

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Энергетика и технология металлов»

**РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОГО СУХОГО СИЛОВОГО  
ТРАНСФОРМАТОРА**

Методические указания к выполнению курсового проекта  
по дисциплине «Электрические машины»  
для студентов направления 13.03.02  
«Электроэнергетика и электротехника»  
(профиль «Электроснабжение»)

Курган 2018

Кафедра: «Энергетика и технология металлов».

Дисциплина: «Электрические машины» для студентов направления  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение»).

Составил: доцент, канд. техн. наук В.И. Мошкин

Составлены на основе переработанных и дополненных методических указаний «Расчёт трёхфазного сухого силового трансформатора». Методические указания к выполнению курсовой работы по курсу «Электромеханика» для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения. – Курган : Изд-во КГУ, 2005. – 63 с.

Утверждены на заседании кафедры «30» августа 2017 г.

Рекомендованы методическим советом университета «20» декабря 2017 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Методические указания соответствует учебной программе «Электрические машины» по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение»).

В методических указаниях изложена методика проектирования сухих силовых трансформаторов с плоской магнитной системой из холоднокатаной электротехнической стали, с обмотками из медного и алюминиевого провода и даны практические примеры. В нем содержатся необходимые для расчета сведения по конструкции магнитных систем, обмоток силовых трансформаторов и справочные материалы. Методика электромагнитного расчета трансформатора базируется на основных положениях книги П.М. Тихомирова [1].

При подготовке учебного издания были использованы и переработаны методические указания к выполнению курсовой работы «Расчет трехфазного сухого силового трансформатора», составленные доцентом кафедры ЭТМ, канд. техн. наук В.Я. Ивановым, преподававшим этот курс в Курганском государственном университете более 20 лет.

В методических указаниях принят следующий порядок изложения материала:

- задачи проектирования;
- требования к содержанию и объему работы (проекта);
- требования к графической части;
- краткая характеристика и расчетные параметры трансформатора, требования к точности расчета;
- алгоритм и рекомендации к расчету;
- оценка эксплуатационных свойств спроектированного трансформатора.

В приложении представлены формы заполнения пояснительной записки и пример расчета трансформатора.

## 1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Проектирование трансформаторов является важной составной частью подготовки студентов по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение»).

Вариант задания на проектирование на бланке формата А4 выдает преподаватель, форма титульного листа пояснительной записки приведена в приложении 1.

## 2 ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Основными задачами проектирования являются:

- систематизация и расширение объема знаний по электрическим машинам;
- получение навыков активного использования теоретических положений при решении практических задач;
- получение навыков работы с литературными, патентными и справочными материалами;

- получение навыков использования стандартов при оформлении материалов работы.

### **3 ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОБЪЕМУ ПРОЕКТА**

В процессе проектирования необходимо:

- изучить литературные материалы по объекту проектирования (трансформатор), составить краткий обзор по изученным материалам;
- согласно заданию выполнить расчеты, оценить эксплуатационные свойства спроектированного трансформатора и дать оценку точности расчёта;
  - составить расчетно-пояснительную записку и оформить графическую часть, поместив ее в среде Компас с основной надписью (Приложение 10).

В расчетно-пояснительную записку (РПЗ) следует помещать следующие разделы в указанной ниже последовательности:

- титульный лист (Приложение 1);
- задание (приводятся все параметры, подлежащие расчету, определяются допуски на основные из них);
  - содержание должно отражать все материалы, представленные к защите. В содержании перечисляют заголовки разделов, подразделов и указывают номера листов (страниц), на которых они начинаются. В конце содержания перечисляют графический материал с указанием «на отдельных листах»);
  - введение (приводятся общие сведения о силовых трансформаторах, области их применения, особенностях эксплуатации);
  - расчетная часть (приводятся необходимые соотношения и результаты предварительных и окончательных расчетов с обоснованием выбора окончательного варианта; расчет эксплуатационных характеристик спроектированного трансформатора);
  - конструктивно-технологическая часть (приводится описание конструкции трансформатора, даются основные сведения по технологии его изготовления и испытаний);
  - заключение (дается краткая оценка полученных результатов, оценка эксплуатационных свойств спроектированного трансформатора, дается сводная таблица всех заданных и рассчитанных величин. Заголовок «Заключение» пишут прописными буквами);
  - список использованных источников (источники в списке нумеруют в порядке их упоминания в тексте пояснительной записки);
  - приложения (помещаются материалы, не вошедшие в основную расчетно-пояснительную записку или графическую часть (схемы испытаний, справочные данные о материалах и т.д.)).

Пояснительная записка выполняется на листах формата А4 в печатном виде (кегель 12-14, *TNR*, через 1...1,5 интервала) по ГОСТ 7.32-2001.

### **4 ТРЕБОВАНИЯ К ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПРОЕКТА**

В графическую часть в среде **Компас** помещать следующие материалы:

- чертеж, показывающий конструкцию обмоток (рис. 2, п. 10.3);
- чертеж центрального пакета магнитопровода (рис. 4, п. 11.1.1), штриховку в зонах стыков на чертеже показывать не следует;
- чертеж, показывающий сечение стержня (рис. 5, п. 11.1.3);
- чертеж, показывающий сечение ярма (рис. 6, п. 11.2.4);
- схему электрическую обмотки высшего напряжения (ВН) одной фазы с ответвлениями (рис. 3, п. 10.4);
- общий вид трансформатора (рис. П9);
- схему электрическую трансформатора с векторной диаграммой напряжений, поясняющей группу трансформатора.

Примечание: на чертежах следует проставить округленные размеры (в мм). Буквенные обозначения можно не показывать.

Общий объем графической части работы составляет 1,0 лист формата А1 (594 x 841 мм), составленных из форматов А4 и А3.

Курсовой проект не содержит выделенной графической части, все графические материалы даются в виде приложений к расчетно-пояснительной записке.

## **5 КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА, РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ РАСЧЕТОВ**

**5.1 Определение трансформатора.** В соответствии с ГОСТ 16110-82 трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования одной системы напряжений в другую.

В наиболее простом варианте трансформатор содержит трёхстержневой магнитопровод, обмотку высшего напряжения (ВН) и обмотку низшего напряжения (НН).

**5.2 Основные параметры силового трансформатора.** Основными параметрами трансформатора являются:

$S_{ном}$  – номинальная мощность, кВ·А;

$U_{ВН}$  – напряжение обмотки ВН (линейное), кВ;

$U_{НН}$  – напряжение обмотки НН (линейное), кВ;

$u_k$  – напряжение короткого замыкания, дано в процентах от  $U_{ВН}$ ;

$i_o$  – ток холостого хода, дан в процентах от тока  $I_{ном}$ ;

$P_k$  – потери короткого замыкания (потери в обмотках), кВт;

$P_o$  – потери холостого хода (потери в магнитопроводе), кВт.

**5.3 Материалы, применяемые в трансформаторостроении.** В качестве материала обмоток в современных трансформаторах используют медь, либо алюминий, а в качестве материала магнитопровода используют холоднокатаную трансформаторную сталь толщиной не более 0,35 мм.

**5.4 Регулирование напряжения.** Для регулирования выходного напряжения трансформаторов используют два вида устройств для переключения витков одной из обмоток, обычно ВН:

- устройство РПН – происходит переключение витков под нагрузкой;
- устройство ПБВ – происходит переключение без возбуждения (без тока).

Для сухих трансформаторов используется устройство ПБВ, что упрощает и удешевляет этот способ переключения, не требуя дугогашения устройства.

**5.5 Основные размеры.** Под основными размерами трансформатора понимают следующие величины:

- $d$  – диаметр стержня, то есть диаметр окружности, в которую вписана ступенчатая фигура пакета стержня магнитопровода;
- $\ell$  - высота обмотки (в осевом направлении);
- $D_{12}$  - средний диаметр витка одноименных фаз обмоток (или средний диаметр осевого канала между этими фазами).

В то же время мощность трансформатора  $S'$ , приходящаяся на один стержень, определяется произведением площади стержня на площадь окна, то есть мощность определяется 4-й степенью линейного размера трансформатора [1]:

$$S' = 2,22f(B_c \cdot j_{cp}) \cdot \Pi_{фс} \cdot \Pi_{ок} \cdot (K_c \cdot K_o),$$

где  $f$  – частота сети;  $B_c$  – амплитуда магнитной индукции в стержне;  $j_{cp}$  – средняя плотность тока в обмотках;  $\Pi_{фс}$  – площадь ступенчатой фигуры магнитопровода;  $\Pi_{ок}$  – площадь окна, занимаемого обмоткой;  $K_c \cdot K_o$  – коэффициенты заполнения магнитопровода и обмоток.

**Примечание:** принятые обозначения величин и их определения приведены в **приложении 2**.

### 5.6 В результате расчета необходимо:

- выбрать конструкцию магнитопровода и главной изоляции;
- определить основные размеры;
- выбрать конструкцию и произвести расчет обмоток ВН и НН;
- определить параметры короткого замыкания ( $i_K$ ;  $P_K$ ), произвести оценку механических усилий при коротком замыкании;
- определить параметры холостого хода ( $P_o$ ;  $i_o$ );
- оценить тепловой режим устройства;
- оценить эксплуатационные свойства спроектированного трансформатора;
- определить массу и стоимость трансформатора.

**5.7 Допустимые отклонения в расчётах.** Полученные в расчете значения должны отличаться от заданных не более, чем на  $\pm 7, 5\%$  для  $i_K$  и  $P_K$  и превышать заданные не более, чем на  $10\%$  для  $P_o$  и  $20\%$  для тока холостого хода  $i_o$ .

## 6 СХЕМА РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА. РЕКОМЕНДАЦИИ

**6.1 Предварительный расчёт.** При предварительных расчетах следует выбрать параметры, конструкцию и материалы согласно заданию на проектирование:

- выбрать конструкцию магнитопровода с креплением ярма балками и прессованием стержня расклиниванием для диаметра стержня до 0,22 м и креплением бандажами из стекловолокна свыше 0,22 м;

- принять план шихтовки магнитной системы с косыми стыками в 4-х и прямыми в 2-х углах;
- принять ступенчатую форму ярма (рис. 1 а) или полуступенчатую (рис. 1 б);

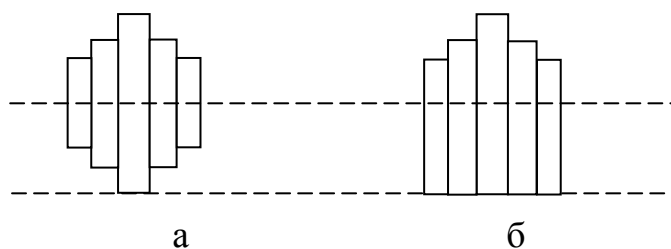


Рис. 1- Форма сечения ярма

- принять технологию сборки магнитной системы на горизонтальном столе с последующей расшихтовкой верхнего ярма для установки катушек обмоток НН и ВН;
- принять конструкцию катушек НН цилиндрической двухслойной для мощности  $S_H \leq 630$  кВ·А и многослойной цилиндрической для  $S_H = 1000$  кВ·А из прямоугольного провода;
- принять конструкцию катушки ВН цилиндрической многослойной из круглого провода для  $S_{ном} \leq 630$  кВ·А и цилиндрической многослойной из прямоугольного провода для  $S_{ном} > 630$  кВ·А [1];
- принять минимальную ширину канала между слоями обмоток, равной 4 мм (если бóльшая ширина не потребуется по условиям охлаждения [1]);
- принять амплитуду индукции  $B_c$  в стержне магнитопровода (предварительно), равной 1,5 Тл.

**Примечание:** найденные из расчетов значения величин необходимо несколько раз уточнять в процессе расчёта по следующим причинам:

- имеется ограниченное число диаметров круглого провода и размеров прямоугольного провода;
- найденное расчетное значение диаметра  $d$  стержня необходимо округлять до значения из нормализованного ряда;
- необходимо иметь целое число витков в катушках обмоток НН и ВН;
- на размер  $d$  стержня влияет величина напряжения обмотки ВН, от которого зависит значение изоляционных зазоров, то есть влияют размеры окна  $l_{ок}$  и соотношение между величинами  $l$  и  $D_{12}$ .

**6.2 Схема расчёта.** Расчет трансформатора рекомендуется вести по следующей схеме:

- определение основных электрических величин (токов, рабочих напряжений, испытательных напряжений);
- определение основных размеров трансформатора (диаметр стержня  $d$ , высота обмотки  $l$ , изоляционные промежутки (таблица 4), предварительный тепловой расчет);
- расчет обмоток высшего ВН и низшего НН напряжений;
- определение параметров короткого замыкания и механических усилий в обмотках при к.з.;
- окончательный размер магнитопровода, определение параметров х. х.;

- оценка теплового режима обмоток;
- определение массы активных материалов и оценка стоимости трансформатора;
- оценка эксплуатационных свойств спроектированного трансформатора.

## 7 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ РАСЧЕТУ ТРАНСФОРМАТОРА

### 7.1 Расчет основных электрических параметров

7.1.1 Мощность одной фазы и стержня, кВ·А,

$$S_{\phi} = S_{\text{НОМ}} / m; \quad S'_1 = S_{\text{НОМ}} / c,$$

где  $m=3$  – число фаз;  $c=3$  – число стержней.

7.1.2 Фазные напряжения и токи:

Сторона НН:  $U_{\text{Ф.НОМ.1}} = U_{\text{НН}} / \sqrt{3}$  – для соединения звездой Y;

$$U_{\text{Ф.НОМ.1}} = U_{\text{НН}} \quad \text{– для соединения треугольником } \Delta;$$

$$I_{\text{Ф.НОМ.1}} = S_{\text{НОМ}} / U_{\text{НН}} \sqrt{3} \quad \text{– для Y;} \quad I_{\text{Ф.НОМ.1}} = S_{\text{НОМ}} / 3U_{\text{НН}} \quad \text{– для } \Delta,$$

где  $U_{\text{НН}}$  взято из задания для обмотки НН.

Сторона ВН:  $U_{\text{Ф.НОМ.2}} = U_{\text{ВН}} / \sqrt{3}$  – для Y;  $U_{\text{Ф.НОМ.2}} = U_{\text{ВН}}$  – для  $\Delta$ ;

$$I_{\text{Ф.НОМ.2}} = S_{\text{Н}} / U_{\text{ВН}} \sqrt{3} \quad \text{– для Y;} \quad I_{\text{Ф.НОМ.2}} = S_{\text{Н}} / 3U_{\text{ВН}} \quad \text{– для } \Delta,$$

где  $U_{\text{ВН}}$  – из задания для обмотки ВН.

**Примечание:** индекс 1 относится к стороне НН (ближняя к стержню обмотка), 2 – к стороне ВН.

7.1.3 Активная и реактивная составляющая напряжения к. з., %:

$$u_{\text{ка}} = 100P_{\text{к}}/S_{\text{Н}}; \quad u_{\text{кр}} = \sqrt{u_{\text{к}}^2 - u_{\text{ка}}^2}.$$

### 7.2 Выбор главной и продольной изоляции

7.2.1 По классу напряжения трансформатора, определяемого классом обмотки ВН, выбираем испытательное напряжение промышленной частоты из таблицы 1 (ГОСТ 16110-82).

Таблица 1 –Испытательные напряжения промышленной частоты

Класс напряжения, кВ	до 1	3	6	10	15
Испытательное напряжение, кВ	3	10	16	24	37

**Примечание:** 1 – напряжение прикладывается к обмотке, концы которой замкнуты, и к деталям конструкции, к которым присоединены выводы другой обмотки (обмоток); 2 – время приложения испытательного напряжения – 1 мин.

7.2.2 Конструкция главной изоляции обмоток трансформаторов показана на рис. 2.

7.2.3 Для выбранного испытательного напряжения находим минимальные изоляционные расстояния обмотки ВН из таблицы 2.



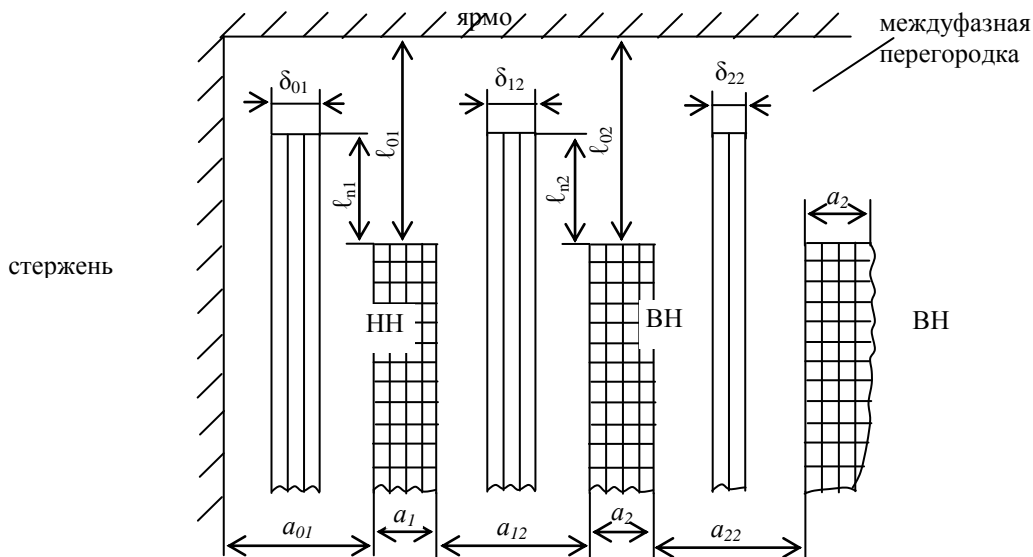


Рис. 2– Конструкция главной изоляции обмоток для  $U_{исп}= 3-37кВ$

Таблица 2 – Минимальные изоляционные расстояния обмотки ВН [1]

$U_{вн}$ , кВ	$U_{исп}$ для ВН, кВ	Размеры, мм					
		$l_{02}$	$a_{12}$	$\delta_{12}$	$l_{п,2}$	$a_{22}$	$\delta_{22}$
до 1,0	3	15	10	1,0	1,0	10	-
3,0	10	20	15	2,5	10	10	2
6,3	16	45	22	4	25	25	3
10	24	80	40	5	40	45	3
15,75	37	120	60	10	60	65	5

**Примечание:** принятые в настоящем методическом указании обозначения величин даны в приложении 2.

Минимальные изоляционные расстояния обмотки НН можно определить из таблицы 3.

