

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЕГАЗОВЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Филиал ТюмГНГУ в г. Тобольске

Кафедра электроэнергетики

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ЧАСТЬ 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Методические указания для выполнения курсовых проектов
для студентов направления подготовки 13.03.02 -
Электроэнергетика и электротехника, всех форм обучения

Составители: О.А. Бузинов, *Г.В. Иванов*

Тюмень
ТюмГНГУ
2016

Электрические машины: метод.указ. для выполнения курсовых проектов по дисциплине «Электрические машины» для студентов направления подготовки 13.03.02 -Электроэнергетика и электротехника, всех форм обучения / сост. Ф.А. Бузинов, Г.В. Иванов; Тюменский государственный нефтегазовый университет. – 1-е изд. – Тюмень: Издательский центр БИК, ТюмГНГУ, 2016.– 30с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры электроэнергетики

«10» марта 2016 года, протокол № 9.

Аннотация

Методические указания по дисциплине «Электрические машины» предназначены для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Данная дисциплина изучается в двух семестрах.

Данные методические указания предназначены для выполнения курсовых проектов по дисциплине «Электрические машины».

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания предназначены для выполнения курсовых проектов по теме: «Расчет трехфазных масляных трансформаторов».

Трансформатор – это устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии переменного тока с одними параметрами в электрическую энергию переменного тока с другими параметрами без изменения частоты. Силовой трансформатор является основным элементом многих электрических подстанций, также важнейшим элементом электрической сети, где производятся многократные преобразования параметров электрической энергии.

Примерно 40% от суммарных потерь электроэнергии в электрической сети составляют потери в трансформаторах. Поэтому при проектировании большое внимание следует уделять вопросам снижения потерь в трансформаторах и стоимости трансформаторов.

В настоящих методических указаниях приведены подробные методики расчетов масляных трансформаторов с расширительными баками и гладкими баками с навесными прямоотрубными радиаторами. В них не рассматриваются расчеты герметичных трансформаторов, трансформаторов с баками с гофрированными ребрами, трансформаторов сухих, трансформаторов с литой эпоксидной изоляцией в силу особенностей таких расчетов.

Хотя выполняемый проект является учебным, но он затрагивает все основные вопросы проектирования трансформаторов и позволяет приобрести навыки в этой сфере деятельности инженера.

Выполнение условий задания на проектирование возможно лишь с использованием новых электротехнических и изоляционных материалов, современных технологий проектирования, изложенных в рекомендуемой литературе.

Расчетно-пояснительная записка курсового проекта должна содержать:

- содержание;
- задание на курсовой проект;
- введение;
- реферат;
- расчетную часть;
- заключение;
- список литературы.

Расчетно-пояснительная записка выполняется согласно требованиям ЕСКД к текстовым документам.

Варианты задания на курсовое проектирование приведены в таблице 1.

Таблица 1

Варианты задания на курсовое проектирование

Вариант	Мощность трансформатора S_H , кВ·А	U_{BH} / U_{HH} , кВ	Схемы и группа соединений обмоток	U_{KH}^* , %	P_{KH} , Вт	P_{OH} , Вт	i_{OH}^* , %
1	100	10/0,4	Д/У _H -11	4,5	1980	290	2,2
2	160	10/0,4	Д/У _H -11	4,5	2650	510	2,4
3	250	10/0,4	Д/У _H -11	4,5	3700	740	2,3
4	400	10/0,4	Д/У _H -11	4,7	5900	950	2,1
5	630	10/0,4	Д/У _H -11	5,5	8500	1310	2,0
6	1000	10/0,4	Д/У _H -11	5,5	10800	1550	1,2
7	1250	10/0,4	Д/У _H -11	6,0	15000	1800	1,2
8	1600	10/0,4	Д/У _H -11	6,0	16500	1950	1,0
9	2500	10/0,4	Д/У _H -11	6,0	25000	3400	0,8
10	4000	35/6,3	Д/Д-0	6,5	25000	6200	3,0
11	6300	35/6,3	Д/Д-0	6,5	46500	12300	3,0
12	100	6/0,4	Д/У _H -11	4,5	1980	290	2,2
13	160	6/0,4	Д/У _H -11	4,5	2650	510	2,4
14	250	6/0,4	Д/У _H -11	4,5	3700	740	2,3
15	400	6/0,4	Д/У _H -11	4,7	5900	950	2,1
16	630	6/0,69	Д/У _H -11	5,5	8500	1310	2,0
17	1000	10/0,69	Д/У _H -11	5,5	12200	2100	1,4
18	1000	6/0,69	Д/У _H -11	5,5	12200	2100	1,4
19	1600	6/0,4	Д/У _H -11	6,0	16000	2050	1,0
20	2500	6/0,4	Д/У _H -11	6,0	24000	2800	0,8
21	4000	35/11	Д/Д-0	7,5	33500	6700	1,0
22	6300	35/11	Д/Д-0	7,5	46500	9400	0,9
23	400	6/0,4	У/У _H -0	4,7	5900	950	2,1
24	630	6/0,69	У/У _H -0	5,5	8500	1310	2,0
25	1000	6/0,69	У/У _H -0	5,5	12200	2100	1,4

Расчет трансформатора производится в 2 этапа: предварительный и окончательный. На этапе предварительного расчета определение некоторых размеров и параметров осуществляется по упрощенным выражениям с использованием коэффициентов, полученных из практики проектирования. При окончательном расчете, который производится после выбора конструкции и определения размеров элементов трансформатора, проверки и подгонки к заданной норме параметров короткого замыкания, уточняются основные размеры и параметры трансформатора.

