235 | А2А3 | В2В3 | С2С3 |
| 35875 | 1176 + 29 = 1205 | А3А4 | В3В4 | С3С4 |
| 35000 | 1176 | А4А5 | В4В5 | С4С5 |
| 34125 | 1176 – 29 = 1147 | А5А6 | В5В6 | С5С6 |
| 33250 | 1176 – 2·29 = 1118 | А6А7 | В6В7 | С6С7 |



Рис. 4. Схема регулирования напряжения ВН

*Ориентировочное сечение витка*

 м2  мм2.

По табл. П.6 по мощности 1600 кВ∙А, току на один стержень 26,4 А, номинальному напряжению обмотки 35000 В и сечению витка 7,31 мм2 выбираем конструкцию непрерывной катушечной обмотки из прямоугольного медного провода марки ПБ класса В с радиальными каналами.

**Если по рекомендации табл. П.6 выбрана цилиндрическая многослойная обмотка из круглого провода, то расчет обмотки ВН выполнить по формулам для расчета обмотки НН.**

По полученному ориентировочному значению  выбираем по табл. П.13 сечение витка из одного прямоугольного провода марки ПБ:

 сечением 7,625·10-6 м2 .

В двух верхних и двух нижних катушках обмотки каждой фазы применяем провод с усиленной изоляцией 1,50 мм, с размерами провода в изоляции 2,907,10 мм. (1,4+1,5 = 2,9 мм, 5,6 +1,5 = 7,1 мм).

*Плотность тока в обмотке*

**МА/м2.

При J2 = 3,46 МА/м2 и *b* = 5,6 мм по графикам рис. 5, а находим

q800 Вт/м2.



Рис. 5. Графики для ориентировочного определения размера провода *b* по заданным значениям *q* и J в катушечных, винтовых и цилиндрических обмотках из прямоугольного провода

(для цилиндрической обмотки размер *b*, полученный по графику, умножить на 0,8).

Принимаем конструкцию обмотки с радиальными каналами по  мм между всеми катушками. Две крайние катушки сверху и снизу отделены каналами по  мм. Схема регулирования напряжения – по рис. 4, канал в месте разрыва обмотки *h*кр = 10 мм (рис. 6).

Осевой размер катушки 6,1 мм, осевой размер крайних катушек с усиленной изоляцией 7,1 мм, т. е. провод укладывается “плашмя” (на сторону ).

*Число катушек на стержне предварительно*

** катушек,

где *h'*к – ширина межкатушечных каналов (для SН < 1600 кВ∙А, *h'*к = (4 ÷ 6)мм).

*Число витков в катушке ориентировочно*

.

*Радиальный размер*

**м,

где *а*´– радиальный размер провода.

*Общее распределение витков по катушкам:*

*Распределение витков по катушкам следует начинать с регулируемых катушек:*

*В одной ступени регулирования 29 виток, поэтому регулируемая катушка должна содержать w*кр = *w*р*/2 = 14,5 витка, а число регулируемых катушек*

**

*Для защиты обмотки ВН от внешних электрических импульсов крайние катушки обмотки должны иметь лучшую изоляцию.*

*Четыре катушки, например, могут содержать по18 витков*

*49 силовых катушек Г по 20 витков..............................................980*

*8 регулировочных катушек Д по 14,5 витка .................................116*

*4 катушки с усиленной изоляцией Е по 20 витков .........................80*

*Всего 61 катушка ..............................................................1176 витков*

Расположение катушек на стержне и размеры радиальных каналов приняты

по рис. 6 и 7.

Рис. 6. Расположение катушек и радиальных каналов.

*Осевой размер обмотки*

**

Величина *l2*должна быть равна *l1*(*l1*= *l2* = 0,62 м).

По испытательному напряжению *U*исп = 85 кВ и мощности трансформатора S = 1600 кВ∙А по табл. П.7 находим:

Канал между обмотками ВН и НН ……………………….. 

Толщина цилиндра (изоляционного)……………………....

Выступ цилиндра за высоту обмотки ……………………...

Расстояние обмотки ВН до ярма …………………………...

*Плотность теплового потока на поверхности обмотки для катушек группы Г*



 Вт/м2.

Значение *q2* меньше 1200 Вт/м2, что гарантирует допустимый нагрев обмотки ВН.

*Внутренний диаметр обмотки*

 мм.

Принимаем размеры бумажно-бакелитового цилиндра, на котором на 12 рейках толщиной 18 мм наматывается обмотка ВН (диаметром 0,380/0,4000,770 м). Основные размеры обмоток трансформатора показаны на рис. 6 и 7.

*Радиальный размер обмотки с экраном* ()

м.

*Внешний диаметр обмотки*

м.



Рис. 7. Схема обмоток НН и ВН и изоляционных расстояний трансформатора

*Масса меди обмотки ВН*

** кг,

где мм.

*Масса провода* *в обмотке ВН с изоляцией*

** кг,

где *k*из – коэффициент увеличения массы обмотки ВН с учетом изоляции.

*Масса меди двух обмоток*

** кг.

*Масса провода* *двух обмоток*

** кг.

4. **Определение параметров режима короткого замыкания**

***4.1 Определение потерь короткого замыкания***

*Основные потери*

Обмотка НН

Вт.

Обмотка ВН

Вт.

Основные потери в отводах рассчитываются следующим образом.

*Длина отводов определяется приближенно*

м – для схемы *“треугольник”,*

м – для схемы *“звезда”.*

*Масса отводов НН*

кг.

где м2.

*Потери в отводах НН*

Вт.

*Масса отводов ВН*

кг.

где м2.

*Потери в отводах ВН*

Вт.

*Потери в стенках бака и других элементах конструкции* до выяс­нения размеров бака определяем приближенно

Вт.

где *k = 0,02* для *Sн< 1000 кВ·А,*

*k = (0,03÷0,04)* для *Sн >1000 кВ·А.*

*Полные потери короткого замыкания*



Вт.

*к*д – коэффициент добавочных потерь: для многослойных цилиндрических обмоток *к*д *=1,12*, для катушечных – *к*д *=1,05÷1,06.*

или % заданного значения.

***4.2* *Определение напряжения короткого замыкания ()***

*Активная составляющая (в %)*

*%*.

*Реактивная составляющая (в %)*



 %,

где уточненное значение 







*Напряжение короткого замыкания (в %)*

 %,

или % заданного значения *Uк*.

*Установившийся ток короткого замыкания* на обмотке ВН

А,

где *Sк* – мощность короткого замыкания электрической сети:

*Sк= 5000 кВ·А* при *UВН < 10 кВ, Sк= 2500 кВ·А* при *UВН >10 кВ.*

*Мгновенное максимальное значение тока короткого замыкания*

 А,

при по табл. П.20 .

*Температура обмотки через t = 5 с после возникновения короткого замыкания*

 ºС .

 – рабочая температура обмотки до КЗ (принимают 90 ºС ) .

Предельно допустимая температура обмоток при аварийном коротком замыкании: для обмотки из меди кл. А и Е 250 ºС, для кл. В 350 ºС [1].

***4.3*** ***Определение механических сил в обмотках***

*Радиальная сила*



 Н.

*Среднее сжимающее напряжение в проводе обмотки НН*

 МПа.

*Среднее* *растягивающее напряжение в проводах обмотки ВН*

 МПа,

т. е. 38,4 % допустимого значения 60 МПа.

Осевые силы в катушечной обмотке

**Н

**Н.

где мм (по рис. 8,а)*, т –* множитель, зависящий от расположения обмоток, для расположения обмоток на рис. 8, *б* значение *т* = 4 [1].Расстояние от стержня до стенки бака *l"= 0,25* м.

Для многослойных цилиндрических обмоток ,  и  (направление  на рис.8, *б* к центру обмотки 2).

*Максимальные сжимающие силы в обмотках*

**Н.

**Н.



Рис. 8. Механические силы в обмотках трансформатора

а) схема расположения катушек обмотки ВН по рис.6.

б) схема осевых сил обмоток НН и ВН

Наибольшая сжимающая сила наблюдается в середине обмотки НН (обмотка 1), где *F* сж1= 174715 Н. Напряжение сжатия на междувитковых прокладках

 МПа,

что ниже допустимого значения 18÷20 МПа [1];

*n* – число прокладок по окружности обмотки; *а* – радиальный размер обмотки;

*b* – ширина прокладки (*b = 0,04 ÷ 0,06* м для *Sн< 63000* кВ·А).

**5. Окончательный расчет магнитной системы**

***5.1*** ***Определение размеров пакетов и активной площади стержня и ярма***

Выбрана конструкция трехфазной плоской шихтованной магнитной ­системы, собираемой из пластин холоднокатаной текстурованной стали марки *3404* толщиной *0,35* мм. Стержни магнитной системы скрепляются бандажами из стеклоленты, ярма прессуются ярмовыми балками. Размеры пакетов выбраны по табл. П.12 для стержня диаметром 0,260 м без прессующей пластины. Число ступеней в сечении стержня 8, в сечении ярма 6 (рис. 9).

Размеры пакетов в сечении стержня и ярма по табл. П.12.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № пакета | Стержень, мм | Ярмо (в половине поперечного сечения), мм |
|  |  |  |
| 1 | 250  35 | 250  35 |
| 2 | 23025 | 230 25 |
| 3 | 21513 | 21513 |
| 4 | 195  13 | 19513 |
| 5 | 175  10 | 175  10 |
| 6 | 1558 | 15523 |
| 7 | 1209 | — |
| 8 | 105 6 | — |

Общая толщина пакетов стержня (ширина ярма) 0,238 м. Площадь ступенчатой фигуры сечения стержня по табл. П.21.

 см2  м2; ярма –см2 м2.

*Объем, угла магнитной системы*

см2  м2.

*Активное сечение стержня*

 м2.

*Активное сечение ярма*

 м2.

*Объем стали угла магнитной системы*

 м3.

**а)**



**б)**

Рис. 9. Магнитна система трансформатора:

а)сечение стержня и ярма; б) основные размеры магнитной системы.

*Длина стержня (рис. 1 и 9)*

м.