Таблица 3 – Минимальные изоляционные расстояния обмотки НН

$U_{нн}$ , кВ	$U_{исп}$ , кВ	Размеры, мм			
		$l_{01}$	$a_{01}$	$\delta_{01}$	$l_{п,1}$
до 1,0	3	15	15	1,0	1,0
3,0	10	30	20	2,5	15
6,0	16	55	27	5,0	30

7.2.4 Межслойную (продольную) изоляцию следует выполнять лакотканью ЛСБ – 120/130 толщиной 0,15 мм из следующего расчета:

Рабочее напряжение двух слоев обмотки, В	Число слоев лакоткани
1000 ÷ 2000	3
2000 ÷ 3000	4
3000 ÷ 3500	5

**Примечание:** лакоткань должна выступать за край обмотки на 20 мм, при этом на краях укладывают по кольцу полосу электрокартона (толщина его должна быть равна ширине провода).

### 7.3 Определение основных размеров трансформатора

По трём основным размерам легко найти остальные размеры трансформатора, определяющие форму и объём магнитной системы и обмоток (рис. 2а). Для этого необходимо знать изоляционные расстояния между обмотками и от обмоток до заземлённых частей, а так же условия охлаждения обмоток. Основные размеры силового трансформатора связаны с реактивной составляющей напряжения короткого замыкания  $u_{кр}$ . Эта связь позволила профессору Тихомирову П.М. предложить формулу, связывающую диаметр  $d$  стержня трансформатора с его мощностью и значением  $u_{кр}$  (пункт 7.3.2).

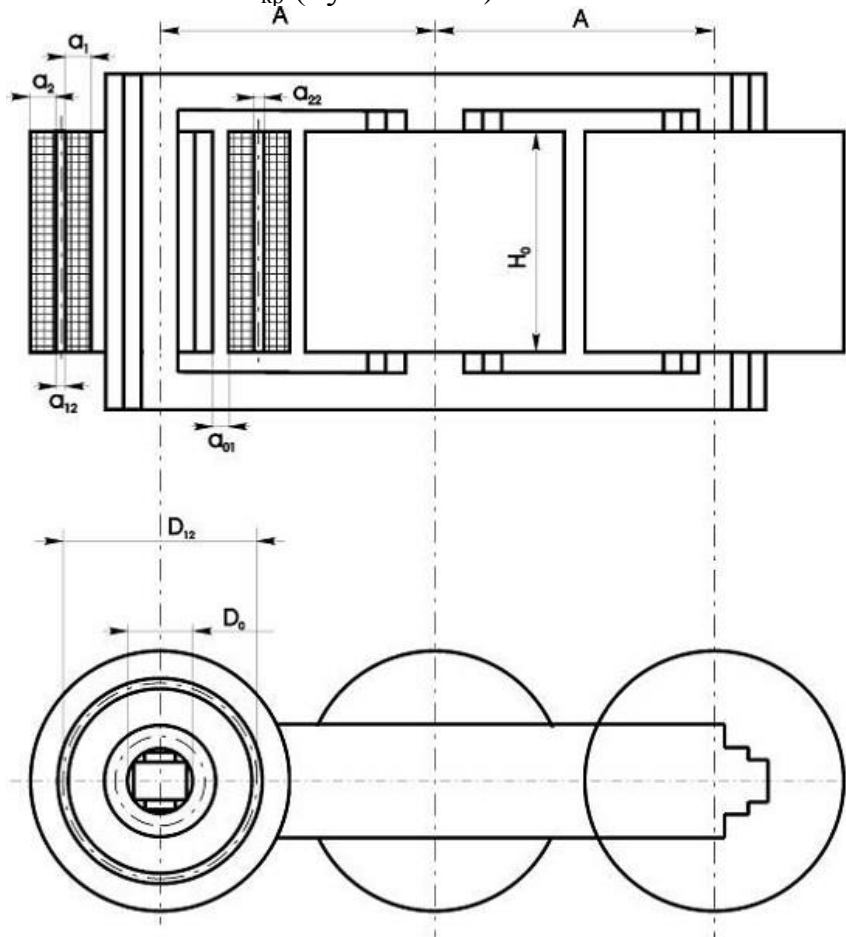


Рис. 2а – Основные размеры трансформатора

7.3.1 Дальнейший расчет является многовариантным, итерационным, некоторые параметры и расчетные коэффициенты могут меняться в широких пределах, поэтому для облегчения расчётов в таблице 4 приведены ориентировочные значения некоторых параметров и расчетных коэффициентов, позволяющие начать расчет.

7.3.2 Определяем диаметр  $d$  стержня трансформатора [1]:

$$d = 0,507 \sqrt[4]{\beta} \cdot \sqrt[4]{\frac{S'_1 \cdot a_p \cdot K_p}{f \cdot u_{кр} \cdot B_c^2 \cdot K_c^2}},$$

где  $S'_1$  – мощность, приходящаяся на один стержень;  $\beta = \frac{\pi D_{12}}{\ell}$  – коэффициент

экономичности, то есть отношение длины витка двух обмоток  $D_{12}$  к высоте  $l$  обмотки;  $K_p = 0,95$  – коэффициент Роговского (**Приложение 2**);  $f=50$  Гц – частота сети;  $u_{кр}$  – реактивная составляющая напряжения  $u_k$ , %.;  $B_c=1,5$  Тл – амплитуда магнитной индукции (пункт 6.1);  $K_c$  – общий коэффициент заполнения стали (табл. 5);  $a_p$  – ширина приведенного канала рассеяния (это ориентировочно ширина зоны, занятой обмотками НН и ВН).

Первоначально рекомендуемое значение  $\beta$  определяют из таблицы 4.

Таблица 4 – Параметры и расчетные коэффициенты сухих трансформаторов

№ п/п	Мощность кВ·А	40	63	100	160	250	400	630	1000	Литерат. источник[1]
1	$d$ , м	0,1	0,12	0,14	0,16	0,19	0,22	0,24	0,24	Табл.2.6
2	Число ступеней	4	5	6	6	7	7	8	8	-//-
3	Коэффициент $K_{кр}$	0,88	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,94	0,8	-//-
4	Число каналов магнитопровода	-			-	-	-	-	1	-//-
5	Коэффициент $K_c$	0,85	0,89	0,89	0,9	0,9	0,9	0,91	0,77	Приложение 2
6	Коэффициент $K$ (медь)	0,7	0,65	0,6	0,57	0,55	0,53	0,51	0,48	Табл.3.3
7	Коэффициент $K$ (алюминий)	0,88	0,81	0,75	0,71	0,69	0,66	0,64	0,6	-//-
8	Коэффициент $\beta$ (медь)	2,6	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	Табл.3.12
9	Коэффициент $\beta$ (алюминий)	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	-//-
10	Плотность тока $j$ , А/мм <sup>2</sup> (медь, обм. НН)	по индивидуальному заданию студента								Табл. 5.7
11	Плотность тока $j$ , А/мм <sup>2</sup> (медь, обм. ВН)	по индивидуальному заданию студента								-//-
12	Плотность тока $j$ , А/мм <sup>2</sup> (алюм., обм. НН)	по индивидуальному заданию студента								-//-
13	Плотность тока $j$ , А/мм <sup>2</sup> (алюм., обм. ВН)	по индивидуальному заданию студента								-//-
14	Коэф-т $K_d$ (сухой тр.)	0,98	0,97	0,97	0,96	0,92	0,9	0,88	0,87	Примеч. к табл. 3.6
15	Число реек для крепления обмотки	6	6	6	8	8	8	8	10	Стр. 225

**Примечание:** 1-Значение коэффициента  $K$  для алюминия принимают в 1,25 раза больше значения для меди. 2- Общий коэффициент заполнения сталью  $K_c = K_3 \cdot K_{кр}$ , где рекомендуется принять значение  $K_3 = 0,965$  [1].

Затем при уточнении коэффициента  $\beta$  руководствуются следующим:

- увеличение  $\beta$  приводит к увеличению  $u_{кр}$  и к некоторому росту мощности потерь  $P_K$ , так как при этом уменьшается высота обмотки, то есть трансформатор будет более низким и более широким;

- уменьшение  $\beta$  приводит к уменьшению  $u_{кр}$  и некоторому снижению  $P_K$ .

Расчет ширины приведенного канала рассеяния  $a_p$  находим по соотношению

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3},$$

где  $a_{12}$  – ширина изоляционного промежутка из таблицы 1;  $a'$  - радиальный размер обмоток ВН и НН (ширина),  $a_1$  и  $a_2$  – толщины этих обмоток (рис. 2а).

$$a' = \frac{a_1 + a_2}{3} = K \sqrt[4]{S'} \cdot 10^{-2},$$

где коэффициент  $K$  берут из таблицы 4 методических указаний.

Полученное при расчете значение  $d'$  (то есть предварительное) округляют до ближайшего значения из нормализованного ряда диаметров:

– от 0,08 до 0,13 м через 0,005 м;

– от 0,13 до 0,4 м через 0,01 м;

– от 0,4 до 0,5 м через 0,02 м.

При выборе диаметра стержня нужно учитывать следующее: чем меньше диаметр стержня, тем меньше масса электротехнической стали для магнитной системы, но больше индукция в стержне; чем больше диаметр стержня, тем больше масса металла обмоток [1].

7.3.3 Уточняют значение коэффициента экономичности  $\beta$  для выбранного диаметра, повторив расчет по соотношению

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

7.3.4 Определяют средний диаметр витка  $D_{12}$  двух обмоток (средний диаметр канала рассеяния) предварительно

$$D'_{12} = d + 2a_{01} + a_{12} + 2,2a',$$

где  $d$  (пункт 7.3.2);  $a_{01}$  и  $a_{12}$  – взять из таблицы 1;

$a'$  – радиальный размер обмоток ВН и НН.

Тогда определяют средний диаметр обмотки НН

$$D_{CP1} = D_{12} - a_{12} - 1,1a'$$

и средний диаметр обмотки ВН

$$D_{CP2} = D_{12} + a_{12} + 1,1a'.$$

7.3.5 После чего определяют высоту обмоток  $\ell$  (предварительно):

$$\ell' = \frac{\pi D'_{12}}{\beta},$$

где  $D'_{12}$  – взять из пункта 7.3.4;  $\beta$  – из пункта 7.3.3.

7.3.6 Определяют активное сечение стержня (предварительно):

$$\Pi_c = K_{кр} \cdot K_3 \cdot \frac{\pi d^2}{4} = K_c \cdot \frac{\pi d^2}{4},$$

где  $K_{кр}$  – из таблицы 4;  $K_3 = 0,965$  (коэффициент заполнения площади, приложение 2);  $K_c$  – общий коэффициент заполнения (таблица 4).

## 7.4 Предварительный расчет обмоток

7.4.1 Определяют ЭДС одного витка (предварительно):

$$E'_B = 4,44 \cdot f \cdot \Pi_c \cdot B_c.$$

Проверяем соответствие величины  $u_{кр}$  заданному значению по соотношению из пункта 10.2. При несоответствии изменить  $\beta$  по рекомендациям п. 7.3.2.

$$u_{кр\%} = \frac{7,92 \cdot f \cdot S'_1 \cdot a_p \cdot K_p \cdot \beta}{E_B^2} \cdot 10^{-1}.$$

7.4.2 Определяют число витков обмотки НН  $w'_1 = \frac{U_{\phi 1}}{E'_B}$ , округлив результат до

ближайшего целого числа.

**Примечание:** при двухслойной цилиндрической обмотке округляем  $w_1$  до четного числа.

Уточняем ЭДС одного витка после округления:

$$E_B = \frac{U_{\phi 1}}{w_1}.$$

Тогда число витков обмотки ВН:

$$w_2 = \frac{U_{\phi 2}}{E_B} = w_1 \cdot \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 1}}.$$

7.4.3 Разделяем заданную мощность потерь короткого замыкания  $P_K$  между обмотками НН и ВН пропорционально длине витка, что обеспечивает примерно одинаковую плотность тока для обеих обмоток:

$$P_{K1} = \frac{P_K \cdot D_{CP1}}{D_{CP1} + D_{CP2}} \quad - \text{потери в обмотке НН};$$

$$P_{K2} = \frac{P_K \cdot D_{CP2}}{D_{CP1} + D_{CP2}} \quad - \text{потери в обмотке ВН}.$$

Определяем площади сечений проводов обмоток НН и ВН [1]:

$$\Pi_1 = \frac{3 \cdot I_{\text{ф.ном1}}^2 \cdot \rho_t \cdot \pi D_{\text{CP1}} \cdot w_1}{P_{\text{к1}}};$$

$$\Pi_2 = \frac{3 \cdot I_{\text{ф.ном2}}^2 \cdot \rho_t \cdot \pi D_{\text{CP2}} \cdot w_2}{P_{\text{к2}}},$$

где  $\rho_t$  - удельное сопротивление материала обмотки (таблица 6 м.у.).

Тогда расчетные плотности тока в обмотках будут:

$$j'_{\text{ср1}} = \frac{I_{\text{ф.ном1}}}{\Pi_1}; \quad j'_{\text{ср2}} = \frac{I_{\text{ф.ном2}}}{\Pi_2}.$$

Сравниваем расчетные значения с заданием и с рекомендацией пункта 6.1. Если расчетная плотность меньше, то продолжим расчет, а если больше или равна, то уменьшаем величину диаметра стержня  $d$ , то есть повторяем расчет, начиная с пункта 7.3.2.

Уточняем действительную амплитуду индукции в стержне:

$$B_c = E_B / (4,44 \cdot f \cdot \Pi_c).$$

Значение индукции  $B_c$  должно находиться в рекомендуемом пределе  $B_c = (1,45 \dots 1,55)$  Тл.

7.4.5 Определяем число реек по данным таблицы 4.

**Примечание:** тип обмоток рекомендован в п. 6.1 настоящего методического указания.

7.4.6 Определяем ширину реек из условия, что их суммарная ширина не более 15% от длины окружности обмотки, то есть принимаем коэффициент закрытия поверхности  $K_{\text{зп}} \geq 0,85$ .

## 7.5 Расчет обмоток (общие положения)

Исходными данными для расчета являются:

$\ell_1; \ell_2$  – высота обмоток;  $\Pi_1; \Pi_2$  – сечения витков;  $w_1; w_2$  – числа витков; номинальные фазные токи обмоток, их материал.

При этом высота обмоток НН и ВН предполагается одинаковой.

7.5.1 Для оценки теплового режима трансформатора найдем *фактическую* плотность теплового потока обмоток (для двух охлаждающих поверхностей у каждой обмотки):

$$q_{\text{НН}} = \frac{P_{\text{к,НН}}}{\Pi_{\text{охл1}}} = \rho_t \frac{w_1 \cdot I_{\text{ф.ном}}^2}{2 \cdot \ell \cdot \Pi_1 \cdot K_{\text{зп}} \cdot K_{\text{д}}}; \quad q_{\text{ВН}} = \frac{P_{\text{к,ВН}}}{\Pi_{\text{охл2}}} = \rho_t \frac{w_2 \cdot I_{\text{ф.ном2}}^2}{2 \cdot \ell \cdot \Pi_2 \cdot K_{\text{зп}} \cdot K_{\text{д}}},$$

где  $\rho_t$  – удельное сопротивление при рабочей температуре  $t_{\text{раб}}$  (таблица 6);

$I_{\text{ф,ном}}$  – номинальный ток обмотки;  $K_{\text{д}}$  – из таблицы 4;  $\ell$  – длина обмотки;  $\Pi_1, \Pi_2$  – сечения проводов;  $K_{\text{зп}} = 0,85$ .

7.5.2 Сравниваем полученные значения с данными таблицы 5 [1]. При этом нужно учесть, что для обмотки НН шириной канала является размер  $\frac{a_{01} + a_{12}}{2}$ , а

для обмотки ВН – размер  $a_{12}$ .

Таблица 5 – Допустимые значения плотности теплового потока обмоток ВН, НН

Допустимое превышение $t$ , °С	Плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>		
	Канал 7 мм	Канал 10 мм	Канал 15 мм
75°С ( <i>B</i> )	230	450	550
100°С ( <i>F</i> )	300	600	720
115°С ( <i>F</i> )	380	800	950

Если ширина канала равна или превышает 15 мм, то из таблицы 5 можно брать наибольшую плотность теплового потока, то есть 380 Вт/м<sup>2</sup> для класса нагревостойкости изоляции *B* и 720 Вт/м<sup>2</sup> – для класса *F*.

Таблица 6 – Удельное сопротивление материала обмоток

Материал	Значение $\rho_t$ при $t_{\text{раб}}$ , Ом/м	
	75°С	115°С
Медь	$21,35 \cdot 10^{-9}$	$26,2 \cdot 10^{-9}$
Алюминий	$34,4 \cdot 10^{-9}$	$38,8 \cdot 10^{-9}$

Если полученные значения превышают норму по пункту 7, то нужно руководствоваться следующим:

- при превышении плотности теплового потока для обмотки НН не более 20% можно увеличивать площадь сечения провода обмотки пропорционально превышению, то есть увеличить, например, в 1,15 раза, если норма превышена в 1,15 раза. Это перераспределит потери между обмотками НН и ВН, причем потери в обмотке НН не должны быть меньше 1/3 от суммарных потерь  $P_K$ . Следует проверить это условие, пользуясь соотношениями пункта 10.1;

- при превышении плотности для любой обмотки от 20% до 40% следует ввести один канал шириной 7 мм, при этом норма возрастает на величину потока для этого канала, то есть составит  $(380+160)$  Вт/м<sup>2</sup> для класса нагревостойкости изоляции *B* и  $(720+300) = 1020$  Вт/м<sup>2</sup> – для класса *F*;

- при превышении плотности от 40% до 80% следует ввести канал шириной 10 мм, норма составит 680 Вт/м<sup>2</sup> (для класса *B*) и 1320 Вт/м<sup>2</sup> (для класса *F*);

- при превышении плотности от 80% до 100% следует ввести канал 15 мм, норма при этом удвоится (760 Вт/м<sup>2</sup> для класса *B* и 1320 Вт/м<sup>2</sup> для класса *F*);

- при бóльшем превышении плотности необходимо ввести и бóльшее число каналов, имея в виду, что введение каждого канала увеличивает норму на указанное в таблице 5 значение;

- ширина вводимых каналов должна быть *минимально необходимой*, без излишнего запаса.

