

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева

Кафедра электротехники и электрооборудования

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

по дисциплине

ЭЛЕКТОРООБОРУДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

8 семестр 2 часть

Направление подготовки: *13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»*

Профиль подготовки: *Электрооборудование и электрохозяйства предприятий,
организаций и учреждений*

Квалификация выпускника: *бакалавр*

Форма обучения: *очная*

Методические указания по выполнению курсовой работы составлены доцентом Чумаковым А.В. и обсуждены на заседании кафедры электротехники и электрооборудования факультета САУ

протокол № ___ от " ___ " _____ 20__ г.

Зав. кафедрой _____ Б.В. Сухинин

Методические указания по выполнению курсовой работы пересмотрены и утверждены на заседании кафедры электротехники и электрооборудования факультета САУ

протокол № ___ от " ___ " _____ 20__ г.

Зав. кафедрой _____ Б.В. Сухинин

СОДЕРЖАНИЕ

I. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	4
II. ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	4
III. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	5
1. Определение основных электрических величин.....	5
2. Выбор главной и продольной изоляции.....	5
3. Выбор конструкции магнитопровода.....	8
4. Определение основных размеров трансформатора.....	9
5. Выбор конструкции обмоток.....	11
6. Расчет обмоток трансформатора. Общие положения.....	13
7. Расчет обмоток низшего напряжения.....	17
8. Расчет обмоток высшего напряжения.....	24
9. Расчет параметров короткого замыкания.....	30
10. Расчет магнитной системы трансформатора.....	32
IV. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	33
V. ПРИЛОЖЕНИЕ.....	34

I. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Целью курсовой работы является изучение студентами основных методов расчета трансформаторов. Исходные данные, необходимые для расчета приведены в таблице 1.

В результате расчета необходимо:

- выбрать конструкцию магнитной системы и конструкцию главной изоляции;
- определить основные размеры трансформатора;
- выбрать конструкцию и произвести расчет обмоток низшего и высшего напряжения;
- определить потери короткого замыкания и напряжения короткого замыкания;
- произвести расчет магнитной системы, определить параметры холостого хода.

Полученные в результате расчета значения величин не должны отличаться от заданных значений более чем на:

- $\pm 5\%$ – напряжение короткого замыкания;
- $\pm 5\%$ – потери короткого замыкания;
- $\pm 7.5\%$ – потери холостого хода;
- $\pm 15\%$ – ток холостого хода.

II. ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа выполняется в виде пояснительной записки с необходимыми рисунками, брошюруется и снабжается титульным листом.

В пояснительной записке приводится краткое изложение хода расчета с обоснованием выбора конструкции узлов, а также значений тех или иных величин и коэффициентов со ссылкой на страницы, таблицы и формулы соответствующих руководств.

При проведении расчетов нужно привести буквенные обозначения величин, затем подставить численные значения величин и лишь после этого привести результат и размерности величин. Результаты расчетов округляются до трех значащих цифр.

Объем курсовой работы должен составлять примерно 25 – 35 страниц машинописного текста. Работа оформляется в соответствии с ГОСТ 2.105–95 «Основные требования к текстовым документам» и ГОСТ 2.106–96 «Текстовые документы и спецификации».

III. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1. Определение основных электрических величин

1.1. Мощность одной фазы S_{ϕ} и одного стержня S' , кВА:

$$S_{\phi} = S_n/m; \quad S' = S_n/c, \quad (1)$$

где c – число стержней.

1.2. Фазные напряжения и токи

$$U_{\phi \text{ ном } i} = \begin{cases} U_i/\sqrt{3} \\ U_i \end{cases}; \quad I_{\phi \text{ ном } i} = \begin{cases} S_n/(\sqrt{3}U_i) \text{— для } Y \\ S_n/(3U_i) \text{— для } D \end{cases}, \quad (2)$$

где $i = 1, 2$; индекс 1 относится к ОНН, 2 – к ОВН;

U_i – номинальное линейное напряжение i – ой обмотки, приведенное в задании.

Расщепленные обмотки трансформаторов типа ТРДН и ТРДНС рассчитываются на токи одной параллельной ветви ОВН или одной группы ОНН:

$$I_{нв} = I_{\phi \text{ ном}}/2. \quad (3)$$

Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, %:

$$u_{ка} = 100 P_k/S_n; \quad u_{кр} = \sqrt{u_k^2 - u_{ка}^2}. \quad (4)$$

2. Выбор главной и продольной изоляции

2.1. Испытательные напряжения определяются по [1, табл.4.1, с.169] для масляных трансформаторов и по [1, табл.4.2] – для сухих.

2.2. Выбор конструкции главной изоляции масляных трансформаторов производится на основании [1, рис.4.6, 4.7, с.184,187] и сухих трансформаторов согласно [1, рис.4.17, с.203].

2.3. Минимальные изоляционные расстояния (a_{01}, a_{12} и др.) масляных трансформаторов определяются по [1, табл.4.4, с.183] – для обмоток низшего напряжения (ОНН) и по [1, табл.4.5] – для обмоток высшего напряжения (ОВН) с $U_{исп2} \leq 85$ кВ. При $U_{исп2} = 200$ кВ изоляционные расстояния указаны [1, рис.4.7]. Минимальные изоляционные расстояния для сухих трансформаторов приведены в [1, табл.4.15 и табл.4.16].