где *l0* и *—* расстояние от обмотки до верхнего и нижнего ярма (рис. 1).

*Расстояние между осями стержней*

м.

где = 0,033 – расстояние между обмотками ВН двух соседних стержней (по табл. П.7).

***5.2*** ***Определение массы стержня и ярма***

*Масса стали угла магнитной системы*

**кг.

кг/м3 – удельный вес стали.

*Масса стали ярм*



кг.

*Масса стали стержней*

кг.

где кг;

кг.

*Общая масса стали*

кг.

***5.3*** ***Определение потерь в стали магнитопровода***

Расчет потерь холостого хода по [1].

*Индукция в стержне*

 Тл.

*Индукция в ярме*

 Тл.

*Индукция на косом стыке*

 Тл.

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

*Площадь сечения стержня на косом стыке*

м2.

Удельные потери для стали стержней, ярм и стыков определяются по табл. П.22:

для стали марки 3404 толщиной 0,35 мм при шихтовке в две пластины:

при Тл Вт/кг; Вт/м2;

при  Тл  Вт/кг; Вт/м2;

при  Тл  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 в магнитопроводе применим выра­жение:

,

где *k*п.д = 1,15 для трансформаторов Sн ≤ 63000 кВ·А

и *k*п.д = 1,2, если Sн > 63000 кВ·А.

По табл. П.23 находим коэффициент .

Тогда *потери холостого хода*

Вт.

Полученное значение *Px* составляет % от заданного значения.

***5.4*** ***Определение тока холостого хода***

Для расчета намагничивающей мощности по табл. П.24 находим удель­ные намагничивающие мощности:

при Тл; В·А/кг;  В·А /м2;

при Тл; В·А/кг;  В·А /м2;

при  Тл;  В·А /м2.

Для принятой конструкции магнитной системы и технологии ее изготовления используем

*Намагничивающая мощность холостого хода*



,

где *k*тр *=* 1,18 для отожженной стали 3404 и 3405;

*k*ту = 42,40 по табл. П.25;

*k*т.пл = 1,32 для Sн ≤ 1600 кВ·А и *k*т.пл = 1,2 для Sн > 1600 кВ·А.





В∙А.

*Реактивная составляющая тока холостого хода*

%.

*Активная составляющая тока холостого хода*

%.

*Ток холостого хода*

 %, что составляет % от заданного *i0% = 1,3%* для серийного трансформатора (табл. П.2).

***5.5*** ***Внешние характеристики трансформатора***

Рассчитать и построить графики зависимости КПД и *U2 = f(I2).*

*Изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора:*

*, В,*

где * 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2*  при 

* *

Коэффициент мощности нагрузки задается в задании на проектирование (например *).*

*.*

*. .*

*Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора*

**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *ki* | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 |
| *U2, В* | 34673,5 | 34347,1 | 34020,6 | 33694,1 | 33367,7 | 33041,2 |
| *η* | 0,985 | 0,988 | 0,987 | 0,985 | 0,982 | 0,980 |
| *P2, кВ·А* | 320 | 640 | 960 | 1280 | 1600 | 1920 |

Для номинальной нагрузки Sн = 1600 кВ∙А; Р*ст* = Р*х* = 3,645 кВт; Р*меди* = Р*к* =18,715 кВт



Рис. 10. График КПД трансформатора



Рис. 11. Зависимости вторичного напряжения *U2* и выходной мощность *P2* от *ki .*

**6. Тепловой расчет и расчет системы охлаждения**

При работе трансформатора в режиме нагрузки потери, возникающие в его обмотках и магнитопроводе, преобразуются в теплоту. Часть этой теплоты нагревает активные части, а остальная отводится в окружающую среду. В номинальном режиме нагрузки температура обмоток и масла достигает установившихся значений, которые не должны превышать допустимых ГОС стандартом.

***6.1. Расчет температурного перепада в обмотках***

*Внутренний перепад температуры:*

Обмотка НН

ºС,

где *δ* – толщина изоляции провода на одну сторону, δ = 0,25∙10-3 м; *q* – плотность теплового потока на поверхности обмотки; λиз – тепло­проводность бумажной изоляции провода пропитанной маслом, по табл. П.26. λиз = 0,17 Вт/(м∙ºС);

Обмотка ВН

ºС,

*Перепад температуры на поверхности обмоток:*

обмотка НН

 ºС,

где *k=*0,285 для цилиндрической обмотки;

обмотка ВН

 ºС,

где *k1* = 1,0 для естественного масляного охлаждения; *k2=* l,0 для наружной обмотки; для внутренней катушечной обмотки *k2=* l,1; коэффициент *k*з учитывает влияние на конвекцию горизонтальных масляных каналов, по табл. П.27 *k*з= 0,95 для *h*к/*a* = 4,0/38 = 0,105, при отсутствии каналов *k*з = 0,95; *hк –* ширина масляного канала; *a –* глубина канала (ширина обмотки);

*Полный средний перепад температуры от обмотки к маслу:*

обмотка НН

 ºС,

обмотка ВН

 ºС,

***6.2 Выбор и расчет системы охлаждения (расчет бака, радиаторов, охладителей)***

В соответствии с мощностью трансформатора по табл. П.28 выбираем конструкцию гладкого бака с радиатором из труб (рис. 14). Тепловые расчеты для других конструкций баков (табл. П.28) изложены в [1,2].

Изоляционные расстояния отводов определяем до прессующей балки верхнего ярма и стенки бака.

*Минимальная ширина бака* (рис.12 и 13)

*.*

м.



Рис. 12. Схема бака трансформатора

*Изоляционные расстояния* по табл. П.29 (рис.13):

― расстояние от изолированного отвода обмотки ВН до стенки бака  = 40 мм для Uисп = 85 кВ;

― изоляционное расстояние от изолированного отвода обмотки ВН до собственной обмотки

 = 40 мм для Uисп *=* 85кВ

― изоляционное расстояние от отвода обмотки НН до обмотки ВН

= 25 мм для Uисп = 35 кВ;

― изоляционное расстояние от отвода обмотки НН до стенки бака

 = 90 мм для Uисп = 85 кВ;

диаметр изолированного отвода от обмотки ВН, = 10 мм;

диаметр изолированного отвода обмотки НН = 10 мм.

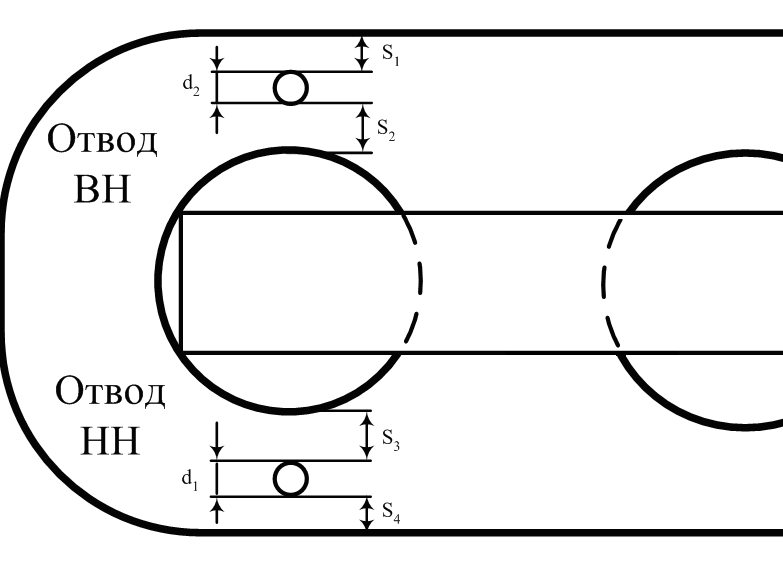


Рис. 13. Схема отводов обмоток трансформатора

*Длина бака*

**м ,

где *С* – расстояние между осями стержней (см. пункт «Расчет магнитной системы»); м.

Принимаем А=1,8 м.

*Высота активной части*

м,

где  *–* высота стержня;

*hЯ* *–* высота ярма (равна высоте наибольшего пакета в сечении ярма. см. пункт «Расчет магнитной системы трансформатора»);

*hn* *–* толщина бруска между дном бака и нижним ярмом (0,05 м).

Согласно рекомендации [1] расстояние от верхнего ярма до крышки бака обмотки ВН:

для 6 и 10 кВ м, для 20 кВ м;

для 35 кВ м, если S4 ≥ 1600 кВт и U ≥ 25 кВ м,

принимаем м.

*Глубина бака*

**м,

*Допустимое превышение средней температуры масла над температурой окружающего воздуха для наиболее нагретой обмотки*

 ºС;

где – большее из двух значений, подсчитанных для обмоток ВН и НН.

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

 ºС < 60 ºС;

Принимая предварительно перепад температуры на внутренней поверхности стенки бака  ºС и запас 2 ºС, находим *среднее превышение* *температуры наружной стенки бака над температурой воз­духа*

** ºС;

Для выбранного размера бака рассчитываем *поверхность конвекции гладкой стенки бака*

м2

где  м.

*Ориентировочная поверхность излучения бака с трубами*

м2,

где *k –* коэффициент, учитывающий отношение периметра поверхности излучения к поверхности гладкой части бака и приближенно равный: 1,0 – для гладкого бака; 1,2 – 1,5 – для бака с трубками и 1,5 – 2,0 – для бака с навесными радиаторами.

*Ориентировочная необходимая поверхность конвекции* для заданного значения  ºС

м2,

где Вт.

По табл. П.30 для мощности 1600 кВА выбираем бак с двумя рядами овальных труб (рис. 14).

Размеры трубы:

― сечение, мм – 72×20;

― радиус закругления R= 188 мм;

― шаг труб между рядами tP = 100 мм;

― прямой участок для внутреннего ряда труб принимаем а1 = 50 мм;

а2 = а1 + tр = 50+100 = 150 мм;

По табл. П.31 по размеру наружного ряда труб выбираем минимальные значения *с* и *е.*

*сmin =* 75мм*, еmin =* 85мм.