7.5.3 В случае, если при выполнении пункта 7.5.2 изменено сечение провода, повторить расчеты по пункту 7.5.1.

## 8 РАСЧЕТ ОБМОТОК НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

**8.1 Общие положения расчета обмотки НН.** Обмотка НН располагается между стержнем и обмоткой ВН.

Расчет двухслойной цилиндрической обмотки из прямоугольного провода (размеры  $a \times b$ ). Особенность конструкции рассматриваемой обмотки состоит в том, что все витки каждого слоя ( $w_{\text{сл1}} = w_1 / N_{\text{сл1}}$ ) и их параллельные провода расположены в один ряд без интервалов в осевом направлении. Отсюда следует, что высота витка (осевой размер витка):

$$h_{\text{в1}} = n_{\text{в1}}(b + \Delta_{\text{из}}),$$

где  $\Delta_{\text{из}} = 2\delta$  – толщина изоляции провода на две стороны;  $n_{\text{в1}}$  – число параллельных проводов в витке. Число слоев  $N_{\text{сл1}}$  обычно равно двум.

Кроме того, имеют место соотношения

$$\ell_1 = (w_{\text{сл1}} + 1) \cdot h_{\text{в1}}; \quad \Pi_1 = n_{\text{в1}} \cdot \Pi_{\text{пр1}},$$

где  $n_{\text{в1}}$  – число параллельных проводов;

$\Pi_{\text{пр1}}$  – площадь поперечного сечения одного проводника ( $\Pi_{\text{пр1}} \approx a \cdot b$ ).

По значениям высоты  $h_{\text{в1}}$  и суммарной площади  $\Pi_1$  подбирают размеры провода  $a$  и  $b$ , а также число параллельных проводов  $n_{\text{в1}}$  с обязательным выполнением **шести правил**, перечисленных на с. 266-267 [1].

### Порядок расчета обмотки НН

а) число витков в слое

$$w_{\text{сл1}} = w_1 / N_{\text{сл1}} = w_1 / 2; \quad N_{\text{сл}} = 2;$$

б) ориентировочная высота витка

$$h'_{\text{в1}} = \frac{\ell_1}{(w_{\text{сл1}} + 1)};$$

в) перебирая бóльший размер  $b$  при намотке плашмя (или размер  $a$  при намотке на ребро) (таблица 1 приложения П5), выбираем первый (осевой) размер провода  $b$  так, чтобы число отдельных проводов в витке  $n_{\text{в1}} = h'_{\text{в1}} / (b + \Delta_{\text{из}})$  было близким к целому (отклонение от целого числа должно быть не более 3...5 %) (рис. 3);

г) зная первый размер (осевой) провода и перебирая при этом второй размер (радиальный) по таблице 1 приложения П5, выбираем его (радиальный размер провода) так, чтобы выполнялось соотношение, при котором суммарное сечение  $\Pi_{\text{пр1}} \cdot n_{\text{в1}}$  будет близко к значению  $\Pi_1$  (рис. 4):

$$\Pi_{\text{пр1}} \cdot n_{\text{в1}} \approx \Pi_1.$$

**Примечание:** с целью облегчения процесса намотки желательно выбирать размеры провода так, чтобы он наматывался плашмя.

В целях обеспечения механической прочности обмотки рекомендуется:

$$n_{\text{в1}} \leq \begin{cases} 4 \div 6 & \text{– при укладке проводов плашмя } (a < b), \\ 6 \div 8 & \text{– при укладке проводов на ребро } (a > b). \end{cases}$$

Кроме того, по технологическим причинам при укладке проводов на ребро рекомендуется выполнять соотношение  $1,3 \leq a/b \leq 3$ .



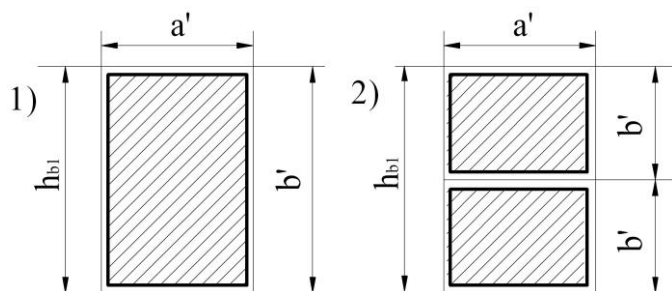


Рис. 3- Выбор размеров прямоугольного провода при намотке плашмя: 1) в один провод ( $n_{в1}=1$ ); 2) в два провода ( $n_{в1}=2$ )

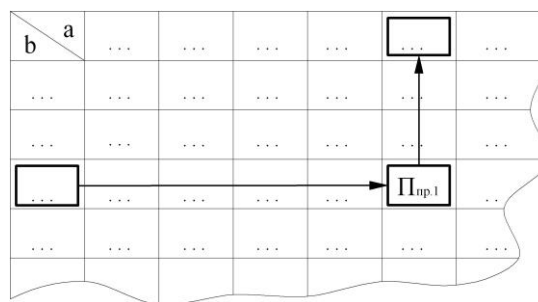


Рис.4- Схема пользования табл.1 приложения П5

Записываем выбранный провод, например, для класса нагревостойкости **B**

$$\text{ПБ(АПБ)} - n_{в1} \times \frac{a \times b}{a' \times b'} \times \Pi_{пр,1},$$

где  $a' = a + 2\delta$ ;  $b' = b + 2\delta$ . Уточняем осевой размер витка  $h_{в1} = b'$ ; уточняем сечение витка; уточняем плотность тока в обмотке НН  $j_1 = I_1 / \Pi_1$  (для класса *F* необходима другая изоляция);

д) определяем остальные размеры обмотки:  $\ell_1 = n_{в1} b' (w_{сл1} + 1)$  – для намотки плашмя;  $a_1 = 2a' + a_{к1}$  – для намотки плашмя; или  $a_1 = 2b' + a_{к1}$  – для намотки на ребро;  $\ell_1 = n_{в1} \cdot a' (w_{сл1} + 1)$  – для намотки на ребро.

Здесь  $a_{к1}$  – ширина межслойного канала обмотки НН. Её можно принять равной 4 мм при условии, что для обеспечения теплового режима достаточно двух охлаждающих поверхностей. Если двух поверхностей не достаточно, то ширину канала следует увеличить и принять 7 или 10 или 15 мм в соответствии с табл. 6 и пункта 7.5.2.

$D'_1 = d + 2a_{о1}$  - внутренний диаметр обмотки НН;

$D''_1 = D'_1 + 2a_1$  - наружный диаметр обмотки НН;

е) масса металла обмотки без изоляции, кг,

$m_{о1} = \gamma_{пр1} \cdot \Pi_1 (c \cdot \pi \cdot D_{ср1} \cdot w_1 + 7,5 \cdot \ell)$  – для соединения звездой Y;

$m_{о1} = \gamma_{пр1} \cdot \Pi_1 (c \cdot \pi \cdot D_{ср1} \cdot w_1 + 13 \cdot \ell)$  – для соединения треугольником  $\Delta$ ,

где  $\gamma_{пр}$  – плотность материала провода (для меди  $\gamma_{пр} = 8900 \text{ кг/м}^3$ ; для алюминия  $\gamma_{пр} = 2700 \text{ кг/м}^3$ );

ж) средний диаметр обмотки НН  $D_{ср1} = \frac{D'_1 + D''_1}{2}$ .

Масса проводов обмотки с изоляцией

$$M_{пр1} = K_{из} \cdot m_{о1},$$

где  $K_{из}$  – коэффициент, определяемый по таблице 7.

Таблица 7 – Увеличение массы провода за счет изоляции  $\Delta_{из} = 2\delta = 0,5 \text{ мм}$  на две стороны ( $K_{из}$ )

Размер $b$ , мм	Материал	Размер $a$ , мм			
		1,4÷1,8	1,9÷2,65	2,8÷3,75	4,0÷7,0
3,75÷7,5	Cu	1,035	1,03	1,025	1,020

8÷16, 0	<i>Cu</i>	1,025	1,02	1,02	1,015
3,75÷7,5	<i>Al</i>	1,115	1,1	1,08	1,066
8÷18, 0	<i>Al</i>	1,08	1,066	1,066	1,05

**8.2 Расчет многослойной цилиндрической обмотки из прямоугольного провода.** Многослойная обмотка отличается от двухслойной бóльшим числом слоев  $N_{сл}$ , например, трём, которое в начале расчета неизвестно, а также тем, что охлаждающие каналы делаются не между каждой парой слоев ( $n_{кан} \leq (N_{сл} - 1)$ ). Радиальный размер проводов и число слоев обмотки  $N_{сл}$  должны быть выбраны так, чтобы добавочные потери в обмотке не вышли за принятый уровень (5-10 % от основных). При этом число охлаждающих каналов должно быть выбрано так, чтобы тепловая нагрузка  $q$  не превышала допустимую.

Рекомендуется следующий порядок расчета многослойной цилиндрической обмотки:

а) определяем предварительно суммарный радиальный размер проводов обмотки [1]:

$$a'_{сум1} = \frac{w_1 \cdot \Pi_1}{\ell_1 \cdot K_{oc}},$$

где  $K_{oc}$  – коэффициент заполнения окна обмотки ( $a_{\Sigma} \ell_1$ ) металлом ( $K_{oc} = 0,92$  для медных проводов,  $K_{oc} = 0,93$  – для алюминиевых);

б) зная  $a'_{сум1}$ , по таблице 8 проверяем максимальный радиальный размер провода  $a_{max}$ , который обеспечивает требуемое значение коэффициента  $K_{доб}$  ( $K_{доб} \leq 1,05$ ). Можно принять значение  $K_{доб} \leq 1,1$ , но учесть это увеличение в дальнейшем, при расчете параметров *короткого замыкания*.

в) по таблице 1 приложения П5 подбираем провод так, чтобы  $a \leq a_{max}$ ;

г) зная  $a$  и сечение  $\Pi_1$ , по таблице 1 приложения П5 подбираем размер провода  $b$  так, чтобы получить целое число параллельных проводов в витке  $n_{в1} = \Pi_1 / \Pi_{пр} \approx$  целое число (с точностью 1÷5%).

Таблица 8 – Предельные радиальные размеры провода в мм, обеспечивающие добавочные потери не более 5% ( $K_{доб} = 1,05$ ) и 10% ( $K_{доб} = 1,1$ ).

Материал	Число слоев							
	1	2	3	4	6	8	12	16
Медь (5%)	9, 0	6, 3	5, 3	4, 5	3, 75	3, 35	2, 65	2, 24
Алюминий	11, 8	8, 0	6, 7	5, 6	4, 75	4, 0	3, 35	2, 8
Медь (10%)	10, 6	7, 5	6, 3	5, 3	4, 5	3, 75	3, 15	2, 65
Алюминий	13, 2	10, 0	8, 0	6, 7	5, 6	4, 75	3, 75	3, 35

Записываем выбранный провод в виде, например, для класса нагревостойкости **F**:

$$\text{ПСДК(АПСДК)} - n_{\epsilon 1} \times \frac{a \times b}{a' \times b'} \cdot \Pi_{пр1}.$$

Находим точное значение сечения витка

$$\Pi_1 = n_{\text{сл}} \cdot a \times b;$$

д) находим число витков в слое обмотки

$$w_{\text{сл1}} = \frac{\ell_1}{n_{\text{сл}} \cdot b'} - 1.$$

Округляем число витков  $w_{\text{сл1}}$  до меньшего целого числа;

е) находим число слоев

$$N_{\text{сл1}} = w_1 / w_{\text{сл1}}.$$

Округляем  $N_{\text{сл1}}$  до бóльшего целого числа.

Если последний слой обмотки окажется слабо заполненным, то можно скорректировать значения размеров  $a$  и  $b$  так, чтобы дробная часть числа  $N_{\text{сл1}}$  была незначительно меньше единицы.

ж) определяем число охлаждающих каналов, проведя предварительный расчет для двух охлаждающих поверхностей.

Электрические потери в обмотке НН будут:

$$P_{\text{эл1}} = 3\rho_t \cdot \pi(D'_1 + D''_1) \cdot \frac{w_1}{2 \cdot \Pi_1} \cdot I_{\text{ф.ном1}}^2,$$

где внутренний диаметр обмотки НН  $D'_1 = d + 2a_{01}$ ;

наружный диаметр обмотки НН  $D''_1 = D'_1 + 2a_1$ ;

$a'_1 = n_{\text{сл}} \cdot a'$  – при намотке обмотки НН *плашмя*;

$a'_1 = n_{\text{сл}} \cdot b'$  – при намотке обмотки НН *на ребро*.

Плотность теплового потока находим по формуле:

$$q = \frac{P_{\text{эл1}}}{\Pi_{\text{охл1}}} = \frac{P_{\text{эл1}}}{\pi(D'_1 + D''_1) \cdot \ell_1 \cdot K_{\text{зп}}}.$$

Исходя из полученного значения, определяем необходимое число охлаждающих каналов шириной 15 мм (или меньшей ширины), как это следует из таблицы 6 и пункта 7.5.2 данного методического указания;

з) рабочее напряжение двух слоев

$$U_{\text{мсл}} = 2 \cdot w_{\text{сл1}} \cdot E_{\text{В}}.$$

По рабочему напряжению двух слоев в соответствии с указаниями [п. 7.2.4] выбирается число листов и общая толщина кабельной бумаги  $\delta_{\text{мсл}}$  в изоляции между двумя слоями обмотки.

Радиальный размер обмотки НН

$$a_1 = a' N_{\text{сл1}} + \Delta_{\text{из.лак}} \cdot N_{\text{сл.лак}} + n_{\text{к}} \cdot h_{\text{к}},$$

где  $\Delta_{\text{из.лак}} = 0,15$  мм – толщина слоя лакоткани;  $n_{\text{к}}$  – число охлаждающих каналов;  $h_{\text{к}}$  – ширина охлаждающего канала;  $N_{\text{сл.лак}}$  – общее число слоев лакоткани.

Далее находят остальные размеры и параметры аналогично п.п. 8.1 д-е.

## 9 РАСЧЕТ ОБМОТОК ВЫСШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

### 9.1 Выбор схемы регулирования напряжения

На стороне ВН осуществляют регулирование напряжения трансформатора. Выбор схемы регулирования напряжения проводится в соответствии с заданием на курсовое проектирование. В трансформаторах с регулированием напряжения

на стороне ВН путем переключения ответвлений без возбуждения (ПБВ) должно предусматриваться изменение числа витков обмотки ВН на значение  $\pm 2 \times 2,5\% = \pm 5,0\%$  от номинального.

**9.2 Расчет многослойной цилиндрической обмотки ВН из круглого провода.** Рекомендуется следующий порядок расчета обмотки:

а) находим максимальное число витков обмотки ВН

$$w_{2\max} = 1,05 \cdot w_2,$$

где  $w_2$  – расчетное значение числа витков (п.4.2.).

Число витков на ответвлениях:

1-е (конец обмотки)	$1,05w_2$ ;
2-е ( $U_2 = U_{2\text{ном}} + 2,5\%$ )	$1,025w_2$ ;
3-е ( $U_2 = U_{2\text{ном}}$ )	$1,0 w_2$ ;
4-е ( $U_2 = U_{2\text{ном}} - 2,5\%$ )	$0,975 w_2$ ;
5-е ( $U_2 = U_{2\text{ном}} - 5\%$ )	$0,95 w_2$ ;

б) определяем ориентировочную плотность тока  $j'_2$  по п. 6.1,

тогда ориентировочное сечение витка:

$$\Pi'_2 = I_{\text{Фном2}} / j'_2;$$

в) выбираем тип обмотки и схему регулирования напряжения;

г) по таблице приложения П6 выбираем один провод нужного сечения диаметром  $d_2/d'_2$ . Если одного провода недостаточно, можно взять несколько проводов в параллель  $n_{в2} = 2 \div 3$  так, чтобы  $n_{в2} \cdot \Pi_{\text{пр2}} = \Pi'_2$ .

Записываем выбранный провод в виде:

$$(\text{марка провода}) - n_{в2} \times \frac{d_2}{d'_2} \times \Pi_{\text{пр,2}},$$

где  $d_2$  - диаметр провода без изоляции,  $d'_2$  - диаметр провода с изоляцией.

Фактическая плотность тока в обмотке будет

$$j_2 = I_2 / \Pi_2;$$

д) число витков в слое ориентировочно:

$$w'_{\text{сл2}} = \frac{\ell}{n_{в2} \cdot d'_2} - 1.$$

Округляем их до целого числа;

е) число слоев ориентировочно:

$$N'_{\text{сл2}} = w_{2\max} / w'_{\text{сл2}},$$

оно округляется до ближайшего большего целого числа;

ж) рабочее напряжение двух слоев

$$U_{\text{м сл}} = 2w'_{\text{сл2}} \cdot E_{\text{в}}.$$

По рабочему напряжению двух слоев (см. п. 7.2.4) выбирается число слоев и общая толщина кабельной бумаги;

и) распределяем витки по слоям.

При распределении витков по слоям нужно учесть следующее:

- верхний слой должен содержать только те витки, от которых выполнены отводы, то есть составлять примерно  $10\% w_{2\max}$ ;

- остальные 90% витков нужно распределить по оставшимся слоям, их число будет  $N'_{сл2}-1$ , отсюда число витков в этих слоях  $w'_{сл2} \approx \frac{0,9 \cdot w_{2\max}}{N'_{сл2}-1} - 1$  – его округляем до целого;

к) разбираем обмотку ВН на 2 катушки с осевым каналом между катушками. Число слоев внутренней катушки  $1/3 \div 2/5$  от  $N_{сл2}$ . Минимальная ширина канала  $a_{к2}'$  выбирается по таблице 6.