Для снижения трудоемкости расчетов схему их выполнения необходимо строить так, чтобы заданные параметры учитывались и

корректировались на ранних стадиях расчета. Этим условиям отвечает следующая схема его проведения (и таким должно быть содержание проекта):

1) определение основных электрических величин (по заданным параметрам):

- а) линейных и фазных номинальных токов и напряжений обмоток ВН и НН;
- б) испытательных напряжений обмоток;
- в) активной и реактивной составляющих напряжения короткого замыкания;

2) расчет основных размеров трансформатора:

а) выбор схемы, конструкции и технологии изготовления магнитной системы;

б) выбор марки и толщины листов стали и типа изоляции пластин, индукции в магнитной системе;

в) выбор материала обмоток;

г) предварительный выбор конструкции обмоток;

д) выбор конструкции и определение размеров основных изоляционных промежутков главной изоляции обмоток;

е) предварительный расчет трансформатора и выбор соотношения основных размеров β с учетом заданных значений $U_{кн}^*$, $P_{кн}$ и $P_{он}$;

ж) определение диаметра стержня и высоты обмоток, предварительный расчет магнитной системы;

3) расчет обмоток НН и ВН:

а) выбор типов обмоток НН и ВН;

б) расчет вариантов обмотки НН; выбор обмотки НН на основе сравнения полученных массо-габаритных характеристик;

в) расчет вариантов обмотки ВН; выбор обмотки ВН на основе сравнения полученных массо-габаритных характеристик;

4) определение параметров короткого замыкания:

а) потерь короткого замыкания – основных и добавочных в обмотках, добавочных в элементах конструкции;

б) номинального напряжения короткого замыкания;

в) механических сил в обмотках;

5) окончательный расчет магнитной системы. Определение параметров холостого хода:

а) размеров пакетов и активных сечений стержня и ярма;

б) массы стержня и ярма и массы стали;

в) потерь холостого хода;

г) тока холостого хода;

б) тепловой расчет и расчет системы охлаждения:

а) поверочный тепловой расчет обмоток;

б) расчет системы охлаждения (бака, радиаторов);

7) определение габаритных размеров трансформатора и массы материалов:

- а) превышений температуры обмоток и масла;
- б) массы масла и основных размеров расширителя;
- в) расхода активных и конструкционных материалов.

Расчет следует вести преимущественно с использованием единиц измерения системы СИ, но во всех случаях необходимо анализировать применяемую формулу и устанавливать использование требуемых единиц измерения ее величин.

Методические указания состоят из трех частей.

Часть 1. Общие вопросы. Предварительные расчеты элементов трансформаторов.

Часть 2. Расчет обмоток и магнитных систем трансформаторов.

Часть 3. Расчет систем охлаждения и элементов конструкции трансформаторов.

1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

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

- мощность на одну фазу и на стержень;
- номинальные линейные токи обмоток высшего напряжения (ВН) и низшего напряжения (НН);
- номинальные фазные токи и напряжения обмоток ВН и НН;
- активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания;
- испытательные напряжения для элементов обмоток ВН и НН.

Эти электрические величины определяются по заданным параметрам по нижеприводимым формулам.

Мощность одной фазы трансформатора

$$S_{\phi} = \frac{S_H}{m}, \quad (1)$$

где S_H – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;
 m – число фаз.

Мощность на одном стержне

$$S' = \frac{S_H}{c}, \quad (2)$$

где c – число активных (несущих обмотки) стержней магнитопровода трансформатора.

Для трехфазного ($m = 3$) трехстержневого ($c = 3$) трансформатора

$$S_{\phi} = S' = \frac{S_H}{3}. \quad (3)$$

Номинальные линейные токи обмоток

$$I_{BH} = \frac{S_H \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{BH}}; \quad (4)$$

$$I_{HH} = \frac{S_H \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{HH}}, \quad (5)$$

где U_{BH} и U_{HH} – линейные напряжения соответственно обмоток ВН и НН при использовании нулевых ответвлений обмотки ВН, В.

Фазный ток (ток фазной обмотки) трехфазного трансформатора зависит от схем соединений его обмоток:

при соединении обмоток в звезду или зигзаг (обмотки НН задания)

$$I_{\phi} = I, \quad (6)$$

при соединении обмоток в треугольник (обмотки ВН задания)

$$I_{\phi} = \frac{I}{\sqrt{3}}, \quad (7)$$

где I – номинальный линейный ток обмотки: $I = I_{ВН}$ обмотки ВН, $I = I_{НН}$ обмотки НН.

Фазное напряжение (напряжение фазной обмотки) трёхфазного трансформатора также зависит от схем соединений обмоток:

при соединении обмоток в звезду или зигзаг (обмотки НН задания)

$$U_{\phi} = \frac{U}{\sqrt{3}}, \quad (8)$$

при соединении обмоток фаз в треугольник (обмотки ВН задания)

$$U_{\phi} = U, \quad (9)$$

где U – номинальное линейное напряжение соответствующей обмотки: $U = U_{ВН}$ обмотки ВН, $U = U_{НН}$ обмотки НН.

Активная составляющая номинального напряжения короткого замыкания, %

$$U_A^* = \frac{P_{KH}}{S_H} * 100\%, \quad (10)$$

где P_{KH} – мощность потерь короткого замыкания, Вт (значение указано в задании).

Реактивная составляющая номинального напряжения короткого замыкания, %

$$U_P^* = \sqrt{U_{KH}^{*2} - U_A^{*2}}, \quad (11)$$

где U_{KH}^* – номинальное напряжение короткого замыкания (значение указано в задании).

В зависимости от классов напряжений по таблице 1.1 определяются испытательные напряжения обмоток НН и ВН (испытательное напряжение

– это напряжение для проверки электрической прочности изоляции элементов трансформатора). По ним выбираются в дальнейших расчетах изоляционные промежутки между обмотками и другими токоведущими частями и заземленными элементами трансформатора.

Таблица 1.1

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

Класс напряжения, кВ	До 1кВ	3	6	10	15	20	35	110
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	-	3,6	7,2	12,0	17,5	24	40,5	126
Испытательное напряжение, $U_{исп}$, кВ	5	18	25	35	45	55	85	200

2 РАСЧЁТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА

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

Основой конструкции трансформатора является магнитная система, основные размеры которой в совокупности с основными размерами обмоток определяют главные размеры активной части и всего трансформатора.

Наиболее распространены плоские магнитные системы стержневого типа со ступенчатой формой поперечного сечения стержня, вписанного в окружность, и с обмотками в виде цилиндров. Стержневые магнитные системы шихтуются из листов электротехнической стали с косыми сторонами на крайних стержнях и с прямыми – на среднем стержне (рисунок 2.1). Использование косых стыков в углах позволяет уменьшить потери и намагничивающую мощность для углов и всей магнитной системы.

