

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА**

*Методические указания к курсовому проектированию  
для студентов бакалавриата направления 13.03.02*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2019**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра электроэнергетики и электромеханики

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА

*Методические указания к курсовому проектированию  
для студентов бакалавриата направления 13.03.02*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2019

УДК 621.313(073)

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ. Проектирование трансформатора:**  
Методические указания по курсовому проектированию / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *А.В. Каган, М.С. Ковальчук*. СПб, 2019. 42 с.

Приведены рекомендации по порядку и содержанию электромагнитного расчета трехфазного двухобмоточного масляного трансформатора.

Методические указания предназначены для студентов бакалавриата очной формы обучения направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиля «Электроснабжение».

Научный редактор проф. *А.Е. Козярук*

Рецензент канд. техн. наук *А.С. Иванов* (ООО «Джуг Ру Групп»)

## ВВЕДЕНИЕ

Курсовой проект позволяет приобрести опыт проектирования таких технических объектов как трансформатор напряжения при решении задач в области электроснабжения промышленных предприятий и населенных пунктов.

Производство электрической энергии на крупных электростанциях с генераторами большой единичной мощности, размещаемых вблизи расположения топливных и гидравлических энергоресурсов, позволяет получать в этих районах необходимые количества электрической энергии при относительно невысокой ее стоимости. Использование дешевой электрической энергии потребителями, которые находятся на значительном расстоянии, иногда измеряемом сотнями и тысячами километров, и рассредоточенными по обширной территории страны, требует создания сложных разветвленных электрических сетей. Силовой трансформатор является одним из важнейших элементов электрической сети. При помощи трансформаторов осуществляется повышение или понижение напряжения. Так, при напряжении на шинах электростанции 15,75 кВ в современной сети часто применяется следующая последовательность трансформаций напряжения с учетом падения напряжения на линиях передачи: 15,75 на 525 кВ; 500 на 242 кВ; 230 на 121 кВ; 115 на 38,5 кВ; 35 на 11 кВ; 10 на 0,4 или 0,69 кВ.

Необходимость распределения энергии между многими мелкими потребителями приводит к значительному увеличению числа отдельных трансформаторов по сравнению с числом генераторов. При этом суммарная мощность трансформаторов в сети на каждой последующей ступени с более низким напряжением в целях более свободного маневрирования энергией выбирается обычно большей, чем мощность предыдущей ступени более высокого напряжения. Вследствие этого общая мощность всех трансформаторов, установленных в сети, в настоящее время превышает общую генераторную мощность в 7—10 раз.

Трансформаторы используются не только при передаче и распределении электрической энергии в энергетических установках,

но и для разнообразных преобразований переменного тока в промышленных установках, в устройствах связи, радио, автоматики, телемеханики и т. п. В соответствии с этим номинальные мощности и напряжения трансформаторов, изготавливаемых на заводах электротехнической промышленности, колеблются в очень широких пределах. В зависимости от мощности, напряжения и назначения меняется также конструкция трансформаторов.

## ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Проектированию подлежит трехфазный силовой двухобмоточный трансформатор с естественным масляным охлаждением для эксплуатации в условиях умеренного климата.

Вариант задания на курсовой проект студент выбирает по последней цифре шифра, а первичное и вторичное напряжения - с учетом последней и предпоследней цифре шифра. Варианты задания приведены в табл.1.

В качестве прототипа проектируемого трансформатора выбирается ближайший подходящий по мощности и высшему напряжению трансформатор серии ТМ.

Расчетно-пояснительная записка выполняется на бумаге формата А4 (210x297). Она должна содержать титульный лист, задание, оглавление, введение, расчетную часть, заключение и список использованной литературы.

Во введение указывается назначение трансформатора и его конструктивные особенности. В заключении приводятся результаты расчета трансформатора: напряжение КЗ  $U_k$ , %; потери КЗ  $P_k$ , Вт; потери ХХ  $P_x$ , Вт; ток ХХ  $I_0$ , % и их сравнение с исходными данными для расчета.

Расчетно-пояснительная записка печатается на одной стороне листа. Страницы записки нумеруются. Все расчеты должны быть выполнены в системе СИ или в другой системе с переводом основных результатов в систему СИ. Расчетно-пояснительная записка должна быть в жестком переплете.

Иллюстративный материал позволяет совершенствовать навыки графического оформления результатов проектирования и выполняется на миллиметровой или чертежной бумаге такого же

формата как формат пояснительной записки и должен иметь порядковую нумерацию и название.

Варианты задания

Таблица №1

№ вар	Мощность	Потери х.х.	Потери к.з.	Напряжение к.з.	Ток х.х.
	кВА	Вт	Вт	%	%
0	32	170	770	4,5	3,2
1	50	230	1050	4,5	3,0
2	80	340	1650	4,5	2,7
3	120	440	2350	4,5	2,5
4	180	630	2970	4,5	2,3
5	320	1050	4700	5,5	2,2
6	450	1200	6200	5,5	2,0
7	1200	2900	14600	6,5	1,4
8	3000	5500	31200	6,5	1,0
9	5000	8000	42000	7,5	0,9
Напряжение, кВ (предпоследняя цифра шифра)					
Последняя цифра шифра	0; 1	2; 3	4; 5	6; 7	8; 9
0	10/0,4	3/0,525	6/0,69	10/0,525	6/0,4
1	10/0,525	3/0,69	6/0,4	10/0,69	3/0,525
2	3/0,69	10/0,4	35/0,525	35/0,69	20/0,4
3	20/0,69	3/0,525	10/0,4	6/0,4	35/0,69
4	20/0,4	10/0,525	6/0,69	35/0,4	3/0,69
5	10/0,69	20/0,4	35/0,525	3/0,4	6/0,525
6	35/11	20/3,15	6/0,525	10/0,69	3/0,69
7	20/6,3	35/3,15	3/0,69	35/11	10/3,15
8	35/11	20/3,15	6/3,15	10/0,69	3/0,525
9	20/11	35/6,3	10/3,15	35/11	20/3,15

Примечание: при  $U_2 = 0,525; 3,15; 6,3; 11$ кВ группа соединения -  $Y/\Delta-11$ ;  
при  $U_2 = 0,4; 0,69$  кВ группа соединения -  $Y/Y-0$ .

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

В данном проекте рассматриваются трехфазные силовые масляные трансформаторы серии ТМ. Исполнение ТМ до 1,6 МВА включительно соответствует общим конструктивным требованиям ГОСТ 11677-85, выпускается в баках с охладительными трубами или с прямоугольными радиаторами, приваренными к баку. В масляных трансформаторах в систему охлаждения входит бак, заливаемый трансформаторным маслом. Бак состоит из двух частей: нижней высотой 300 – 500 мм, на которой устанавливается активная часть, и верхней, которая может быть снята при осмотре или ремонте активной части без подъема активной части трансформатора. Гофрированные баки обеспечивают необходимую поверхность охлаждения без применения съемных охладителей, что значительно увеличивает надежность трансформаторов. Внутренний объем трансформаторов ТМ имеет сообщение с окружающей средой, температурные изменения объема масла, происходящие во время эксплуатации, компенсируются за счет объема расширителя. Для очистки от влаги и промышленных загрязнений воздуха, поступающего в трансформатор при температурных колебаниях уровня масла, расширитель снабжается воздухоосушителем.

Трансформаторы ТМ имеют повышенную электрическую прочность изоляции вследствие применения при их заливке маслом глубокого вакуума, который полностью обеспечивает удаление воздуха из обмоток и изоляционных деталей активной части.

Фиксация положений переключателя ответвлений обмоток ВН, позволяющего регулировать напряжение ступенями по 2,5 % в диапазоне  $\pm 5$  %, осуществляется специальным фиксирующим

устройством, расположенным в приводе внутри бака трансформатора, а также дополнительным фиксатором, расположенным в металлической рукоятке привода.