Таблица 1

№ варианта	Тип трансформатора	Номинальная мощность трансформатора S , <i>кВА</i>	Номинальное напряжение обмоток, кВ		Напряжение к.з U_k , %	Ток холостого хода i_0 , %	Потери, кВт		Материал обмоток	Вид переключения обмоток	Схема и группа соединений
			$U_{вн}$	$U_{нн}$			Короткого замыкания $P_{кз}$, <i>кВт</i>	Хол. хода $P_{хх}$, <i>кВт</i>			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
001	ТДН	16000	115	38,5	10,5	0,85	85	21	Медь	РПН	Д/У _н -11
002	ТМН	400	10	0,69	4,5	2,1	5,9	0,95	Алюм.	РПН	Д/У _н -11
003	ТМ	160	35	0,69	6,5	2,4	3,1	0,62	Медь	ПБВ	Д/У _н -11
004	ТРДНС	32000	36,75	6,3/6,3	9,5	0,45	145	26	Медь	РПН	У _н /Д-Д-11-11
005	ТМН	2500	110	22	10,5	1,5	22	5,0	Медь	РПН	У _н - Д-11
006	ТД	10000	38,5	10,5	7,5	0,8	65	12,3	Медь	ПБВ	У/Д-11
007	ТСЗ	400	13,8	0,4	8	3,5	6	1,4	Алюм.	ПБВ	Д/У _н -11
008	ТМН	1600	10	6,3	5,5	1,3	16,5	2,8	Алюм.	РПН	У/Д-11
009	ТСЗ	1000	10,5	0,4	8	2,0	12	3,0	Алюм.	ПБВ	Д/У _н -11
010	ТМН	6300	115	22	10,5	1	50	10	Медь	РПН	У _н /Д-11
011	ТДНС	10000	36,75	3,15	14,0	0,8	85	12,3	Алюм.	РПН	У/У-0
012	ТМН	630	35	0,4	6,5	2,0	7,6	1,6	Алюм.	РПН	У/У _н -0
013	ТМН	6300	10	6,3	6,5	0,8	46,5	7,65	Алюм.	РПН	У/Д-11
014	ТДН	10000	115	38,5	10,5	0,9	60	14	Медь	РПН	У _н /Д-11
015	ТМ	250	35	0,4	6,5	2,3	3,7	0,9	Алюм.	ПБВ	У/У _н -0
016	ТСЗ	1000	15,76	0,4	8	2,0	12	3,2	Алюм.	ПБВ	Д/У _н -11
017	ТМН	630	35	6,3	6,5	2,0	7,6	1,6	Медь	РПН	У/Д-11
018	ТМ	160	10	0,4	4,5	2,4	2,65	0,51	Алюм.	ПБВ	У/У _н -0
019	ТСЗ	630	10	0,69	5,5	3,0	7,3	2	Медь	ПБВ	Д/У _н -11
020	ТМН	6300	115	11	10,5	0,8	48	10	Алюм.	РПН	У _н /Д-11
021	ТРДНС	40000	36,75	10,5/10,5	11,5	0,35	170	31	Алюм.	РПН	Д/Д-Д-0-0
022	ТСЗ	630	15,75	0,4	8	2,0	8,7	2,3	Алюм.	ПБВ	Д/У _н -11
023	ТДНС	16000	36,75	10,5	10,5	0,36	100	17,8	Медь	РПН	У/У-0
024	ТСЗ	160	10	0,4	5,5	4	2,7	0,7	Алюм.	ПБВ	Д/У _н -11
025	ТРДН	25000	115	6,3/6,3	10,5	0,7	120	25	Медь	РПН	У _н /Д-Д-11-11
026	ТД	40000	38,5	6,3	8,5	0,4	165	31	Медь	ПБВ	У/Д-11
027	ТМ	400	10	0,4	4,5	2,1	5,5	0,95	Алюм.	ПБВ	У/У _н -0
028	ТСЗ	250	15,75	0,4	8	4	4,4	1,1	Алюм.	ПБВ	Д/У _н -11
029	ТМН	2500	110	11	10,5	1,5	22	5,5	Алюм.	РПН	У _н /Д-11
030	ТМН	400	35	0,4	6,5	2,1	5,5	1,2	Алюм.	РПН	У/У _н -0
031	ТДН	25000	36,75	10,5	8	0,7	125	24,5	Медь	РПН	У/Д-11
032	ТРДН	32000	115	22/22	10,5	0,75	145	35	Медь	РПН	У _н /Д-Д-11-11
033	ТМ	160	35	0,4	6,5	2,4	2,65	0,62	Алюм.	ПБВ	У/У _н -0
034	ТСЗ	1600	13,8	0,4	8,0	2	16	4,3	Медь	ПБВ	Д/У _н -11
035	ТДН	10000	115	22	10,5	0,9	60	14	Алюм.	РПН	У _н /Д-11
036	ТМН	400	35	0,69	6,5	2,1	5,9	1,2	Медь	РПН	Д/У _н -11
037	ТДН	16000	38,5	6,3	8,0	0,6	90	17,8	Алюм.	РПН	Д/У-11
038	ТСЗ	630	10,5	0,4	5,5	1,5	7,3	2,0	Алюм.	ПБВ	У/У _н -0
039	ТМН	6300	35	6,3	7,5	0,9	46,5	8,0	Алюм.	РПН	У/Д-11
040	ТДН	10000	115	11	10,5	0,7	60	14	Алюм.	РПН	У _н /Д-11
041	ТРДНС	25000	36,75	6,3/6,3	9,5	0,5	115	21	Медь	РПН	Д/Д-Д-0-0
042	ТСЗ	1000	10	0,69	5,5	1,5	11,2	3,0	Алюм.	ПБВ	Д/У _н -11
043	ТМН	630	35	11	6,5	2,0	7,6	1,6	Медь	РПН	У/Д-11
044	ТМН	2500	35	0,69	6,5	1,1	25	4,35	Алюм.	РПН	У/У-0
045	ТДН	40000	115	38,5	10,5	0,65	160	42	Медь	РПН	У _н /Д-11
046	ТСЗ	1600	15,75	0,4	8,0	2,0	16	4,3	Алюм.	ПБВ	Д/У _н -11
047	ТРДН	25000	115	10,5/10,5	10,5	0,7	120	25	Алюм.	РПН	У _н /Д-Д-11-11
048	ТСЗ	400	10	0,69	5,5	3,0	5,4	1,3	Медь	ПБВ	Д/У _н -11
049	ТДН	25000	38,5	10,5	8,0	0,7	125	24,5	Алюм.	РПН	Д/У-11
050	ТДНС	6300	10,5	6,3	8,0	0,9	46,5	8,0	Алюм.	РПН	У/У-0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
051	ТДН	16000	115	6,6	10,5	0,7	85	21	Алюм.	РПН	Д/У _Н -11
052	ТСЗ	630	13,8	0,4	8,0	2,0	8,7	2,3	Алюм.	ПБВ	Д/У _Н -11
053	ТРДНС	32000	36,75	10,5/10,5	11,5	0,45	145	26	Алюм.	РПН	Д/Д-Д-0-0
054	ТМ	250	35	0,69	6,5	2,3	4,2	0,9	Медь	ПБВ	Д/У _Н -11
055	ТДНС	16000	36,75	6,6	10	0,75	105	17,8	Медь	РПН	У/Д-11
056	ТРДН	40000	115	22/22	10,5	0,7	175	42	Алюм.	РПН	У _Н /Д-Д-11-11
057	ТМН	1000	35	11	6,5	1,5	11,6	2,35	Медь	РПН	У/Д-11
058	ТДН	10000	38,5	6,3	8	0,8	65	12,3	Алюм.	РПН	Д/У-11
059	ТСЗ	400	15,75	0,4	8	3,5	6	1,4	Алюм.	ПБВ	Д/У _Н -11
060	ТМН	2500	110	6,6	10,5	1,5	22	5,5	Алюм.	РПН	У _Н /Д-11
061	ТМС	1000	10,5	0,525	8	1,5	12,2	2,35	Алюм.	ПБВ	У/Д-11
062	ТМН	4000	35	6,3	7,5	1,0	33,5	5,7	Медь	РПН	У/Д-11
063	ТСЗ	1000	13,8	0,4	8	2,0	12	3,2	Алюм.	ПБВ	Д/У _Н -11
064	ТМН	6300	115	38,5	10,5	1,0	50	10	Алюм.	РПН	У _Н /Д-11
065	ТДНС	10000	36,75	6,6	14	0,8	85	12,3	Медь	РПН	У/Д-11
066	ТМН	630	10	0,4	5,5	2,0	7,6	1,31	Алюм.	РПН	У/У _Н -0
067	ТДН	16000	115	22	10,5	0,85	85	21	Медь	РПН	У _Н /Д-11
068	ТД	40000	38,5	10,5	8,5	0,4	165	31	Алюм.	ПБВ	У/Д-11
069	ТСЗ	160	10	0,69	5,5	4	2,7	0,7	Алюм.	ПБВ	Д/У _Н -11
070	ТМН	6300	115	6,6	10,5	0,8	48	10	Алюм.	РПН	У _Н /Д-11
071	ТРДНС	25000	36,75	10,5/10,5	9,5	0,5	115	21	Алюм.	РПН	У _Н /Д-Д-11-11
072	ТСЗ	1000	10	0,4	5,5	1,5	11,2	3	Медь	ПБВ	Д/У _Н -11
073	ТМН	6300	35	11,0	7,5	0,9	46,5	8,0	Медь	РПН	У/Д-11
074	ТДН	16000	115	11	10,5	0,7	85	21	Алюм.	РПН	У _Н /Д-11
075	ТМН	1000	35	0,69	6,5	1,5	12,2	2,35	Алюм.	РПН	У/У-0
076	ТСЗ	160	10,5	0,4	5,5	4	2,7	0,7	Алюм.	ПБВ	Д/У _Н -11
077	ТДНС	10000	36,75	6,3	14	0,8	85	12,3	Медь	РПН	У/У-0
078	ТРДН	40000	115	6,3/6,3	10,5	0,65	160	42	Медь	РПН	У _Н /Д-Д-11-11
079	ТСЗ	630	10	0,4	5,5	1,5	7,3	2	Алюм.	ПБВ	Д/У _Н -11
080	ТМН	2500	35	11	6,5	1,1	23,5	4,35	Медь	РПН	У/Д-11
081	ТМН	1600	10	0,69	5,5	1,3	18	2,8	Алюм.	РПН	Д/У-11
082	ТМН	630	35	0,69	6,5	2,0	8,5	1,6	Медь	РПН	Д/У _Н -11
083	ТДН	25000	38,5	6,3	8,0	0,7	125	24,5	Медь	РПН	Д/У-11
084	ТСЗ	400	10	0,23	5,5	3	5,4	1,3	Алюм.	ПБВ	Д/У _Н -11
085	ТДН	10000	115	6,6	10,5	0,7	60	14	Алюм.	РПН	У _Н /Д-11
086	ТМН	1600	35	0,69	6,5	1,4	18	3,1	Алюм.	РПН	У/У-11
087	ТМН	4000	10	6,3	6,5	0,9	33,5	5,45	Алюм.	РПН	У/Д-11
088	ТМН	1600	35	11	6,5	1,4	16,5	3,1	Медь	РПН	У/Д-11
089	ТСЗ	1600	10	0,69	5,5	1,5	16	4,2	Медь	ПБВ	Д/У _Н -11
090	ТРДН	32000	115	10,5/10,5	10,5	0,7	145	32	Медь	РПН	У _Н /Д-Д-11-11
091	ТДНС	10000	36,75	10,5	8,0	0,8	65	12,3	Алюм.	РПН	У/У-0
092	ТМ	250	10	0,4	4,5	2,3	3,7	0,74	Алюм.	ПБВ	У/У _Н -0
093	ТСЗ	160	10	0,23	5,5	4,0	2,7	0,7	Медь	ПБВ	Д/У _Н -11
094	ТДН	25000	115	38,5	10,5	0,7	120	25	Алюм.	РПН	У _Н /Д-11
095	ТРДНС	40000	36,75	6,3/6,3	11,5	0,35	170	31	Медь	РПН	У _Н /Д-Д-11-11
096	ТМН	1000	10	0,69	5,5	1,4	12,2	2,1	Алюм.	РПН	Д/У-11
097	ТМН	630	10	0,69	5,5	2,0	8,5	1,31	Медь	РПН	Д/У _Н -11
098	ТМН	2500	35	6,3	6,5	1,1	23,5	4,35	Медь	РПН	У/Д-11
099	ТДН	32000	115	38,5	10,5	0,7	145	32	Медь	РПН	У _Н /Д-11
100	ТД	16000	38,5	10,5	8,0	0,6	90	17,8	Медь	ПБВ	У/Д-11