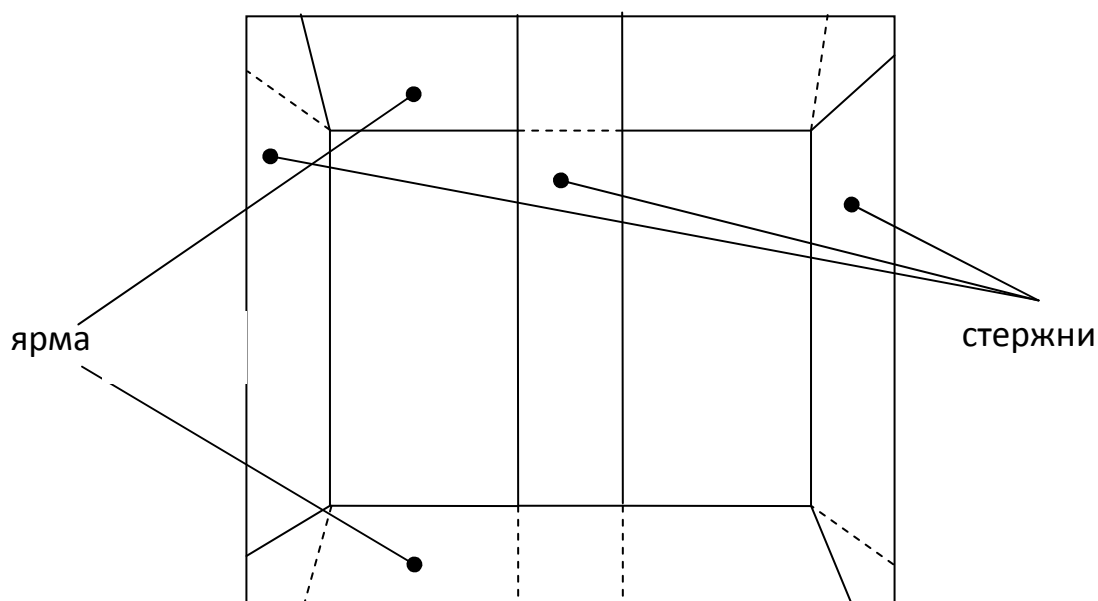


Рис. 2.1. Схема шихтовки магнитной системы
(пунктиром показаны пластины нижнего ряда)

Для изготовления магнитных систем силовых трансформаторов применяют электротехнические холоднокатаные тонколистовые стали марок 3404, 3405, 3406, 3407 и 3408 толщиной 0,35, 0,30 и 0,27мм, поставляемые в рулонах. При выборе марки стали и толщины пластины нужно учитывать, что сталь с высокими магнитными свойствами имеет

большую стоимость, а сталь меньшей толщины имеет лучшие магнитные свойства, но при сборке магнитопровода даёт меньший коэффициент заполнения и требует увеличенных трудозатрат. Поэтому в трансформаторах мощностью до 1000 кВ·А используется, в основном, сталь марки 3404 с толщиной пластин 0,35 мм.

Если расчетные значения $P_{он}$, $S_{он}$, $I_{он}$ ($i_{он}^*$) превышают максимально допустимые, то следует использовать стали марок 3405, 3406 с толщиной пластин 0,35 мм или сталь марки 3404 с меньшей толщиной, а также магнитные системы с шестью косыми стыками.

Магнитопроводы трансформаторов мощностью более 1000 кВ·А собираются из сталей марок 3405, 3406 с толщиной пластин 0,30 или 0,27 мм.

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

Таблица 2.1

Рекомендуемая индукция в стержнях масляных трансформаторов

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

Электротехнические стали марок 3404, 3405, 3406, 3407 и 3408 имеют анизотропные свойства – резко отличающуюся магнитную проводимость в направлении проката и поперек направления проката. Поэтому пластины сердечников и ярм штампуются так, чтобы направления их длинных сторон совпадали с направлением проката. В этом случае большая магнитная проводимость будет в направлении основного магнитного потока трансформатора.

Форма поперечного сечения стержней магнитопровода определяется формой обмоток. Так как для трансформаторов используются цилиндрические обмотки, то поперечное сечение стержней стремятся приблизить к кругу с диаметром, равным внутреннему диаметру обмотки НН или каркаса обмотки. Стержни круглого сечения изготовить практически невозможно. Поэтому сечение стержня делают ступенчатым, набирая каждую ступень (пакет стержня) из пластин одинаковой ширины, и поперечное сечение стержня в стержневых магнитных системах имеет вид симметричной ступенчатой фигуры, вписанной в окружность (рисунок 2.2).

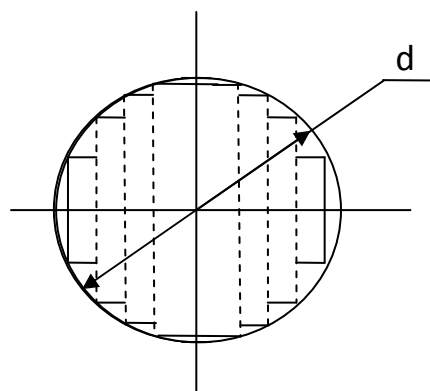


Рис. 2.2. Поперечное сечение стержня стержневой магнитной системы

Диаметр этой окружности d называется диаметром стержня и является одним из основных размеров трансформатора.

Нормализованные (устанавливаемые стандартом) диаметры стержней d_n , м: 0,08; 0,085; 0,09; 0,092; 0,095; 0,10; 0,105; 0,11; 0,115; 0,12; 0,125; 0,13; 0,14; 0,15; 0,16; 0,17; 0,18; 0,19; 0,20; 0,21; 0,22; 0,225; 0,23; 0,24; 0,245; 0,25; 0,26; 0,27; 0,28; 0,29; 0,30; 0,31; 0,32; 0,33; 0,34; 0,35; 0,36; 0,37; 0,38; 0,39; 0,40; 0,42; 0,45; 0,48; 0,50; 0,53; 0,56; 0,60; 0,63; 0,67; 0,71; 0,75 – для магнитных систем без поперечных каналов и 0,80; 0,85; 0,875; 0,9; 0,925; 0,975; 1,0; 1,03; 1,06; 1,12; 1,15; 1,18; 1,22; 1,25; 1,28; 1,32; 1,36; 1,40; 1,45; 1,50 – для магнитных систем, имеющих поперечные охлаждающие каналы.

Чистое сечение стали в поперечном сечении стержня называется активным сечением стержня.