Ко дну бака привариваются пластины либо швеллеры, имеющие отверстия для крепления трансформатора на фундаменте. На швеллерах, в трансформаторах мощностью 160 кВА и выше по заказу потребителя могут устанавливаться переставные транспортные ролики, позволяющие производить продольное или поперечное перемещение трансформатора. В нижней части бака имеются узел заземления и сливная пробка.

Для масляных силовых трансформаторов общего назначения номинальными условиями места установки и охлаждающей среды согласно ГОСТ 11677-85 являются: высота над уровнем моря не более 1000 м; температура охлаждающей среды: для воды – не более  $+25^{\circ}\text{C}$  у входа в охладитель, для воздуха – естественно изменяющаяся температура охлаждающего воздуха не более  $+40^{\circ}\text{C}$  при среднесуточной температуре воздуха не более  $+30^{\circ}\text{C}$  и среднегодовой его температуре не более  $+20^{\circ}\text{C}$ ; температура окружающего воздуха не ниже  $-45^{\circ}\text{C}$ .

Основными частями трансформатора являются магнитная система (магнитопровод), обмотки и система охлаждения. Магнитопровод трансформатора представляет собой комплект пластин холоднокатаной электротехнической стали марки 3404, 3405 толщиной 0,3 - 0,35 мм. Эти стали обладают низкими удельными потерями при высокой магнитной индукции. Магнитная система имеет определенную геометрическую форму, предназначенную для локализации в ней основного магнитного поля трансформатора. Ее обычно разделяют на стержни и ярма.



На стержнях располагаются обмотки, представляющие собой совокупности витков, образующих электрическую цепь, в которой суммируются ЭДС, наведенные в витках с целью получения высшего или низшего напряжения трансформатора.

Из всех возможных групп соединений трехфазных двухобмоточных трансформаторов согласно ГОСТ 11677-85 стандартизованы только две группы: 0 и 11 - с выводом в случае необходимости нулевой точки звезды или зигзага (Y/Y-0; Y/ $\Delta$ -11; Y/Zn-11).

Обмотки, как правило, выполняют из медного или алюминиевого изолированного провода. Электротехническая медь отличается высокой чистотой и качеством. Из всех проводниковых материалов, за исключением серебра, она имеет самое низкое удельное электрическое сопротивление. Проволоку из мягкой (отожженной) меди ПММ применяют для изготовления обмоточных проводов, из твердой ПМТ – токопроводящих стержней, шин, прутков и проводов с большой механической прочностью.

Алюминий уступает меди в прочности и электропроводности, но его дешевизна, легкость и сравнительно низкое удельное электрическое сопротивление позволяет широко внедрять его в производство. За счет уменьшения массы и стоимости провода из алюминия удастся компенсировать увеличение других затрат, и общая стоимость трансформатора с алюминиевыми обмотками практически не отличается от стоимости эквивалентного трансформатора с медными обмотками.

Для обмоток применяют круглые и прямоугольные провода различных марок (ПБ, АПБ, АПБУ, АПБД, ПЭЛ, ПСД) [9].

В двух обмоточном трансформаторе различают обмотку высшего напряжения ВН и обмотку низшего напряжения НН.

Для изготовления отводов применяют гибкие медные изолированные провода круглого сечения марки ПБОТ с бумажной изоляцией, медные и алюминиевые шины и прутки. По нагревостойкости изоляции провода, применяемые в трансформаторах, относятся к классу А.

Для изоляции обмоточных проводов и отводов применяют электроизоляционную бумагу и электроизоляционный картон, изготовленные из химически обработанной древесной целлюлозы на специальных бумагоделательных машинах. Они обладают высокой электрической и механической прочностью, высокой маслостойкостью при работе в горячем трансформаторном масле, относятся по нагревостойкости к классу А. Применяют следующие марки бумаги и электрокартона: ЭКТМ, КТ, АМ, СВН [18].

Главным изоляционным материалом является трансформаторное масло. Трансформаторное масло является продуктом перегонки нефти. В масляных трансформаторах применяют масло, выпускаемое с добавкой антиокислительной присадки – дибутилпаракрезола ДБК (от 0,1 до 0,5 %), которое изготавливают по специальным заказам.

К конструкционным относят материалы, применяемые для изготовления сборочных единиц и деталей, несущих механические нагрузки и скрепляющие отдельные части трансформаторов. Это черные металлы (сталь, чугун) и цветные металлы (латунь, бронза), пластмассы, бук, стеклянная бандажная лента ЛСБ-Т, пропитанная клеящим кремнийорганическим лаком, масло-тепломорозостойкая резина МТМ, листовая рулонная резина и др.

К вспомогательным материалам относят припои (МФЗ, ПОС, ПСр), канифоль, магнезитовую замазку (используют для вмазки фарфорового изолятора), силикагель (обладает большой пористостью

и способностью задерживать влагу), цеолиты (широко применяют для очистки трансформаторного масла от воды), асбестовую набивку, краски, клей и др.

По заказу потребителей трансформаторы ТМ комплектуются газовым реле и электроконтактным термометром.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА

### 1. Основные электрические величины

1.1. Номинальные линейные токи на сторонах трехфазного трансформатора, А:

$$I_{\text{вн}} = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{вн}}},$$

$$I_{\text{нн}} = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{\text{нн}}},$$

где  $S$  - полная мощность трёхфазного трансформатора, кВА;

$U_{\text{вн}}, U_{\text{нн}}$  - номинальное линейное напряжение, В.

1.2. Фазные токи обмоток, А:

- при соединении обмоток в звезду

$$I_{\text{ф,вн}} = I_{\text{вн}};$$

- при соединении обмоток в треугольник

$$I_{\text{ф,нн}} = I_{\text{нн}} / \sqrt{3},$$

где  $I_{\text{вн}}, I_{\text{нн}}$  - номинальные линейные токи, А.

1.3. Фазные напряжения обмоток, В:

- при соединении в звезду

$$U_{\phi, \text{ВН}} = U_{\text{ВН}} / \sqrt{3};$$

- при соединении в треугольник

$$U_{\phi, \text{НН}} = U_{\text{НН}},$$

где  $U_{\text{ВН}}$ ,  $U_{\text{НН}}$  - номинальные линейные напряжения обмоток, В.

#### 1.4. Испытательное напряжение для обмоток

По классам напряжений обмоток ( $U_{\text{ВН}}$ ,  $U_{\text{НН}}$ ) устанавливается испытательное напряжение (табл.2). При классе напряжения меньше 3000 В испытательное напряжение принимается равным 5000 В.

Испытательное напряжение для обмотки ВН,  $U_{\text{исп, ВН}}$  (В).

Испытательное напряжение для обмотки НН,  $U_{\text{исп, НН}}$  (В).

Таблица 2

Нормы испытательных напряжений (ГОСТ 1516.1-89)

Класс напряжения, кВ	Испытательное напряжение		
	Приложенное действующее $U_{\text{исп}}$ , кВ	Импульсное амплитудное (кВ) при волне	
		Полной	Срезанной
3	18	44	50
6	25	60	70
10	35	80	90
15	45	108	120
20	55	130	150
35	85	200	225
110	200	480	550
150	230	550	600
220	325	750	835
330	460	1050	1150
500	630	1550	1650

## 2. Данные конструктивного исполнения обмоток

### 2.1. Типы обмоток

Выбор типа обмотки осуществляется в соответствии с энергетическими показателями трансформатора [4,5].

## 2.2. Материалы проводов

В качестве материала провода обмотки применяется медный или алюминиевый провод.

## 2.3. Коэффициент канала рассеяния.

В табл.3 приведены значения коэффициента для трансформаторов с обмотками из алюминиевого провода. Для обмоток из медного провода табличное значение следует разделить на 1,25.

Принятое значение  $K_{кр}$  уточняется в процессе расчета.