*Расстояние между осями труб на стенке бака (по рис.14):*

Наружный ряд

м.

Внутренний ряд

м.

*Развернутая длина трубы (рис.14)*

первый (внутренний) ряд

м,

второй ряд

м.



Рис.14. Элемент трубчатого бака

*Поверхность конвекции* составляется из:

поверхности гладкого бака Пк,гл = 7,5 м2 и

поверхности крышки бака



м2,

где 0,16 – удвоенная ширина верхней рамы бака.

*Поверхность излучения бака с трубами*

 **

** м2.

где *d* – больший размер поперечного сечения овальной трубы, *d* = 72 мм (табл. П.30), меньший размер – 20 мм.

*Поверхность конвекции труб*

 м2.

*Необходимая фактическая поверхность конвекции труб*

 м2,

где *k*Фтр =1,34 для двух рядов труб и *k*Фтр =1,4 при одном ряде труб.

При поверхности 1м трубы *ПМ*= 0,16 м2  необходимо иметь общую длину труб

м.

где Пм – поверхность 1 м трубы по табл. П.30.

*Число труб в одном ряду на поверхности бака*

.

*Шаг труб в ряду*

м.

*Поверхность конвекции бака*

**м2.

Таким образом, поверхность конвекции бока достаточно близка к предварительному значению , необходимой для отвода тепловых потерь.

***6.3*** ***Определение превышения температуры обмоток и масла над воздухом***.

*Среднее превышение температуры наружной поверхности трубы над температурой воздуха*

ºС.

*Среднее превышение температуры масла вблизи стенки над температурой внутренней поверхности стенки трубы*

ºС.

*Превышение средней температуры масла над температурой воздуха*

 ºС.

*Превышение температуры масла в верхних слоях над температурой воздуха*

ºС < 60ºС.

*Превышение средней температуры обмоток над температурой воз­духа:*

НН ºС < 65ºС.

ВН ºС < 65ºС.

Превышения температуры масла в верхних слоях ºС и обмоток ºС лежат в пределах допустимого нагрева по**ГОСТ** 11677-85.

6.4 ***Определение массы масла и основных размеров расширителей.***

*Масса активной части*

 кг.

*Объем активной части*

** м3.

*Объем бака*

м3.

*Объем масла в баке*

** м3.

*Масса масла в баке*

кг.

*Масса масла в охладителях*

**кг.

*Общая масса масла*

 кг.

По ГОСТ 982-80 используется трансформаторное масло марки Т-750 с антиокислительной присадкой и гарантированной кинетической вязкостью при –30ºС.

Список литературы

1. Тихомиров П.М. «Расчет трансформаторов». Учебное пособие для вузов. М.,«Энергия», 1986.
2. Тихомиров П.М. «Расчет трансформаторов». Учебное пособие для вузов. М.,«Энергия», 1976.
3. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1985.
4. Электротехнический справочник: В4, т.2. Электротехнические изделия и устройства/ Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимов и др. (глав. Ред.Н.Н. Орлов) 8-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 518 с.

**Приложение**

**Параметры холостого хода и короткого замыкания трехфазных масляных силовых трансформаторов общего назначения классов напряжения 10 и 35 кВ мощностью 25 – 630 кВ·А ( ГОСТ 12022-76 )**

**Таблица П.1**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номинальная мощность, кВ·А | Класс напряжения, кВ | Потери, Вт | | Напряжение короткого замыкания, % | Ток холостого хода, % |
| холостого хода | короткого  замыкания |
| 25 | 10 | 130 | 600 | 4,5 | 3,2 |
| 40 | 10 | 175 | 880 | 4,5 | 3,0 |
| 63 | 10 | 240 | 1280 | 4,5 | 2,8 |
| 100 | 10 | 330 | 1970 | 4,5 | 2,6 |
| 100 | 35 | 420 | 1970 | 6,5 | 2,6 |
| 160 | 10 | 510 | 2650 | 4,5 | 2,4 |
| 160 | 35 | 620 | 2650 | 6,5 | 2,4 |
| 250 | 10 | 740 | 3700 | 4,5 | 2,3 |
| 250 | 35 | 900 | 3700 | 6,5 | 2,3 |
| 400 | 10 | 950 | 5500 | 4,5 | 2,1 |
| 400 | 35 | 1200 | 5500 | 6,5 | 2,1 |
| 630 | 10 | 1310 | 7600 | 5,5 | 2,0 |
| 630 | 35 | 1600 | 7600 | 6,5 | 2,0 |

**Параметры холостого хода и короткого замыкания трехфазных масляных силовых трансформаторов общего назначения классов напряжения 10 и 35 кВ мощностью 1000 – 80 000 кВ·А, переключаемых без возбуждения ( ГОСТ 11920-85 )**

**Таблица П.2**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номинальная мощность, кВ·А | Класс напряжения, кВ | Потери, Вт | | Напряжение короткого замыкания, % | Ток холостого хода, % |
| холостого хода | короткого замыкания |
| 1000 | 10  35 | 2100  2000 | 11 600  11 600 | 5,5  6,5 | 1,4  1,4 |
| 1600 | 10  35 | 3300  3500 | 17 500  18 000 | 5,5  6,5 | 1,3  1,3 |
| 2500 | 10  35 | 3900  3900 | 23 500  23 500 | 5,5  6,5 | 1,0  1,0 |
| 4000 | 10  35 | 5200  5300 | 33 500  33 500 | 7,5  7,5 | 0,9  0,9 |
| 6300 | 10  35 | 7400  7600 | 46 500  46 500 | 7,5  7,5 | 0,9  0,8 |
| 10 000 | 35 | 12 300 | 65 000 | 7,5 | 0,8 |
| 16 000 | 35 | 17 800 | 90 000 | 8,0 | 0,6 |
| 80 000 | 38,5 | 58 000 | 280 000 | 10,0 | 0,45 |

**Испытательные напряжения промышленной частоты (50 Гц) для масляных силовых трансформаторов (ГОСТ 1516.1-76)**

**Таблица П.3**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Класс напряжения,  кВ | 3 | 6 | 10 | 15 | 20 | 35 | 110 | 150 | 220 | 330 | 500 |
| Наибольшее рабочее напряжение,  кВ | 3,6 | 7,2 | 12,0 | 17,5 | 24 | 40,5 | 126 | 172 | 252 | 363 | 525 |
| Испытательное напряжение Uисп ,  кВ | 18 | 25 | 35 | 45 | 55 | 85 | 200 | 230 | 325 | 460 | 630 |

**Примечание.** Обмотки масляных трансформаторов с рабочим напряжением до 1 кВ имеют

Uисп = 5 кВ.

**Выбор способа прессовки стержней и ярм, формы сечения и коэффициента усиления ярма для современных трансформаторов [1]**

**Таблица П.4**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Мощность трансформатора *S*, кВ∙А | Прессовка стержней | Прессовка ярм | Форма сечения ярма | Коэффициент усиления ярма |
| 25 – 100 | Расклиниванием с обмоткой | Балками стянутыми шпильками, расположенными вне ярма | 3 – 5 ступеней | 1,025 |
| 160 – 630 | С числом ступеней на одну- две меньше числа ступеней стержня | 1,015 – 1,025 |
| 1000 – 6300 | Бандажами из стеклоленты | Балками, стянутыми стальными полубандажами |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Число ступеней в сечении трехфазных масляных трансформаторов и коэффициент заполнения *k***кр  **Таблица П.5** | | | | | | | | | |
| Мощность трансформатора, кВ·А | до 16 | | | 16 | 25 | 40-100 | 160-630 | | |
| Ориентировочный диаметр стержня *d*, м | до 0,08 | | | 0,08 | 0,09 | 0,10-0,14 | 0,16-0,18 | 0,20 | 0,22 |
| Число ступеней | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 8 |
| Коэффициент *k*кр | 0,636 | 0,786 | 0,851 | 0,861 | 0,890 | 0,91-0,92 | 0,913 | 0,918 | 0,928 |
| Мощность трансформатора, кВ·А | 1000-1600 | | 2500-6300 | | 10 000 | 16 000 | 25 000 | 32 000-80 000 | |
| Ориентировочный диаметр стержня *d*, м | 0,24-0,26 | 0,28-0,30 | 0,32-0,34 | 0,36-0,38 | 0,40-0,42 | 0,45-0,50 | 0,53-0,56 | 0,60-0,67 | 0,71-0,75 |
| Число ступеней | 8 | 8 | 9 | 9 | 11 | 14 | 15 | 16 | 16 |
| Коэффициент *k*кр | 0,925 | 0,928 | 0,929 | 0,913 | 0,922 | 0,927 | 0,927 | 0,929 | 0,931 |
| Мощность трансформатора, кВ·А | 100 000-1 000 000 | | | | | | | | |
| Ориентировочный диаметр стержня *d*, м | 0,80-0,95 | | 1,00-1,09 | 1,12-1,18 | | 1,22 | 1,25-1,36 | 1,40-1,50 | |
| Число ступеней | 12 | | 13 | 15 | | 16 | 17 | 18 | |
| Коэффициент *k*кр | 0,892-0,904 | | 0,899-0,907 | 0,903-0,909 | | 0,910 | 0,912-0,913 | 0,913-0,914 | |