Отношение площади сечения стержня к площади круга диаметром d называется коэффициентом заполнения площади круга - K_{KP} .

Число ступеней, определяемое числом пакетов стержня в половине круга, для трансформаторов разных мощностей различно. С увеличением числа ступеней увеличивается K_{KP} , но увеличивается число типоразмеров пластин, что усложняет их заготовку и сборку магнитной системы. В таблицах 2.2 и 2.3 приведены рекомендуемые значения числа ступеней и получающиеся при этом значения d и K_{KP} .

Ярма магнитной системы с целью иметь равномерное распределение магнитного потока в стыкуемых стержнях и ярмах также должны иметь ступенчатую форму с числом ступеней, равным числу ступеней в сечении стержня. При этом активное сечение ярм должно быть несколько большим активных сечений стержней. С целью получить равномерное сжатие пластин ярма балками 2-3 крайних пакета выполняют из пластин одинаковой ширины, что также увеличивает активное сечение ярма.

Таблица 2.2

Число ступеней в сечениях стержней трёхфазных масляных трансформаторов мощностью до 400 кВ·А

Показатель		Прессовка стержня расклиниванием с обмоткой, сечение стержня без каналов							
Мощность трансформатора, кВ·А		до 16			16	25	40-100	160	250
Ориентировочный диаметр стержня d , м		до 0,08			0,08	0,09	0,10-0,14	0,15, 0,16	0,17, 0,18
Без прессующей пластины	Число ступеней	1	2	3	4	5	6	6	6
	Коэффициент K_{KP}	0,636	0,786	0,851	0,861	0,89	0,91-0,92	0,913	0,918

Таблица 2.3

Число ступеней в сечениях стержней трёхфазных масляных трансформаторов мощностью 400-6300 кВ·А

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

Примечание – В коэффициенте K_{KP} учтено наличие охлаждающих каналов в сечении стержня, если они выполняются.

Отношение активного сечения ярма $\Pi_{Я}$ к активному сечению стержня $\Pi_{С}$ называется коэффициентом усиления ярма

$$K_{Я} = \frac{\Pi_{Я}}{\Pi_{С}} . \quad (12)$$

Для нормализованных размеров пакетов пластин $K_{Я} = 1,02 \div 1,03$; точные значения $K_{Я}$ приведены в таблице 2.5.

В предварительном расчёте, когда размеры пакетов пластин ещё не установлены, активное сечение стержня определяется по выражению:

$$P'_C = \kappa_C \frac{\pi d^2}{4}, \quad (13)$$

где κ_C - коэффициент заполнения сталью;

$$\kappa_C = \kappa_{KP} \cdot \kappa_3, \quad (14)$$

где κ_3 - коэффициент заполнения площади ступенчатой фигуры сечения стержня чистой сталью; значение κ_3 зависит от вида стали (рулонная или листовая), типа изоляционного покрытия, технологии сборки магнитной системы и определяется из таблицы 2.4.

Таблица 2.4

Значения коэффициента κ_3 для рулонной холоднокатаной стали

Марка стали	Толщина, мм	Вид изоляционного покрытия	κ_3
3404, 3405, 3406	0,35	Нагревостойкое	0,97
	0,30		0,96
3404, 3405, 3406	0,35	Нагревостойкое, однократная лакировка	0,965
	0,30		0,955

Примечания:

а) при прессовке стержней путем расклинивания с внутренней обмоткой κ_3 , полученное из таблицы значение, уменьшить на 0,01;

Б) при использовании листовой холоднокатаной стали толщиной 0,35мм κ_3 уменьшить на 0,01 дополнительно к примечанию а;

в) для стали толщиной 0,35мм без электроизоляционного покрытия при двукратной лакировке $\kappa_3 = 0,92 \div 0,93$.

Предварительное значение активного сечения ярма (значение $\kappa_я$ приведено в таблице 2.5)

$$P'_я = \kappa_я \cdot P'_C \quad (15)$$

Пластины пакетов стержней и ярм выштамповываются из рулонной стали или резаных лент. Исходные материалы, поставляемые с

металлургических заводов, могут иметь нагревостойкое электроизоляционное покрытие обеих плоскостей, или покрытия может не быть. Если используется такая сталь, то на обе поверхности выштампованных пластин наносится покрытие лаком КФ 965 с последующей огневой обработкой. Число слоёв лаковой плёнки должно быть не менее 2.

В процессе механической обработки могут ухудшаться свойства холоднокатаной стали: увеличиваются удельные потери и мощность намагничивания. Поэтому после штамповки и снятия заусенцев пластины необходимо подвергнуть восстановительному отжигу при температуре 800-820°C. А после отжига, во избежание ухудшения магнитных свойств, необходимо исключить толчки, удары и изгибы пластин. Кроме того, пластины, имеющие нагревостойкое покрытие, после отжига однократно лакируются.

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

В трехфазных трансформаторах мощностью до 250 кВ·А и диаметром стержня $d \leq 0,18\text{м}$ прессовка стержней осуществляется забивкой деревянных клиньев (стержней и планок) между стержнем магнитопровода и обмоткой НН или жестким бумажно-бакелитовым каркасом обмотки.

Стержни трансформаторов мощностью от 400 кВ·А и выше и диаметром стержня $d > 0,18\text{м}$ прессуются наложением бандажей из стеклоленты на расстояниях 0,12-0,15м один от другого.

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

В трансформаторах мощностью 10000 кВ·А и выше ярма прессуются посредством стальных полубандажей, стягивающих две ярмовые балки и изолированных от балок.

Рекомендации по выбору способов прессовки стержней и ярм, формы сечения и коэффициента усиления ярма даны в таблице 2.5.

Для того чтобы магнитная система была достаточно устойчивой, могла выдержать механические усилия, возникающие в обмотках при коротких замыканиях, не разваливалась при подъёме остова или активной части, верхние и нижние ярма магнитной системы должны быть надёжно

соединены между собой. Такое соединение в масляных трансформаторах с напряжением обмотки ВН классов 6, 10, 35 и 110кВ выполняется стягиванием между собой верхних и нижних прессующих балок вертикальными шпильками.