Таблица 3

Габарит трансформатора	Мощность, кВА	Коэффициент канала рассеяния $K_{кр}$	
		Класс напряжения ВН	
		до 10 кВ	более 10 кВ
I	до 100	0,85 – 0,8	0,91 – 0,85
II	160 – 1000	0,8 – 0,65	0,81 – 0,73
III	1600 – 6300	0,65 – 0,54	0,67 – 0,58
IV	свыше 6300	0,54 – 0,42	0,58 – 0,54

## 2.4. Устанавливается размерное соотношение, м

$$(a_1 + a_2) / 3 = K_{кр} (S / 3)^{1/4} 10^{-2},$$

где  $a_1$  и  $a_2$  – соответственно радиальные размеры обмоток НН и ВН.

## 2.5. Ширина приведённого канала рассеяния, м

$$a_p = a_{12} + (a_1 + a_2) / 3,$$

где  $a_{12}$  - изоляционный канал между обмотками, м.

2.6. Изоляционные расстояния между обмотками ВН и НН устанавливаются в зависимости от мощности трансформатора и величины испытательного напряжения (табл.4 и 5).

Таблица 4

Изоляционные расстояния для обмотки НН

Мощность, кВА	$U_{\text{исп. нн}}$ , кВ	От яра, мм $h_{01}$	Обм НН от стержня, мм			
			$\delta_{01}$	$a_{11}$	$a_{01}$	$h_{01}$
25-250	5	15	1,5	2	4	2
400-630	5	20	1,5	3	5	3
400-630	5	20	4	6	15	18
1000-2500	5	30	4	6	15	18
630-1600	18,25 и 35	50	4	6	15	25
2500-6300	18,25 и 35	50	4	8	17,5	25
630 и выше	45	75	5	10	20	30
630 и выше	55	75	5	13	23	45,5
Все мощн.	85	80	6	19	30	70

Таблица 5

Изоляционные расстояния для обмотки ВН

Мощность, кВА	$U_{\text{исп. вн}}$ , кВ	ВН от яра, мм		Между ВН и НН, мм		Выс- туп цилин- дра, мм	Между ВН и НН, мм	
		$h_{02}$	$\delta_{02}$	$a_{12}$	$\delta_{12}$		$h_{02}$	$a_{22}$
25-100	18, 25 и 35	20	1	9	25	10	8	1
160-630	18, 25 и 35	30	1	9	3	15	10	1
1000-6300	18, 25 и 35	50	1	20	4	20	18	1
630 и выше	45	50	2	20	4	20	18	2
630 и выше	55	75	2	20	5	30	20	3
160-630	85	75	2	27	5	50	20	3
1000-6300	85	75	2	27	5	50	30	3
10000 и выше	85	80	3	30	6	50	30	3

3. Дополнительные данные, необходимые для дальнейшего расчета.

3.1. Коэффициент, устанавливающий отношение активного сечения стержня к площади круга с диаметром, равным диаметру стержня трансформатора; предварительно принимают  $K_c = 0,9$ ;

3.2. Коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному полю (коэффициент Роговского) при определении

основных размеров можно приближенно принять  $K_p = 0,95$ ;

3.3. Соотношение между основными размерами трансформатора могут быть представлены коэффициентом  $\beta$  (табл. 6);

3.4. Принимается марка стали магнитопровода;

3.5. Индукция в стержнях масляного трансформатора  $B_c$  может быть предварительно принята, исходя из опыта проектирования с учетом мощности (табл. 7).

Все предварительно принятые величины уточняются в процессе расчета.

Таблица 6

Вид охлажд.	Металл обмоток	Относительный размер $\beta$		
		Мощность, кВА		
		25 – 630	1000- 6300	10000–80000
Масляное	<i>Cu</i>	1,2 – 3,6	1,5 – 3,6	1,2 – 3
	<i>Al</i>	0,9 – 3	1,2 – 3	1,2 – 3

Таблица 7

Марка стали	Рекомендуемая индукция в стержнях		
	Мощность трансформатора, кВА		
	до 16	25 – 100	160 и более
Масляные трансформаторы (индукция, Тл)			
3404, 3405	1,5 – 1,55	1,55 – 1,6	1,55 – 1,65

3.6. Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, %

$$u_a = P_k / 10S ;$$

$$u_p = \sqrt{u_k^2 - u_a^2} ,$$

где  $P_k$  - потери КЗ, Вт ;

$u_k$  - напряжение КЗ, %.

3.7. Диаметр стержня, м

$$D'_0 = 0,507 \cdot \sqrt[4]{\frac{S' \cdot a_p \cdot \beta \cdot K_p}{f \cdot u_p \cdot B_c^2 \cdot K_c^2}} ,$$

где  $S'$  – мощность одной фазы, кВА

$$S' = S / 3 ;$$

$f$  – частота сети, Гц.

Полученный размер округляется до ближайшего по таблице нормалей  $D_0$  (табл. 8).

3.8. После выбора нормализованного диаметра уточняется значение

$$\beta = \beta \left( \frac{D_0}{D_0'} \right)^4 .$$

3.9. По принятому размеру  $D_0$ , пользуясь табл.8, определяют геометрическое сечение стержня  $\Pi_{ф,с}$ ,  $м^2$ .

Таблица 8

Нормали				
Диаметр стержня, м ( $D_0$ )	Геометрическое сечение стержня, $м^2$ ( $\Pi_{ф,с}$ )	Геометрическое сечение ярма, $м^2$ ( $\Pi_{я,с}$ )	Объем угла, $м^3$ ( $V_{\gamma}$ )	Высота ярма, $v$ ( $h_{я}$ )
0,08	0,00433	0,00448	0,000292	0,075
0,09	0,00567	0,00582	0,000426	0,085
0,1	0,0072	0,00732	0,000596	0,095
0,11	0,00862	0,00897	0,00079	0,105
0,125	0,01123	0,01153	0,001157	0,12
0,140	0,01415	0,0144	0,001618	0,135
0,16	0,01835	0,01883	0,00242	0,155
0,18	0,0233	0,0238	0,00345	0,175
0,2	0,0278	0,0279	0,00469	0,195
0,22	0,0342	0,0344	0,00632	0,215
0,24	0,0408	0,0409	0,00827	0,23
0,26	0,0478	0,0484	0,01054	0,25
0,28	0,0556	0,0567	0,01328	0,27
0,3	0,0645	0,0654	0,0163	0,295
0,32	0,0733	0,0744	0,02	0,31
0,34	0,0829	0,0837	0,0239	0,325
0,36	0,091	0,0917	0,0275	0,35
0,38	0,102	0,1038	0,0327	0,368
0,4	0,1143	0,115	0,0385	0,385



3.10. Коэффициент заполнения сечения стержня магнитопровода сталью  $K_3$ , равный отношению сечения стали стержня к площади его поперечного сечения, может быть установлен по табл.9.

3.11. Сечение стали стержня,  $m^2$

$$P_c = P_{\phi,c} \cdot K_3 .$$

3.12. ЭДС витка, В

$$U_B = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_c \cdot P_c .$$

Таблица 9

Сравнительные показатели для стали

Толщина мм	Марка стали	Относи- тельные удельные потери, %	Относи- тельная цена, %	Относительное число пластин в пакетах, %	$K_3$
0,35	3404	100	100	100	0,97
	3405	94	104,1		
0,30	3404	94	104,1	115	0,96
	3405	87,5	108,2		

3.13. Средний диаметр между обмотками НН и ВН  $D_{12}$ , может быть установлен с помощью вспомогательного коэффициента  $k_{аср}$ , значение которого принимают в соответствии с выбранным материалом обмотки НН.

Для медных обмоток  $k_{аср}=1,3 - 1,5$ . Для алюминиевых обмоток

$$k_{аср}=1,5 - 1,7 .$$

3.14. Средний диаметр стержня, м:

$$D_{12} \approx k_{аср} D_0 .$$

3.15. Высота окна под обмотку, м

$$H_0 = \pi D_{12} / \beta .$$

#### 4. Расчет обмоток

Расчет обмоток трансформатора начинают с обмотки НН, обычно размещаемой между стержнем и обмоткой ВН.