**Обычные пределы применения различных типов обмоток масляных трансформаторов**

**Таблица П.6**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип обмотки | Применение на стороне | | Материал обмоток | Пределы применения включительно | | | | Число параллельных проводов | |
| главное | возможное | по мощности трансформатора, кВ·А | по току обмотки стержня, А | по напряжению,  кВ | по сечению витка,  мм 2 | от | до |
| **Цилиндрическая одно- двухслойная из провода прямоугольного сечения** | ***НН*** | ***ВН*** | Медь | до 630 | от 15-18  до 800 | до 6 | от 5,04  до 250 | 1 | 4-8 |
| Алюминий | до 630 | от 10-13  до 600-650 | до 6 | от 6,39  до 300 |
| **Цилиндрическая многослойная из провода прямоугольного сечения** | ***ВН*** | ***НН*** | Медь | от 630  до 80 000 | от 15-18  до 1000-1200 | 10 и 35 | от 5,04  до 400 | 1 | 4-8 |
| Алюминий | до 16 000 -25 000 | от 10-13  до 1000-1200 | 10 и 35 | от 6,30  до 500 |
| **Цилиндрическая многослойная из провода круглого сечения** | ***ВН*** | ***НН*** | Медь | до 630 | от 0,5  до 80-100 | до 35 | от 1,094  до 42,44 | 1  1 | 2  1 |
| Алюминий | до 630 | от 2-3  до 125-135 | до 35 | от 1,37  до 50,24 |
| **Непрерывная катушечная из провода прямоугольного сечения** | ***ВН*** | ***НН*** | Медь | от 160  и выше | от 15-18  и выше | от 3 до  110-220 | от 5,04  и выше | 1 | 3-5 |
| Алюминий | от 100  и выше | от 10-13  и выше | от 3 до  110-220 | от 6,39  и выше |
| **Винтовая одно- и двух- ходовая** | ***НН*** | ***—*** | Медь | от 160  и выше | от 300  и выше | до 35 | от 75-100  и выше | 4 | Без ограниче-ния |
| Алюминий | от 100  и выше | от 150-200  и выше | до 35 | от 75-100  и выше |

**Главная изоляция. Минимальные изоляционные расстояния обмоток НН с учетом конструктивных требований. Масляные трансформаторы**

**Таблица П.7**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Мощность трансформатора S, кВ·А | *U*исп  для НН,  кВ | НН от ярма  ***l*** 01, мм | НН от стержня, мм | | | |
| δ 01 | а И1 | а 01 | *l*И1 |
| 25**―**50 | 5 | 15 | картон 2×0,5 | — | 4,0 | — |
| 400**―**630\* | 5 | Принимаем равным найденному по испыта-тельному напряжению обмотки ВН | картон 2×0,5 | — | 5,0 | — |
| 1000**―**2500 | 5 | 4,0 | 6,0 | 15 | 18 |
| 630**―**1600 | 18, 25 и 35 | 4,0 | 6,0 | 15 | 25 |
| 2500**―**6300 | 18, 25 и 35 | 4,0 | 8,0 | 17,5 | 25 |
| 630 и выше | 45 | 5,0 | 10 | 20 | 30 |
| 630 и выше | 55 | 5,0 | 13 | 23 | 45 |
| Все мощности | 85 | 6,0 | 19 | 30 | 70 |

\* Для винтовой обмотки с испытательным напряжением *U*исп = 5 кВ размеры взять из следующей

строки (для мощностей 1000-2500 кВ·А)

**Главная изоляция. Минимальные изоляционные расстояния обмоток ВН с учетом конструктивных требований. Масляные трансформаторы.**

**Таблица П.8**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Мощность трансформатора S, кВ·А | *U*исп  для ВН,  кВ | ВН от ярма, мм | | Между ВН иНН, мм | | Выступ цилиндра ***l*** Ц2 | Между ВН иНН, мм | |
| ***l*** 02 | δ Ш | а 12 | δ 12 | а 22 | δ 22 |
| 25―100 | 18, 25 и 35 | 20 | 18 | – | 2,0 | 10 | 8,0 | — |
| 160―630 | 18, 25 и 35 | 30 | 15 | – | 3,0 | 15 | 10 | — |
| 1 000―6300 | 18, 25 и 35 | 50 | — | 20 | 4,0 | 20 | 18 | — |
| 630 и выше | 45 | 50 | 2,0 | 20 | 4,0 | 20 | 18 | 2,0 |
| 630 и выше | 55 | 50 | 2,0 | 20 | 5,0 | 30 | 20 | 3,0 |
| 160―630 | 85 (прим.1) | 75 | 2,0 | 27 | 5,0 | 50 | 20 | 3,0 |
| 1 000―6300 | 85 (прим.1) | 75 | 2,0 | 27 | 5,0 | 50 | 30 | 3,0 |
| 10 000 и выше | 85 | 80 | 3,0 | 30 | 6,0 | 50 | 30 | 3,0 |

**Примечания:**

**1.** Для цилиндрических многослойных обмоток минимальное изоляционное расстояниеа 12 = 27 мм. Электростатический экран – с изоляцией 3 мм. При расчете диаметра стержня магнитной системы и реактивной составляющей напряжения короткого замыкания принимать а 12 = 30 мм.

**2.** При наличии прессующих колец расстояние до верхнего ярма  принимать увеличенным против данных таблицы для трансформаторов 1000 – 6300 кВ·А на 45 мм,

для двухобмоточных трансформаторов 10 000 – 63 000 кВ·А — на 60 мм и для трехобмоточных трансформаторов этих мощностей — на 100 мм. Расстояние от нижнего ярма ***l***0 и в этих случаях выбирается по таблице.

**Значения коэффициента *k* в формуле для масляных двухобмоточных трансформаторов ПБВ с медными обмотками и потерями короткого замыкания по ГОСТ**

**Таблица П.9**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Мощность трансформатора *S*, кВ∙А | Класс напряжения, кВ | | |
| 10 | 35 | 110 |
| до 250  400 – 630  1000 – 6300  10 000 – 80 000 | 0,63  0,53  0,51 – 0,43  — | 0,65 – 0,58  0,52 – 0,48  0,48 – 0,46 | —  —  0,68 – 0,58 |

**Рекомендуемая индукция в стержнях масляных трансформаторов *В*, Тл**

**Таблица П.10**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Марки стали | Мощность трансформатора S, кВ∙А | | |
| до 16 | 25–100 | 160 и более |
| 3411, 3412, 3413 | 1,45–1,50 | 1,50–1,55 | 1,55–1,60 |
| 3404, 3405, 3406, 3407, 3408 | 1,50–1,55 | 1,55–1,60 | 1,55–1,65 |

**Примечания: 1.** В магнитных системах трансформаторов мощностью от 100 000 кВ∙А и более допускается индукция до 1,7 Тл.

**2.** При горячекатаной стали в магнитных системах масляных трансформаторов индукция до 1,4–1,45 Тл.

**Ориентировочные значения *b = 2a2/d* для масляных двухобмоточных трансформаторов ПБВ с медными обмотками и потерями короткого замыкания по ГОСТ**

**Таблица П.11**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Мощность трансформатора, кВ∙А | Класс напряжения, кВ | | |
| 10 | 35 | 110 |
| До 100 | 0,55 | — | — |
| 100―630 | 0,46―0,40 | — | — |
| 1000―6300 | 0,26―0,24 | 0,32―0,28 | — |
| 6300―63 000 | — | 0,26 | 0,35 |

**Примечания. 1.** Для обмоток из алюминиевого провода значения b, полученные из

таблицы, умножить на 1,25.

**Размеры пакетов – ширина пластин *а* и толщина пакетов *b*, мм, для магнитных систем без прессующей пластины с прессовкой стержня бандажами из стеклоленты (*n*с и *n*я – число ступеней в сечении стержня и ярма; *k*кр – коэффициент заполнения круга для стержня)**

**Таблица П.12**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| стержня d, м | Стержень | | | | Ярмо | | Размеры пакетов *а*×*b*, мм, в стержне | | | | | | | |
| без прессующей пластины | | с прессующей пластиной | | *n*я | *а*я, мм |
| *n*с | *k*кр | *n*с | *k*кр | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 0,08 | 4 | 0,863 | — | — | 3 | 55 | 75*×*14 | 65*×*9 | 55*×*9 | 40*×*5 | — | — | — | — |
| 0,09 | 5 | 0,891 | — | — | 4 | 55 | 85*×*15 | 75*×*10 | 65*×*6 | 55*×*4 | 40*×*5 | — | — | — |
| 0,10 | 6 | 0,917 | — | — | 5 | 55 | 95*×*16 | 85*×*10 | 75*×*7 | 65*×*5 | 55*×*4 | 40*×*4 | — | — |
| 0,11 | 6 | 0,905 | — | — | 5 | 65 | 105*×*16 | 95*×*11 | 85*×*7 | 75*×*6 | 65*×*4 | 40*×*7 | — | — |
| 0,12 | 6 | 0,928 | — | — | 5 | 60 | 115*×*18 | 105*×*11 | 90*×*10 | 75*×*8 | 60*×*6 | 40*×*4 | — | — |
| 0,13 | 6 | 0,918 | — | — | 5 | 65 | 125*×*18 | 110*×*16 | 100*×*8 | 80*×*9 | 65*×*5 | 40*×*6 | — | — |
| 0,14 | 6 | 0,919 | — | — | 5 | 65 | 135*×*19 | 120*×*17 | 105*×*10 | 85*×*9 | 65*×*7 | 40*×*5 | — | — |
| 0,15 | 6 | 0,915 | — | — | 5 | 85 | 145*×*19 | 135*×*13 | 120*×*13 | 105*×*9 | 85*×*8 | 55*×*7 | — | — |
| 0,16 | 6 | 0,913 | — | — | 5 | 85 | 155*×*20 | 135*×*23 | 120*×*10 | 105*×*7 | 85*×*7 | 55*×*7 | — | — |
| 0,17 | 6 | 0,927 | — | — | 5 | 85 | 160*×*28 | 145*×*17 | 130*×*10 | 110*×*10 | 85*×*8 | 50*×*8 | — | — |
| 0,18 | 6 | 0,915 | — | — | 5 | 95 | 175*×*21 | 155*×*25 | 135*×*13 | 120*×*8 | 95*×*9 | 65*×*8 | — | — |
| 0,19 | 7 | 0,927 | 6 | 0,890 | 5 | 100 | 180*×*30 | 165*×*17 | 145*×*14 | 130*×*8 | 115*×*7 | 100*×*5 | 75*×*7 | — |
| 0,20 | 7 | 0,918 | 6 | 0,885 | 5 | 120 | 195*×*22 | 175*×*26 | 155*×*15 | 135*×*11 | 120*×*6 | 105*×*5 | 75*×*7 | — |
| 0,21 | 7 | 0,922 | 6 | 0,890 | 5 | 130 | 200*×*32 | 180*×*22 | 160*×*14 | 145*×*8 | 130*×*6 | 110*×*8 | 90*×*6 | — |
| 0,22 | 8 | 0,929 | 7 | 0,901 | 6 | 120 | 215*×*23 | 195*×*28 | 175*×*15 | 155*×*12 | 135*×*9 | 120*×*5 | 105*×*4 | 75*×*7 |
| 0,23 | 8 | 0,933 | 7 | 0,907 | 6 | 130 | 220*×*34 | 205*×*19 | 185*×*16 | 165*×*12 | 145*×*9 | 130*×*5 | 115*×*5 | 90*×*6 |
| 0,24 | 8 | 0,927 | 7 | 0,902 | 6 | 135 | 230*×*34 | 215*×*19 | 195*×*17 | 175*×*12 | 155*×*9 | 135*×*8 | 120*×*5 | 95*×*6 |
| 0,25 | 8 | 0,929 | 7 | 0,909 | 6 | 140 | 240*×*35 | 220*×*24 | 200*×*16 | 180*×*12 | 155*×*11 | 140*×*6 | 120*×*6 | 100*×*5 |
| 0,26 | 8 | 0,924 | 7 | 0,900 | 6 | 155 | 250*×*35 | 230*×*25 | 215*×*13 | 195*×*13 | 175*×*10 | 155*×*8 | 120*×*9 | 105*×*6 |
| 0,27 | 8 | 0,930 | 7 | 0,901 | 6 | 155 | 260*×*36 | 240*×*25 | 215*×*20 | 195*×*13 | 170*×*11 | 155*×*5 | 135*×*7 | 105*×*8 |
| 0,28 | 8 | 0,927 | 7 | 0,903 | 6 | 175 | 270*×*37 | 250*×*26 | 230*×*17 | 215*×*9 | 195*×*11 | 175*×*9 | 135*×*13 | 105*×*7 |
| 0,29 | 8 | 0,927 | 7 | 0,899 | 6 | 165 | 280*×*37 | 260*×*27 | 235*×*21 | 210*×*15 | 180*×*13 | 165*×*6 | 145*×*6 | 115*×*8 |
| 0,30 | 8 | 0,930 | 7 | 0,912 | 6 | 175 | 295*×*28 | 270*×*37 | 250*×*18 | 230*×*13 | 215*×*8 | 175*×*18 | 135*×*12 | 105*×*6 |