Таблица 2.5

Способы прессовки стержней и ярм, формы сечения и коэффициенты усиления ярма

Мощность трансформатора, кВ·А	Прессовка стержней	Прессовка ярм	Форма сечения ярма	$K_{я}$
25-100	Расклинивание с обмоткой	Швеллерными балками, стянутыми шпильками, расположенными вне ярма	3-5 ступеней	1,025
160, 250			С числом ступеней на 1-2 меньше числа ступеней стержня	1,015-1,025
400, 630, 1000-6300	Бандажами из стеклоленты			

Шпильки надёжно изолируются и удаляются на достаточное расстояние от обмотки ВН. Другой функцией этих шпилек является осевая прессовка обмоток.

В масляных трансформаторах при напряжениях обмоток ВН 150кВ и выше соединение верхних и нижних ярмовых балок выполняется прессующими пластинами (полосами), проложенными под бандаж по оси крайнего пакета стержня. Эти полосы изготавливаются из немагнитной стали и тщательно изолируются от ярмовых балок.

Порядок сборки активной части трансформатора:

- 1) шихтуется магнитопровод трансформатора;
- 2) выполняется прессовка нижнего и верхнего ярм магнитопровода;
- 3) производится предварительная стяжка верхних и нижних прессующих балок;
- 4) на стержни магнитной системы накладываются бандажи из стеклоленты (если предусматривается прессовка стержней таким образом);
- 5) стяжка балок снимается, производится распрессовка и расшихтовка верхнего ярма;
- 6) на стержни насаживаются обмотки;
- 7) путём расклинивания с обмотками прессуются стержни (если предусмотрена такая прессовка стержней);

- 8) устанавливаются прессующие кольца, если таковые предусматриваются для осевой прессовки обмоток;
- 9) шихтуется и прессуется верхнее ярмо;
- 10) проводится окончательная стяжка верхних и нижних прессующих балок.

2.2 Выбор материалов и конструкции обмоток (предварительно)

Электролитическая медь, как проводниковый материал, по сравнению с алюминием имеет примерно в 1,5 раза меньшее удельное электрическое сопротивление, большую механическую прочность, легко обрабатывается, более стойка к коррозии, но имеет большую стоимость, поэтому алюминиевые обмотки также находят весьма широкое использование.

Сравнение трансформаторов равной мощности с медными и алюминиевыми обмотками, имеющих одинаковую конструкцию и материал магнитной системы, одинаковые параметры холостого хода и короткого замыкания, даёт следующие результаты:

- трансформаторы с алюминиевыми обмотками имеют несколько меньшие диаметры стержней магнитной системы, но большую их длину; в целом расстояние между стержнями магнитопровода на 5-10%, а высота магнитной системы на 15-30% больше соответствующих размеров трансформатора с медными обмотками; массы сталей магнитных систем примерно равны;
- числа витков алюминиевых обмоток на 15-20%, сечения витков на 50-60% больше, чем медных; поэтому трудоёмкость работ при намотке алюминиевых обмоток выше, больше расход изоляционных материалов;
- при использовании алюминиевых обмоток увеличены также размеры бака трансформатора и масса трансформаторного масла;
- общая стоимость трансформаторов равной мощности и класса напряжения с одинаковыми параметрами холостого хода и короткого замыкания с алюминиевыми и медными обмотками примерно одинакова.

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

Выбор конструкции обмоток должен проводиться с учётом эксплуатационных (надёжность, электрическая и механическая прочность, хорошие условия охлаждения) и технических (технологичность, наименьшие трудоёмкость и расход материалов) требований и удобства выполнения отводов обмотки ВН на переключатель регулирования напряжения.

В таблице 2.6 приведены основные свойства и условия применения различных типов обмоток масляных трансформаторов. Предварительный выбор конструкции обмоток трансформатора можно выполнить, руководствуясь рекомендациями этой таблицы. Выбор окончательного варианта конструкции обмоток ВН и НН может быть проведён после их расчета на основе сравнения нескольких вариантов.

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

Силовой трансформатор может быть представлен состоящим из трёх систем:

- системы частей, находящихся при включенном трансформаторе под напряжением (обмотки, контакты переключателей ступеней напряжения, отводы, проходные шины и шпильки вводов, защитные экраны);
- системы заземлённых частей (магнитная система со всеми металлическими деталями, бак и система охлаждения);
- системы изоляции, разделяющей первые две системы и отдельные части, находящиеся под напряжением.

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

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

Структура главной изоляции масляных трансформаторов классов напряжений от 1 до 35 кВ (испытательные напряжения от 5 до 85 кВ) показана на рисунке 2.3.

Изоляция между обмотками ВН и НН выполняется жесткими бумажно-бакелитовыми цилиндрами или мягкими из электроизоляционного картона. Размеры выступов цилиндров за высоту обмоток ($l_{ц1}$ и $l_{ц2}$) обеспечивают отсутствие разрядов по поверхности цилиндра между обмотками и с обмоток на стержни магнитопровода. Изоляция обмоток от ярма при испытательном напряжении 85 кВ усиливается шайбами и подкладками из электроизоляционного картона. Между обмотками ВН соседних стержней устанавливается междуфазная перегородка из электроизоляционного картона. Значения размеров главной изоляции обмоток НН и ВН указаны в таблицах 2.7 и 2.8.

Таблица 2.6

Основные свойства и условия применения различных типов обмоток масляных трансформаторов

Тип обмотки	Применение на стороне		Основные достоинства	Основные недостатки	Материал обмоток	Пределы применения (включительно)				Число параллельных проводов	
	основное	возможное				мощность тр-ра, кВ·А	по току на стержень, А	по напряжению, кВ	по сечению витка, мм ²		
Цилиндрическая одно- и двухслойная из прямоугольного провода	Н Н	В Н	Простая технология изготовления, хорошее охлаждение	Малая механическая прочность	медь	до 630	от 15 до 800	до 6	от 5,04 до 250	от 1 до 8	
					алюминий	до 630	от 10 до 650	до 6	от 6,39 до 300		
Цилиндрическая многослойная из прямоугольного провода	В Н	Н Н	Простая технология изготовления, хорошее заполнение окна магнитной системы	Уменьшение поверхности охлаждения по сравнению с обмотками с радикальными каналами	медь	от 630 до 63000	от 15 до 1200	10 и 35	от 5,04 до 400	от 1 до 8	
					алюминий	до 25000	от 10 до 1200	10 и 35	от 6,39 до 500		
Цилиндрическая многослойная из круглого провода	В Н	Н Н	Простая технология изготовления	Ухудшение теплоотдачи и уменьшение механической прочности с ростом мощности	медь	до 630	От 0,3 до 100	до 35	от 1,094 до 42,44	1	2
					алюминий	до 630	от 2 до 135	до 35	от 1,37 до 50,24	1	1