##### Обмотка низшего напряжения

#### 4.1. Число витков на фазу при номинальном напряжении

$$W_{\text{нн}} = U_{\text{ф,нн}} / U_{\text{в}}.$$

Полученное значение округляется до целого числа, для многослойных обмоток, желательно, кратного числу слоев, чтобы слои имели одинаковое число витков.

#### 4.2. Уточняется напряжение одного витка, В

$$U_{\text{в}} = U_{\text{ф,нн}} / W_{\text{нн}}.$$

#### 4.3. Действительная индукция в стержне, Тл

$$B_{\text{с}} = U_{\text{в}} / (\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \Pi_{\text{с}}).$$

4.4. Устанавливается средняя плотность тока в обмотке НН с учетом материала провода. Изоляционные материалы, принятые к использованию, относятся к классу нагревостойкости А, поэтому устанавливается расчетная температура 75 °С.

Удельные электрические сопротивления проводов при 75°С, А/м<sup>2</sup>:

- для меди  $\rho_{\text{м}75} = 2,17 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;
- для алюминия  $\rho_{\text{а}75} = 4,00 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

$$J_{\text{нн}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \rho_{75}} \cdot k_r \cdot \frac{P_k \cdot U_{\text{ф,нн}}}{S \cdot D_{12} \cdot W_{\text{нн}}},$$

где коэффициент  $k_r$  определяется по табл. 10.

Полученное значение сопоставляется с рекомендуемой плотностью тока (табл. 11).

В том случае, если полученное значение отличается от рекомендуемого более чем на 5 %, следует принять рекомендуемую величину.

Таблица 10

Значение коэффициента $k_T$				
Мощность, кВА	до 100	160 – 250	250 – 1000	1000-6300
$k_T$	0,97	0,96 – 0,93	0,92 – 0,86	0,85

Таблица 11

Материал обмотки	Средняя плотность тока в обмотках, А/мм <sup>2</sup>				
	Масляные трансформаторы мощностью, кВ·А				
	25 - 40	63 - 630	1000 - 6300	10000 – 16000	25000-80000
Медь	1,8 – 2,2	2,2– 2,8	2,3 – 2,8	2,2 – 2,6	2,2 – 2,6
Алюминий	1,2 – 1,4	1,4– 1,8	1,6 – 1,9	1,2 – 1,5	1,1 – 1,3

#### 4.5. Сечение витка, м<sup>2</sup>

$$P_{в,нн} = I_{ф,нн} / J_{нн}.$$

При выборе проводов необходимо пользоваться стандартными сортаментами. По известному значению сечения витка из стандартного сортамента проводов выбирается ближайшее подходящее по сечению значение. Если сечение витка очень велико и ему не найти соответствия в стандартном сортементе, провод разбивают на ряд параллельных проводов по соответствующим правилам в зависимости от типа обмотки.

Сечению витка  $P_{в,нн}$  в сортементе обмоточного провода обычно соответствует несколько близких сечений провода с различным соотношением сторон  $a$  и  $b$ , что дает возможность широкого варьирования при размещении витков в катушке. При этом должны соблюдаться следующие условия:

- общее количество катушек должно быть четным;

- регулировочные витки должны быть уложены в отдельные катушки;
- общая высота (осевой размер) обмотки после сушки и опрессовки должен быть не более  $H_0$ .

Подобранные размеры провода записывают следующим образом:

$$\text{марка провода } n_{\text{пр}} \frac{a \times b}{a' \times b'} \times \Pi_{\text{пр}(НН,ВН)},$$

где  $a$  и  $b$  - размеры провода без изоляции;

$a'$  и  $b'$  - размеры провода с изоляцией;

$n_{\text{пр}}$  - количество элементарных проводников в эффективном;

$\Pi_{\text{пр}(ин;вн)}$  - сечение голого провода.

Устанавливается размер по высоте окна  $b'$  и размер по ширине окна  $a'$ .

Двухсторонняя толщина изоляции проводов зависит от марки провода и его размеров.

Для круглого провода поступают аналогично. Подобранные размеры провода записывают следующим образом:

$$\text{марка провода } n_{\text{пр}} \frac{d}{d'} \times \Pi_{\text{пр}(ВН,НН)},$$

где  $d$  и  $d'$  - диаметры провода без изоляции и с изоляцией, соответственно;

$n_{\text{пр}}$  - количество элементарных проводников в эффективном;

$\Pi_{\text{пр}(вн;нн)}$  - сечение провода без изоляции.

4.6. Осевой размер (высота) канала в трансформаторах мощностью до 6300 кВА и рабочим напряжением не более 35 кВ в среднем равен  $h_{\text{кан}}=0,005$  м.

Полное сечение витка из  $n_{\text{пр}}$  параллельных проводов (или сечение одного эффективного проводника),  $\text{м}^2$

$$\Pi_{\text{в,нн}} = n_{\text{пр}} \cdot \Pi_{\text{пр,нн}}.$$

4.7. Уточненная плотность тока,  $A/m^2$

$$J_{\text{нн}}=I_{\text{ф,нн}}/\Pi_{\text{в,нн}}.$$

4.8. Число катушек на одном стержне в случае, когда каналы выполнены между всеми катушками (целое число),

$$n_{\text{кат}}=(H_0+h_{\text{кан}})/(b'+h_{\text{кан}}).$$

При постоянном числе витков обмотки НН подбирается такое целое число катушек, которое обеспечило бы целое число витков в катушке.

Уточненное число витков в катушке

$$W_{\text{кат}}=W_{\text{нн}}/n_{\text{кат}}.$$

4.9. Проверяется высота обмотки с каналами между всеми катушками, м

$$H_{0,\text{нн}}=b'n_{\text{кат}}+K_y(h_{\text{кан}}(n_{\text{кат}}-2)+h_{\text{канр}}),$$

где коэффициент усадки  $K_y$  в среднем можно принять равным 0,93, а высота канала в месте разрыва обмотки может быть принята равной

$$h_{\text{канр}}=0,009 \text{ м}.$$

Полученное значение  $H_{0,\text{нн}}$  при правильно определенных размерах, не должно быть больше  $H_0$ , тогда обмотка сможет разместиться в выбранном габарите. В противном случае следует уменьшить размер элементарного проводника по высоте  $b'$ , установив больший размер по ширине  $a'$  при том же сечении элементарного проводника и снова повторить расчет.

4.10. Радиальный размер обмотки, м

$$a_1=a' n_{\text{пр}} W_{\text{кат}}.$$

4.11. Внутренние и наружные диаметры обмотки НН, внутренний диаметр обмотки ВН.

Ширина канала между обмоткой и стержнем  $a_{01}$ , м (табл. 4).

Внутренний диаметр обмотки НН, м

$$D'_1 = D_0 + 2a_{01}.$$

Наружный диаметр обмотки НН, м

$$D''_1 = D'_1 + 2a_1.$$

Внутренний диаметр обмотки ВН, м

$$D'_2 = D''_1 + 2a_{12}.$$

### Обмотка высшего напряжения

4.12. Расчет обмоток ВН начинают с определения числа витков, необходимого для получения номинального напряжения и напряжения всех ответвлений.

Число витков при номинальном напряжении

$$W_{\text{ВН}} = U_{\text{ф,ВН}} / U_{\text{В}}.$$

Полученное значение округляется до целого числа, для многослойных обмоток, желательно, кратного числу слоев, чтобы слои имели одинаковое число витков.

4.13. Число витков на одну ступень регулирования  $W_{\text{р}}$ , устанавливается из положения, что регулирование в обмотке осуществляется в пределах  $\pm 2,5$  % от номинального значения напряжения:

$$W_{\text{р}} = (2,5 \% / 100 \%) W_{\text{ВН}} = 0,025 W_{\text{ВН}}.$$

Полученное значение округляется до целого числа.