**Примечания:**

**1.** В магнитной системе с прессующей пластиной исключить последний – седьмой или восьмой – пакет стержня.

**2.** Крайний наружный пакет ярма имеет ширину *а* и толщину, равную сумме толщин трех крайних пакетов (5 – 7 или 6 – 8) при отсутствии прессующей пластины, или двух крайних пакетов (5 – 6 или 6 – 7) при её наличии.

**Номинальные размеры и сечения медного и алюминиевого обмоточного провода марок ПБ и АПБ (размеры *а* и *b* в – мм, сечения в – мм2)**

**Медный провод ПБ ― все размеры таблицы, за исключением провода размером *b* 17 и 18 мм**

**Алюминиевый провод АПБ ― все размеры таблицы вправо и вверх от жирной черты**

**Таблица П.13**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| a  b | 1,40 | 1,50 | 1,60 | 1,70 | 1,80 | 1,90 | 2,00 | 2,12 | 2,24 | 2,36 | 2,50 | 2,65 | 2,80 | 3,00 | 3,15 | 3,35 | 3,55 | 3,75 | 4,00 | 4,25 | 4,50 | 4,75 | 5,00 | 5,30 | 5,60 | a  b |
| 3,75 | 5,04 | — | 5,79 | — | 6,39 | — | 7,14 | — | 8,04 | — | 8,83 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 3,75 |
| 4,00 | 5,39 | 5,79 | 6,19 | 6,44 | 6,84 | 7,24 | 7,64 | 8,12 | 8,60 | 8,89 | 9,45 | 10,1 | 10,7 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 4,00 |
| 4,25 | 5,74 | — | 6,59 | — | 7,29 | — | 8,14 | — | 9,16 | — | 10,1 | — | 11,4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 4,25 |
| 4,50 | 6,09 | 6,54 | 6,99 | 7,29 | 7,74 | 8,19 | 8,64 | 9,18 | 9,72 | 10,1 | 10,7 | 11,4 | 12,1 | 13,0 | 13,6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 4,50 |
| 4,75 | 6,44 | — | 7,39 | — | 8,19 | — | 9,14 | — | 10,3 | — | 11,3 | — | 12,8 | — | 14,4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 4,75 |
| 5,00 | 6,79 | 7,29 | 7,79 | 8,14 | 8,64 | 9,14 | 9,64 | 10,2 | 10,8 | 11,3 | 12,0 | 12,7 | 13,5 | 11,5 | 15,2 | 16,2 | 17,2 | — | — | — | — | — | — | — | — | 5,00 |
| 5,30 | 7,21 | — | 8,27 | — | 9,18 | — | 10,2 | — | 11,5 | — | 12,7 | — | 14,3 | — | 16,2 | — | 18,3 | — | — | — | — | — | — | — | — | 5,30 |
| 5,60 | 7,63 | 8,19 | 8,75 | 9,16 | 9,72 | 10,3 | 10,8 | 11,5 | 12,2 | 12,7 | 13,5 | 14,3 | 15,1 | 16,3 | 17,1 | 18,2 | 19,3 | 20,1 | 21,5 | — | — | — | — | — | — | 5,60 |
| 6,00 | 8,19 | — | 9,39 | — | 10,4 | — | 11,6 | — | 13,1 | — | 14,5 | — | 16,3 | — | 18,4 | — | 20,8 | — | 23,1 | — | — | — | — | — | — | 6,00 |
| 6,30 | 8,61 | 9,24 | 9,87 | 10,4 | 11,0 | 11,6 | 12,2 | 13,0 | 13,8 | 14,3 | 15,2 | 16,2 | 17,1 | 18,4 | 19,3 | 20,6 | 21,8 | 22,8 | 24,3 | 25,9 | 27,5 | — | — | — | — | 6,30 |
| 6,70 | 9,17 | — | 10,5 | — | 11,7 | — | 13,0 | — | 14,7 | — | 16,2 | — | 18,2 | — | 20,6 | — | 23,2 | — | 25,9 | — | 29,3 | — | — | — | — | 6,70 |
| 7,10 | 9,73 | 10,4 | 11,2 | 11,7 | 12,4 | 13,1 | 13,8 | 14,7 | 15,5 | 16,2 | 17,2 | 18,3 | 19,3 | 20,8 | 21,8 | 23,2 | 24,7 | 25,8 | 27,5 | 29,3 | 31,1 | 32,9 | 34,6 | — | — | 7,10 |
| 7,50 | 10,3 | — | 11,8 | — | 13,1 | — | 14,6 | — | 16,4 | — | 18,2 | — | 20,5 | — | 23,1 | — | 26,1 | — | 29,1 | — | 32,9 | — | 36,6 | — | — | 7,50 |
| 8,00 | 11,0 | 11,8 | 12,6 | 13,2 | 14,0 | 14,8 | 15,6 | 16,6 | 17,6 | 18,3 | 19,5 | 20,7 | 21,9 | 23,5 | 24,7 | 26,3 | 27,9 | 29,1 | 31,1 | 33,1 | 35,1 | 37,1 | 39,2 |  | 43,9 | 8,00 |
| 8,50 | 11,7 | — | 13,4 | — | 14,9 | — | 16,6 | — | 18,7 | — | 20,7 | — | 23,3 | — | 26,2 | — | 29,6 | — | 33,1 | — | 37,4 | — | 41,6 |  | 46,7 | 8,50 |
| 9,00 | 12,4 | 13,3 | 14,2 | 14,9 | 15,8 | 16,7 | 17,6 | 18,7 | 19,8 | 20,7 | 22,0 | 23,3 | 24,7 | 26,5 | 27,8 | 29,6 | 31,4 | 32,9 | 35,1 | 37,4 | 39,6 | 41,9 | 44,1 | 46,8 | 49,5 | 9,00 |
| 9,50 | 13,1 | — | 15,0 | — | 16,7 | — | 18,6 | — | 20,9 | — | 23,2 | — | 26,1 | — | 29,4 | — | 33,2 | — | 37,1 | — | 41,9 | — | 46,6 | — | 52,1 | 9,50 |
| 10,00 | 13,8 | 14,8 | 15,8 | 16,6 | 17,6 | 18,6 | 19,6 | 20,8 | 22,0 | 23,1 | 24,5 | 26,0 | 27,5 | 29,5 | 31,0 | 33,0 | 35,0 | 36,6 | 39,1 | 41,6 | 44,1 | 46,6 | 49,1 | 52,1 | 55,1 | 10,00 |
| 10,60 | 14,6 | — | 16,8 | — | 18,7 | — | 20,8 | — | 23,4 | — | 26,0 | — | 29,1 | — | 32,8 | — | 37,1 | — | 41,5 | — | 46,8 | — | 52,1 | — | 58,5 | 10,60 |
| 11,20 | 15,5 | 16,6 | 17,7 | 18,7 | 19,8 | 20,9 | 22,0 | 23,4 | 24,7 | 25,9 | 27,5 | 29,1 | 30,8 | 33,1 | 34,7 | 37,0 | 39,2 | 41,4 | 43,9 | 46,7 | 49,5 | 52,3 | 55,1 | 58,5 | 61,9 | 11,20 |
| 11,80 | — | — | 18,7 | — | 20,9 | — | 23,2 | — | 26,1 | — | 29,0 | — | 32,5 | — | 36,6 | — | 41,3 | — | 46,3 | — | 52,2 | — | 58,1 | — | 65,2 | 11,80 |
| 12,50 | — | 18,5 | 19,8 | 20,9 | 22,1 | 23,4 | 24,6 | 26,1 | 27,6 | 29,0 | 30,7 | 32,6 | 34,5 | 37,0 | 38,8 | 41,3 | 43,8 | 46,0 | 49,1 | 52,3 | 55,4 | 58,5 | 61,6 | 65,4 | 69,1 | 12,50 |
| 13,20 | — | — | — | — | 23,4 | — | 26,0 | — | 29,2 | — | 32,5 | — | 36,4 | — | 41,0 | — | 46,3 | — | 51,9 | — | 58,5 | — | 65,1 | — | 73,1 | 13,20 |
| 14,00 | — | — | — | — | 24,8 | 26,2 | 27,6 | 29,3 | 31,0 | 32,5 | 34,5 | 36,6 | 38,7 | 41,5 | 43,6 | 46,4 | 49,2 | 52,0 | 55,1 | 58,6 | 62,1 | 65,6 | 69,1 | 73,3 | 77,5 | 14,00 |
| 15,00 | — | — | — | — | — | — | 29,6 | — | 33,2 | — | 37,0 | — | 41,5 | — | 46,7 | — | 52,7 | — | 59,1 | — | 66,6 | — | 74,1 | — | 83,1 | 15,00 |
| 16,00 | — | — | — | — | — | — | 31,6 | 33,6 | 35,5 | 37,2 | 39,5 | 41,9 | 44,3 | 47,5 | 49,9 | 53,1 | 56,3 | 59,1 | 63,1 | 67,1 | 71,1 | 75,1 | 79,1 | 83,9 | 88,7 | 16,00 |
| 17,00 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 47,2 | — | 53,2 | — | 59,4 | — | 67,1 | — | 75,6 | — | 84,1 | — | 94,3 | 17,00 |
| 18,00 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 53,1 | 55,8 | 59,4 | 63,0 | 66,6 | 71,1 | 75,6 | 80,1 | 84,6 | 89,1 | 94,5 | 99,9 | 18,00 |