Межслойная изоляция в многослойных цилиндрических обмотках сухих трансформаторов выбирается согласно указаниям [1, с.203].

2.4. Ширина каналов между катушками обмоток по условиям электрической прочности определяется по формуле:

$$h_k = 3 \frac{2U_{кат}}{1000} \cdot 10^{-3} \geq 0.4 \text{ см}, \quad (5)$$

где $U_{кат}$ – рабочее напряжение одной катушки.

Ширина каналов по условиям охлаждения выбирается согласно табл.9.2 [1]. При этом длина вертикальных каналов принимается равной высоте цилиндрических обмоток, а длина горизонтальных каналов равна радиальному размеру винтовых и катушечных обмоток.

Ширина каналов в сухих трансформаторах зависит от класса изоляции и приводится в [1, табл.9.2,б и табл.9.2,в]. При курсовом проектировании следует принять класс изоляции B или F .

Минимальные размеры канала $h_{кр}$ катушечных обмоток ВН в месте расположения регулировочных витков выбираются по [1, табл.4.9].

2.5. Толщина изоляции проводов $\Delta_{из}$ на две стороны выбирается по табл.4.6 [1, с.189]. При этом расшифровка марок проводов дается на [1, с.210–215]. изоляция проводов марок ПБ, АПБ и ПЭЛБО относится к классу A , проводов марок ПСД и АПСД – к классу F .

Для обмоток с испытательным напряжением до 85 кВ $\Delta_{из} = 0.5 \text{ мм}$, при $U_{исп} = 200 \text{ кВ}$, $\Delta_{из} = 1.35 \text{ мм}$.

Дополнительная изоляция входных катушек обмоток ВН масляных трансформаторов класса напряжения $20 - 110 \text{ кВ}$ выбирается по табл.4.10 [1, с.196].

3. Выбор конструкции магнитопровода

3.1. Для трехфазных силовых трансформаторов мощностью до 100000 кВА наибольшее распространение получила плоская шихтованная стержневая магнитная система со сборкой впереplet, с четырьмя косыми и двумя прямыми или полукосыми стыками [1, рис.2.17,б,в]. Для трансформаторов мощностью до 6300 кВА находит применение симметричная пространственная стыковая магнитная система; при мощности $160 - 630 \text{ кВА}$ эта система дает возможность уменьшить массу стали примерно на $12 - 15 \%$.