4.14. Число витков на ответвлениях.

$$+ 5 \% W_{\text{ВН}} = W_{\text{ВН}} + 2 W_{\text{р}};$$

$$+ 2,5 \% W_{\text{ВН}} = W_{\text{ВН}} + W_{\text{р}};$$

$$- 2,5 \% W_{\text{ВН}} = W_{\text{ВН}} - W_{\text{р}};$$

$$- 5 \% W_{\text{ВН}} = W_{\text{ВН}} - 2 W_{\text{р}}.$$

4.15. Средняя плотность тока в обмотке ВН с учетом материала провода, А/м<sup>2</sup>

$$J_{\text{ВН}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \rho_{75}} \cdot k_r \cdot \frac{P_k \cdot U_{\phi, \text{вн}}}{S \cdot D_{12} \cdot W_{\text{вн}}}.$$

Полученное значение сопоставляется с рекомендуемой плотностью тока. В том случае, если полученное значение отличается от рекомендуемого, более чем на 5 %, следует принять рекомендуемую величину. Приняв рекомендуемую величину, вы увеличиваете основные размеры трансформатора.

При обмотках, выполненных из одного материала, плотность тока в обмотке НН и ВН практически совпадают. Если обмотки выполнены из разных материалов, то плотности тока в обмотках трансформаторов серии ТМ могут отличаться друг от друга в пределах  $\pm 20$  %. Следует отметить, что одновременное наличие в баке трансформатора меди и алюминия вызывает процессы коррозии.

4.16. Ориентировочное сечение витка, м<sup>2</sup>

$$\Pi_{\text{в,вн}} = I_{\phi, \text{вн}} / J_{\text{вн}}.$$

По установленному значению  $\Pi_{\text{в,вн}}$  из стандартного сортамента проводников выбирается ближайшее подходящее по сечению значение размеров проводника.

4.17. Осевой размер (высота) канала в трансформаторах мощностью до 6300 кВА и рабочим напряжением не более 35 кВ в среднем равен

$$h_{\text{кан}} = 0,005 \text{ м.}$$

4.18. Полное сечение одного эффективного проводника, м<sup>2</sup>:

$$\Pi_{\text{в,вн}} = n_{\text{прв}} \Pi_{\text{пр,вн}}.$$

4.19. Плотность тока, А/м<sup>2</sup>

$$J_{\text{вн}} = I_{\phi, \text{вн}} / \Pi_{\text{в,вн}}.$$

4.20. Число катушек на одном стержне для случая, когда каналы

предусмотрены между всеми катушками (целое число):

$$n_{\text{кат}} = (H_0 + h_{\text{кан}}) / (b' + h_{\text{кан}}).$$

При постоянном числе витков обмотки ВН подбирается такое целое число катушек которое обеспечило бы целое число витков в катушке.

4.21. Число витков в катушке

$$W_{\text{кат}} = W_{\text{ВН}} / n_{\text{кат}}.$$

4.22. Уточненная высота обмотки, м

$$H_{0,\text{ВН}} = b' n_{\text{кат}} + K_y (h_{\text{кан}} (n_{\text{кат}} - 2) + h_{\text{канр}}),$$

где коэффициент усадки в среднем можно принять равным  $K_y = 0,93$ , а высота канала в месте разрыва обмотки может быть принята равной

$$h_{\text{канр}} = 0,009 \text{ м.}$$

Полученное значение  $H_{0,\text{ВН}}$ , при правильно определенных размерах, не должно быть больше  $H_0$ , тогда обмотка сможет разместиться в выбранном габарите. В противном случае следует уменьшить размер элементарного проводника по высоте  $b'$ , установив больший размер по ширине  $a'$  при том же сечении элементарного проводника, и снова повторить расчет.

4.23. Радиальный размер обмотки, м

- без экрана

$$a_2 = a' n_{\text{пр}} \cdot W_{\text{кат}};$$

- с экраном

$$a'_2 = a_2 + 0,005.$$

4.24. Наружный диаметр обмотки  $\text{ВН}_2$  м

- без экрана

$$D''_{26} = D'_2 + 2 a_2;$$



- с экраном

$$D''_2 = D'_2 + 2 a'_2.$$

## 5. Уточненные размерные соотношения

5.1. Ширина канала, м

$$a_p = a_{12} + (a_1 + a_2) / 3.$$

5.2. Средний диаметр между обмотками ВН и НН, м

$$D_{12} = D''_1 + a_{12}.$$

5.3. Высота окна выбирается исходя из условия размещения катушек на стержне. Устанавливается величина высоты наибольшей катушки, м

$$H_o = \max(H_{o, \text{нн}}, H_{o, \text{вн}}).$$

5.4. Изоляционные расстояния  $h_{01}$  и  $h_{02}$  между обмотками НН и ВН от ярма устанавливаются в зависимости от мощности трансформатора и величины испытательного напряжения (табл. 3 и 4).

5.5. Полная высота окна  $H$  с учетом изоляции устанавливается по высоте катушек, м

$$H_{\text{нн}} = H_{o, \text{нн}} + 2 \cdot h_{01};$$

$$H_{\text{вн}} = H_{o, \text{вн}} + 2 \cdot h_{02};$$

$$H = \max(H_{\text{нн}}, H_{\text{вн}}).$$

5.6. Коэффициент, устанавливающий соотношения между основными размерами,

$$\beta = \pi D_{12} / H_o.$$

Полученное значение  $\beta$  сравнивается с ранее принятым  $\beta$

$$\Delta_\beta = \left(1 - \frac{\beta_o}{\beta}\right) \cdot 100$$

Полученное значение  $\Delta_{\beta}$  должно быть не более  $\pm 10\%$ , что говорит об отсутствии в расчетах грубых арифметических ошибок. В том случае, если величина  $\Delta_{\beta}$  более  $\pm 10\%$ , следует внимательно проверить результаты вычислений, а затем вернуться к определению основных размеров и вновь повторить расчет до выполнения данного условия.

5.7. Расстояние между осями соседних стержней, м

$$A = D''_2 + a_{22},$$

где  $a_{22}$  определяется по табл. 4.

5.8. Длина магнитопровода, м

$$l_m = 2 A + D_0.$$

5.9. Расстояние между крайними витками с током обмоток НН и ВН, м

$$h_x = | H_{0, \text{НН}} - H_{0, \text{ВН}} |.$$

Если полученное значение  $h_x < 0,001$  м, то можно принять  $h_x = 0$ .

5.10. Отношение размеров  $h_x$  и  $H_0$

$$x = h_x / H_0.$$

Все основные геометрические размеры трансформатора определены. После этого выполняется эскиз магнитной системы.

5.11. Коэффициент рассеяния

$$\sigma = (a_{12} + a_1 + a_2) / \pi H_0.$$

5.12. Коэффициент, учитывающий отклонение реального поля от идеального (коэффициент Роговского),

$$k_p = 1 - \sigma (1 - e^{-1/\sigma}).$$

5.13. Коэффициент учёта неравномерного распределения витков по высоте может быть принят  $k_q = 1$ .