**Примечания:**

**1.** Провод марок ПБ и АПБ выпускается с толщиной изоляции на две стороны 2δ = 0,45 (0,50), 0,55 (0,62), 0,72 (0,82), 0,96 (1,06), 1,20 (1,35), 1,35 (1,50), 1,68 (1,83) и 1,92 (20,7) мм.

**2.** Вне скобок указана номинальная толщина изоляции. Размеры катушек считать по толщине изоляции, указанной в скобках.

**3.** Медный провод марки ПБУ выпускается с размерами проволоки по стороне *а* от 1,8 до 5,6 и по стороне *b* от 6,7 до 18 мм с изоляцией толщиной2δ = 1,35 (1,45), 2,00 (2,20), 2,48 (2,63), 2,96 (3,16), 3,60 (3,80), 4,08 (4,28) и 4,40 (4,65) мм.

**Значения *k*Д для трехфазных трансформаторов**

**Таблица П.14**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Мощность трансформатора *S*, кВ∙А | до 100 | 160–630 | 1000–6300 | 10 000–  16 000 | 25 000–  63 000 | 80 000–  100 000 |
| *k*Д | 0,97 | 0,96–0,93 | 0,93–0,85 | 0,84–0,82 | 0,82–0,81 | 0,81–0,80 |

**Примечание.** Для однофазных трансформаторов определять *k*Д по мощности 1,5*S.*

**Номинальные размеры и сечения прямоугольного медного обмоточного провода марок ПСД и ПСДК (предпочтительные размеры) (размеры *a* и *b* – в мм, сечение – в мм2)**

**Таблица П.15**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***a***  ***b*** | 1,40 | 1,60 | 1,80 | 2,00 | 2,24 | 2,50 | 2,80 | 3,15 | 3,55 | 4,00 | 4,50 | 5,00 | 5,60 |
| 4,00 | 5,39 | 6,19 | 6,84 | 7,64 | 8,60 | 9,45 | 10,7 | — | — | — | — | — | — |
| 4,50 | 6,09 | 6,99 | 7,74 | 8,64 | 9,72 | 10,7 | 12,1 | 13,6 | — | — | — | — | — |
| 5,00 | 6,79 | 7,79 | 8,64 | 9,64 | 10,80 | 12,0 | 13,5 | 15,2 | 17,2 | — | — | — | — |
| 5,60 | 7,63 | 8,75 | 9,72 | 10,80 | 12,20 | 13,5 | 15,1 | 17,1 | 19,3 | 21,5 | — | — | — |
| 6,30 | 8,61 | 9,87 | 10,40 | 12,20 | 13,80 | 15,2 | 17,1 | 19,3 | 21,8 | 24,3 | 27,5 | — | — |
| 7,10 | 9,73 | 11,20 | 12,40 | 13,80 | 15,50 | 17,2 | 19,3 | 21,8 | 24,7 | 27,5 | 31,1 | 34,6 | — |
| 8,00 | 11,00 | 12,60 | 14,00 | 15,60 | 17,60 | 19,5 | 21,9 | 24,7 | 27,9 | 31,1 | 35,1 | 39,2 | 43,9 |
| 9,00 | 12,40 | 14,20 | 15,80 | 17,60 | 19,80 | 22,0 | 24,7 | 27,8 | 31,4 | 35,1 | 39,6 | 44,1 | — |
| 10,00 | 13,80 | 15,80 | 16,60 | 19,60 | 22,00 | 24,5 | 27,5 | 31,0 | 25,0 | 39,1 | 44,1 | 49,1 | — |
| 11,20 | — | — | — | — | 24,70 | 27,5 | 30,8 | 34,7 | 39,2 | 43,9 | 49,5 | 55,1 | — |
| 12,50 | — | — | — | — | 27,60 | — | — | — | — | — | — | — | — |

**Примечание.** Номинальная удвоенная толщина изоляции 2δ = 0,27÷0,48 мм. В расчете принимать для проводов с размером *b* ≤ 5,60 мм, 2δ = 0,45 мм; для проводов с размером *b* ≥ 6,30 мм – 2δ = 0,50 мм.

**Ориентировочное увеличение в процентах массы медного провода марки ПБ за счет изоляции**

**Таблица П.16**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Диаметр провода, мм | При толщине изоляции 2δ, мм | | | | |
| 0,72 | 1,20 | 1,92 | 4,08 | 5,76 |
| 1,18 | 18 | 35 | — | — | — |
| 1,40 | 14 | 27 | — | — | — |
| 1,60 | 12 | 23 | — | — | — |
| 1,80 | 10 | 19 | — | — | — |
| 2,00 | 9 | 17 | — | — | — |
| 2,12 | 8,5 | 16 | — | — | — |
| 2,50 | 7,5 | 12,5 | 22 | — | — |
| 3,00 | 6 | 10 | 18 | — | — |
| 3,55 | 5 | 9 | 14 | — | — |
| 4,00 | 4,5 | 8 | 12 | 34 | 54 |
| 4,50 | 4 | 7 | 11 | 28 | 46 |
| 5,20 | 4 | 6 | 10 | 24 | 38 |

**Примечание**. Для промежуточных значений диаметра провода и толщины изоляции можно пользоваться линейной интерполяцией.

**Номинальные размеры сечения и изоляции круглого медного и алюминиевого обмоточного провода марок ПБ и АПБ с толщиной изоляции на две стороны 2δ = 0,30 (0,40)** **мм**

**Таблица П.17**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Диаметр, мм | Сечение, мм2 | Увеличение массы, % | Диаметр, мм | Сечение, мм2 | Увеличение массы, % | Диаметр, мм | Сечение, мм2 | Увеличение массы, % |
| Марка ПБ – медь | | | 2,00 | 3,14 | 3,0 | 4,00 | 12,55 | 1,5 |
| 1,18 | 1,094 | 6,0 | 2,12 | 3,53 | 3,0 | 4,10 | 13,2 | 1,5 |
| 1,25 | 1,23 | 5,5 | 2,24 | 3,94 | 3,0 | 4,25 | 14,2 | 1,5 |
| Марка ПБ – медь  Марка АПБ – алюминий | | | 2,36 | 4,375 | 2,5 | 4,50 | 15,9 | 1,5 |
| 1,32 | 1,37 | 5,0 | 2,50 | 4,91 | 2,5 | 4,75 | 17,7 | 1,5 |
| 1,40 | 1,51 | 5,0 | 2,65 | 5,515 | 2,5 | 5,00 | 19,63 | 1,5 |
| 1,50 | 1,77 | 4,5 | 2,80 | 6,16 | 2,5 | 5,20 | 21,22 | 1,5 |
| 1,60 | 2,015 | 4,0 | 3,00 | 7,07 | 2,5 | Марка АПБ – алюминий | | |
| 1,70 | 2,27 | 4,0 | 3,15 | 7,795 | 2,0 | 5,30 | 22,06 | 1,5 |
| 1,80 | 2,545 | 3,5 | 3,35 | 8,81 | 2,0 | 6,00 | 28,26 | 1,5 |
| 1,90 | 2,805 | 3,5 | 3,55 | 9,895 | 2,0 | 8,00 | 50,24 | 1,0 |
| 3,75 | 11,05 | 1,5 |

**Примечания: 1.** Провод марок ПБ и АПБ всех диаметров выпускается с изоляцией на две стороны толщиной2δ = 0,30 (0,40); 0,72 (0,82); 0,96 (1,06) и 1,20 (1,35) мм;

провод диаметром от 2,24 мм и выше – также с изоляцией 1,68 (1,83) и 1,92 (2,07), а провод диаметром от 3,75 мм и выше – также с изоляцией 2,88 (3,08); 4,08 (4,33)

и 5,76 (6,11) мм.

**2.** Безскобок указана номинальная толщина изоляции. Размеры катушек считать по толщине изоляции, указанной в скобках.

**3.** Увеличение массы провода за счет изоляции дано для медного провода. Для алюминиевого провода марки АПБ данные таблицы по увеличению массы умножить на 3,3.

**4.** Увеличение массы провода марок ПБ и АПБ с усиленной изоляцией принимают по табл. 5.4 с учетом прим. 3 к табл. 5.1.

**5.** Провод марок ПСД и ПСДК выпускается в пределах диаметров от 1,18 до 5,0 мм и провод марок АПСД и АПСДК – от 1,32 до 5,0.