В обмотках класса напряжения 35 кВ для защиты от перенапряжений под внутренним слоем обмотки устанавливается экран – незамкнутый цилиндр из латуни толщиной  $\delta_{экр} = 0,5$  мм, изолированный с обеих сторон листом картона толщиной  $\delta_{из\ экр} = 1,0$  мм. Радиальный размер обмотки с экраном и каналом

$$a_2 = d'_2 N_{сл2} + \delta_{мсл}(N_{сл2} - 1) + (\delta_{экр} + 2\delta_{из\ экр}) + a'_{к2};$$

л) определяем остальные размеры:

- расчетная ширина канала между обмотками

$$a'_{к2} = a_{к2} + (\delta_{экр} + 2\delta_{из\ экр});$$

- внутренний диаметр обмотки ВН

$$D_2' = D_1'' + 2a_{12};$$

- наружный диаметр обмотки ВН

$$D_2'' = D_2' + 2a_2;$$

- средний диаметр обмотки ВН

$$D_{ср2} = 0,5(D_2' + D_2'').$$

м) определяем массу металла обмотки ВН без изоляции, кг

$$m_{02} = \gamma_{пр} \cdot \Pi_2 (c \cdot \pi \cdot D_{ср2} \cdot w_{2,\max} + 7,5 \cdot \ell) - \text{для соединения } Y;$$

$$m_{02} = \gamma_{пр} \cdot \Pi_2 (c \cdot \pi \cdot D_{ср2} \cdot w_{2,\max} + 13 \cdot \ell) - \text{для соединения } \Delta,$$

где  $\gamma_{пр}$  - плотность материала провода ( $\gamma_{пр} = 8900$  кг/м<sup>3</sup> – для меди;  $\gamma_{пр} = 2700$  кг/м<sup>3</sup> – для алюминия);  $c$  – число фаз ( $c = 3$ );

$$D_{ср,2} = \frac{D_2' + D_2''}{2}.$$

## 10 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

**10.1 Определение потерь короткого замыкания.** Они складываются из:

- электрических потерь (основных и дополнительных) в обмотках НН и ВН;
- электрических потерь в отводах обмоток.

Таким образом, общие потери в обмотках находим из соотношений с учетом длины отводов:

$$P_{к1} = \rho_t \cdot \frac{I_{\Phi\text{ном1}}^2}{\Pi_1} \cdot (3\pi D_{ср1} \cdot w_1 + 7,5 \cdot \ell) \cdot K_{доп} - \text{обмотка НН, соединение } Y;$$

$$P_{к1} = \rho_t \cdot \frac{I_{\Phi\text{ном1}}^2}{\Pi_1} \cdot (3\pi D_{ср1} \cdot w_1 + 13 \cdot \ell) \cdot K_{доп} - \text{обмотка НН, соединение } \Delta;$$

$$P_{к2} = \rho_t \cdot \frac{I_{\Phi\text{ном2}}^2}{\Pi_2} \cdot (3\pi D_{ср2} \cdot w_2 + 7,5 \cdot \ell) \cdot K_{доп} - \text{обмотка ВН, соединение } Y;$$

$$P_{к2} = \rho_t \cdot \frac{I_{\text{Фном2}}^2}{\Pi_2} \cdot (3\pi D_{\text{ср2}} \cdot w_2 + 13 \cdot l) \cdot K_{\text{дон}} - \text{обмотка ВН, соединение } \Delta.$$

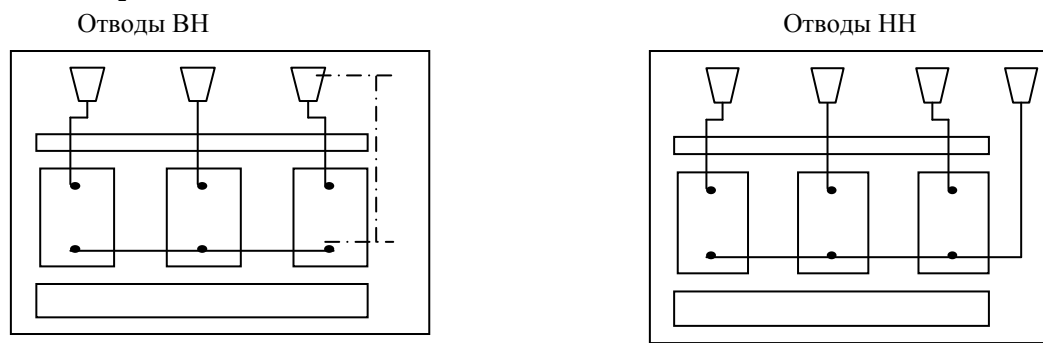


Рис. 5 – Конструкция отводов

Проверим условие  $P_{к1} = \left(\frac{1}{3} \dots \frac{1}{2}\right) P_{к}$ , то есть окончательно потери в обмотке НН должны составлять не менее 1/3 от общих потерь  $P_{к}$ .

**10.2 Расчет напряжения короткого замыкания  $u_{к}$ , %**. Его рассчитывают по формуле:

$$u_{к} = \sqrt{u_{ка}^2 + u_{кр}^2}.$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания, %,

$$u_{ка}, \% = 100 \frac{P_{к}}{S_{Н}},$$

где  $P_{к} = P_{к1} + P_{к2}$  берется из п. 10.1.

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %, определяется по формуле [1]:

$$u_{кр\%} = \frac{7,92 \cdot f \cdot S' \cdot a_p \cdot K_p \cdot \beta}{E_B^2} \cdot 10^{-1},$$

где  $\beta$  – окончательное значение ( $\beta = \pi D_{12} / \ell$ ).

В случае незначительных расхождений высот обмоток НН и ВН при расчете  $\beta$  принимают за высоту  $\ell$  их среднее значение:

$$\ell = (\ell_1 + \ell_2)/2.$$

Входящая в формулу для  $u_{кр}$  величина  $a_p$  называется приведенной шириной канала рассеяния. Для двухобмоточных трансформаторов мощностью до 1000 кВ·А ( $S_{Н} \leq 1000$  кВ·А) её обычно принимают равной

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}.$$

Если полученное значение  $u_{к}$  отличается от заданного более чем на 7,5%, то необходимо вернуться к п. 4.7 и изменить высоту обмоток  $\ell$ , то есть увеличить или уменьшить величину  $\beta$ . В случае необходимости можно изменить диаметр стержня или, в крайнем случае, амплитуду индукции в стержне  $B_c$  [1].

**10.3 Чертёж конструкции обмоток.** После выполнения расчетов по п. 8, 9 и 10 необходимо составить чертеж конструкции обмоток аналогично рис. 2 с указанием всех размеров. При этом следует показать слои обмоток и *охлаждающие* каналы с необходимыми размерами.

**10.4 Электрическая схема обмотки.** Чертим электрическую схему обмотки ВН для одной фазы с указанием числа витков в каждом слое и витков, от которых выполнены отводы (рис. 6).

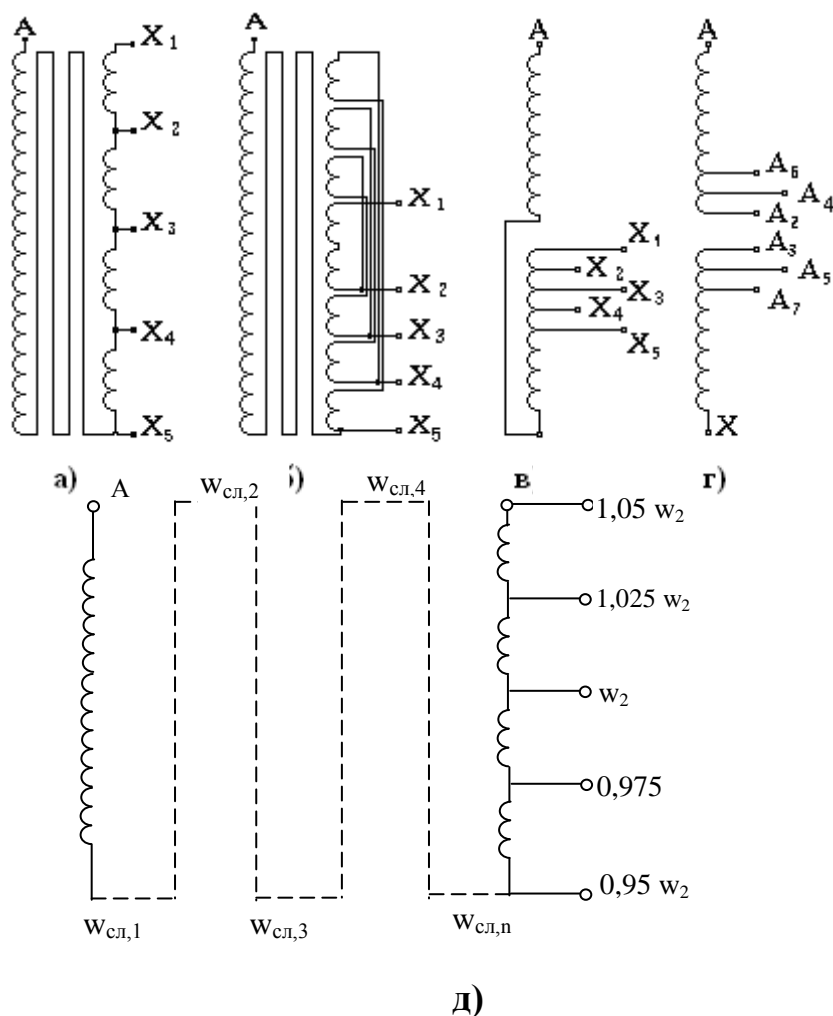


Рис 6.а-г – Различные схемы ответвлений в обмотке ВН при регулировании напряжения без возбуждения ПБВ; д- Схема электрическая одной фазы обмотки ВН

**10.5 Расчет механических усилий в обмотках при коротком замыкании за трансформатором.**

10.5.1 Находим установившийся ток к.з. в фазах обмоток:

$$I_{K.1} = \frac{100\%}{u_K \%} \cdot I_{\Phi_{НОМ1}}; \quad I_{K.2} = \frac{100\%}{u_K \%} \cdot I_{\Phi_{НОМ2}}.$$

10.5.2 Максимальное значение тока к.з. в обмотке ВН (ударный ток к.з.):

$$i_{уд.2} = \sqrt{2} \cdot I_{K.2} \cdot \left(1 + e^{\frac{\pi \cdot u_{Ka} \%}{u_{Kp} \%}}\right).$$

10.5.3 Суммарная радиальная сила разрыва при к.з. [1], Н,:

$$F_{\text{рад}} = \frac{6,4(i_{\text{уд.2}} \cdot w_2)^2 \cdot K_P \cdot \pi \cdot D_{12}}{l} \cdot 10^{-7}.$$

10.5.4 Разрывающее механическое напряжение в проводе обмотки ВН, Н/см<sup>2</sup>:

$$\sigma = \frac{100 \cdot F_{\text{рад}}}{2\pi \cdot w_2 \cdot \Pi_2},$$

оно не должно превышать допустимого значения  $\sigma_{\text{доп}} = 5000 \dots 6000$  Н/см<sup>2</sup>.

## 11 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ И ПАРАМЕТРОВ ХОЛОСТОГО ХОДА

Число ступеней в стержне и ярме выбирают по таблице 4 в зависимости от мощности трансформатора. Ярмо может быть ступенчатой формы или полуступенчатой). Длина стержня (длина окна  $l_{\text{ок}}$ ) рассчитывается суммированием осевого размера каждой обмотки с изоляционными расстояниями от их торцов до ярма (таблицы 2 и 3). Сравнивая длины стержней, получаемых таким образом, выбираем наибольшую из двух (в случае их различия).

**11.1 Расчёт для ярма ступенчатой формы.** Размеры магнитной системы определяются диаметром стержней, диаметром и высотой обмоток и изоляционными промежутками. На рис. 7 приведен чертеж первой (центральной) ступени магнитопровода, а на рис. 8 показано сечение стержня. Размеры по горизонтальной оси обозначены буквой «а», по вертикальной - буквой «л», толщина пакетов пластин - буквой «b».

11.1.1 Определяем ширину  $a_{\text{ок}}$  и высоту  $l_{\text{ок}}$  окна для обмотки

$$a_{\text{ок}} = (D_2'' - d) + a_{22}; \quad l_{\text{ок}} = l + 2l_{02}.$$

Определяем межцентровое расстояние стержней  $a_{\text{мц}}$ , ярм  $l_{\text{мц}}$  и габаритные размеры  $a_{\Gamma}$  и  $b_{\Gamma}$ :

$$\begin{aligned} a_{\text{мц}} &= d + a_{\text{ок}}; & a_{\Gamma} &= 2a_{\text{мц}} + a_{\text{ст,1}}; \\ l_{\text{мц}} &= l_{\text{я}} + l_{\text{ок}}; & l_{\Gamma} &= l_{\text{мц}} + l_{\text{я}}, \end{aligned}$$

где  $l_{\text{я}}$  - ширина пластины ярма ( $l_{\text{я}} = d$ ).

Составляем чертеж по рис. 8 с указанием полученных в расчете размеров.

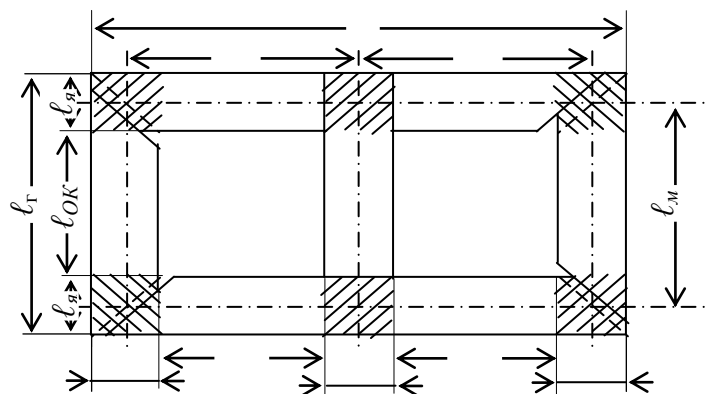


Рис. 7- Вид в плане на центральный пакет пластин магнитопровода (первая ступень)



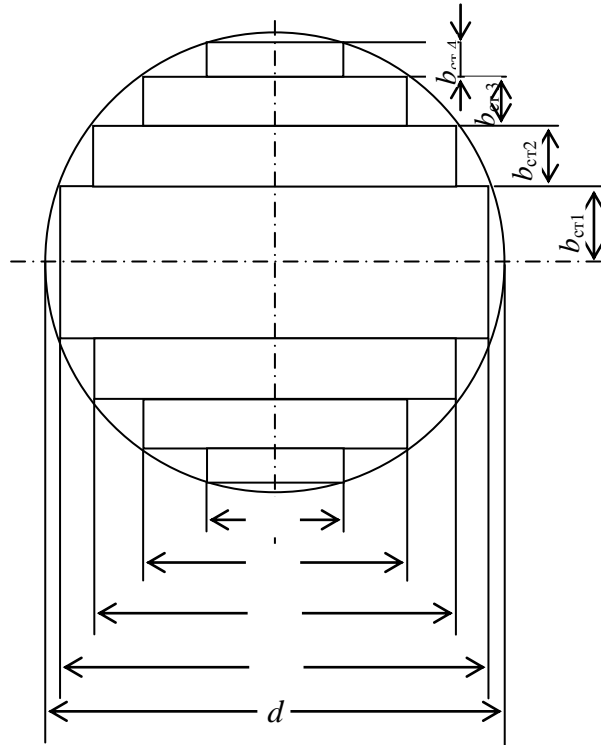


Рис. 8- Сечение стержня и ярма при четырех ступенях

11.1.2 Определяем длину  $l_{cp}$  средней магнитной линии по продольным участкам магнитопровода (кроме заштрихованных участков), длину  $l_{п}$  по двум прямым и  $l_{кос}$  по четырём косым стыками (заштриховано)

$$l_{cp} = 4a_{ок} + 3l_{ок}; \quad l_{п} = 2l_{я}; \quad l_{кос} = 4a_{ст1}.$$

11.1.3 В соответствии с таблицей 4 определяем число ступеней, составляем чертеж аналогично рис. 8 для выбранного числа ступеней, рассчитываем по таблице 9 или по приложению П4 размеры пакетов и указываем их на чертеже.

Таблица 9 – Относительные размеры пакетов магнитопровода

Число ступеней	Коэф-т $K_{кр}$	Относительные размеры пакетов ( $a \times b$ ) для ступени $N$					
		1	2	3	4	5	6
5	0,910	0,91×0,16	0,85×0,1	0,7×0,1	0,53×0,07	0,31×0,05	-
6	0,93	0,96×0,15	0,87×0,1	0,77×0,07	0,64×0,06	0,5×0,05	0,3×0,04

**Примечание:** размеры пакетов для 7 и 8 ступеней приведены в приложении П 8.

11.1.4 Находим объём и массу ступеней магнитопровода для всех участков (п.11.1.2).

– Продольный участок (объём и масса):

$$\text{Объём: } V_{пр} = 2L_{пр} (b_{ст,1} \cdot a_{ст,1} + b_{ст,2} \cdot a_{ст,2} + \dots + b_{ст,i} \cdot a_{ст,i});$$

$$\text{масса: } m_{пр} = V_{пр} \cdot K_3 \cdot g_{ст}.$$

– Косые стыки (объём и масса):

$$V_{кос} = 2L_{кос} (b_{ст,1} \cdot a_{ст,1} + b_{ст,2} \cdot a_{ст,2} + \dots + b_{ст,i} \cdot a_{ст,i}),$$

$$m_{\text{кос}} = V_{\text{кос}} \cdot K_3 \cdot g_{\text{ст}} \cdot$$

– Объём и масса прямых стыков:

$$V_{\text{п}} = 2L_{\text{п}} (b_{\text{ст},1} \cdot a_{\text{ст},1} + b_{\text{ст},2} \cdot a_{\text{ст},2} + \dots + b_{\text{ст},i} \cdot a_{\text{ст},i}); \quad m_{\text{п}} = V_{\text{п}} \cdot K_3 \cdot q_{\text{ст}} \cdot$$

где  $i = 5, 6, 7$  или  $8$  – число ступеней (таблица 4).

$$B_{\text{я}} = \frac{E_{\text{в}}}{4,44 \cdot f \cdot \Pi_{\text{я}}} \cdot$$

11.1.5 Определяем мощность  $P_0$  потерь в стали магнитопровода и её массу.

$$P_o = p \cdot (m_{\text{пр}} + K_{\text{пд}} \cdot K'_{\text{уп}} \cdot m_{\text{кос}} + K_{\text{пд}} \cdot K''_{\text{уп}} \cdot m_{\text{п}}); \quad m_{\text{м}} = m_{\text{пр}} + m_{\text{кос}} + m_{\text{п}},$$

где  $p$  – удельные потери в стали (таблица 10);

$g_{\text{ст}} = 7650 \text{ кг/м}^3$  – удельная плотность холоднокатаной стали;

$K_3 = 0,965$  – коэффициент заполнения ступеней;

$K'_{\text{уп}}; K''_{\text{уп}}$  – коэффициенты увеличения потерь (таблица 11);

$K_{\text{пд}}$  – коэффициент добавочных потерь (таблица 12).