5.14. Коэффициенты для расчета добавочных потерь

$$\beta_{д,нн} = k_p \cdot H_{о,нн} / H_o ,$$
$$\beta_{д,вн} = k_p \cdot H_{о,вн} / H_o .$$

5.15. Коэффициенты, учитывающие добавочные потери от вихревых токов, вызванных собственными магнитными полями рассеяния обмоток

$$k_{д.нн} = 1 + \frac{\pi \cdot f \cdot 2\sqrt{2}}{\rho_{75}} \cdot \beta_{д.нн}^2 \cdot (\Pi_{в.нн})^4 \cdot W_{нн}^2 ,$$
$$k_{д.вн} = 1 + \frac{\pi \cdot f \cdot 2\sqrt{2}}{\rho_{75}} \cdot \beta_{д.вн}^2 \cdot (\Pi_{в.вн})^4 \cdot W_{вн}^2 .$$

6. Массы и активные сопротивления обмоток

6.1. Средний диаметр обмоток, м

$$D_{ср,нн} = 0,5 (D'_1 + D''_1);$$
$$D_{ср,вн} = 0,5 (D'_2 + D''_2).$$

6.2. Полная длина провода в катушках, м

$$l_{нн} = \pi D_{ср,нн} W_{нн};$$
$$l_{вн} = \pi D_{ср,вн} W_{вн}.$$

6.3. Объем всех проводников, м<sup>3</sup>

$$V_{нн} = c l_{нн} \Pi_{в,нн};$$
$$V_{вн} = c l_{вн} \Pi_{в,вн}.$$

6.4. Масса обмотки НН и ВН, кг

$$M_{нн} = \gamma V_{нн};$$
$$M_{вн} = \gamma V_{вн},$$

где удельная массовая плотность, кг/м<sup>3</sup>:

алюминия  $\gamma=2700$ ;

меди  $\gamma=8900$ .

6.5. Активное сопротивление обмоток при расчетной температуре,  
Ом

$$R_{\text{нн}}=(\rho_{75} l_{\text{нн}})/\Pi_{\text{в,нн}};$$

$$R_{\text{вн}}=(\rho_{75} l_{\text{вн}})/\Pi_{\text{в,вн}}.$$

### 7. Массы и активные сопротивления отводов

В процессе расчетов может быть произведено приближенное определение массы отводов. В силовых трансформаторах общего назначения потери в отводах составляют, как правило, не более 5–8 % от потерь КЗ, а добавочные потери в отводах - не более 5 % от основных потерь в них. Поэтому можно ограничиться полученными ниже значениями.

7.1. Общая длина проводов в отводах при принятом сечении отвода,  
м

$$(\Pi_0=\Pi_b):$$

при соединении обмоток «звезда» -  $l_0=7,5 H_0$ ;

при соединении обмоток «треугольник» -  $l_0=14 H_0$ .

7.2. Объем всех отводов, м<sup>3</sup>

$$V_{\text{о,нн}}=c l_{\text{о,нн}} \Pi_{\text{в,нн}};$$

$$V_{\text{о,вн}}=c l_{\text{о,вн}} \Pi_{\text{в,вн}}.$$

7.3. Масса отводов (учитывая материал обмоток), кг

$$M_{\text{о,нн}}=\gamma V_{\text{о,нн}};$$

$$M_{\text{о,вн}}=\gamma V_{\text{о,вн}}.$$

7.4. Активное сопротивление отводов при расчетной температуре,  
Ом

$$R_{\text{о,нн}}=(\rho_{75} l_{\text{о,нн}})/\Pi_{\text{в,нн}};$$

$$R_{\text{о,вн}}=(\rho_{75} l_{\text{о,вн}})/\Pi_{\text{в,вн}}.$$

## 8. Параметры короткого замыкания

### 8.1. Основные потери в обмотках, Вт

$$P_{\text{осн,нн}} = m \cdot R_{\text{нн}} \cdot I_{\text{ф,нн}}^2;$$

$$P_{\text{осн,вн}} = m \cdot R_{\text{вн}} \cdot I_{\text{ф,вн}}^2.$$

### 8.2. Основные потери в отводах, Вт

$$P_{\text{от,нн}} = m \cdot R_{\text{о,нн}} \cdot I_{\text{ф,нн}}^2;$$

$$P_{\text{от,вн}} = m \cdot R_{\text{о,вн}} \cdot I_{\text{ф,вн}}^2.$$

8.3. Потери в стенках бака и других стальных конструкциях достаточно точно можно определить по приближенной зависимости, Вт

$$P_{\text{б}} = 10 \cdot \kappa_{\text{б}} \cdot S,$$

где коэффициент  $\kappa_{\text{б}}$  определяется по табл. 12.

Таблица 12

Коэффициент учета потерь в стенках бака

Полная мощность, кВА	до 1000	до 4000	до 10000
Коэффициент $\kappa_{\text{б}}$	0,015	0,03	0,04

### 8.4. Полные потери короткого замыкания, Вт

$$P_{\text{кз}} = k_{\text{д,нн}} P_{\text{осн,нн}} + k_{\text{д,вн}} P_{\text{осн,вн}} + P_{\text{от,нн}} + P_{\text{от,вн}} + P_{\text{б}}.$$

Полученное  $P_{\text{кз}}$  сравнивается с  $P_{\text{к}}$ , установленным в задании, %:

$$\Delta P_{\text{кз}} = (1 - P_{\text{к}} / P_{\text{кз}}) \cdot 100.$$

В соответствии с ГОСТ 1516.1-87 отклонение расчетной величины потерь короткого замыкания от нормативной должно составлять не более  $\pm 10\%$ .

### 8.5. Напряжение короткого замыкания:

- активная составляющая, %

$$u_a = P_{кз}/(10 \cdot S);$$

- реактивная составляющая, %

$$u_p = \frac{7,9 \cdot f \cdot S \cdot \beta \cdot a_p \cdot k_p \cdot k_q \cdot 10^{-1}}{U_B^2},$$

где  $U_B$  - ЭДС витка, В;

$S$  - мощность одной фазы кВА;

$a_p$  - ширина канала, м.

Полное напряжение КЗ, %

$$u_{кз} = \sqrt{u_a^2 + u_p^2}.$$

8.6. Производится сравнение полученного  $u_{кз}$  с  $u_k$ , установленным в задании, %

$$\Delta u_{кз} = (1 - u_k / u_{кз}) \cdot 100.$$

В соответствии с ГОСТ 1516.1-87 отклонение расчетной величины напряжения короткого замыкания от нормативной должно быть не более чем  $\pm 10$  %.

9. Расчёт температуры нагрева обмоток при коротком замыкании

9.1. Действующее значение установившегося тока КЗ, А

$$I_{к,у} = (100 / u_{кз}) I_{ф,вн}$$

где  $I_{ф,вн}$  - номинальный ток обмотки, А.

9.2. Коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую,

$$k_{\max} = 1 + e^{\frac{-\pi u_a}{u_p}}.$$

### 9.3. Мгновенное максимальное значение тока КЗ, А

$$i_{k,max} = \sqrt{2} \cdot k_{max} I_{k,y}$$

### 9.4. Допустимая продолжительность протекания тока КЗ

$$t_k = t_{k,max} I_{k,y}^2 / i_{k,max}^2,$$

где допустимая продолжительность внешнего короткого замыкания принимается  $t_{k,max}=15$  с.

Согласно ГОСТ 11677-85 наибольшую продолжительность КЗ на зажимах трансформаторов принимают на стороне обмотки ВН с напряжением до 35 кВ длительностью 4 с, на стороне с напряжением больше или равном 110 кВ и выше 3 с.

### 9.5. Температура обмотки через $t_k=4$ с после возникновения КЗ (для медных обмоток)

$$\theta_{k,m} = \theta_n + 53,6 t_k / (u_k / J_{вн})^2 - t_k,$$

где  $J_{вн}$  - плотность тока при номинальной нагрузке, А/мм<sup>2</sup>;

$\theta_n=90$  °С - начальная температура обмотки, установленная ГОСТ.

Предельно допустимые температуры обмоток при КЗ для различных классов нагревостойкости материалов установлены в ГОСТ 11677-85 (табл. 13).

Таблица 13

Предельно допустимая температура

Охлаждение	Масляное	
	Медь	Алюминий
Материал обмотки		
Класс изоляции	А	
Макс. доп. температура, °С	250	200

Обычно защита отключает трансформатор от сети значительно раньше, чем температура обмоток достигает предельно допустимой величины.