Продолжение таблицы 2.6

Тип обмотки	Применение на стороне		Основные достоинства	Основные недостатки	Материал обмоток	Пределы применения (включительно)				Число параллельных проводов	
	основное	возможное				мощность тр-ра, кВ·А	по току на стержень, А	по напряжению, кВ	по сечению витка, мм ²		
Винтовая одно-, двух- и многослойная из прямоугольного провода	Н Н	-	Высокая механическая прочность, надежная изоляция, хорошее охлаждение	Более высокая стоимость по сравнению с цилиндрической	медь	от 160 и выше	от 300 и выше	до 35	от 75 и выше	4	12 и более
					алюминий	от 100 и выше	от 150 и выше	до 35	от 75 и выше		
Непрерывная катушечная из прямоугольного провода	В Н	Н Н	Высокая электрическая и механическая прочность	Необходимость перекладки половины катушек при намотке	медь	от 160 и выше	от 15 и выше	от 3 до 220	от 5,04 и выше	1	3-5
					алюминий	от 100 и выше	от 10 и выше	от 3 до 220	от 6,39 и выше		
Цилиндрическая многослойная из алюминиевой ленты	Н Н	-	Простая технология изготовления, хорошее охлаждение, хорошее заполнение окна	Малая механическая прочность в радиальном направлении	алюминий	от 160 до 1000	от 100 до 1500	до 1 кВ	от 100 до 1000		

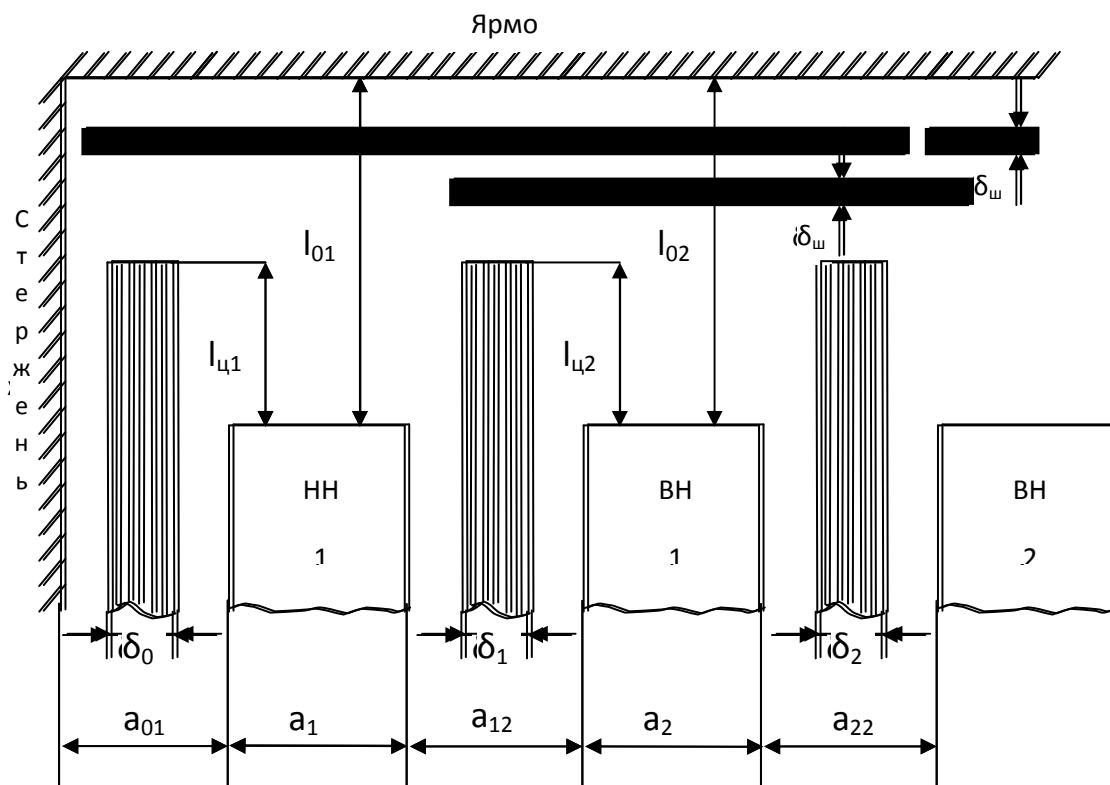


Рис.2.3. Главная изоляция обмоток НН и ВН трансформаторов классов напряжений от 1 до 35 кВ

Продольная изоляция обмоток будет рассмотрена в разделе «Расчет обмоток НН и ВН».

Таблица 2.7

Главная изоляция. Минимальные изоляционные расстояния обмоток НН

Мощность трансформатора, кВ·А	U _{исп} для обмоток НН, кВ	Обм. НН от ярма l ₀₁ , мм	Обм. НН от стержня, мм			
			δ ₀₁	a _{ц1}	a ₀₁	l _{ц1}
25 – 250	5	15	картон 2х0,5	-	4	-
400, 630	5	Принимается равным найденному по испытательному у напряжению обмотки ВН	картон 2х0,5	-	5	-
1000 – 2500	5		4	6	15	18
630 – 1600	18; 25; 35		4	6	15	25
630 и выше	45		5	10	20	30
630 и выше	55		5	13	23	45
все мощности	85		5	19	30	70
			6			

Таблица 2.8

Главная изоляция. Минимальные изоляционные расстояния обмоток
ВН

Мощность трансформатора кВ·А	$U_{исп}$ для обмоток ВН, кВ	ВН от ярма, мм		Между ВН и НН, мм		Выступ цилиндра $l_{ц2}$, мм	Между ВН и ВН, мм	
		l_{02}	$\delta_{ш}$	a_{12}	δ_{12}		a_{22}	δ_{22}
25 – 100	18,25 и 35	20	-	9	2,5	10	8	-
160 – 630	18,25 и 35	30	-	9	3	15	10	-
1000 – 6300	18,25 и 35	50	-	20	4	20	18	-
630 и выше	45	50	2	20	4	20	18	2
630 и выше	55	50	2	20	5	30	20	3
160 – 630	85 (прим.)	75	2	27	5	50	20	3
1000 – 6300	85 (прим.)	75	2	27	5	50	30	3

Примечание - Для цилиндрических обмоток с $U_{исп} = 85 \text{ кВ}$ принимать минимальное изоляционное расстояние $a_{12} = 27$ мм, а при расчете ширины приведенного канала рассеяния - $a_{12} = 30$ мм.