Таблица 10 – Удельные потери  $p$ , Вт/кг, на продольных участках для холоднокатаной стали

$B$ , Тл	Марка и толщина стали			
	3404 0,35 мм	3404 0,3 мм	3405 0,35 мм	3405 0,3 мм
1,3	0,785	0,755	0,755	0,715
1,35	0,857	0,815	0,815	0,775
1,4	0,93	0,875	0,875	0,835
1,45	1,015	0,952	0,952	0,902
1,5	1,1	1,03	1,03	0,97
1,55	1,197	1,13	1,13	1,06
1,6	1,295	1,23	1,23	1,15
1,65	1,45	1,365	1,365	1,275
1,7	1,6	1,5	1,5	1,4

Величина удельных потерь в стали определяется амплитудой индукции в стержне и ярме соответственно:

$$B_{\text{с}} = \frac{E_{\text{в}}}{4,44 \cdot f \cdot \Pi_{\text{с}}};$$

11.1.6 Определяем намагничивающую мощность и ток холостого хода

$$Q_{\text{х}} = [K_{\text{тр}} \cdot K_{\text{тз}} \cdot q_{\text{с}} (m_{\text{п}} + K'_{\text{ту}} \cdot m_{\text{кос}} + K''_{\text{ту}} \cdot m_{\text{пр}}) + \Sigma q_{\text{з}} \cdot N_{\text{з}} \cdot \Pi_{\text{с}}] \cdot K_{\text{тш}},$$

где  $m_{\text{п}}; m_{\text{кос}}; m_{\text{пр}}$  – масса участков (11.1.5);

$q_{\text{с}}$  – удельная намагничивающая мощность стали (таблица 14);

Таблица 11 – Коэффициент  $K_{\text{уп}}$  увеличения потерь на косых и прямых стыках

Стык	$K_{\text{уп}}$	3404		3405	
		0,35 мм	0,3 мм	0,35 мм	0,3 мм
Косой	$K'_{\text{уп}}$	1,32	1,35	1,35	1,36
Прямой	$K''_{\text{уп}}$	1,96	2,02	2,02	2,08

Таблица 12 – Коэффициент добавочных потерь в зоне стыка  $K_{\text{пд}}$ , вызванных заусенцами, резкой, наличием немагнитного зазора

$S$ , кВ·А	До 250	400÷630	1000÷6300	1000 и более
Пластины отожжены	1,12	1,13	1,15	1,2
Пластины не отожжены	1,22	1,23	1,26	1,31

$q_z$  – удельная намагничивающая мощность в зоне шихтованного стыка (табл. 16);

$K_{\text{тр}}$  – коэффициент, учитывающий **резку** листа стали, равен:

$K_{\text{тр}}=1,18$  – для отожженной стали;  $K_{\text{тр}}=1,48$  – для неотожженной стали;

$K'_{\text{ту}}$ ;  $K''_{\text{ту}}$  – коэффициенты, учитывающие прохождение магнитного потока

**под углом** в зоне стыков ( $\approx 45^\circ$  для косых;  $\approx 90^\circ$  для прямых стыков, таблица 13);

$K_{\text{тш}}$  – коэффициент, учитывающий **перешихтовку** ярма при окончательной сборке, равен:

$K_{\text{тш}} = 1,01$  до 250 кВ·А,  $K_{\text{тш}}=1,02$  свыше 400 кВ·А;

$K_{\text{тз}}$  – коэффициент, учитывающий снятие **заусенец** и отжиг, равен:

если не сняты заусенцы, то  $K_{\text{тз}}=1,02$  при отжиге,  $K_{\text{тз}}=1,5$  без отжига;

если сняты заусенцы, то  $K_{\text{тз}}=1,0$  при отжиге,  $K_{\text{тз}}=1,01$  без отжига.

$N_z = 6$  – количество стыков;  $\Pi_c$  – площадь сечения стержня, м<sup>2</sup>;  $\delta$  – немагнитный зазор, м (принять его равным  $\delta = 0,0002$  м).

Таблица 13 – Значения коэффициента  $K_{\text{ту}}$  для стали 3404 и 3405 (0,3 и 0,35 мм)

$B_c$ , Тл	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
$K'_{\text{ту}}$ (косой стык)	3,45	4,0	4,3	4,3	4,0
$K''_{\text{ту}}$ (прямой стык)	7,9	9,0	9,8	10,1	9,8

Полный ток холостого хода  $I_{10}$ , А, и относительный ток  $i_o$ , %, соответственно:

$$I_{10} = \frac{Q_x}{mU_\phi}; \quad i_o = \frac{Q_x}{10S},$$

где мощности  $Q_x$  – в В·А;  $S$  – в кВ·А [1].

Таблица 14 – Полная удельная намагничивающая мощность  $q_c$  для холоднокатанной стали, В·А/кг

Индукция $B_c$ , Тл	Сталь 3404 0,35 мм	Сталь 3404 0,3 мм	Сталь 3405 0,35 мм	Сталь 3405 0,3 мм
1,3	0,9	0,87	0,86	0,85
1,35	0,98	0,955	0,945	0,925
1,4	1,06	1,04	1,02	1,00
1,45	1,195	1,165	1,133	1,102
1,5	1,33	1,29	1,246	1,205
1,55	1,55	1,48	1,424	1,36
1,6	1,775	1,688	1,602	1,526
1,65	1,73	3,12	2,176	1,97

1,7	3,4	3,073	2,75	2,42
-----	-----	-------	------	------

Таблица 15 –Намагничивающая мощность в зоне стыка, В·А/м<sup>2</sup>

$B_c$ , Тл	Сталь 3404	Сталь 3405
1,3	7400	6000
1,35	9400	7500
1,4	11400	9200
1,45	14000	11500
1,5	16600	13800
1,55	19500	16260
1,6	23500	19200
1,69	28500	23200
1,7	33000	27000

**11.2 Расчёт для ярма полуступенчатой формы.** Расчет для этого случая во многом совпадает с предыдущим, поэтому нужно ознакомиться с п. 11.1.

11.2.1 Определяем размеры магнитной системы, указанные в п. 11.1.1 и составляем чертёж (рис. 9) по рис. 7 с указанием полученных в расчете размеров.

11.2.2 Определяем длину средней магнитной линии для следующих участков.

$L_{ст} = 3l_{ок}$  – продольная часть стержня;  $L_{я} = 4a_{ок}$  – продольная часть ярма;  $L_{п} = 2l_{я}$  – плоские стыки;  $L_{кос} = 4a_{ст1}$  – косые стыки.

11.2.3 В соответствии с таблицей 4 выбираем число ступеней; составляем чертёж стержня по рис. 8 для выбранного числа ступеней, рассчитываем по таблице 9 или по приложению П4 размеры пакетов (указать их на чертеже).

11.2.4 Составляем чертёж ярма по рис. 9 для выбранного числа ступеней рассчитываем по таблице 9 или по приложению П4 размеры пакетов (указать их на чертеже).

11.2.5 Определяем объёмы ступеней магнитопровода для всех участков (аналогично п. 11.2.2.).

– Продольный участок стержней

$$V_{ст} = 2 \cdot L_{ст} (b_{ст1} \cdot a_{ст1} + b_{ст2} \cdot a_{ст2} + \dots + b_{ст,i} \cdot a_{ст,i}).$$

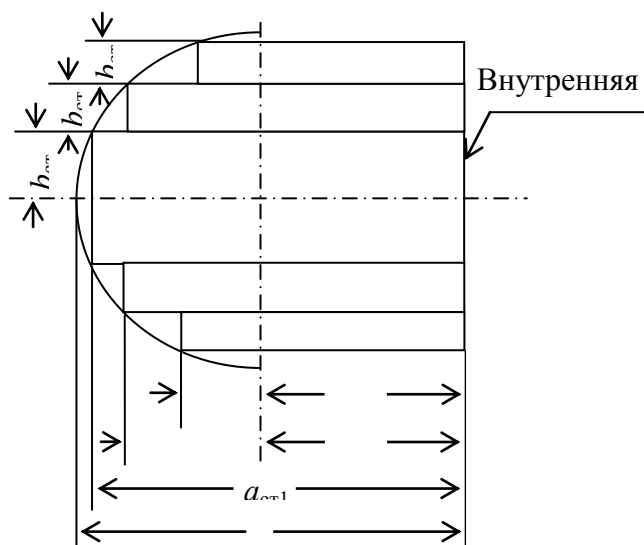


Рис. 9 – Сечение полуступенчатого ярма

– Косые стыки

$$V_{\text{кос}} = 2 \cdot L_{\text{кос}} (b_{\text{ст1}} \cdot a_{\text{ст1}} + b_{\text{ст2}} \cdot a_{\text{ст2}} + \dots + b_{\text{ст},i} \cdot a_{\text{ст},i}).$$

– Прямые стыки

$$V_{\text{п}} = 2L_{\text{п}} (b_{\text{ст1}} \cdot a_{\text{ст1}} + b_{\text{ст2}} \cdot a_{\text{ст2}} + \dots + b_{\text{ст},i} \cdot a_{\text{ст},i}).$$

– Продольный участок ярма

$$V_{\text{я}} = 2 \cdot L_{\text{я}} \cdot \left[ b_{\text{ст1}} \cdot a_{\text{ст1}} + b_{\text{ст2}} \left( \frac{a_{\text{ст1}}}{2} + \frac{a_{\text{ст2}}}{2} \right) + \dots + b_{\text{ст},i} \left( \frac{a_{\text{ст1}}}{2} + \frac{a_{\text{ст},i}}{2} \right) \right].$$

11.2.6 Находим потери в стали магнитопровода и её массу аналогично п.10.1.5.

11.2.7 Определяем намагничивающую мощность и ток холостого хода аналогично п.10.1.6.

**Примечание:** при расчете по пунктам 11.2.6 и 11.2.7 учесть, что магнитопровод разделен на 4 участка.

**11.3 Уточнение амплитуды магнитной индукции в стержне и в ярме, Тл:**

$$B_{\text{с}} = \frac{E_{\text{в}}}{4,44 \cdot f \cdot \Pi_{\text{с}}}; \quad B_{\text{я}} = \frac{E_{\text{в}}}{4,44 \cdot f \cdot \Pi_{\text{я}}}.$$

## 12 ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СПРОЕКТИРОВАННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**12.1 Расчет и построение внешних характеристик  $U_{\text{нн}} = f(k_{\text{нн}})$ .** Спроектированный трансформатор включается в сеть как понижающий. При этом обмотка ВН питается от симметричного источника с номинальными напряжением и частотой, а симметричная нагрузка на стороне НН меняется при изменении коэффициента нагрузки  $k_{\text{нн}}$  от 0 до 1,25 и при двух характерах нагрузки: при активно-индуктивной нагрузке  $\cos\varphi_2 = 0,8$  (типичный характер), при активно-ёмкостной нагрузке  $\cos(-\varphi_2) = 0,8$  (нетипичный характер).

При таком изменении нагрузки сначала рассчитывают для обоих характеров нагрузки процентное изменение напряжения трансформатора по формуле:

$$\Delta U = k_{\text{нн}} \cdot (u_{\text{а}}\% \cdot \cos\varphi_2 + u_{\text{р}}\% \cdot \sin\varphi_2), \%,$$

где  $u_{\text{а}}\%$ ,  $u_{\text{р}}\%$  - найденные расчетные значения активной и реактивной составляющих напряжения короткого замыкания, %;

при  $\cos\varphi_2 = 0,8$  получим  $\sin\varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2\varphi_2} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6$  о.е.;

при  $\cos(-\varphi_2) = 0,8$  получим  $\sin\varphi_2 = -0,6$ .

Затем находим в *процентах* фазное (оно же линейное!) напряжение обмотки НН:

$$U_{\text{нн}} = 100 - \Delta U, \%$$

После этого с шагом 0,25 изменяем коэффициент нагрузки в диапазоне  $k_{\text{нн}} = 0 \dots 1,25$  и приводим в таблице 16 результаты расчета двух внешних характеристик спроектированного трансформатора для обоих характеров нагрузки.

Таблица 16 – Расчеты внешних характеристик сухого трансформатора

Коэффициент нагрузки $k_{\text{нГ}}$ , о.е.		0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
Активно-индуктивная нагрузка при $\cos\varphi_2 = 0,8$	$\Delta U, \%$	0	...				
	$U_{\text{нн}}, \%$	100	...				
Активно-ёмкостная нагрузка при $\cos(-\varphi_2) = 0,8$	$\Delta U, \%$	0	...				
	$U_{\text{нн}}, \%$	100	...				

По результатам этих расчетов построить внешние характеристики в одних осях координат, поместить их в текст РПЗ и сделать выводы, ответив на следующие вопросы:

- 1 От чего зависит изменение вторичного напряжения  $\Delta U$ ?
- 2 Как влияют на вторичное напряжение положительное и отрицательное значения  $\Delta U$  при изменении коэффициента нагрузки трансформатора?
- 3 Какому характеру нагрузки и при каком значении  $k_{\text{нГ}}$  соответствует наибольшее (наименьшее) изменение вторичного напряжения?
- 4 При каких условиях не произойдет изменения вторичного напряжения при изменении нагрузки?

**12.2 Расчет и построение энергетических характеристик трансформатора.** Спроектированный трансформатор включается в сеть как понижающий. При этом обмотка ВН питается от симметричного источника с номинальными напряжением и частотой, а симметричная нагрузка на стороне НН меняется при изменении коэффициента нагрузки  $k_{\text{нГ}}$  от 0 до 1,25 и при двух характерах нагрузки: при активно-индуктивной нагрузке  $\cos\varphi_2 = 0,8$  (типичный характер), при активно-ёмкостной нагрузке  $\cos(-\varphi_2) = 0,8$  (нетипичный характер).

Привести в таблице 17 результаты расчета зависимости КПД спроектированного трансформатора от коэффициента нагрузки  $k_{\text{нГ}}$  при двух указанных выше характерах нагрузки по формуле ГОСТ:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + k_{\text{нГ}}^2 P_{\text{к}}}{k_{\text{нГ}} S_{\text{ном}} \cos\varphi_2 + P_0 + k_{\text{нГ}}^2 P_{\text{к}}},$$

где  $P_0, P_{\text{к}}$  – расчетные значения потерь холостого хода и короткого замыкания в кВт.

В эту таблицу нужно поместить значения оптимального коэффициента нагрузки  $k_{\text{нГ.опт}}$ , при котором трансформатор обладает наибольшим КПД:

$$k_{\text{нГ.опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{к}}}}.$$

По результатам расчетов построить две зависимости  $\eta = f(k_{\text{нГ}})$  в одних осях координат, поместить их в РПЗ и сделать выводы, ответив на следующие вопросы:

- 1 Какие факторы оказывают влияние на КПД трансформатора?

2 От чего зависит значение оптимального коэффициента нагрузки, при котором КПД трансформатора максимален?

3 От чего зависит максимум КПД трансформатора?

Таблица 17 – Расчеты энергетических характеристик сухого трансформатора

Коэффициент нагрузки	$k_{\text{нг}}$	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	$k_{\text{нг.опт}}$
Активно-индуктивная нагрузка при $\cos\varphi_2 = 0,8$	$P_0$ , кВт	$P_0$	...					
	$k_{\text{нг}}^2 \cdot P_{\text{к}}$ , кВт	0	...					
	$k_{\text{нг}} \cdot S_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_2$ , кВт	0	...					
	$\eta$ , о.е.	0	...					
Активно-ёмкостная нагрузка при $\cos(-\varphi_2) = 0,8$	$P_0$ , кВт	$P_0$	...					
	$k_{\text{нг}}^2 \cdot P_{\text{к}}$ , кВт	0	...					
	$k_{\text{нг}} \cdot S_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_2$ , кВт	0	...					
	$\eta$ , о.е.	0	...					

4 Как поддерживать максимальный КПД трансформатора при меняющейся нагрузке?

5 Как получить максимальный КПД при небольшой нагрузке?

6 Как получить максимальный КПД при номинальной нагрузке?

7 При какой нагрузке КПД максимальный?

## 13 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### 13.1 Определим погрешности для основных расчётных параметров:

а) для напряжения короткого замыкания

$$\delta u_{\text{к}} = \frac{u_{\text{к,зад}} - u_{\text{к,расч}}}{u_{\text{к,зад}}} \cdot 100\% ,$$

где  $u_{\text{к,зад}}$  - заданное значение  $u_{\text{к}}$ ;  $u_{\text{к,расч}}$  - расчетное значение  $u_{\text{к}}$ ;

б) для потерь короткого замыкания

$$\delta P_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к,зад}} - P_{\text{к,расч}}}{P_{\text{к,зад}}} \cdot 100\% ;$$

в) для потерь холостого хода

$$\delta P_0 = \frac{P_{0,\text{зад}} - P_{0,\text{расч}}}{P_{0,\text{зад}}} \cdot 100\% ;$$

г) для тока холостого хода

$$\delta I_{10} = \frac{I_{10,\text{зад}} - I_{10,\text{расч}}}{I_{10,\text{зад}}} \cdot 100\% .$$

Сделать выводы о степени соответствия полученных расчетных и заданных величин.