9.6. Время достижения температуры  $250^{\circ}\text{C}$ , для медных обмоток, с

$$t_{к250} \approx 2,5 (u_k / J_{вн})^2,$$

где  $J_{вн}$  - плотность тока при номинальной нагрузке, А/мм<sup>2</sup>.

## 10. Расчёт механических сил в обмотках

Наибольшую механическую нагрузку испытывают внутренние обмотки НН и в них наиболее часто наблюдается потеря радиальной устойчивости.

10.1. Радиальная механическая сила на одну обмотку, Н

$$F_{яp} = 0,628 \cdot (i_{к,маx} \cdot W_{вн})^2 \cdot \beta \cdot k_p \cdot 10^{-6}.$$

10.2. Осевая сила, Н

$$F_{ос} = F_{яp} \cdot a_p / (2 \cdot H_0).$$

10.3. Дополнительная осевая сила, Н

$$F_{ос,д} = F_{яp} \cdot h_x / (a_p \cdot k_p \cdot k_x).$$

Значение  $k_x$  устанавливается в зависимости от расположения обмоток. В случае если величина  $h_x = 0$ , то  $k_x = 1$ . Если  $h_x > 0$ , то значение коэффициента  $k_x \approx 4$ .

10.4. Максимальная сжимающая сила, Н

$$F_{сж} = F_{ос} + F_{ос,д}.$$

10.5. Напряжение на сжатие в проводниках обмоток, мПа

$$\sigma_{сжнн} = F_{сж} \cdot 10^{-6} / (2 \cdot \pi \cdot W_{нн} \cdot \Pi_{в,нн}).$$

Для обеспечения механической стойкости обмоток напряжение на сжатие не должно быть более 30 мПа для медных обмоток и 15 мПа для алюминиевых обмоток.



## 11. Масса участков магнитной системы

11.1. Усредненное значение удельной массовой плотности стали, кг/м<sup>3</sup>

$$\gamma_{ст} = 7650.$$

11.2. По принятому размеру  $D_0$  по табл. 7 определяем:

- геометрическое сечение ярма  $\Pi_{я,с}$ , м<sup>2</sup>;

- объем угла  $V_y$ , м<sup>3</sup>;

- высоту ярма (по ширине наибольшего листа)  $h_я$ , м.

11.3. Масса угла, кг

$$M_y = V_y K_3 \gamma_{ст}.$$

11.4. Масса стержней, кг

$$M_c = c \cdot \Pi_{ф,с} K_3 (H + h_я) \cdot \gamma_{ст} - c \cdot M_y,$$

где  $c = m$  - число стержней;

активное сечение стержня, м<sup>2</sup>

$$\Pi_c = \Pi_{ф,с} K_3.$$

11.5. Масса ярм, кг

$$M_я = 4 \cdot \Pi_{я,с} \cdot K_3 \cdot A \gamma_{ст} - 4 \cdot M_y,$$

где активное сечение ярма, м<sup>2</sup>

$$\Pi_я = \Pi_{я,с} K_3.$$

11.6. Масса стали, кг

$$M_{ст} = M_c + M_я + 2 \cdot c \cdot M_y.$$

11.7. Суммарная масса активных материалов, кг

$$\Sigma M = M_{ст} + M_{нн} + M_{вн} + M_{о,нн} + M_{о,вн}.$$

## 12. Магнитная цепь и параметры холостого хода

12.1. Магнитная индукция в стали стержня сердечника, Тл

$$B_C = \frac{U_B}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \Pi_C}.$$

12.2. Магнитная индукция в стали ярма, Тл

$$B_Y = \frac{U_B}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \Pi_Y}.$$

12.3. Магнитная индукция в углах, Тл:  $B_Y \approx B_C$ .

12.4. Средняя индукция в косом стыке, Тл

$$B_{з,к} = (B_C + B_Y) / 2\sqrt{2}.$$

12.5. Удельные магнитные потери в электротехнической стали могут быть установлены по табл. 14.

Коэффициенты увеличения потерь для углов с прямыми  $K_{пр}$  и косыми  $K_{к}$  стыками устанавливаются по табл. 15.

При резке листов, штамповке отверстий и закатке заусениц получается наклеп, магнитные свойства стали изменяются и потери возрастают. Мерой борьбы с наклепом является отжиг листов стали после механической обработки, который почти полностью восстанавливает магнитные свойства стали.

Таблица 14

## Удельные потери для сталей марок 3404,3405

В, Тл	$\rho_{с,я}$ , Вт/кг		$q_{с,я}$ , ВА/кг		$q_{з,с,я}$ , ВА/м <sup>2</sup>	
	0,35 мм	0,30 мм	0,35 мм	0,30 мм	3404	3405
1,0	0,475	0,425	0,548	0,525	1000	900
1,1	0,575	0,52	0,650	0,620	2500	2300
1,12	0,595	0,531	0,671	0,640	2800	2360
1,14	0,615	0,553	0,693	0,661	3150	2620
1,16	0,631	0,572	0,714	0,681	3450	2980
1,18	0,655	0,590	0,731	0,702	3690	3340
1,2	0,675	0,611	0,752	0,722	4000	3700
1,3	0,785	0,715	0,900	0,850	7400	6000
1,4	0,930	0,835	1,060	1,000	11400	9200
1,5	1,100	0,970	1,330	1,205	16600	13800
1,52	1,134	1,004	1,520	1,263	17960	14760
1,54	1,168	1,038	1,486	1,321	19320	15720
1,56	1,207	1,074	1,575	1,383	20700	16800
1,58	1,251	1,112	1,675	1,449	22100	18000
1,6	1,295	1,150	1,775	1,525	23500	19200
1,62	1,353	1,194	1,956	1,645	25100	20480
1,64	1,411	1,238	2,131	1,775	26700	21760
1,66	1,472	1,288	2,556	1,956	28600	23160
1,68	1,536	1,344	3,028	2,188	30800	24680
1,7	1,600	1,400	3,400	2,420	33000	27000
1,75	1,784	1,554	6,370	4,238	39300	31920
1,8	2,000	1,740	11,50	7,400	48000	37000

Таблица 15

## Увеличение потерь и намагничивающей мощности в углах

В, Тл	Коэффициент увеличения потерь		Коэффициент увеличения намагничивающей мощности	
	Прямой стык $K_{пр}$	Косой стык $K_{к}$	прямой стык $K'_{пр}$	косой стык $K'_{к}$
1,60	2,90	1,80	15,1	3,01
1.61	2,84	1,78	14,4	2,95
1,62	2,79	1,74	13,8	2,87
1.63	2,69	1,67	13,6	2,68
1,64	2,61	1,59	13,4	2,59
1,65	2,54	1,51	13,1	2,48
1.66	2,47	1,48	12,7	2,39
1,67	2,41	1,45	12,2	2,31
1.68	2,38	1,41	11,8	2,23
1,69	2,34	1,38	11,2	2,17
1.70	2,31	1,34	10,3	2,07

## 12.6. Потери холостого хода (в стали магнитопровода), Вт

$$P_0 = K_1 \cdot \left( M_c \cdot P_c + M_y \cdot P_y + M_y \cdot K_{пр} \cdot n_{прс} \cdot \frac{P_c + P_y}{2} + M_y \cdot K_k \cdot n_k \cdot \frac{P_c + P_y}{2} \right),$$

где - число углов с прямыми стыками листов  $n_{прс}$ ;

- число углов с косыми стыками листов  $n_k$ ;

- коэффициенты, учитывающие добавочные потери в магнитопроводе:

$K_1=1,1$  - при отжиге листов;  $K_1=1,17$  - при отсутствии отжига.

12.7. Полученное значение потерь сравнивается с заданным  $P_x$ , %:

$$\Delta P_0 = (1 - P_x / P_0) \cdot 100.$$

Согласно ГОСТ 11920-85 отклонение расчётной величины от нормированной не должно превышать  $\pm 15$  %.

## 12.8. Удельные намагничивающие потери (табл. 13):

- по индукции в стержнях  $q_c$ ;

- по индукции в яре  $q_y$ .