**6.** Толщина изоляции провода марок ПСД, ПСДК, АПСД и АПСДК при диаметрах до 2,12 мм2δ = 0,29 мм (в расчете принимать 0,30 мм), при диаметрах от 2,24 до 5,0 мм

2δ = 0,35÷0,38 мм (в расчете принимать 0,40 мм).

7. Для провода марок ПСД и ПСДК данные таблицы по увеличению массы умножить на 1,75 для диаметров от 1,18 до 2,12 мм и на 2,1 для диаметров от 2,24 мм и выше.

Для алюминиевого провода марок АПСД и АПСДК учитывать прим. 3.

**Ориентировочное увеличение массы прямоугольного медного провода в процентах за счет изоляции для марки ПБ при нормальной толщине изоляции на две стороны   
2δ = 0,45 мм**

**Таблица П.18**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *а*, мм  *b*, мм | 1,40–1,80 | 1,90–2,65 | 2,80–3,75 | 4,00–7,00 |
| 3,75–7,50 | 3,5 | 3,0 | 2,5 | 2,0 |
| 8,0–18,0 | 2,5 | 2,0 | 2,0 | 1,5 |

**Примечания:**

**1.** При другой толщине изоляции данные из таблицы умножить при 2δ = 0,96 мм на 2,5; при 2δ = 1,35 мм на 3,5; при 2δ = 1,92 мм на 5,0.

**2.** Для провода марок ПСД и ПСДК данные из таблицы умножать при 2δ = 0,45 мм на 1,7; при 2δ = 0,50 мм 2,0.

**Значение коэффициента *kб* для расчета потерь в баке**

**Таблица П.19**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Мощность, кВ А | До 1000 | 1000 – 4000 | 6300 – 25 000 | 16 000 – 25 000 | 40 000 – 63 000 |
| k | 0,015 – 0,02 | 0,025 – 0,04 | 0,04 – 0,045 | 0,045– 0,052 | 0,06 – 0,07 |

**Значения *k*max при различных значениях uр**/**uа**

**Таблица П.20**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| uр/uа | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 4,0 |
| *k*max | 1,51 | 1,63 | 1,75 | 1,95 | 2,09 |
| uр/uа | 5,0 | 6,0 | 8,0 | 10,0 | 14 и более |
| *k*max | 2,19 | 2,28 | 2,38 | 2,46 | 2,55 |

**Площади сечения стержня** *П*ф,с **и ярма** *П*ф,я **и объем угла** *V*y **плоской** **шихтованной магнитной системы без прессующей пластины и с прессующей пластиной с размерами пакетов по табл. 11**

**Таблица П.21**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *d*, м | Без прессующей пластины | | | С прессующей пластиной | | |
| *П*ф,с ,  см 2 | *П*ф,я ,  см 2 | *V*y ,  см 3 | *П*ф,с ,  см 2 | *П*ф,я ,  см 2 | *V*y ,  см 3 |
| 0,19 | 262,8 | 267,3 | 4118 | 252,3 | 253,3 | 4012 |
| 0,20 | 288,4 | 296,2 | 4811 | 277,9 | 273,4 | 4685 |
| 0,21 | 319,2 | 327,2 | 5680 | 308,4 | 311,6 | 5522 |
| 0,22 | 353,0 | 360,5 | 6460 | 342,5 | 343,7 | 6334 |
| 0,23 | 387,7 | 394,0 | 7482 | 376,9 | 378,4 | 7342 |
| 0,24 | 419,3 | 425,6 | 8428 | 407,9 | 409,4 | 8274 |
| 0,25 | 456,2 | 462,6 | 9532 | 446,2 | 448,6 | 9392 |
| 0,26 | 490,6 | 507,1 | 10 746 | 478,0 | 488,5 | 10 550 |
| 0,27 | 532,6 | 543,4 | 12 018 | 515,8 | 518,6 | 11 758 |
| 0,28 | 570,9 | 591,1 | 13 738 | 556,2 | 566,6 | 13 480 |
| 0,29 | 612,4 | 622,8 | 14 858 | 594,0 | 596,4 | 14 554 |
| 0,30 | 657,2 | 675,2 | 16 556 | 644,6 | 654,2 | 16 336 |
| 0,31 | 702,0 | 715,8 | 18 672 | 683,0 | 689,4 | 18 312 |
| 0,32 | 746,2 | 762,4 | 20 144 | 732,7 | 743,9 | 19 880 |
| 0,33 | 797,1 | 820,2 | 22 382 | 770,1 | 779,2 | 21 828 |
| 0,34 | 844,8 | 860,8 | 23 732 | 828,6 | 837,4 | 23 416 |
| 0,35 | 903,6 | 927,6 | 26 814 | 868,6 | 876,0 | 26 118 |
| 0,36 | 929,2 | 948,8 | 27 944 | 910,3 | 917,5 | 27 574 |
| 0,37 | 988,8 | 1003,8 | 30 606 | 969,8 | 975,8 | 30 228 |
| 0,38 | 1035,8 | 1063,4 | 33 074 | 1019,6 | 1037,6 | 32 716 |
| 0,39 | 1105,2 | 1123,6 | 35 966 | 1080,0 | 1085,8 | 35 438 |
| 0,40 | 1155,6 | 1167,6 | 39 550 | 1143,2 | 1150,4 | 39 284 |
| 0,42 | 1282,9 | 1315,0 | 46 220 | 1255,0 | 1270,0 | 45 528 |
| 0,45 | 1479,2 | 1500,2 | 56 560 | 1451,2 | 1460,2 | 55 860 |
| 0,48 | 1688,9 | 1718,7 | 68 274 | 1657,4 | 1670,1 | 67 424 |
| 0,50 | 1816,4 | 1843,9 | 76 604 | 1788,4 | 1800,7 | 75 846 |
| 0,53 | 2044,8 | 2077,8 | 92 752 | 2013,6 | 2030,6 | 91 832 |
| 0,56 | 2286,2 | 2316,7 | 107 900 | 2258,9 | 2275,4 | 107 120 |
| 0,60 | 2639,4 | 2690,9 | 133 770 | 2596,5 | 2618,4 | 133 370 |
| 0,63 | 2892,5 | 2958,3 | 154 240 | 2869,1 | 2916,3 | 153 340 |
| 0,67 | 3273,9 | 3397,7 | 186 170 | 3226,6 | 3273,0 | 184 350 |
| 0,71 | 3688,0 | 3797,8 | 222 880 | 3651,2 | 3729,8 | 221 310 |
| 0,75 | 4115,7 | 4251,8 | 262 210 | 4055,7 | 4140,2 | 259 430 |

**Удельные потери в стали *р* и в зонешихтованного стыка *рз*для холоднокатаной стали марок 3404 и 3405 по ГОСТ 21427-83 и для стали иностранного производства марок М6Х и М4Х толщиной 0,35, 0,30 и 0,28 мм при различных индукциях и *f* = 50 Гц**

**Таблица П.22**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *р*, Вт/кг | | | | | *р*з, Вт/м2 | |
| *В*, Тл | 3404,  0,35 мм | 3404,  0,30 мм | 3405,  0,35 мм | М4Х,  0,28 мм | Одна пластина | Две пластины |
| 0,80  1,00  1,20  1,22  1,24  1,26  1,28  1,30  1,32  1,34  1,36  1,38  1,40  1,42  1,44  1,46  1,48  1,50  1,52  1,54  1,56  1,58  1,60  1,62  1,64  1,66  1,68  1,70  1,72  1,74  1,76  1,78  1,80  1,82  1,84  1,86  1,88 | 0,320  0,475  0,675  0,697  0,719  0,741  0,763  0,785  0,814  0,843  0,872  0,901  0,930  0,964  0,998  1,032  1,066  1,100  1,134  1,168  1,207  1,251  1,295  1,353  1,411  1,472  1,536  1,600  1,672  1,744  1,824  1,912  2,000  2,090  2,180  2,270  2,360 | 0,300  0,450  0,635  0,659  0,683  0,707  0,731  0,755  0,779  0,803  0,827  0,851  0,875  0,906  0,937  0,968  0,999  1,030  1,070  1,110  1,150  1,190  1,230  1,278  1,326  1,380  1,440  1,500  1,560  1,620  1,692  1,776  1,860  1,950  2,040  2,130  2,220 | 0,280  0,425  0,610  0,631  0,652  0,673  0,694  0,715  0,739  0,763  0,787  0,811  0,835  0,860  0,869  0,916  0,943  0,970  1,004  1,038  1,074  1,112  1,150  1,194  1,238  1,288  1,344  1,400  1,460  1,520  1,588  1,664  1,740  1,815  1,890  1,970  2,060 | 0,245  0,370  0,535  0,555  0,575  0,595  0,615  0,635  0,658  0,681  0,704  0,727  0,750  0,778  0,806  0,834  0,862  0,890  0,926  0,962  1,000  1,040  1,080  1,132  1,184  1,244  1,312  1,380  1,472  1,564  1,660  1,760  1,860  1,950  2,040  2,130  2,220 | 170  265  375  387  399  411  423  435  448  461  474  497  500  514  526  542  556  570  585  600  615  630  645  661  677  695  709  725  741  757  773  789  805  822  839  856  873 | 215  345  515  536  557  578  589  620  642  664  686  708  730  754  778  802  826  850  878  906  934  962  990  1017  1044  1071  1098  1125  1155  1185  1215  1245  1275  1305  1335  1365  1395 |
| 1,90  1,95  2,00 | 2,450  2,700  3,000 | 2,300  2,530  2,820 | 2,150  2,390  2,630 | 2,400  2,530  2,820 | 890  930  970 | 1425  1500  1580 |

**Значения коэффициента *k*п.у для различного числа углов с косыми и прямыми стыками пластин плоской шихтованной магнитной системы для стали различных марок при *В =* 0,91,7 Тл и *f =* 50 Гц**