Если при расчете магнитной системы потери холостого хода превышают допустимое значение, то нужно проверить правильность расчета потерь. Сравните массу магнитной системы со значением, полученным в предварительном расчете при выборе основных размеров трансформатора. Проверьте, находится ли индукция в стержне в рекомендованных пределах. Если ошибок нет, то можно: 1) запланировать шихтовку в один лист; 2) применить лучшую электротехническую сталь; 3) увеличить количество косых стыков.

**13.2 Составим чертеж общего вида трансформатора с указанием размеров обмоток, межосевых и габаритных размеров.**

**13.3 Заполним сводку всех заданных и рассчитанных величин, форма которой дана в приложении П8.** При заполнении сводки указывать только первый предварительный и последний окончательный результаты, все промежуточные не приводить. Если значение только одно, привести его в строке «Окончательно».



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов. – 5-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
- 2 Гончарук А.И. Расчет и конструирование трансформаторов. -М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
- 3 Кацман М.М. Расчет и конструирование электрических машин. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 350 с.
- 4 ГОСТ 11677-85 Трансформаторы силовые. Общие технические условия.- М.: Изд-во стандартов, 1988. – 53 с.
- 5 Расчет трехфазного сухого силового трансформатора: Методические указания к выполнению курсовой работы по курсу «Электромеханика» для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения/Сост. В.Я. Иванов. – Курган: Изд-во КГУ, 2005. – 61 с.
- 6 Проектирование электрических машин /Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 2000. – 495 с.
- 7 Силовые трансформаторы: Методические указания к выполнению курсового проекта по курсу «Электромеханика» для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» /Сост. С.Г. Филимонов. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2006. – 19 с.
- 8 Игнатович В.М., Усачева Т.В. Расчет активной части и оценка эксплуатационных свойств силового трансформатора: Учебное пособие.– Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 84 с.
- 9 Трансформаторы и асинхронные машины. Контрольные вопросы для программированного обучения по курсу «Электрические машины»/Н.Н. Новиков, И.Е. Родионов, В.Ф. Шутько. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2006.– 33 с.

*Форма заполнения титульного листа записки*

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Энергетика и технология металлов»

***Расчет трехфазного сухого силового трансформатора***  
(тема)

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ  
расчетно-пояснительная записка

Дисциплина *Электрические машины. . . . .*

Студент группы ТС-306..... .. Фамилия И.О./ (Дата...и подпись)

Направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
(профиль «Электроснабжение»)

Руководитель . . . . .Фамилия И.О./ (Дата...и подпись)

Дата защиты . . . . .

Оценка . . . . .

Курган 201 . г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОБОЗНАЧЕНИЕ ВЕЛИЧИН

$a_1$  – ширина обмотки НН (ближней к стержню);

$a_2$  – ширина обмотки ВН (дальней от стержня);

$a_{12}$  – ширина канала между обмотками ВН и НН;

$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}$  - ширина приведенного канала рассеяния;

$a_{к1}; a_{к2}$  - ширина вентиляционного канала обмоток НН и ВН;

$B_c$  – амплитуда индукции в магнитопроводе;

$c$  – число стержней (равно числу фаз, то есть  $c = 3$ );

$d$  – диаметр стержня магнитопровода;

$d_1$  – диаметр провода НН (или  $d_{пр1}$ );

$d_2$  – диаметр провода обмотки ВН (или  $d_{пр2}$ );

$D_{cp} = \frac{D_1' + D_2''}{2}$  - средний диаметр обмоток,  $D_{cp} = D_{12}$ ;

$D_1 = D_{cp1}$  – средний диаметр обмотки НН;

$D_1'; D_1''$  – внутренний и наружный диаметры обмотки НН;

$D_2 = D_{cp2}$  – средний диаметр обмотки ВН;

$D_2'; D_2''$  – внутренний и наружный диаметр обмотки ВН;

$\beta = \frac{\pi D_{12}}{\ell}$  – отношение средней длины окружности обмоток (длины витка) к высоте обмотки;

$a_{22}$  – расстояние между обмотками соседних фаз;

$a_{01}$  – расстояние от обмотки НН до стержня;

$K_3 = \frac{\Pi_{фс}}{\Pi_{ф}}$  – коэффициент заполнения площади ступенчатой фигуры в зависимости от толщины пластин и изоляции (0,96÷0,98), рекомендуется 0,965;

$K_{кр} = \frac{\Pi_{фс}}{\Pi_{ф}}$  – коэффициент заполнения площади круга;

$K_c = K_{кр} \cdot K_3$  – общий коэффициент заполнения сталью площади круга;

$\Pi_{ок}$  – площадь поперечного сечения окна, заполняемого обмотками;

$\ell$  – длина обмотки ВН и НН;

$\ell_o$  – расстояние от торца обмотки до ярма;

$K_p$  – коэффициент Роговского (приведение идеального поля рассеяния к реальному), выбрать в пределах от 0,93 до 0,97 (рекомендуется 0,95);

$\Pi_1$  – площадь сечения витка обмотки НН, то есть всех проводов, составляющих виток обмотки;

## Продолжение приложения 2

$P_2$  – площадь сечения витка обмотки ВН, то есть всех проводов, составляющих виток обмотки;

$P_{пр1}, P_{пр2}$  – площадь сечения отдельного провода обмотки НН или ВН;

$K_{ус.я}$  – коэффициент усиления ярма (1,01÷1,05), обусловлен увеличением площади ярма для выравнивания магнитной индукции;

$P_c$  – активное сечение стержня ( $P_c = P_{фс} \cdot K_3$ );

$P_{фс}$  – площадь ступенчатой фигуры магнитопровода (площадь стали вместе с изоляцией);

$P_{\phi} = \frac{\pi d^2}{4}$  – площадь круга с диаметром  $d$  (стержень);

$\delta_{01}; \delta_{12}; \delta_{22}$  – толщина изоляции, размещенной в изоляционных промежутках;

$\ell_{п1}; \ell_{п2}$  – размер, на который изоляция катушки (диэлектрик) выступает за край катушки;

$K_D = \frac{P_{эл.осн.}}{P_K}$  – коэффициент добавочных потерь в элементах конструкции

( $K_D < 1$ ), зависит от мощности;

$K_{доб}$  – коэффициент добавочных потерь, вызванных эффектом вытеснения тока, то есть увеличением сопротивления на переменном токе по сравнению с постоянным (рекомендуется  $K_{доб} \leq 1,05$ );

$q[\text{Вт/м}^2]$  – тепловая нагрузка, то есть удельное тепловыделение на поверхности обмоток (плотность теплового потока);

$K_{зп}$  – коэффициент закрытия поверхности, учитывает перекрытие части охлаждающей поверхности рейками (6,8 или 10 шт.);

$a_{к1}$  – ширина охлаждающего канала обмотки НН;

$a_{к2}$  – ширина охлаждающего канала обмотки ВН;

$w_1 = w_{НН}$  – число витков обмотки НН;

$w_2 = w_{ВН}$  – число витков обмотки ВН;

$\rho_m, \rho_{ал}$  – удельное сопротивление меди и алюминия;

$h_{р НН}$  – ширина распорной рейки обмотки НН;

$h_{р ВН}$  – ширина распорной рейки обмотки ВН;

$m$  – число фаз;

$n_{в1}; n_{в2}$  – число отдельных проводов в витке обмотки НН или ВН;

$N_{сл1}; N_{сл2}$  – число слоев обмотки НН или ВН;

$a \times b$  – размеры сечения прямоугольного провода (приложение П5).

ПРИМЕР РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА

**1 Исходные данные для проектирования:**

$S_{\text{ном}}$ , кВ·А	Напряжения, кВ		$i_k$ , %	$i_0$ , %	Потери, кВт		Марка стали.	Толщина листа марки стали, мм	
	$U_{\text{вн}}$	$U_{\text{нн}}$			$P_k$	$P_0$		3404	3405
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
160	10,5	0,4	5,3	4,0	2,55	0,7	3404	0,3	0,35

Материал провода об- моток	Форма ярма	Плот- ность то- ка в об- мотках $j_{\text{доп}}$ , А/мм <sup>2</sup>	Класс нагрево- стойко- сти изо- ляции	Технология изготовления пластин	Конструкция обмоток цилиндрическая...		Схема и группа соеди- нен
					НН	ВН	
11	12	13	14	15	16	17	18
медь	ступен- чатая	до 2,7	<i>B</i>	отжиг после резки, без снятия за- усенцев	двухслой- ная	много- слойная	Y/Y <sub>0</sub> -0

2 Электромагнитный расчет трансформатора, в том числе:

- 2.1 определить основные электрические величины токов, рабочих и испытательных напряжений;
- 2.2 рассчитать основные размеры трансформатора, приняв амплитуду индукции  $B_c$  в стержне 1,5 Тл;
- 2.3 произвести расчет обмоток НН и ВН;
- 2.4 оценить тепловой режим обмоток;
- 2.5 рассчитать параметры короткого замыкания и механические усилия в обмотках при коротком замыкании за трансформатором;
- 2.6 выполнить окончательный расчет размеров магнитопровода и параметров холостого хода;
- 2.7 рассчитать массу активных материалов трансформатора.

3 Конструкторско-технологическая часть проекта.

4 Оценка эксплуатационных свойств рассчитанного трансформатора.

5 Графическая часть проекта содержит:

- 5.1 чертеж конструкции обмоток;
- 5.2 чертеж центрального пакета магнитопровода;
- 5.3 чертеж сечения стержня;
- 5.4 чертеж сечения ярма (для полуступенчатой формы);
- 5.4 схему электрическую обмотки ВН с ответвлениями;
- 5.5 чертеж общего вида трансформатора;
- 5.6 векторную диаграмму, поясняющую номер группы соединения фаз.

**2 Находим электрические параметры (п. 7.1).**

2.1 Мощность на один стержень:  $S'_1 = \frac{S_H}{3} = \frac{160}{3} = 53,3 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$

2.2 Фазные напряжения и токи обмоток:

$U_{\phi,Н,1} = 0,23 \text{ кВ}; I_{\phi,Н,1} = 231 \text{ А};$

$U_{\phi,Н,2} = 6,06 \text{ кВ}; I_{\phi,Н,2} = 8,8 \text{ А}.$

2.3 Напряжение короткого замыкания:

$u_{ка} = \frac{100 \cdot 2,55}{160} = 1,59\%; u_{кр} = \sqrt{u_k^2 - u_{ка}^2} = \sqrt{5,32^2 - 1,59^2} = 5,06\% .$

**3 Выбор изоляции (размеры в м согласно таблице 2 метод. указаний):**

$\ell_{02,М}$	$a_{12,М}$	$\delta_{1,2,М}$	$\ell_{п,2,М}$	$a_{22,М}$	$\delta_{2,2,М}$	$\ell_{01,М}$	$a_{0,1,М}$	$\delta_{0,1,М}$	$\ell_{п,1,М}$
0,08	0,04	0,005	0,04	0,045	0,003	0,015	0,015	0,001	0,001

**4 Определяем основные размеры трансформатора (п. 7.3.2).**

а) определение диаметра  $d$  стержня:

$$d = d' = 0,507^4 \sqrt{\beta} \cdot 4 \sqrt{\frac{S'_1 \cdot a_p \cdot K_p}{f \cdot u_{кр} \cdot B_c^2 \cdot K_c^2}},$$

где  $\beta = 2,2$  (из таблицы 4 методических указаний);

$S'_1 = 160/3 = 53,3 \text{ кВ} \cdot \text{А};$

Примем  $K_c = 0,9$  (из таблицы 4 метод. указаний);

$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3},$

где  $a_{12} = 40 \text{ мм} = 0,04 \text{ м}$  (из табл. 3 для  $U_{ВН} = 10 \text{ кВ}$ );

$\frac{a_1 + a_2}{3} = K \sqrt{S'_1} \cdot 10^{-2}; K = 0,57$  (из таблицы 4 метод. указаний);

$a' = \frac{a_1 + a_2}{3} = 0,57^4 \sqrt{53,3} \cdot 10^{-2} = 0,57 \cdot 2,7 \cdot 10^{-2} = 0,0154 \text{ м};$

тогда  $a_p = 0,04 + 0,0154 = 0,0554 \text{ м};$

$K_p = 0,95$  – коэффициент Роговского;

Тогда получим по [1]

$d' = 0,507^4 \sqrt{2,2} \cdot 4 \sqrt{\frac{53,3 \cdot 0,0554 \cdot 0,95}{50 \cdot 5,0 \cdot (1,5)^2 \cdot (0,9)^2}} = 0,173 \text{ м}.$

Округлим значение  $d''$  до 0,17 и найдем уточненное значение  $\beta$ :

$\beta = \beta' \left( \frac{d}{d''} \right)^4 = 2,2 \left( \frac{0,17}{0,173} \right)^4 = 2,05;$

б) определение среднего диаметра витка  $D_{1,2}$  и среднего диаметра обмоток НН и ВН ( $D_{cp1}$  и  $D_{cp2}$ ):

$$D_{12} = D'_{12} = d + 2a_{01} + a_{12} + 2,2a' = 0,17 + 2 \cdot 0,015 + 0,04 + 2,2 \cdot 0,0154 = 0,273 \text{ м};$$

$$D_{cp1} = D_{12} - a_{12} - 1,1a' = 0,273 - (0,04 + 0,017) = 0,216 \text{ м};$$

$$D_{cp2} = D_{12} + a_{12} + 1,1a' = 0,273 + 0,057 = 0,33 \text{ м};$$

в) определение (предварительно) высоты обмоток НН и ВН:

$$\ell' = \frac{\pi D'_{12}}{\beta} = \frac{3,14 \cdot 0,273}{2,05} = 0,418 \text{ м};$$

г) определяем активное сечение стержня (предварительно):

$$\Pi'_c = K_c \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 0,9 \frac{3,14 \cdot 0,17^2}{4} = 2,04 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

### 5 Предварительный расчет обмоток (п. 7.4):

а) определяем ЭДС витка

$$E'_B = 4,44 \cdot f \cdot \Pi'_c \cdot B_c = 4,44 \cdot 50 \cdot 2,04 \cdot 10^{-2} \cdot 1,5 = 6,79 \text{ В}.$$

Проверяем соответствие величины  $u_{кр}$  заданному значению 5,06%

$$u_{кр} = \frac{7,92 \cdot f \cdot S' \cdot a_p \cdot K_p \cdot \beta}{E_B^2 \cdot 10} = \frac{7,92 \cdot 50 \cdot 53,3 \cdot 0,0554 \cdot 0,95 \cdot 2,05}{6,79^2 \cdot 10} = 4,93\%.$$

Следовательно, после оценки относительного отклонения расчет можно продолжить;

б) определяем число витков обмотки НН

$$w_1 = \frac{230}{6,79} = 33,87,$$

округляем его до 34 ( $w_1 = 34$ ) и после этого корректируем ЭДС витка

$$E_B = \frac{230}{34} = 6,76 \text{ В}.$$

Определяем число витков обмотки ВН

$$w_2 = \frac{6060}{6,76} = 896.$$

в) разделим заданные потери  $P_k$  между обмотками, что обеспечит примерно равную плотность тока в них:

$$P_{k1} = P_k \cdot \frac{D_{cp1}}{D_{cp1} + D_{cp2}} = 2550 \cdot \frac{0,216}{0,216 + 0,33} = 1009 \text{ Вт},$$

$$P_{k2} = P_k - P_{k1} = 2550 - 1009 = 1541 \text{ Вт}.$$

Площадь сечения провода обмоток НН и ВН (предварительно):

$$\Pi_1 = \Pi_1' = \frac{3 \cdot 231^2 \cdot 21,35 \cdot 10^{-9} \cdot 3,14 \cdot 0,216 \cdot 34}{1009} = 78,1 \text{ мм}^2;$$

$$\Pi_2 = \Pi_2' = \frac{3 \cdot 8,8^2 \cdot 21,35 \cdot 10^{-9} \cdot 3,14 \cdot 0,33 \cdot 896}{1541} = 2,98 \text{ мм}^2,$$

где  $\rho_t = 21,35 \cdot 10^{-9}$  Ом/м – удельное сопротивление материала обмоток (медь) (из таблицы 6 методических указаний).

В результате получим плотности тока в обмотках НН и ВН:

$$j_1 = \frac{231}{78,1} = 2,96 \text{ А/мм}^2; \quad j_2 = 2,95 \text{ А/мм}^2;$$

г) видим, что плотность тока превышает допустимую, следовательно, расчет нужно повторить от п. 7.3.2, уменьшив величину диаметра стержня  $d$  до следующего нормализованного значения.

Выбираем  $d = 0,16$  м и корректируем средние диаметры согласно п. 7.3.4:

$$D_{12} = 0,16 + 2 \cdot 0,015 + 0,04 + 2,2 \cdot 0,0154 = 0,264 \text{ м}; \quad D_{\text{ср}1} = 0,264 - 0,04 - 1,1 \cdot 0,0154 = 0,207 \text{ м}; \quad D_{\text{ср}2} = 0,264 + 0,04 + 1,1 \cdot 0,0154 = 0,32 \text{ м}.$$

Корректируем коэффициент  $\beta$ :

$$\beta = \beta' \left( \frac{d}{d'} \right)^4 = 2,05 \left( \frac{0,16}{0,17} \right)^4 = 1,61.$$

Определяем длину обмоток

$$\ell = \frac{\pi D_{12}}{\beta} = \frac{3,14 \cdot 0,264}{1,61} = 0,515 \text{ м}.$$

Находим сечение стержня трансформатора

$$\Pi_{\text{с}} = K_{\text{с}} \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 0,9 \cdot \frac{\pi \cdot 0,16^2}{4} = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

Снова корректируем ЭДС витка

$$E'_B = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,8 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} = 5,99 \text{ В}.$$

Она стала меньше, тогда число витков обмотки НН изменится:

$$w_1 = \frac{230}{5,99} = 38,4,$$

округляем значение до 40 ( $w_1 = 40$ ).