12.9. Удельные намагничивающие мощности (табл. 13)

- по средней индукции в косом стыке  $q_{3,к}$ ;

- по индукции в стержне для прямого стыка стержня  $q_{3,с}$ ;

- по индукции в ярме для прямого стыка ярма  $q_{3,я}$ .

12.10. Коэффициенты, учитывающие увеличение намагничивающей мощности в углах с прямыми и косыми стыками, принимаются из табл.14 по значению индукции в углах  $B_y$ . Устанавливаются коэффициенты  $K'_{пр}$  и  $K'_к$ .

12.11. Сумарная намагничивающая мощность для всех стыков, ВАр

$$Q_3 = \Pi_C \cdot q_{3,с} \cdot n_{3,с} + q_{3,я} \cdot n_{3,я} \cdot \Pi_я + n_{3,к} \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\Pi_C + \Pi_я}{2} \cdot q_{3,к},$$

где для трехстержневого трансформатора  $n_{3,с}=1$ ;  $n_{3,я}=2$ ;  $n_{3,к}=4$ .

12.12. Намагничивающая мощность всей магнитной системы, ВАр

$$Q_x = K'_2 \cdot \left[ M_C \cdot q_C + M_я \cdot q_я + M_y \cdot \frac{q_C + q_я}{2} \cdot (n_{прс} \cdot K'_{пр} + n_к \cdot K'_к) + Q_3 \right]$$

где  $K'_2=1,65$  - при отжиге листов,  $K'_2=2,3$  - при отсутствии отжига.

12.13. Относительное значение тока холостого тока, %

$$i_0 = Q_x / (10 \cdot S),$$

где  $Q_x$  - намагничивающая мощность всей магнитной системы, ВАр.

Полученное значение тока холостого хода сравнивается с установленным в задании, %

$$\Delta i_0 = (1 - i_x / i_0) 100.$$

Согласно ГОСТ 11920-85 отклонение расчётной величины от нормированной не должно превышать  $\pm 15\%$ .

Относительное значение активной составляющей тока, %

$$i_{0,a} = P_0 / (10 \cdot S).$$

Относительное значение реактивной составляющей тока, %

$$i_{0,p} = \sqrt{i_0^2 - i_{0,a}^2}.$$

13. Коэффициент полезного действия трансформатора при номинальной нагрузке

13.1. Коэффициент нагрузки при номинальном режиме

$$k_{\beta} = \frac{I_2}{I_{2H}} = 1,$$

где номинальные величины представлены линейными значениями.

13.2. Суммарные потери трансформатора, Вт:

$$\Sigma P \approx P_0 + k_{\beta} \cdot P_{K3}.$$

13.3. Изменение напряжения в процентах от номинального вторичного напряжения, %

$$\Delta u \approx k_{\beta} \cdot (u_a \cdot \cos \varphi_2 + u_p \cdot \sin \varphi_2).$$

Напряжение на выводах вторичной обмотки, В

$$U_2 = U_{2\text{ном}} \cdot (1 - \Delta u / 100),$$

где номинальные величины представлены линейными значениями.

13.4. Коэффициент полезного действия, %

$$\eta = \left( 1 - \frac{P_0 + k_{\beta}^2 \cdot P_{K3}}{k_{\beta} \cdot S \cdot \cos \varphi_2 + P_{K3} \cdot k_{\beta}^2 + P_0} \right) \cdot 100$$

Коэффициент нагрузки, при котором  $\eta = \eta_{\text{max}}$

$$\beta_{\text{max}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{K3}}}.$$

Максимальное значение коэффициента полезного действия, %

$$\eta_{\max} = 100 - \frac{200 P_0}{\sqrt{\frac{P_0}{P_{K3}} \cdot S \cdot \cos \rho_2 + 2 \cdot P_0}}$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спроектированный трансформатор должен соответствовать требованиям ГОСТ, предъявляемым к параметрам и рабочим свойствам трансформаторов.

Отклонение расчетной величины от нормированной, заданной в техническом задании на проектирование, может отличаться на установленное ГОСТ значение.

Соответствие параметров и рабочих свойств требованиям ГОСТ представляют в табличной форме (табл. 16).

Таблица 16

Результаты сравнения основных показателей

Рабочие свойства	Заданное значение	Расчетное значение	Отклонение, %	Допуск. отклонение
Напряжение КЗ, %				±10%
Ток ХХ, %				±15%
Потери КЗ при номинальном токе, кВт				±10%
Потери ХХ при номинальном напряжении, кВт				±15%

На основании приведенных данных можно заключить, что спроектированный трансформатор...соответствует... (не соответствует)... требованиям ГОСТ 12022 и .....может (не может)..... быть использован в качестве силового трансформатора общепромышленного назначения.

## РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вольдек, А.И. Электрические машины. Машины переменного тока: учеб. для вузов/ А.И. Вольдек, В.В. Попов: - СПб.: Питер, 2007.
2. Копылов, И.П. Электрические машины.: учеб. для вузов/ И.П. Копылов.- Изд. 4-е, испр. – М.: Высш.шк., 2004.
3. Электротехнический справочник: в 4 т./ под общ.ред. В.Г. Герасимова и [др.] - 9-е изд.,стер. - М.: Изд-во МЭИ, 2003.
4. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов/ П.М. Тихомиров. 5-е изд.,перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Гончарук, А.Н. Расчет и конструирование трансформаторов/ А.Н. Гончарук. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Атабеков, В.А. Ремонт трансформаторов, электрических машин и аппаратов/ В.А. Атабеков. - М.: Высш. школа, 1994.
7. ГОСТ 16110-82 Трансформаторы силовые. Термины и определения.
8. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.



## ПРИЛОЖЕНИЕ

Санкт-Петербургский горный университет  
Кафедра электроэнергетики и электромеханики  
Направление подготовки 13.03.02  
Профиль подготовки «Электроснабжение»  
З А Д А Н И Е

на курсовой проект по дисциплине "Электрические машины"  
Студент \_\_\_\_\_

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель \_\_\_\_\_

(фамилия, имя, отчество, должность)

Тема проекта: *Трансформатор трехфазный двухобмоточный*

Срок сдачи студентом законченного проекта:

Задача проекта и исходные условия

*Спроектировать трехфазный силовой двухобмоточный трансформатор с естественным масляным охлаждением для эксплуатации в условиях умеренного климата, соответствующий следующим техническим характеристикам:*

- мощность \_\_\_\_\_ кВА;
- частота сети 50 Гц;
- обмотка ВН \_\_\_\_\_ кВ;
- обмотка НН \_\_\_\_\_ кВ;
- схема и группа соединения обмоток \_\_\_\_\_ ;
- потери короткого замыкания \_\_\_\_\_ Вт;
- напряжение короткого замыкания \_\_\_\_\_ %;
- потери холостого хода \_\_\_\_\_ Вт;
- ток холостого хода \_\_\_\_\_ %;
- коэффициент мощности нагрузки 0,8.

*Магнитопроводы трансформаторов могут быть изготовлены из штампованных листов холоднокатаных сталей марок 3404, 3405 толщиной 0,35 и 0,5 мм. В качестве материалов для изготовления обмоток используются медные или алюминиевые провода прямоугольного или круглого сечения. Электроизоляционные материалы, принятые к использованию, относятся по нагревостойкости к классу А.*

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ .....	4
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА.....	6
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА.....	10
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	38
РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	39
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	40

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**  
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА**

*Методические указания к курсовому проектированию  
для студентов бакалавриата направления 13.03.02*

Сост.: *А.В. Каган, М.С. Ковальчук*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
электроэнергетики и электромеханики

Ответственный за выпуск *А.В. Каган*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 26.03.2019. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 2,4. Усл.кр.-отгт. 2,4. Уч.-изд.л. 2,0. Тираж 50 экз. Заказ 262. С 99.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2