3.2. Число ступеней стержней выбирается согласно табл.2.5 и табл.2.6 [1]. Коэффициент усиления ярма берется из табл.2.8 [1].

3.3. Число и ширина охлаждающих каналов в стержнях выбирается по табл.2.7 [1].

3.4. Коэффициент $K_{кр}$ заполнения круга, равный отношению площади ступенчатой фигуры стержня $P_{фс}$ к площади $P_{ф}$ круга диаметром d :

$$K_{кр} = \Pi_{\phi c} / \Pi_{\phi} = \Pi_{\phi c} / (\pi d^2 / 4), \quad (6)$$

определяется по табл.2.5 для масляных и по табл.2.6 [1] – для сухих трансформаторов. Коэффициент заполнения площади ступенчатой фигуры стержня сталью, т.е. отношение активного сечения стержня Π_c к площади ступенчатой фигуры $K_z = \Pi_c / \Pi_{\phi c}$, определяется по табл.2.2 [1]. Рекомендуется для рулонной стали с жаростойким покрытием и однократной лакировкой при толщине листов 0.35 мм принять $K_z = 0.965$.

Общий коэффициент заполнения сталью (K_c) площади круга диаметром d рассчитывается по формуле:

$$K_c = K_{кр} \cdot K_z. \quad (7)$$

3.5. Способ прессовки стержней и ярм определяется по табл.2.8 [1].

3.6. Согласно рекомендациям для современных трансформаторов обычно применяется холоднокатаная (текстурированная) сталь марок 3404 и 3405 с толщиной листов 0.35; 0.3 и 0.27 мм. Индукция в стержнях выбирается по табл.2.4 [1].

4. Определение основных размеров трансформатора

4.1. Под основным размером трансформатора понимают: диаметр d окружности, в которую вписана ступенчатая фигура стержня, осевой размер l (высоту) обмоток (их среднее значение) и средний диаметр витка двух обмоток d_{12} [1, рис.3.5]. Если известны три основных размера, то остальные размеры, определяющие форму и объем магнитной системы и обмоток, можно найти исходя из известных изоляционных расстояний между обмотками и от обмоток до заземленных частей, а также из условий охлаждения обмоток.

Основные размеры трансформатора можно связать с мощностью, приходящейся на один стержень:

$$S' = 2.22f(B_{cp}J_{cp})\Pi_{\phi c}\Pi_{ок}(K_cK_o), \quad (8)$$

где J_{cp} – средняя плотность тока в обмотках (действ. значение);

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

K_o – коэффициент заполнения окна проводниками.

Задаваясь значениями B_{cp} , J_{cp} и учитывая заданные соотношения между размерами магнитопровода, можно определить основные размеры трансформатора. Такой метод определения основных размеров положен в основу расчета трансформаторов малой мощности (микротрансформаторов), не предназначенных для параллельной работы с другими трансформаторами.

Основные размеры силового трансформатора могут быть также связаны с реактивной составляющей напряжения короткого замыкания $u_{кр}$. Используя эту связь, можно вывести формулу, связывающую диаметр трансформатора с его мощностью и значением $u_{кр}$:

$$d = 0.507 \sqrt[4]{\frac{S' \beta a_p K_p}{f u_{kp} B_c^2 K_c^2}}, \quad (9)$$

где размеры указаны в метрах, а S' – в кВА.

Величины, входящие в формулу, можно подразделить на три группы:

1) величины, заданные при расчете, – S' ; частота сети f ; реактивная составляющая напряжения короткого замыкания u_{kp} , %.

2) величины, выбираемые при расчете, – отношение длины канала между двумя обмотками к высоте обмоток $\beta = \frac{\pi d_{12}}{l}$; приведенная ширина канала рассеяния a_p ; коэффициент Роговского K_p .

Выбор исходных данных β, B_c, K_c может быть сделан на основе исследования ряда вариантов [1, §3.5] или путем использования разработанных рекомендаций [1, §3.6]. Для определения предварительных значений a_p и K_p используются приближенные методы, затем значения уточняются после расчета обмоток.

4.2. Выбор оптимального значения отношения $\beta_{пред}$ производится по табл.3.12 [1,с.159]. В случае необходимости оптимальное значение $\beta_{пред}$ рассчитывается по методике, изложенной в [1, §§ 3.5; 3.6].

4.3. Ширина приведенного канала рассеяния определяется по приближенной формуле

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}. \quad (10)$$

Значение a_{12} берется из п.2.3. Приведенная ширина двух обмоток определяется по приближенной формуле

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = K \sqrt[4]{S'} \cdot 10^{-2}, \quad (11)$$

где K – может быть найдено по табл. 3.3 [1, с.121], $K_p \approx 0,95$, S' - кВА.

4.4. Полученное по формуле (9) значение $d^{(l)}$ округляют до ближайшего нормализованного значения d . Нормализованные значения диаметров указаны [1, с.87–89], а также в табл. 8.6–8.7.

4.5. Уточняем значение β :

$$\beta_{уточн} = \beta_{пред} \left(\frac{d}{d^{(l)}} \right)^4. \quad (12)$$

4.6. Средний размер витка обмоток (средний диаметр канала рассеяния) определяем предварительно по формуле

$$d_{12}^{(l)} = d + 2a_{01} + 2a'_1 + a_{12}, \quad (13)$$

причем a_{01} и a_{12} определены в п.3.2. Радиальный размер ОНН приближенно находим по формуле

$$a'_1 = K_1 \frac{a_1 + a_2}{3}, \quad (14)$$

где $\frac{a_1 + a_2}{3}$ берем из п.4.3, а значения K_1 указаны в [1, с.164].

Найденное значение $d_{12}^{(1)}$ является предварительным, оно должно быть уточнено после расчета обмотки НН.

4.7. Высота обмоток

$$l^{(1)} = \frac{\pi d_{12}^{(1)}}{\beta_{\text{уточн}}}. \quad (15)$$

Это значение высоты обмоток является приближенным; оно уточняется после расчета обмотки НН, т.е. после определения a_1 и $d_{12}^{(2)}$.

4.8. Активное сечение стержня P_c определяется по формуле

$$P_c = K_3 P_{\text{фс}}, \quad (16)$$

где $P_{\text{фс}}$ – находится по табл.8.6–8.7 в зависимости от диаметра d .

При этом магнитная система масляных трансформаторов с d до 75 см и сухих с $d < 20$ см принимается без прессующей пластины [1,с.366], а сухих с $d \geq 20$ см – с прессующей пластиной [1, с.364].

Для сухих трансформаторов при $24 \text{ см} \leq d < 36 \text{ см}$ значение $P_{\text{фс}}$ находится по формуле

$$P_{\text{фс}} = P'_{\text{фс}} - n_k l_k h_k, \quad (17)$$

где n_k, h_k – число и ширина каналов (табл.2.7);

$P'_{\text{фс}}$ – находится по табл.8.6;

$$l_k = \begin{cases} b_1 & \text{при } n_k = 1 \\ b_2 & \text{при } n_k = 2 \end{cases};$$

b_1, b_2 – ширина первой и второй пластин (табл.8.2–8.5).