2.4 Определение основных размеров трансформатора

Магнитная система и обмотки трехфазного двухобмоточного трансформатора с плоской трехстержневой магнитной системой изображены на рисунке 2.4.

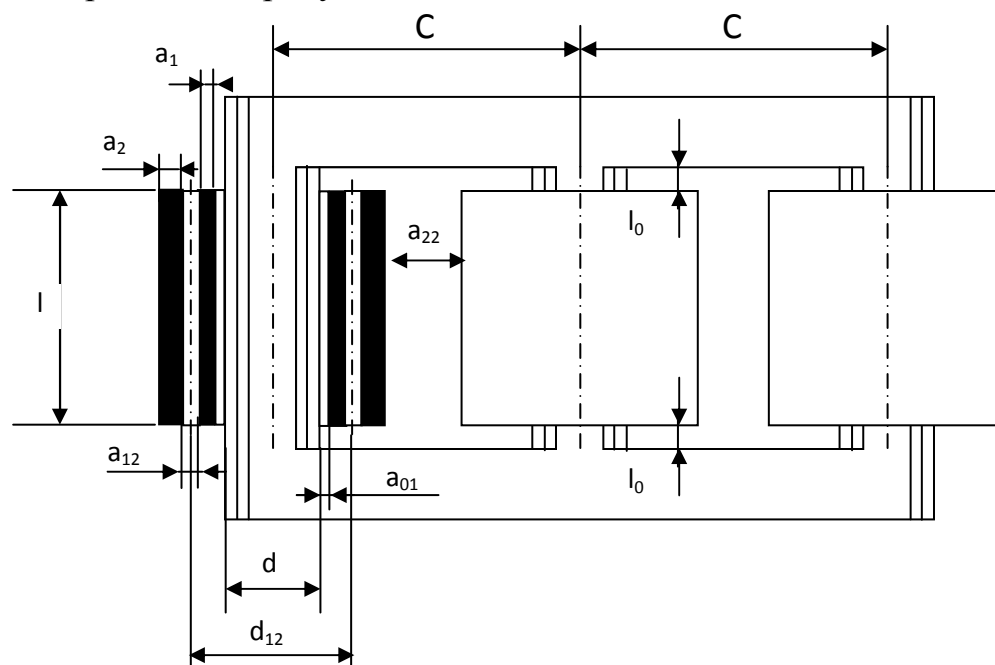


Рис.2.4. Активная часть трёхфазного двухобмоточного трансформатора с плоской трёхстержневой магнитной системой

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

$$d = 0,507 \cdot \sqrt[4]{\frac{S' \cdot a_p \cdot \beta \cdot \kappa_p}{f_1 \cdot U_p^* \cdot B_c^2 \cdot \kappa_c^2}}, \quad (16)$$

где a_p – ширина приведенного канала рассеяния трансформатора:

$$a_p = a_{12} + \frac{(a_1 + a_2)}{3}, \quad (17)$$

значение a_{12} выбирается по таблице 2.8.

На этом этапе расчета размеры a_1 и a_2 неизвестны, поэтому $\frac{(a_1 + a_2)}{3}$ рассчитывается по приближенной формуле:

$$\frac{(a_1 + a_2)}{3} \approx \kappa \cdot \sqrt[4]{S' \cdot 10^{-2}}, \quad (18)$$

где κ – коэффициент, зависящий от мощности трансформатора, металла обмоток, класса напряжения обмоток ВН и мощности потерь короткого замыкания; значения κ выбираются из таблицы 2.9.

Таблица 2.9

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

Мощность трансформатора, кВ·А	Класс напряжений, кВ	
	6, 10	35
до 250	0,63	0,65–0,58
400, 630	0,53	0,58–0,52
1000–6300	0,51–0,43	0,52–0,48

Примечания:

а) для обмоток из алюминиевого провода значение κ , найденные из таблицы 2.9, увеличить в 1,25 раза.

Б) для обмоток НН из алюминиевой ленты трансформаторов мощностью 100 – 1000 кВ·А значения κ определять, как для обмоток из алюминиевого провода.

В) при отклонении заданных потерь короткого замыкания от потерь, установленных соответствующим ГОСТ, на $\pm 10\%$ значение K , полученное из таблицы 2.9, умножить, соответственно, на 0,96 и 1,04.

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

$$\beta = \frac{\pi \cdot d_{12}}{l'} \quad (19)$$

β определяет соотношение между диаметром и высотой обмотки и является очень важным параметром, так как меньшим значениям β соответствуют трансформаторы относительно узкие и высокие, а большим – широкие и низкие. Разным значениям β соответствуют разные соотношения масс активных материалов – стали магнитопровода и металла обмоток. Следовательно, от величины β зависит стоимость трансформатора. Кроме того с изменением β изменяются и технические параметры трансформатора: потери и ток холостого хода, механическая прочность и нагревостойкость обмоток, габаритные размеры.

Если заданные параметры и принятые исходные данные расчета совпадают с условиями, для которых составлена таблица 2.10, то выбор β можно сделать по этой таблице.

Таблица 2.10

Рекомендуемые значения β для масляных трансформаторов

Мощность, кВ·А	Алюминий		Медь	
	6, 10 кВ	35 кВ	6, 10 кВ	35 кВ
25 – 100	1,2 – 1,6	–	1,8 – 2,4	–
160 – 630	1,2 – 1,6	1,2 – 1,5	1,8 – 2,4	1,8 – 2,4
1000 – 6300	1,3 – 1,7	1,2 – 1,6	2,0 – 2,6	1,8 – 2,4

Примечание:

а) рекомендуемые значения β приведены для трехфазных масляных трансформаторов классов напряжений 6, 10 и 35 кВ, отвечающих требованиям ГОСТ 12022-76 и ГОСТ 11920-85.