**Таблица П.23**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Число углов со стыками | | Марка стали и её толщина | | | | | | |
| 3412,  0,35 мм | 3413,  0,35 мм | 3404,  0,35 мм | 3404, 0,30 мм;  3405, 0,35 мм | 3405,  0,30 мм | М6Х,  0,35 мм | М4Х,  0,28 мм |
| косыми | прямыми |
| Трехфазная магнитная система (три стержня) | | | | | | | | |
| 6 | — | 7,48 | 7,94 | 8,58 | 8,75 | 8,85 | 8,38 | 9,10 |
| 5\* | 1\* | 8,04 | 8,63 | 9,38 | 9,60 | 9,74 | 9,16 | 10,10 |
| 4 | 2 | 8,60 | 9,33 | 10,18 | 10,45 | 10,64 | 9,83 | 11,10 |
| — | 6 | 10,40 | 11,57 | 12,74 | 13,13 | 13,52 | 12,15 | 14,30 |
| Однофазная магнитная система (два стержня) | | | | | | | | |
| 4 | — | 4,60 | 4,88 | 5,28 | 5,40 | 5,44 | 5,16 | 5,60 |
| — | 4 | 6,40 | 7,18 | 7,84 | 8,08 | 8,32 | 7,48 | 8,80 |

**\*** Комбинированный стык по рис. 2.17, *в* [1].

**Полная удельная намагничивающая мощность в стали *q* и в зонешихтованного стыка *qз*для холоднокатаной стали марок 3404 и 3405 толщиной 0,35 и 0,30 мм при различных индукциях и *f* = 50 Г**

**Таблица П.24**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *В*, Тл | Марка стали и её толщина | | | | *q*з, В·A/м2 | |
| 3404,  0,35 мм | 3404,  0,30 мм | 3405,  0,35 мм | 3405,  0,30 мм | 3404 | 3405 |
| 0,20  0,40  0,60  0,80  1,00  1,20  1,22  1,24  1,26  1,28  1,30  1,32  1,34  1,36  1,38  1,40  1,42  1,44  1,46  1,48 | 0,040  0,120  0,234  0,375  0,548  0,752  0,782  0,811  0,841  0,870  0,900  0,932  0,964  0,996  1,028  1,060  1,114  1,168  1,222  1,276 | 0,040  0,117  0,230  0,371  0,540  0,742  0,768  0,793  0,819  0,844  0,870  0,904  0,938  0,972  1,006  1,040  1,089  1,139  1,188  1,238 | 0,039  0,117  0,227  0,366  0,533  0,732  0,758  0,783  0,809  0,834  0,860  0,892  0,924  0,956  0,988  1,020  1,065  1,110  1,156  1,210 | 0,038  0,115  0,223  0,362  0,525  0,722  0,748  0,773  0,799  0,824  0,850  0,880  0,910  0,940  0,970  1,000  1,041  1,082  1,123  1,161 | 40  80  140  280  1000  4000  4680  5360  6040  6720  7400  8200  9000  9800  10 600  11 400  12 440  13 480  14 520  15 560 | 40  80  140  280  900  3700  4160  4620  5080  5540  6000  6640  7280  7920  8560  9200  10 120  11 040  11 960  12 880 |

Продолжение таблицы П.24

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *В*, Тл | Марка стали и её толщина | | | | *q*з, В·A/м2 | |
| 3404,  0,35 мм | 3404,  0,30 мм | 3405,  0,35 мм | 3405,  0,30 мм | 3404 | 3405 |
| 1,50  1,52  1,54  1,56  1,58  1,60  1,62  1,64  1,66  1,68  1,70  1,72  1,74  1,76  1,78  1,80  1,82  1,84  1,86  1,88  1,90  1,95  2,00 | 1,330  1,408  1,486  1,575  1,675  1,775  1,958  3,131  2,556  3,028  3,400  4,480  5,560  7,180  9,340  11,500  20,240  28,980  37,720  46,460  55,200  89,600  250,000 | 1,289  1,360  1,431  1,511  1,600  1,688  1,850  2,012  2,289  2,681  3,073  4,013  4,953  6,364  8,247  10,130  17,670  25,210  32,750  40,290  47,830  82,900  215,000 | 1,246  1,311  1,376  1,447  1,524  1,602  1,748  1,894  2,123  2,435  2,747  3,547  4,347  5,551  7,161  8,770  15,110  21,450  27,790  34,130  40,740  76,900  180,000 | 1,205  1,263  1,321  1,383  1,449  1,526  1,645  1,775  1,956  2,188  2,420  3,080  3,740  4,736  6,068  7,400  12,540  17,680  22,820  27,960  33,100  70,800  145,000 | 16 600  17 960  19 320  20 700  22 100  23 500  25 100  26 700  28 600  30 800  33 000  35 400  37 800  40 800  44 400  48 000  52 000  56 000  60 000  64 000  68 000  80 000  110 000 | 13 800  14 760  15 720  16 800  18 000  19 200  20 480  21 760  23 160  24 680  27 000  28 520  30 840  33 000  35 000  37 000  39 800  43 600  47 400  51 200  55 000  65 000  75 000 |

**Значения коэффициента *k*т.у для различного числа углов с косыми и прямыми стыками пластин плоской шихтованной магнитной системы для стали марок 3404 и 3405 толщиной 0,35 и 0,3 мм при  *f =* 50 Гц**

**Таблица П.25**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Число углов со стыками | | индукция В, Тл | | | | |
| косыми | прямыми | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 |
| 6  5  4  - | -  1  2  6 | 26,0  32,25  38,5  58,5 | 27,95  34,83  41,7  64,7 | 27,95  35,20  42,45  65,6 | 26,0  33,25  40,5  64,7 | 22,10  27,85  33,66  52,0 |

**Удельные теплопроводности λ изоляционных и других материалов**

**Таблица П.26**

|  |  |
| --- | --- |
| ***Материал*** | **λ, Вт/(м · °С)** |
| Бумага кабельная сухая  Бумага кабельная в масле  Бумага кабельная, пропитанная лаком  Электроизоляционный картон  Лакоткани электроизоляционные  Гетинакс  Текстолит  Стеклотекстолит  Лак бакелитовый и др. лаки  Масло при отсутствии конвекции  Электротехническая сталь в пакетах:  вдоль пластин  поперек пластин  Нагревостойкое покрытие стали  Медь  Алюминий | 0,12  0,17  0,17  0,17  0,25  0,17 – 0,175  0,146 – 0,162  0,178 – 0,182  0,3  0,1  22,3  4,75 – 4,85  0,8  390  226 |

**Значения коэффициента *k***з

**Таблица П.27**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***h***к**/*а*** | 0,07 –  0,08 | 0,08 –  0,09 | 0,1 | 0,11 –  0,12 | 0,13 –  0,14 | 0,15 –  0,19 | 0,2 и  более |
| ***k***з | 1,10 | 1,05 | 1,0 | 0,95 | 0,90 | 0,85 | 0,80 |

**Типы баков силовых масляных трансформаторов**

**Таблица П.28**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Тип бака | Рисунок [1] | Вид  охлаждения | Пределы применения по мощности, кВ·А |
| Бак с гладкими стенками | — | М | до 25 – 40 |
| Бак со стенками в виде волн | 9.14 | М | от 40 – 63 до 630 |
| Бак с вваренными охлаждающими гнутыми трубами (трубчатый) | 9.15 | М | от 40 – 63 до 1600 |
| Бак с навесными радиаторами с прямыми трубами | 9.16 | М | от 100 до 6300 |
| Бак с навесными радиаторами с гнутыми трубами | 9.17 | М | от 2500 до 10 000 |
| Бак с навесными радиаторами с гнутыми трубами с дутьем | 9.6 | Д | от 10 000 до 80 000 |
| Бак с охладителями с принудительной циркуляцией масла и с дутьем | — | ДЦ | от 63 000 и выше |

**Минимально допустимые расстояния от отводов до заземленных частей бака**

**(рис. 12 и 13)**

**Таблица П.29**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Испытательные  отводы, кВ | | 25 | 35 | 45 | 55 | 85 | 100 |
| Изоляционные расстояния,  мм | S1 | 15 | 25 | 35 | 40 | 42 | 45 |
| S2 | 15 | 23 | 32 | 40 | 40 | 40 |
| S3 | 25 | 30 | 50 | 70 | 90 | 150 |
| S4 | 15 | 20 | 25 | 25 | 25 | 30 |
| S5 | 45 | 60 | 82 | 105 | 125 | 200 |
| Диаметр отвода ВН, мм | d1 | 4 | 6 | 6 | 8 | 10 | 15 |
| Диаметр отвода НН, мм | d2 | 6 | 10 | 14 | 16 | 20 | 25 |

**Данные круглых и овальных труб, применяемых в масляных силовых трансформаторах**

**Таблица П.30**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *Формы труб* | *Размеры сечения, мм* | *Толщина стенки, мм* | *Поперечное сечение в свету, мм2* | *Поверхность 1 м, м2* | *Масса в 1 м, кг* | |
| *металла* | *масла в трубе* |
| Круглая  Овальная  Круглая | Ø 51  72×20  Ø 30 | 1,5  1,5  1,2 | 1810  890  600 | 0,16  0,16  0,0942 | 1,82  1,82  0,845 | 1,63  0,79  0,54 |
| *Формы труб* | *Шаг, мм* | | *Радиус изгиба, мм*  *R* | *Число рядов труб при мощности, кВ·А* | | |
| *между рядами tр* | *в ряду*  *tT* | *63 – 160* | *250 – 630* | *1000 –*  *1600* |
| Круглая  Овальная  Круглая | 75  100  55 | 70  50  50 | 150  188  150 | 1  1  1 | 2  1  1 | 2 – 3  1 – 2  2 – 3 |

**Минимальное расстояние оси трубы от дна и крышки бака для масляных силовых трансформаторов. Трубы круглого сечения Ø 51 мм**

**Таблица П.31**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *а,* мм | 50 – 80 | 100 – 150 | 170 – 200 | 250 – 280 |
| *сmin* | 60 | 75 | 90 | 120 |
| *emin* | 70 | 85 | 100 | 130 |

**Примечание.** Для труб овального сечения 72×20 мм при тех же размерах *а* значения *сmin* и *emin* , найденные из таблицы, увеличивать на 10 мм.