5. Выбор конструкции обмоток

5.1. ЭДС витка (предварительно), B :

$$E'_e = 4.44f P_c B_c 10^{-4}. \quad (18)$$

Значение $P_c, \text{ см}^2$, берут из п.4.8.

5.2. Число витков обмотки НН (предварительно)

$$w'_1 = U_{\phi 1} / E'_e. \quad (19)$$

Округляют значение w'_1 до целого числа w_1 . В случае двухслойной цилиндрической обмотки w_1 берут четным.

Уточняем ЭДС витка

$$E_e = U_{\phi 1} / w_1. \quad (20)$$

Номинальное число витков обмотки ВН

$$w_{2 \text{ ном}} = U_{\phi 2} / E_e = w_1 \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 1}}. \quad (21)$$

5.3 Средняя плотность тока в проводах обмоток J_{cp} (здесь и далее A/mm^2) определяется по формуле, вытекающей из формул [1, (5.4), (5.5), (7.10), (7.10,a)],

$$J_{cp} = K_J K_D \frac{P_k E_B}{S_n d_{12}} \cdot 10^4, \quad (22)$$

где P_k , S_n берут из задания (все величины в системе СИ);

$K_D = P_{эл\text{ осн}}/P_k$ берут из табл.3.6 [1,с.131].

Значение K_J зависит от материала проводов (медь, алюминий), а также от расчетной температуры обмоток: $75^\circ C$ – для масляных трансформаторов, а также сухих трансформаторов с изоляцией классов A и B ; $115^\circ C$ – для сухих трансформаторов с изоляцией классов F и H ; [1, с.315].

Значения K_J приведены в табл.2.

Таблица 2

№ п/п	Материал проводов	Расчетная температура, $^\circ C$	Значение K_J
1	Медь	75	0,746
2	Медь	115	0,658
3	Алюминий	75	0,463
4	Алюминий	115	0,4105

Полученные значения J_{cp} необходимо сверить с данными [1,табл.5.7,с.257], где приведены средние значения плотностей тока применяемых трансформаторов.

5.4. Сечение витка (предварительно), mm^2 :

$$P'_1 = I_{\phi 1}/J_{cp}; \quad P'_2 = I_{\phi 2}/J_{cp}. \quad (23)$$

5.5. Число реек N_p берут согласно данным, приведенным в [1, с.225].

5.6. Выбор типа обмоток производится согласно [1,с.258].

Для приведенных в задании мощностей ориентировочно могут быть рекомендованы следующие типы обмоток.

Обмотки низшего напряжения:

а) для $S_n \leq 630 \text{ кВА}$, $U_1 \leq 10 \text{ кВ}$, $P_1 = 5 \div 300 \text{ мм}^2$ – цилиндрическая двухслойная из прямоугольного провода;

б) для $S_n \geq 100 - 160 \text{ кВА}$, $U_1 \leq 10 \text{ кВ}$, $P_1 > 75 \text{ мм}^2$ – винтовая, одно- и двухходовая;

в) для $S_n \geq 630 \text{ кВА}$, $U_1 = 10 \div 35 \text{ кВ}$, $P_1 = 5 \div 400 \text{ мм}^2$ – многослойная цилиндрическая из прямоугольного провода;

г) для $S_n \geq 100 - 160 \text{ кВА}$, $U_1 = 3 \div 220 \text{ кВ}$, $P_1 = 5 \div 7 \text{ мм}^2$ и выше – непрерывная катушечная [см. 1,с.259].

Обмотки высшего напряжения:

а) $S_n \leq 630 \text{ кВА}$, $U_2 \leq 135 \text{ кВ}$, $П_2 < 50 \text{ мм}^2$ – цилиндрическая многослойная из круглого провода;

б) $S_n > 630 \text{ кВА}$, $U_2 = 10 - 35 \text{ кВ}$, $П_2 = 5 \div 400 \text{ мм}^2$ – цилиндрическая многослойная из прямоугольного провода;

в) $S_n > 100 \div 160 \text{ кВА}$, U_2 до 220 кВ , $П_2 = 5 \text{ мм}^2$ – непрерывная катушечная.

Если по предварительным данным подходят несколько типов обмоток, то начинать расчет следует с простейшей из них. Окончательно тип обмотки определяется в процессе расчета.

6. Расчет обмоток трансформатора. Общие положения

6.1. Исходными данными для расчета обмоток низшего (ОНН) и высшего (ОВН) являются значения высоты обмотки l_1 , сечения витка $П_1$ и число витков обмотки w_1 . При этом высота обмоток НН и ВН должна быть одинакова ($l_1 \cong l_2$), а сечения витков должны быть такие, чтобы плотности тока в проводах отличались от среднего значения J_{cp} , найденного в п.3, не более чем на 0.1 А/мм^2 .

Размеры проводов (a и b), расстояние между охлаждающими каналами по проводам без изоляции (размер c) и ширина каналов h_k должны быть выбраны так, чтобы тепловая нагрузка q (потери на единицу поверхности охлаждения) не превышали допустимого по условиям нагрева значения ($q \leq q_{дон}$).

Для масляных трансформаторов обычно $q \leq 1200 \text{ Вт/м}^2$ и в редких случаях $q = 1400 \div 1500 \text{ Вт/м}^2$ [1, с.267]. Для сухих трансформаторов с изоляцией класса А для внутренних обмоток при вертикальных каналах шириной 1.0 см и горизонтальных – 0.8 см допускают $q = 280 \text{ Вт/м}^2$. Для наружных обмоток, имеющих только одну внешнюю поверхность, допускают $q \leq 600 \text{ Вт/м}^2$ [1, с.260]. В сухих трансформаторах с изоляцией класса В следует принимать $q \leq 320 \text{ Вт/м}^2$ [1, с.267]. Более детальные сведения о допустимых тепловых нагрузках трансформатора приведены в [1, табл.9.2].

Размеры проводов и катушек в радиальном направлении должны быть выбраны так, чтобы коэффициент добавочных потерь $K_{доб}$, характеризующий увеличение сопротивления обмотки переменному току по сравнению с постоянным током, не превышал допустимого значения; обычно $K_{доб} \leq 1.05$ [1, с.267]. Кроме того, размеры проводов должны лежать в пределах, указанных в сортаменте на обмоточные провода [1, табл.5.1, табл.5.2 и табл.5.3]. При этом максимальные размеры прямоугольных проводов не должны превышать: 16 мм – для медных проводов, 18 мм – для алюминиевых проводов. По

возможности следует стремиться выбирать из сортамента провода больших сечений, что упрощает изготовление обмотки.