Если такого совпадения нет, то рекомендуется выбор оптимального значения β сделать на основе предварительного обобщенного расчета.

K_p – коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному (коэффициент Роговского); значение K_p при концентрическом расположении обмоток и равномерном расположении витков по их высоте

колеблется от 0,93 до 0,98; при определении основных размеров можно принять $\kappa_p \approx 0,95$ [2];

f_1 – частота питающей сети (по заданию); 50 Гц

B_c – индукция в стержне магнитной системы; для выбранной марки стали для трансформатора заданной мощности предварительное значение B'_c принимается из таблицы 2.1;

κ_c – коэффициент заполнения сталью; $\kappa_c = \kappa_{KP} \cdot \kappa_3$ значения κ_{KP} выбираются из таблиц 2.2 и 2.3, а κ_3 – из таблицы 2.4.

Если полученный диаметр d отличается от нормализованного значения (п. 2.1), то следует принять ближайший диаметр по нормативной шкале – d_H и пересчитать значение β на это значение по формуле:

$$\beta_H = \beta \cdot \left(\frac{d_H}{d} \right)^4. \quad (20)$$

Таблица 2.11

Ориентировочные значения коэффициента a_d для медных обмоток

Мощность трансформатора, кВ·А	Уровень потерь короткого замыкания	Значения a_d при классе напряжения обмотки ВН, кВ	
		6,10	35
До 630	1,2 Р _к по ГОСТ	1,33	1,37
	Р _к по ГОСТ	1,36	1,40
	0,8 Р _к по ГОСТ	1,40	1,44
От 1000 до 6300	1,2 Р _к по ГОСТ	1,35	1,37
	Р _к по ГОСТ	1,38	1,40
	0,8 Р _к по ГОСТ	1,42	1,44

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

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

$$d'_{12} \approx a_d \cdot d_H, \quad (21)$$

где a_d – коэффициент, значения которого зависят от мощности, класса напряжений и принятого уровня потерь короткого замыкания; ориентировочные значения a_d для трансформаторов с магнитопроводами из холоднокатаной стали приведены в таблице 2.11.

Высота обмоток трансформатора

$$l' = \frac{\pi \cdot d'_{12}}{\beta_H} \quad (22)$$

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

радиальный размер обмоток НН

$$a_1 = \kappa_1 \frac{a_1 + a_2}{3}, \quad (23)$$

где κ_1 – коэффициент, значения которого могут быть приняты для трансформаторов с плоской магнитной системой мощностью 25 – 630 кВ·А равным 1,1, мощностью 1000-6300 кВ·А класса напряжения 6 и 10 кВ и мощностью 1000 - 80000 кВ·А класса напряжения 35 кВ – 1,4;

активное сечение стержня (предварительное):

$$P'_C = \kappa_C \frac{\pi \cdot d_H^2}{4}, \quad (24)$$

активное сечение ярма (предварительное):

$$P'_Y = K_Y \cdot P'_C,$$

высота стержня:

$$l'_C = l' + 2 \cdot l_{02}, \quad (25)$$

расстояние между осями соседних стержней (предварительное):

$$C' = d_{12} + a_{12} + 2 \cdot a_2 + a_{22}, \quad (26)$$

где $2 \cdot a_2$ - удвоенный радиальный размер обмотки ВН;

$$2 \cdot a_2 \approx b_d \cdot d_H, \quad (27)$$

b_d – коэффициент, зависящий от мощности, класса напряжения трансформатора, материала обмотки и типа переключателя; в таблице 2.12 приведены ориентировочные значения коэффициента b_d .

Напряжение одного витка (предварительно)

$$u'_B = 4,44 \cdot f_1 \cdot B'_C \cdot \Pi'_C. \quad (28)$$

Таблица 2.12

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

Мощность трансформатора, кВ·А	Класс напряжений, кВ	
	6,10	35
До 100	0,55	-
100 – 630	0,46 – 0,40	-
1000 – 6300	0,26 – 0,24	0,32 – 0,28

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

Следовательно, на этом этапе расчета основных размеров трансформатора нужно определить:

- 1) диаметр стержня магнитопровода - $d(d_H)$;
- 2) средний диаметр канала между обмотками - d'_{12} ;
- 3) высоту обмоток трансформатора - l' ;
- 4) радиальный размер обмотки $HH - a'_1$;
- 5) активное сечение стержня - Π'_C ;
- 6) активное сечение ярма - $\Pi'_я$;
- 7) высоту стержня - l'_C ;
- 8) расстояние между осями соседних стержней - C' ;
- 9) напряжение одного витка - u'_B ;

Примечание - Величины, отмеченные штрихом, будут иметь предварительные значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Копылов, И.П.** Электрические машины[Текст]: учебник для студентов электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов/ И.П.Копылов. – Изд.5-е, стереотип. – М.: Высшая школа, 2006.- 607с.
2. **Тихомиров, П.М.** Расчет трансформаторов[Текст]: учебное пособие для студентов электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов/П.М.Тихомиров – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Альянс, 2013. – 527с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. **Копылов, И.П.** Проектирование электрических машин[Текст]: В 2 кн. Книга 1 / И.П.Копылов. –М.: Энергоатомиздат, 2003.
4. **Кацман, М.М.** Справочник по электрическим машинам[Текст]: учебное пособие для студентов образоват. учреждений средн. проф. образования / М.М. Кацман.– М.: Academia, 2006.- 480с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Определение основных электрических величин.....	7
2 Расчет основных размеров трансформатора	1
	0
2.1 Выбор конструктивной схемы магнитной системы, марки стали и толщины листов, технологии изготовления.....	1
	0
2.2 Выбор материала и конструкции обмоток (предварительно).....	1
	7
2.3 Выбор конструкции и определение размеров основных изоляционных промежутков главной изоляции обмоток.....	1
	8
2.4 Определение основных размеров трансформатора.....	2
	2
Список литературы.....	2
	8

Учебное издание

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ЧАСТЬ 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Методические указания для выполнения курсовых проектов

Составители

БУЗИНОВ Олег Анатольевич

ИВАНОВ Геннадий Викторович

Редактор *В.К. Бородина*

Компьютерная верстка *Т.И. Роцин*

Подписано в печать . Формат 60х90 1/16. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 30 экз. Заказ № .

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский государственный нефтегазовый университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.