Снова корректируем ЭДС витка и число витков обмотки ВН, получим

$$E_B = \frac{230}{40} = 5,75 \text{ В}; \quad w_2 = \frac{6060}{5,75} = 1054.$$

Проверяем напряжение к.з.

$$u_{\text{кр}} = \frac{7,92 \cdot 50 \cdot 53,3 \cdot 0,0554 \cdot 0,95 \cdot 1,61}{(5,75)^2 \cdot 10} = 5,4 \text{ \%}.$$



### Продолжение приложения 3

Это значение больше заданного (5,06), однако оно ещё входит в допуск, поэтому для точного соответствия согласно рекомендации [1] уменьшим коэффициент  $\beta$  в необходимой пропорции:

$$\beta = \beta' \left( \frac{u_{\text{кр}}}{u'_{\text{кр}}} \right) = 1,61 \left( \frac{5,06}{5,4} \right) = 1,5.$$

Уточняем для полученного значения  $\beta$  длину обмоток НН и ВН:

$$\ell = \frac{\pi D_{12}}{\beta} = \frac{3,14 \cdot 0,264}{1,5} = 0,55 \text{ м.}$$

Снова найдем сечение проводов, проверяя плотность тока обмоток

$$П_1 = \frac{3 \cdot 231^2 \cdot 21,35 \cdot 3,14 \cdot 0,207 \cdot 40}{1009 \cdot 10^9} = 88,1 \text{ мм}^2;$$

$$П_2 = \frac{3 \cdot (8,8)^2 \cdot 21,35 \cdot 3,14 \cdot 0,32 \cdot 1054}{1541 \cdot 10^9} = 3,4 \text{ мм}^2.$$

Аналогично для обмотки ВН:

$$j_2 = \frac{8,8}{3,4} = 2,58 \text{ А/мм}^2,$$

что меньше допустимой величины, то есть расчет можно продолжить. Отсюда плотность тока обмотки НН:

$$j_1 = \frac{231}{88,1} = 2,62 \text{ А/мм}^2.$$

д) выбираем число реек в количестве 8 шт. (из таблицы 4 метод. указаний).

Определяем ширину рейки для обмотки НН

$$h_{\text{рНН}} = 0,15 \cdot \pi \cdot D_{\text{ср1}} / 8 = \frac{0,15 \cdot 3,14 \cdot 0,207}{8} \approx 13 \text{ мм.}$$

Определяем ширину рейки для обмотки ВН

$$h_{\text{рВН}} = 0,15 \cdot \pi \cdot D_{\text{ср2}} / 8 = \frac{0,15 \cdot 3,14 \cdot 0,32}{8} = 17 \text{ мм.}$$

### 6 Оценим тепловой режим обмоток НН и ВН (п. 7.5):

а) определяем фактическую ширину охлаждающих каналов для обмоток НН и ВН (выбраны согласно таблиц 2 и 3 метод. указаний с учётом изоляционных промежутков, которые улучшают условия охлаждения):

$$a_{\text{к1}} = \frac{a_{01} + a_{12}}{2} = \frac{0,015 + 0,04}{2} = 0,0275 \text{ м} > 15 \text{ мм};$$

для обмотки ВН шириной естественного канала охлаждения будет  $a_{12}$ :

$$a_{\text{к2}} = a_{12} = 0,04 \text{ м} > 15 \text{ мм},$$

поэтому выбираем из таблицы 6 значение (при классе нагревостойкости изоляции **B**)  $q = 380 \text{ Вт/мм}^2$  для канала 15 мм (1-я строка таблицы 5 метод. указаний);

б) определяем фактическую плотность теплового потока обмоток:

$$q_{\text{НН}} = 21,35 \cdot 10^{-9} \frac{40 \cdot (231)^2}{2 \cdot 0,55 \cdot 88,1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,85 \cdot 0,96} = 576 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{\text{ВН}} = 21,35 \cdot \frac{1054 \cdot (8,8)^2 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 0,55 \cdot 3,4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,85 \cdot 0,96} = 571 \text{ Вт/м}^2.$$

Согласно [1] норма плотности теплового потока составляет 380 Вт/м<sup>2</sup> (для обеих обмоток при классе нагревостойкости **B**). Видим, что эти нормы превышены, поэтому необходимо введение охлаждающих каналов, причем для обмотки ВН достаточно ширины дополнительного канала 10 мм и такого же канала 10 мм – для обмотки НН. Тогда допустимая плотность теплового потока составит (при классе нагревостойкости **B**):

- для обмотки НН получим:  $q_{\text{НН}} = 380 + 300 = 680 > 576 \text{ Вт/м}^2$ ;
- для обмотки ВН получим:  $q_{\text{ВН}} = 380 + 300 = 680 > 571 \text{ Вт/м}^2$ .

**7 Выполним расчет обмотки низшего напряжения** (п. 8.1). Исходные данные для расчета следующие:

$$w_1 = 40; D_{\text{ср1}} = 0,207 \text{ м}; D_{12} = 0,264 \text{ м}; \ell = 0,55 \text{ м}; \Pi_1 = 88,1 \text{ мм}^2; a_{\text{к1доп}} = 10 \text{ мм}.$$

Остальные размеры взять в п.3 методики расчета.

Находим число витков в слое обмотки НН

$$w_{\text{сл1}} = \frac{w_1}{2} = \frac{40}{2} = 20 .$$

Определяем высоту одного витка

$$h_{\text{в1}} = \frac{\ell}{w_{\text{сл1}} + 1} = \frac{0,55}{21} = 26,1 \text{ мм}.$$

Перебираем варианты числа параллельных проводов с толщиной изоляции 0,5 мм на две стороны и при намотке плашмя:

- сначала берём один провод и, анализируя по табл.1 приложения П5 её данные, видим, что в ней нет нужного размера провода;

- затем берём два провода в параллель: сечение одного из них составляет  $\frac{88,1}{2} = 44 \text{ мм}^2$ , при этом ширина его будет

$$b = \frac{26,1 - 0,5 \cdot 2}{2} = 12,5 \text{ мм}.$$

В табл.1 приложения П5 по значению ширины  $b$  отыскиваем наиболее близкий размер: 3,55×12,5 мм (сечение 43,8 мм<sup>2</sup>).

Записываем выбранный провод

$$\text{(марка провода)} - 2 \times \frac{3,55 \times 12,50}{4,1 \times 13,0} \times 43,8 \text{ мм}^2.$$

Уточняем значения  $\ell_1$  и  $\Pi_1$ :

$$\begin{aligned}\ell_1 &= 13,1 \times 2 \times 21 = 0,545 \text{ м}, \\ \Pi_1 &= 2 \times 43,8 = 87,6 \text{ мм}^2.\end{aligned}$$

Таким образом, обмотка НН должна быть намотана на цилиндрическую оправку диаметром  $d+a_{01}=0,16+0,04=0,2$  м в два слоя, между слоями помещаются 8 планок толщиной 10 мм размерами  $0,56 \times 0,013$  м ( $560 \times 13$  мм), число витков в каждом слое 20, намотка ведется двумя параллельными проводами плашмя. Для закрепления витков обмотка промазывается бакелитовым лаком и просушивается.

Определяем остальные размеры обмотки НН:

$$a_1 = 2a' + a_{к1} = 2 \cdot 4,1 + 10 = 18,2 \text{ мм};$$

$$D'_1 = d + 2a_{01} = 0,16 + 2(0,015) = 0,19 \text{ м} - \text{внутренний диаметр обмотки НН};$$

$$D''_1 = D'_1 + a_1 = 0,19 + 0,0182 = 0,208 \text{ м} - \text{наружный диаметр обмотки НН};$$

$$D_{ср1} = 0,5(0,19 + 0,208) = 0,2 \text{ м}.$$

Определяем массу обмотки без изоляции

$$m_{01} = 8900 \cdot 87,6(3 \cdot 3,14 \cdot 0,2 \cdot 40 + 7,5 \cdot 0,55) / 10^6 = 61,96 \text{ кг}.$$

Определяем массу обмотки с изоляцией

$$m_{пр01} = m_{01} \cdot K_{из} = 61,96 \cdot 1,02 = 63,2 \text{ кг}.$$

**8 Выполним расчет обмотки высшего напряжения** (п. 9.2.). Исходные данные для расчета:  $a_{к2} = 10$  мм;  $w_2 = 1054$ ;  $D_{срВН} = 0,32$  м;  $D_{12} = 0,264$  м;  $\ell = l_2 = 0,55$  м;

$$\Pi_1 = 3,4 \text{ мм}^2; E_B = 5,75 \text{ В}.$$

Остальные размеры берутся из п. 3 методики расчета.

Порядок расчета:

а) определяем число витков на отводах обмотки ВН:

$$1\text{-й (конец обмотки)} w_{2\text{max}} = 1,05 \cdot w_2 = 1107 \text{ витков};$$

$$2\text{-й (+2, 5\%)} w_2 = 1,025 \cdot w_2 = 1080 \text{ витков};$$

$$3\text{-й (норма)} w_2 = 1054;$$

$$4\text{-й (-2, 5\%)} w_2 = 0,975 \cdot w_2 = 1028 \text{ витков};$$

$$5\text{-й (-5\%)} w_{2\text{min}} = 0,95 \cdot w_2 = 1001 \text{ виток};$$

б) выбираем размер провода из табл. Пб (размер изоляции на обе стороны 0,4 мм). Выбираем диаметр провода  $d_2 = 2,12$  мм сечением  $3,53 \text{ мм}^2$ .

Число слоев обмотки ВН ориентировочно

$$n'_{сл2} = \frac{(2,12 + 0,4) \cdot w_{2\text{max}}}{\ell} = \frac{2,52 \cdot 1107}{550} = 5,07,$$

округляем  $n'_{сл2}$  в большую сторону, до 6.

Оставляем витки с отводами в наружном слое, то есть

$$1107 - 1001 = 106 \text{ витков}.$$

### Продолжение приложения 3

Остальные 1001 витков разделяем на 5 слоев, примерно по 200 витков в слое.

Длина обмотки ВН при этих условиях составит

$$\ell'_2 = (2,12 + 0,4)(w'_{\text{сл}2} + 1) = 2,52 \cdot 201 = 0,506 \text{ м.}$$

В соответствии с рекомендациями п. 9.2 разбиваем обмотку на 2 катушки по 2 и 4 слоя с каналом 10 мм между ними;

в) определяем рабочее напряжение двух слоев (межслойное):

$$U_{\text{мсл}} = 2w_{\text{сл}2} \cdot E_{\text{В}} = 2 \cdot 200 \cdot 5,75 = 2300 \text{ В,}$$

то есть в соответствии с п. 7.2.4 необходимо между слоями наматывать по 4 слоя лакоткани:

- между слоями 1 и 2;
- между слоями 3 и 4;
- между слоями 4 и 5;
- между слоями 5 и 6, итого 16 слоев толщиной 0,15 мм;

г) определяем размеры обмотки ВН:

$$D'_2 = D'_1 + a_{12} = 0,207 + 0,04 = 0,247 \text{ м – внутренний диаметр,}$$

$$a_2 = d_2 \cdot N_{\text{сл}2} + \Delta_{\text{лак}} \cdot N_{\text{лак}} + a_{\text{к}2} = 2,52 \cdot 6 + 0,15 \cdot 16 + 10 = 25,4 \text{ мм;}$$

$$D''_2 = D'_2 + 2a_2 = 0,247 + 2 \cdot 0,0254 \approx 0,3 \text{ м;}$$

$$D_{\text{ср}2} = 0,5(D'_2 + D''_2) = 0,5(0,247 + 0,3) \approx 0,274 \text{ м;}$$

д) определяем массу металла обмотки ВН без изоляции

$$m_{02} = \gamma_{\text{пр}} \cdot \Pi_2 (c \cdot \pi \cdot D_{\text{ср}2} w_{2\text{макс}} + 7,5\ell) = .$$

$$= 8900 \cdot 3,53 (3 \cdot 3,14 \cdot 0,2174 \cdot 1107 + 7,5 \cdot 0,55) = 89,9 \text{ кг.}$$

## 9 Расчет параметров короткого замыкания

Порядок расчета:

а) определяем потери в обмотке НН (соединение звездой):

$$P_{\text{кНН}} = 21,35 \cdot \frac{(231)^2}{87,6} [3,14 \cdot 3 \cdot 0,2 \cdot 40 + 7,5 \cdot 0,55] \cdot 10^{-3} \cdot 1,05 = 1085 \text{ Вт ;}$$

б) определение потерь в обмотке ВН (соединение звездой):

$$P_{\text{кВН}} = 21,35 \cdot \frac{(8,8)^2}{3,53} [3 \cdot 3,14 \cdot 0,274 \cdot 1054 + 7,5 \cdot 0,55] \cdot 1,05 \cdot 10^{-3} = 1340 \text{ Вт.}$$

Общие потери в обмотках и отводах

$$P_{\text{к}} = 1085 + 1340 = 2425 \text{ Вт.}$$

Проверяем соотношение потерь в обмотках НН и ВН:

$$\frac{P_{\text{кН}}}{P_{\text{кНН}} + P_{\text{кВН}}} = \frac{1085}{2425} = 0,448;$$

в) определяем напряжения  $u_k$

*Продолжение приложения 3*

$$u_k = \sqrt{u_{ка}^2 + u_{кр}^2};$$

$$u_{ка} = 100 \frac{P_k}{S_H} = 100 \cdot \frac{2,425}{160} = 1,51 \%;$$

$$u_{кр} = \frac{7,92 \cdot 50 \cdot 53,3 \cdot 0,0545 \cdot 1,5 \cdot 0,95}{(5,75)^2 \cdot 10} = 4,95 \%;$$

$$u_k = \sqrt{(4,95)^2 + (1,51)^2} = 5,175 \%,$$

где уточненное значение  $a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 0,04 + \frac{0,0182 + 0,0254}{3} = 0,0545$  м.

г) рассчитываем **механические усилия** в обмотках при к.з ( пункт 10.5 методических указаний).

## 10 Определение размеров магнитной системы и параметров холостого хода (п. 11.1)

Исходные данные для расчета:

$$D_2'' = 0,3 \text{ м}; \quad a_{22} = 0,045 \text{ м}; \quad \ell_{02} = 0,08 \text{ м}; \quad \ell = 0,55 \text{ м}.$$

$a_{ст1} = d \times 0,96 = 0,154$  м (ширина пакета 1-й ступени согласно таблице 9 метод. указаний);  $K_3 = 0,965$ ;

$g_{ст} = 7650 \text{ кг/м}^3$ ;  $B_c = 1,5 \text{ Тл}$ ;  $P = 1,03 \text{ Вт/кг}$  (для стали 3404 толщиной 0,3 мм при индукции 1,5 Тл согласно таблице 10 метод. указаний), пластины отожжены  $q_c = 1,29 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$  (для стали 3404 толщиной 0,3 мм при индукции 1,5 Тл из таблицы 14 метод. указаний);

$$\mu_c = 1,79 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2; \quad \delta = 0,2 \text{ мм}.$$

Ширина окна

$$a_{ок} = (0,3 - 0,16) + 0,045 = 0,185 \text{ м}.$$

Высота окна

$$\ell_{ок} = 0,55 + 2 \cdot 0,08 = 0,71 \text{ м}.$$

Межцентровое расстояние для стержней

$$a_{мц} = d + a_{ок} = 0,16 + 0,185 = 0,345 \text{ м}.$$

Межцентровое расстояние для ярем

$$\ell_{мц} = \ell_{я} + \ell_{ок} = d + \ell_{ок} = 0,16 + 0,71 = 0,87 \text{ м}.$$

Габаритный размер магнитной системы в длину

$$a_{Г} = 2a_{мц} + a_{ст1} = 2 \cdot 0,345 + 0,154 = 0,844 \text{ м}.$$

Габаритный размер магнитной системы в высоту

$$a_{Г} = \ell_{мц} + \ell = \ell_{мц} + d = 0,87 + 0,16 = 1,03 \text{ м}.$$

Длина средней магнитной линии:

- по продольным участкам

*Продолжение приложения 3*

$$L_{\text{пр}} = 4a_{\text{ок}} + 3\ell_{\text{ок}} = 4 \cdot 0,185 + 3 \cdot 0,71 = 2,87 \text{ м};$$

- по прямым стыкам

$$L_{\text{п}} = 2\ell_{\text{я}} = 2\ell_{\text{д}} = 2 \cdot 0,16 = 0,32 \text{ м};$$

- по косым стыкам

$$L_{\text{кос}} = 4 \cdot q_{\text{ст1}} = 4 \cdot 0,154 = 0,616 \text{ м}.$$

Размеры пакетов (ступеней) в поперечном сечении стержней и яра (таблица 9 метод. указаний):

1-я ступень

$$a_{\text{ст1}} = 0,96 \times d = 0,96 \times 0,16 = 0,154 \text{ м};$$

$$b_{\text{ст1}} = 0,15 \times d = 0,15 \times 0,16 = 0,024 \text{ м};$$

$$a \times b = 0,154 \cdot 0,024 = 36,9 \cdot 10^{-4};$$

2-я ступень

$$a_{\text{ст2}} = 0,87 \times d = 0,14 \text{ м},$$

$$b_{\text{ст2}} = 0,1 \times d = 0,016 \text{ м},$$

$$a \times b = 0,14 \cdot 0,016 = 22,4 \cdot 10^{-4},$$

3-я ступень

$$a_{\text{ст3}} = 0,77 \times d = 0,123 \text{ м},$$

$$b_{\text{ст3}} = 0,07 \times d = 0,11 \text{ м}, \quad a \times b = 13,5 \cdot 10^{-4},$$

4-я ступень

$$a_{\text{ст4}} = 0,64 \times d = 0,1 \text{ м},$$

$$b_{\text{ст4}} = 0,06 \times d = 0,01 \text{ м}, \quad a \times b = 10 \cdot 10^{-4},$$

5-я ступень

$$a_{\text{ст5}} = 0,5 \times d = 0,08 \text{ м},$$

$$b_{\text{ст5}} = 0,05 \times d = 0,008 \text{ м}, \quad a \times b = 6,4 \cdot 10^{-4},$$

6-я ступень

$$a_{\text{ст6}} = 0,3 \times d = 0,05 \text{ м},$$

$$b_{\text{ст6}} = 0,04 \times d = 0,006 \text{ м}, \quad a \times b = 3,0 \cdot 10^{-4}.$$