Расчет обмотки при указанных исходных условиях и ограничениях имеет целью:

1) Выбор проводов обмотки, т.е. определение осевого и радиального размеров проводов без изоляции (b и a соответственно) и с изоляцией (b' и a'), а также числа параллельных проводов в витке (n_g). Подобранные по сортаменту провода записываются так:

$$\text{Марка провода} \times n_g \cdot \frac{a \times b}{a' \times b'} \times \Pi_{np}, \quad (24)$$

где Π_{np} – сечение одного провода;

$n_g = 1 \div 8$ – для непрерывной катушечной обмотки и $2 \div 30$ – для винтовой [4].

2) Распределение витков по элементам обмотки (по слоям, по катушкам).

3) Определение осевого (l_i) и радиального (a_i) размеров обмотки (здесь $i = 1; 2$).

4) Проверку ограничений: $q \leq q_{доп}$; $K_{доб} \leq 1.05$.

6.2. Расстояние между соседними охлаждающими каналами (размер c') играет важную роль при расчете обмоток и имеет следующие значения для обмоток различного типа:

$c' = a'$ – для двухслойной цилиндрической обмотки из прямоугольного провода;

$c = a'N'_{сл}$ – для многослойной цилиндрической обмотки из прямоугольного провода ($N'_{сл}$ – число слоев обмотки в одном центре);

$c' = b'$ – для винтовых и катушечных обмоток с полным числом охлаждающих каналов;

$c' = 2b'$ – то же, но со вдвоенными катушками.

Между размером c' и тепловой нагрузкой q имеется связь, которая может быть выражена формулой

$$q = \left(\frac{\rho}{2} \right) \frac{K_{доб}}{K_{зк}} \cdot \frac{K_{np} J^2 \cdot 10^{12}}{(1/c' + 1/l_k)} = \left(\frac{\rho}{2} \right) \frac{K_{доб} K_{сдв} J I w_{кр} \cdot 10^6}{K_{зк} (c' + l_k)}, \quad (25)$$

где l_k – длина охлаждающего канала, равная высоте обмотки l_1 , для цилиндрических обмоток или радиальному размеру a_1 катушек – для катушечных и винтовых обмоток;

$w_{кр} = \frac{I}{n_x}$ – для винтовых обмоток, n_x – число ходов;

$w_{кр} = w_{кат}$ – округленное до большего целого значения число витков в катушке непрерывной катушечной обмотки. $w_{кр} = w_{сл}$ – число витков в слое цилиндрических обмоток;

$K_{сдв} = c'/b'$ – для винтовых и катушечных обмоток или $K_{сдв} = c'/a'$ – для цилиндрических обмоток из прямоугольного провода.

$K_{зк}$ – коэффициент закрытия поверхности, равный $0.75 \div 0.8$ [1, с.288, 314].

Для винтовых и катушечных обмоток:

$$K_{зк} = 1 - N_p b_{np} / \pi D_{cp}, \quad (26)$$

где N_p – число реек;

$b_{np} = 0.15 \div 0.18$ – ширина прокладок;

D_{cp} – средний диаметр катушки.

Все размерные величины, входящие в приведенные формулы, выражаются в системе СИ. Значения удельного сопротивления ρ для проводов из различных материалов представлены в табл.3.

Таблица 3

Материал провода	Значения ρ , Ом/м при расчетной температуре	
	75 °С	115 °С
Медь	$21,35 \cdot 10^{-9}$	$26,2 \cdot 10^{-9}$
Алюминий	$34,4 \cdot 10^{-9}$	$38,8 \cdot 10^{-9}$

Указанная выше формула является общей для приведенных в [1] формул (7.17) и (7.19). Из (25) найдем допустимый по условию нагрева размер $c'_{пред}$, м:

$$c'_{пред} = \frac{2}{\rho} \frac{K_{зк}}{K_{доб}} \frac{q}{J^2} (1 + c'/l_k) 10^{12}. \quad (27)$$

Эта формула совпадает с формулами (5.6), (5.7), (7.18) и (7.18,а) в [1] при $c'/l_k \cong 0$, ($c'_{пред}$ в [1] обозначено через b). При предварительных расчетах принимают $K_{зк} = 0.8$; $c'/l_k = 0.15 \div 0.3$ – для масляных или $0.3 \div 0.5$ – для сухих трансформаторов; $K_{доб} = 1.05$. Значения допустимых расстояний между каналами $c'_{пред}$ представлены на графиках [1, рис.5.38, с.262].

6.3. Коэффициент добавочных потерь, обусловленных полем рассеяния, определяется по формуле

$$K_{доб} = 1 + K_{вх} \beta_{zn}^2 a^4 (n_p^2 - 0.2) \cdot 10^8, \quad (28)$$

где a – радиальный размер прямоугольного или диаметр (d) круглого провода;

$K_{вх}$ – коэффициент, зависящий от материала обмотки, температуры и формы провода (см. табл.4).

Под n_p понимается число проводов в катушке, уложенных в радиальном направлении (перпендикулярно линиям магнитного поля рассеяния). Это число

$$n_p = \begin{cases} 2 & \text{— для цилиндрических двухслойных обмоток;} \\ N_{сл} & \text{— для цилиндрических многослойных обмоток;} \\ n_в & \text{— для винтовых обмоток;} \\ n_в w_{кат} & \text{— для катушечных обмоток.} \end{cases}$$

Таблица 4

Материал провода	Значения K_{ex} при температуре			
	75 °С		115 °С	
	прямоугольный провод	круглый провод	прямоугольный провод	круглый провод
Медь	0,095	0,044	0,063	0,0292
Алюминий	0,037	0,017	0,029	0,0134

Коэффициент

$$\beta_{zn} = \frac{bm}{l} K_p, \quad (29)$$

где m – число проводов обмотки в осевом направлении;

$$m = \begin{cases} w_{сл} n_в & \text{— для цилиндрических обмоток;} \\ w_l n_x & \text{— для винтовых обмоток;} \\ n_{кат} & \text{— для непрерывных катушечных} \\ & \text{обмоток.} \end{cases}$$

При $n_p \geq 2$ формула для $K_{доб}$ принимает вид:

$$K_{доб} = 1 + \Delta K_{доб}, \quad (30)$$

где

$$\Delta K_{доб} = K_{ex} \beta_{zn}^2 n_p^2 a^4 \cdot 10^8 = K_{ex} \beta_{zn}^2 \left(\frac{a_\Sigma^2}{n_p} \right)^2 \cdot 10^8, \quad (31)$$

$$a_\Sigma = n_p a. \quad (32)$$

Из формулы (31) видно, что при заданном значении суммарной ширины a_Σ значение $\Delta K_{доб}$ обратно пропорционально квадрату числа проводов n_p .

При предварительных расчетах принимают $K_p = 0.95$.

6.4. Масса металла обмотки без изоляции, кг:

$$M_{oi} = K_m c D_{cpl} w_l \Pi_l \cdot 10^{-5}, \quad (33)$$

где

$$K_m = \begin{cases} 28 & \text{— для медных проводов;} \\ 8.47 & \text{— для алюминиевых проводов,} \end{cases}$$

$$D_{cpl} = \frac{D'_l + D''_l}{2}, \text{ см}; \quad \Pi_l - \text{мм}^2, \quad i = 1, 2, \dots$$

Масса проводов обмотки с изоляцией

$$M_{np\ i} = K_{uz} M_{oi}, \quad (34)$$

где K_{uz} – коэффициент, определяемый по [1, табл.5.5].

6.5. Электрические потери в обмотке

$$P_{эi} = K_{доб} K_э M_{oi} J_I^2, \quad (35)$$

где $K_э$ – коэффициент, зависящий от материала обмотки и расчетной температуры. Значения $K_э$ приведены в табл.5.

Таблица 5

Материал проводов	Значения $K_э$ при расчетной температуре	
	75 °С	115 °С
Медь	2,4	2,72
Алюминий	12,75	14,4

Коэффициент $K_{доб}$ определяется по [1, табл.5.9] или по формуле (28).

7. Расчет обмоток низшего напряжения

7.1. Расчет двухслойной цилиндрической обмотки из прямоугольного провода. Особенность конструкции рассматриваемой обмотки состоит в том, что все витки каждого слоя ($w_{cl1} = w_I / N_{cl1}$) и их параллельные провода расположены в один ряд без интервалов в осевом направлении. Отсюда следует, что высота витка:

$$h_{e1} = n_e b' = n_{ei} (b + \Delta_{uz}). \quad (36)$$

Кроме того, имеют место соотношения

$$l_1 = (w_{cl1} + I) h_{e1} + \Delta l; \quad \Delta l = 0.005 \div 0.015 \text{ м}; \quad \Pi_1 = n_{e1} \Pi_{np1}, \quad (37)$$

где n_{e1} – число параллельных проводов;

Π_{np1} – площадь поперечного сечения одного проводника ($\Pi_{np1} \cong ab$).

Эти соотношения позволяют найти размеры проводов a и b и число параллельных проводов n_{e1} .

Порядок расчета обмотки

а) Число витков в слое

$$w_{cl1} = w_I / N_{cl1} = w_I / 2; \quad N_{cl1} = 2. \quad (38)$$

б) Высота витка

$$h_{e1} = \frac{l_1 - \Delta l}{(w_{cl1} + I)}. \quad (39)$$

в) Перебирая размер b (или размер a при укладке на ребро [1, табл.5.2 или табл.5.3]), выбирают первый (осевой) размер провода так, чтобы число

$$n_{e1} = h_{e1} / (b + \Delta_{uz}) \quad (40)$$

было близким к целому (отклонение от целого числа должно быть не более 1–2%).

г) Зная первый размер провода, перебирая второй размер по [1, табл.5.2 и табл.5.3], выбираем второй (радиальный) размер провода так, чтобы

$$\Pi_{np1} n_{\epsilon1} \cong \Pi_1. \quad (41)$$

Это равенство должно соблюдаться с точностью до 1–3%, чтобы фактическое значение J_1 отличалось от полученного в п.5.3 значения J_{cp} не более чем на 0.1 A/мм^2 .

В целях обеспечения механической прочности обмотки рекомендуется, чтобы

$$n_{\epsilon1} \leq \begin{cases} 4 \div 6 & \text{– при укладке проводов плашмя } (a < b); \\ 6 \div 8 & \text{– при укладке проводов на ребро } (a > b). \end{cases}$$

Кроме того, по технологическим причинам при укладке проводов на ребро рекомендуется выполнять соотношение $1.3 \leq a/b \leq 3$ [1, с.228].

Записываем выбранный провод в виде

$$n_{\epsilon1} \frac{a \times b}{a' \times b'} \Pi_{np1}. \quad (42)$$

д) Проверяем размер a по нагреву: $a' \leq c'_{пред}$, где $c'_{пред}$ находят по формулам (5.6) или (5.7) или по кривым рис.5.34 [1].

е) Проверяем размер a по величине коэффициента $K_{доб}$ [1, табл.5.9].

ж) Определяем остальные размеры обмотки:

$$l_1 = n_{\epsilon1} b' (w_{cл1} + l) + \Delta l; \quad (43)$$

$$a_1 = 2a' + a_{11}, \quad (44)$$

или по [1, табл.9.2,а],

где $a_{11} = 0.4 \text{ см}$ при $U_1 \leq 1 \text{ кВ}$ [1, с.267];

$D'_1 = d + 2a_{01}$ – внутренний диаметр;

$D''_1 = D'_1 + 2a_1$ – наружный диаметр;

$$d_{12}^{(2)} = D''_1 + a_{12}; \quad (45)$$

$$\Pi_{охл1} = c \pi K_{зк} n D_{1 \text{ охл}}, \text{ м}^2, \quad (46)$$

где $c = m = 3$,

$n_1 D_{1 \text{ охл}}$ – число и средний диаметр охлаждаемых поверхностей [1, рис.5.22].

з) Тепловая нагрузка, Вт/м^2 :

$$q_1 = \frac{P_{\epsilon1}}{\Pi_{охл1}}. \quad (47)$$

7.2. Расчет многослойной цилиндрической обмотки из прямоугольного провода.

Многослойная обмотка отличается от двухслойной большим количеством слоев $N_{сл}$, 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 заданную.

Рекомендуется следующий порядок расчета многослойной цилиндрической обмотки:

а) По таблицам 5.2 и 5.3 [1,с.212-215] подбираем возможно больший размер провода b так, чтобы соблюдались условия: $n_{сл1} = \Pi_1/\Pi_{пр}$ (целое число с точностью $1 \div 3\%$), $b/a \geq 1/3$.

б) Находим число витков в слое обмотки:

$$w_{сл1} = \frac{l_1 - \Delta l}{n_{сл1} b'} - 1. \quad (48)$$

Округляем $w_{сл1}$ до меньшего целого числа.

в) Находим число слоев:

$$N_{сл1} = w_1/w_{сл1}. \quad (49)$$

Округляем $N_{сл1}$ до большего целого числа.

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

г) По таблице 5.9 [1,с.264] проверяем условие $a \leq a_{пред}$ при выбранном выше значении $N_{сл1}$. Если это условие не соблюдается, то необходимо выбрать провод с меньшим значением a .

д) Определяем фактический суммарный радиальный размер проводов с изоляцией:

$$a'_\Sigma = a' N_{сл1}. \quad (50)$$

е) Определяем предельно допустимое расстояние между охлаждающими каналами $c'_{пред}$ по формуле (27) или по кривым [1, рис.5.34].