Объем ступеней магнитопровода для всех участков

Объем продольных участков

$$V_{\text{пр}} = 2L_{\text{пр}} \sum a_i b_i = 2 \cdot 3,87 \cdot 10^{-4} (36,9 + 22,4 + 13,5 + 10 + 6,4 + 3) = 53 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Масса продольных участков

$$m_{\text{пр}} = V_{\text{пр}} \cdot g \cdot K_3 = 53 \cdot 10^{-3} \cdot 7650 \cdot 0,965 = 391,2 \text{ кг}.$$

Объем участков с косыми стыками

$$V_{\text{кос}} = 2L_{\text{кос}} \sum a_{\text{ст},i} \cdot b_{\text{ст},i} = 2 \cdot 0,616 \cdot 0,00937 = 0,0115 \text{ м}^3.$$

Масса участков с косыми стыками

$$m_{\text{кос}} = V_{\text{кос}} \cdot K_3 \cdot g_{\text{ст}} = 0,0115 \cdot 0,965 \cdot 7650 = 84,9 \text{ кг}.$$

Объем участков с прямыми стыками

$$V_{\text{п}} = 2L_{\text{п}} \cdot \sum a_{\text{ст},i} \cdot b_{\text{ст},i} = 2 \cdot 0,32 \cdot 0,00937 = 0,0059 \text{ м}^3.$$

Масса участков с прямыми стыками

$$m_{\text{кос}} = V_{\text{кос}} \cdot K_3 \cdot g_{\text{ст}} = 0,0059 \cdot 0,965 \cdot 7650 = 43,55 \text{ кг}.$$

Масса магнитопровода

$$m_{\text{м}} = m_{\text{пр}} + m_{\text{кос}} + m_{\text{п}} = 391,2 + 84,9 + 43,55 = 519,65 \text{ кг}.$$

Потери в магнитопроводе

$$P = p(m_{\text{пр}} + K_{\text{пд}} \cdot K'_{\text{уп}} \cdot m_{\text{кос}} + K_{\text{пд}} \cdot K''_{\text{уп}} \cdot m_{\text{п}}) = \\ = 1,03(391,2 + 1,12 \cdot 1,35 \cdot 84,9 + 1,12 \cdot 2,02 \cdot 43,55) = 636,6 \text{ Вт}.$$

Намагничивающая мощность, В·А

$$Q_{\text{х}} = [K_{\text{тр}} \cdot K_{\text{тз}} \cdot q_{\text{с}}(m_{\text{п}} + K'_{\text{ту}} \cdot m_{\text{кос}} + K''_{\text{ту}} \cdot m_{\text{пр}}) + \sum q_3 \cdot N_3 \cdot n_{\text{с}}] \cdot K_{\text{пш}} = \\ = [1,18 \cdot 1,02 \cdot 1,29(391,2 + 4,3 \cdot 84,9 + 9,8 \cdot 43,55) + 16600 \cdot 6 \cdot 1,8 \cdot 10^{-2}] \cdot 1,01 = 3701,3 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Ток холостого хода, А и %:

$$I_{10} = \frac{Q_{\text{х}}}{m \cdot U_{1\Phi}} = \frac{3701,3}{3 \cdot 6060} = 0,203 \text{ А}; \quad i_0 \% = \frac{0,203}{8,8} \cdot 100 = 2,3 \text{ \%}.$$

Амплитуда индукции в стержне  $B_{\text{с}} = 5,75 / (4,44 \cdot 50 \cdot 1,8 \cdot 10^{-2}) = 1,45 \text{ Тл}.$

## 11 Оценка результатов, выводы

Напряжение короткого замыкания,  $u_{\text{к}}$

$$\delta u_{\text{к}} = \frac{u_{\text{кзад}} - u_{\text{красч}}}{u_{\text{кзад}}} \cdot 100\% = \frac{5,3 - 5,175}{5,3} \cdot 100 = 2,35 \text{ \%}.$$

Потери короткого замыкания и холостого хода

$$\delta P_{\text{к}} = \frac{P_{\text{кзад}} - P_{\text{красч}}}{P_{\text{кзад}}} = \frac{2550 - 2425}{2550} = 4,9 \text{ \%};$$

$$\delta P_0 = \frac{P_{0,\text{зад}} - P_{0,\text{расч}}}{P_{0,\text{зад}}} = \frac{700 - 636,6}{700} = 9,06 \text{ \%}.$$

Ток холостого хода  $\delta i_0 = \frac{i_{0,\text{зад}} - i_{0,\text{расч}}}{i_{0,\text{зад}}} = \frac{4,0 - 2,3}{4,0} = 42,5 \text{ \%}.$

**Выводы:** результаты расчета укладываются в заданные требования, кроме тока холостого хода.

Размеры пакетов ( $a \times b$ ) для 7 и 8 ступеней

№ ступени	7 ступеней	8 ступеней
1	0,959×0,14	0,961×0,134
2	0,849×0,08	0,884×0,096
3	0,812×0,071	0,827×0,05
4	0,729×0,05	0,75×0,05
5	0,646×0,038	0,673×0,038
6	0,563×0,033	0,596×0,031
7	0,5×0,021	0,461×0,03
8	-	0,403×0,023



## Приложение 5

Таблица 1 П5 – Номинальные сечения, мм<sup>2</sup> и размеры (a×b) медного (ПБ) и алюминиевого (АПБ) обмоточного провода (выше и правее жирной линии).

<i>b \ a</i>	1,40	1,50	1,60	1,70	1, 80	1,90	2,00	2,12	2,24	2,36	2,50	2,65
3,75	5,04	-	5,79	-	6,39	-	7,14	-	8,04	-	8,83	-
4,00	5,39	5,79	6,19	6,44	6,84	7,24	7,64	8,12	8,60	8,89	9,45	10,1
4,25	5,76	-	6,59	-	7,29	-	8,14	-	9,16	-	10,1	-
4,50	6,09	6,54	6,99	7,29	7,74	8,19	8,64	9,18	9,72	10,1	10,7	11,4
4,75	6,44	-	7,39	-	8,19	-	9,14	-	10,3	-	11,3	-
5,00	6,79	7,29	7,79	8,14	8,64	9,14	9,64	10,2	10,8	11,3	12,0	12,7
5,30	7,21	-	8,27	-	9,18	-	10,2	-	11,5	-	12,7	-
5,60	7,63	8,19	8,76	9,16	9,72	10,3	10,8	11,5	12,2	12,7	13,5	14,3
6,00	8,19	-	9,39	-	10,4	-	11,6	-	13,1	-	14,5	-
6,30	8,61	9,24	9,87	10,4	11,0	11,6	12,2	13,0	13,8	14,3	15,2	16,2
6,70	9,17	-	10,5	-	11,7	-	13,0	-	14,7	-	16,2	-
7,10	9,73	10,4	11,2	11,7	12,4	13,1	13,8	14,7	15,5	16,2	17,2	18,3
7,50	10,3	-	11,8	-	13,1	-	14,6	-	16,4	-	18,2	-
8,00	11,0	11,8	12,6	13,2	14,0	14,8	15,6	16,6	17,6	18,3	19,5	20,7
8,50	11,7	-	13,4	-	14,9	-	16,6	-	18,7	-	20,7	-
9,00	12,4	13,3	14,2	14,9	15,8	16,7	17,6	18,7	19,8	20,7	22,0	23,3
9,50	13,1	-	15,0	-	16,7	-	18,6	-	20,9	-	23,2	-
10,00	13,8	14,8	15,8	16,6	17,6	18,6	19,6	20,8	22,0	23,1	24,5	26,0
10,60	14,6	-	16,8	-	18,7	-	20,8	-	23,4	-	26,0	-
11,20	15,5	16,6	17,7	18,7	19,8	20,9	22,0	23,4	24,7	25,9	27,5	29,1
11,80	-	-	18,7	-	20,9	-	23,2	-	26,1	-	29,0	-
12,50	-	18,5	19,8	20,9	22,1	23,4	24,6	26,1	27,6	29,0	30,7	32,6
13,20	-	-	-	-	23,4	-	26,0	-	29,2	-	32,5	-
14,00	-	-	-	-	24,8	26,2	27,6	29,3	31,0	32,5	34,5	36,6
15,00	-	-	-	-	-	-	29,6	-	33,2	-	37,0	-
16,00	-	-	-	-	-	-	31,6	33,6	35,5	37,2	39,5	41,9

**Примечание:** 1 Толщина изоляции 0, 45(0, 5) мм на обе стороны. Расчет вести по значению в скобках.

Продолжение таблицы 1 П5

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

Номинальные размеры сечения и изоляция круглого медного и алюминиевого обмоточного провода марок ПБ и АПБ с толщиной изоляции на стороны  $2\delta=0, 30 (0, 40)$  мм. Таблица

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

**Примечание:** 1 Провод ПБ и АПБ всех диаметров выпускается с изоляцией на стороны толщиной  $2\delta=0, 30 (0, 40)$ ; 0, 72 (0, 82); провод диаметром от 2, 24 мм и выше – также с изоляцией 1, 68 (1, 83) и 1, 92 (2, 07), а провод диаметром от 3, 75 мм и выше – также с изоляцией 2, 88 (3, 08); 4, 08 (4, 33) и 5, 75 (6, 11) мм.

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

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

Таблица 1 П7 – Ориентировочное увеличение в процентах массы медного провода марки ПБ и алюминиевого марки АПБ (см. примечание1)

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

**Примечание:**

1 Для алюминиевого провода марки АПБ данные таблицы умножить на 3,3.

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

Таблица 2 П7 – Ориентировочное увеличение массы прямоугольного медного провода в процентах за счет изоляции для марки ПБ и алюминиевого марки АПБ (примечание 3) при номинальной толщине изоляции на две стороны 2δ=0,45мм(0,5мм).

$a, \text{ мм}$ $b, \text{ мм}$	1,40 – 1,80	1,90 – 2,65	2,80 – 3,75	4,00 – 7,00
3,75 – 7,50	3,5	3	2,5	2,0
8,0 – 18,0	2,5	2	2,0	1,5

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

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

3 Для алюминиевого провода данные, полученные из таблицы или с учетом примеч. 1 и 2, умножать на  $\gamma_M/\gamma_A = 3,3$ .

Сводка  
всех заданных и рассчитанных величин

1. Исходные данные для проектирования:

$S_{\text{ном}}$ , кВ·А	Напряжения, кВ		$u_{\text{к}}$ , %	$i_0$ , %	Потери, кВт		Марка стали.	Толщина листа марки стали, мм	
	$U_{\text{вн}}$	$U_{\text{нн}}$			$P_{\text{к}}$	$P_0$		3404	3405
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
								0,30	0,35

Материал провода об- моток	Фор- ма ярма	Плотность тока в об- мотках $j_{\text{доп}}$ , А/мм <sup>2</sup>	Класс нагрево- стойко- сти изо- ляции	Техноло- гия изго- товления пластин	Конструкция обмоток цилиндрическая...		Схема и группа соеди- нения
					НН	ВН	
11	12	13	14	15	16	17	18

2 Выбраны параметры (предварительно, п. 6.1)

2.1 Толщина и марка стали:

2.2 Материал обмоток:

2.3 Технология изготовления пластин:

2.4 Форма ярма:

2.5 Плотность тока обмоток ВН:  
обмоток НН:

2.6 Конструкция катушек НН:

2.7 Конструкция катушек ВН:

2.8 Индукция  $B_c$  в стержне:

2.9 Класс нагревостойкости изоляции: - расчетная температура:

3 Электрические параметры (п.7.1)

3.1 Мощность на 1-н стержень:

3.2 Фазные напряжения и токи:

$$U_{\text{фн1}} = \quad ; I_{\text{фн1}} = \quad ; U_{\text{фн2}} = \quad ; I_{\text{фн2}} = \quad .$$

3.3 Напряжение короткого замыкания:

$$u_{\text{ка}} = \quad ; u_{\text{кр}} = \quad .$$

4 Выбор изоляции (в мм)

$\ell_{02}$	$a_{12}$	$\delta_{12}$	$\ell_{п2}$	$a_{22}$	$\delta_{22}$	$\ell_{01}$	$a_{01}$	$\delta_{01}$	$\ell_{п1}$

Число слоев лакоткани:

5 Основные размеры трансформатора (предварительно, п.7.3)

Величина	$d$	$\beta$	$a_p$	$D_{cp1}$	$D_{cp2}$	$\ell$	$\Pi_c$
	М	-	мм	М	М	М	М <sup>2</sup>
Предварительно							
Окончательно							

#### 6 Предварительный расчет обмоток (п.7.4)

Параметр	$E_B$	$w_1$	$w_2$	$j_{cp1}$	$j_{cp2}$	$\Pi_1$	$\Pi_2$	Число реек
	В	-	-	А/мм <sup>2</sup>	А/мм <sup>2</sup>	мм <sup>2</sup>	мм <sup>2</sup>	-
Предварительно								
Окончательно								

#### 7 Расчет обмоток НН (п. 8.1 или 8.2)

Параметр	$w_{сл1}$	$n_{в1}$	$\ell_1$	$a_1$	$D'_1$	$D''_1$	$\Pi_{охл1}$	$m_{01}$	$P_{эл1}$	$q_{(1)}$
	-	-	М	М	М	М	М <sup>2</sup>	кг	Вт	Вт/М <sup>2</sup>
Предварительно										
Окончательно										

Выбран провод:

$$(\text{марка провода}) - n_{в1} \times \frac{a \times b}{a' \times b'} \times \Pi_{пр1} = \quad ; \Pi_1 =$$

#### 8 Расчет обмоток ВН (п.9.2)

Параметр	$w_2$	$N_{сл2}$	$U_{м,сл}$	$\Pi_{охл2}$	$D'_2$	$D''_2$	$a_2$	$m_{02}$	$P_{эл2}$	$q_{(2)}$
	-	-	В	М <sup>2</sup>	М	М	М	кг	Вт	Вт/М <sup>2</sup>
Предварительно										
Окончательно										

Выбран провод

$$(\text{марка провода}) - n_{в2} \times \frac{d_2}{d'_2} \times \Pi_{пр2} = \quad ; \Pi_2 = \Pi_{пр2} \cdot n_{в2} =$$

#### 9 Расчет параметров короткого замыкания (п.10)

Параметр	$P_{к1}$	$P_{к2}$	$P_k$	$u_{ка}$	$u_{кр}$	$u_k$	$\beta$
	Вт	Вт	Вт	%	%	%	-
Предварительно							
Окончательно							

#### 10 Расчет магнитной системы (п.п. 11.1 и 11.2)

Параметр	$a_{ок}$	$\ell_{ок}$	$a_r$	$\ell_r$	$d$	Число ступеней	$P_o$	$m_m$	$i_o$
	М	М	М	М	М	-	Вт	кг	%
Предварительно									
Окончательно									

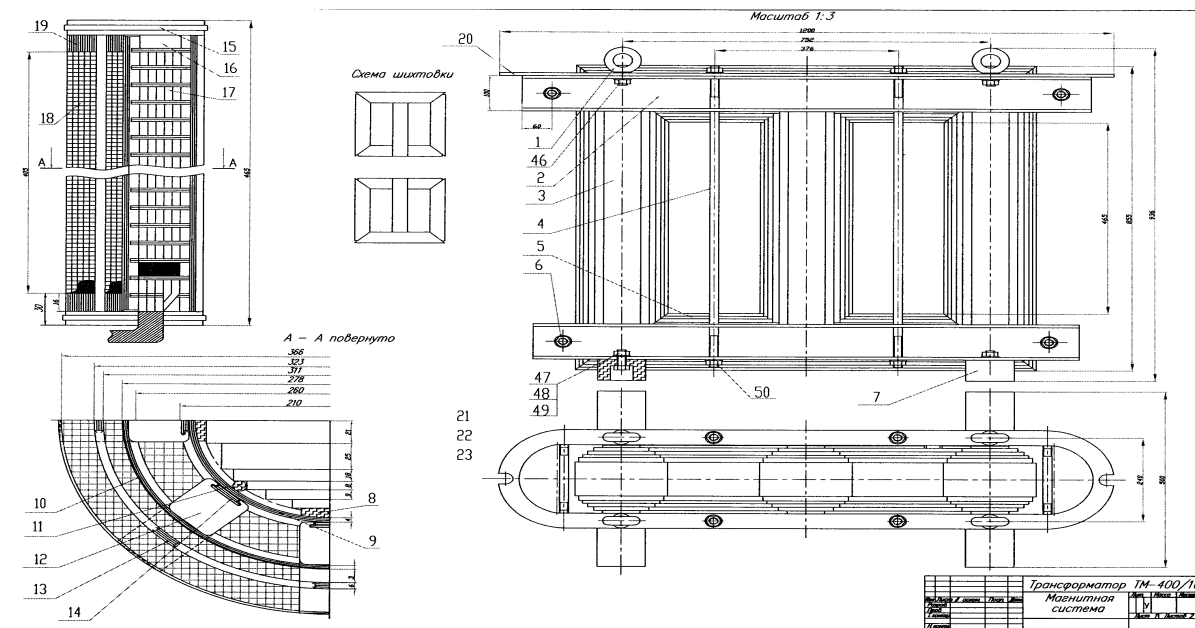


Рис. П9 – Пример чертежей курсового проекта

Перв. примен.	Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Приме-чание
					Документация		
	A4			РПЗ	Расчетно-пояснительная записка	1	
	A3			13.03.02-17-МЧ.01	Чертеж трансформатора	1	
Справ. №							
Подп. и дата							
Инв. № дубл.							
Взам. инв. №							
Подп. и дата							
Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Лист
	Разраб.						Листов
	Пров.						
	Н.контр.						
	Утв.						
Трехфазный сухой силовой трансформатор							
<b>Документация</b>						<b>КГУ ЭТМ</b>	
Копировал						Формат А4	



Владимир Иванович Мошкин

## РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОГО СУХОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Методические указания к выполнению курсового проекта  
по дисциплине «Электрические машины»  
для студентов направления 13.03.02  
«Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение»)

Авторская редакция

---

Подписано в печать	Формат 60x84 1/16	Бумага 65 г/м <sup>2</sup>
Заказ	Усл. печ.л. 3,75	Уч.-изд. л. 3,75
Печать цифровая	Э/в	Не для продажи

---

Библиотечно-издательский центр КГУ.  
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.  
Курганский государственный университет.