ж) Находим число концентрических катушек $n_{кат1}$, на которое следует разделить обмотку в радиальном направлении:

$$n_{кат1} = a'_\Sigma/c'_{пред}. \quad (51)$$

Подбираем число $n_{кат1}$ и число слоев в катушках $N_{сл}$ так, чтобы радиальный размер каждой катушки не превышал допустимого значения ($N_{сл} a' \leq c'_{пред}$).

з) Определяем рабочее напряжение двух слоев

$$U_{мсл} = 2 w_{сл1} E_v. \quad (52)$$

По рабочему напряжению двух слоев [1, табл.4.7] в соответствии с указаниями [1, §4.5] выбирается число листов и общая толщина кабельной бумаги $\delta_{мсл}$ в изоляции между двумя слоями обмотки.

и) Радиальный размер обмотки НН

$$a_l = a'N_{слl} + \delta_{мсл}(N_{сл} - l) + n_k h_k, \quad (53)$$

где h_k – радиальный размер канала, который принимается $h_k = 0.01 l_l \leq 0.005$ м.

Далее определяются остальные размеры, как указано в [1, с.288].

7.3. Расчет винтовой обмотки.

В зависимости от высоты витка винтовая обмотка может быть выполнена одно-, двух- и четырехходовой, причем витки в таких обмотках расположены подобно ходам резьбы многоходового винта.

Обычно провода винтовых обмоток разделяются в осевом направлении охлаждающими каналами, в некоторых случаях охлаждающие каналы выполняются через два провода, причем эти два провода отделены друг от друга только прокладкой толщиной $0.001 \div 0.0015$ м.

Обмотки первого типа будем называть обмотками с полным числом каналов, а обмотки второго типа – обмотками со сдвоенными витками (катушками). С точки зрения методики расчета, винтовые обмотки имеют следующие особенности:

1) Витки, принадлежащие разным ходам, включаются параллельно и располагаются в осевом направлении. Поэтому высота витка винтовой обмотки

$$h_{\text{в}l} = n_x (b' + K_{yc} h_k) - \text{при полном числе каналов};$$

$$h_{\text{в}l} = n_x (b' + K_{yc} (h_k + \delta_{ш}) / 2) - \text{при сдвоенных витках}.$$

В этих формулах обозначено: n_x – число ходов обмотки; $n_x = 1; 2; 4$; $\delta_{ш} = 0.001 \div 0.0015$ м – толщина картонной прокладки (шайбы) между сдвоенными витками, $K_{yc} = 0.94 \div 0.96$ – коэффициент, учитывающий усадку прокладок после сушки и опрессовки обмотки; h_k – ширина охлаждающего канала.

2) Параллельные провода ($n_{\text{в}l}$) располагаются в один ряд в радиальном направлении. Таким образом, полное сечение витка многоходовой обмотки

$$\Pi_l = n_x n_{\text{в}l} \Pi_{\text{н}pl}, \quad (54)$$

где $\Pi_{\text{н}pl}$ – сечение одного провода.

Высота обмотки определяется выражениями

$$l_l = w_{lp} h_{\text{в}l} - K_{yc} h_k - \text{при полном числе каналов};$$

$$l_l = w_{lp} h_{\text{в}l} - K_{yc} \delta_{ш} - \text{при сдвоенных витках},$$

где $w_{lp} = w_l + \Delta w_l$,

$$\Delta w_l = \begin{cases} 4 - \text{при } n_x = 1, \\ 1 - \text{при } n_x = 2; 4. \end{cases}$$

Порядок расчета винтовой обмотки следующий:

а) Выбор числа ходов n_x и высоты провода b .

Задавшись допустимыми значениями тепловой нагрузки и зная J_{cp} , по рис.5.34 или формулам (5.6), (5.7) [1] определяют размер $c'_{пред}$. Далее определяют высоту провода с изоляцией при полном числе каналов:

$$b' = h_{\epsilon l} / n_x - K_{yc} h_{\kappa} = \frac{l_1 + K_{yc} h_{\kappa}}{n_x w_{lp}} - K_{yc} h_{\kappa}. \quad (55)$$

Перебирая значения $n_x = 1; 2; 4$, выбирают такое значение n_x , при котором выполняются условия:

$$b = (b' - \Delta_{уз}) < b_{max}; \quad b' = (b + \Delta_{уз}) \leq c'_{пред}, \quad (56)$$

где $\Delta_{уз}$ определяется по табл.4.69 [1].

Если окажется, что $b' \leq \frac{c'_{пред}}{2}$, то принимают сдвоенные катушки. При этом размер b' определяют из выражения

$$b' = \frac{l_1}{n_x w_{lp}} - \frac{K_{yc}}{2} (h_{\kappa} + \delta_{ш}). \quad (57)$$

б) Определение осевого размера провода, $см^2$

$$b = b' - \Delta_{уз}. \quad (58)$$

Подбирают размер b по табл.5.2, 5.3 [1].

Если $b < 0.5$ см при $n_x = 1$, необходимо применить непрерывную катушечную обмотку.

Если окажется, что $b > b_{max}$ при $n_x = 4$, нужно перейти к многослойной цилиндрической обмотке.

в) Выбор радиального размера a и числа $n_{\epsilon l}$.

Зная осевой размер провода b , перебором размера a по табл.5.2 или табл.5.3 выбирают радиальный размер a и число параллельных проводов $n_{\epsilon l}$ так, чтобы с точностью не хуже 3% соблюдалось равенство

$$n_{\epsilon l} \Pi_{np1} n_x = \Pi_1. \quad (59)$$

Или, что то же самое,

$$n_{\epsilon l} = \frac{\Pi_1}{n_x \Pi_{np1}} \quad (\text{целое число}). \quad (60)$$

г) Проверка размера провода a по величине $K_{доб}$.

д) Определяют остальные размеры:

l_1 – как указано выше, $a_1 = 1.03 a' n_{\epsilon l}$ и т.д.

е) Определяют q_1 и уточняют h_{κ} по табл.9.2,а (для сухих трансформаторов).

7.4. Расчет непрерывной катушечной обмотки. В непрерывной катушечной обмотке параллельные провода каждого витка n_{ϵ} и сами витки

катушек $w_{кат}$ укладываются в один ряд в радиальном направлении, поэтому высота обмотки l , в отличие от рассмотренных ранее случаев, не ограничивает осевой размер провода b' . В катушечных обмотках этот размер ограничивается только условиями охлаждения ($c' \leq c'_{пред}$ или $q \leq q_{дон}$) и максимальными размерами (b_{max}) по сортаменту проводов [1, табл.5.2 и табл.5.3], что значительно упрощает расчет катушечной обмотки. Как и в случае винтовых обмоток, будем различать катушечные обмотки с полным числом каналов и обмотки со сдвоенными катушками.

Порядок расчета обмотки при известных значениях w_l, l_l, P_l, J_{cp} следующий:

а) Задавшись значением тепловой нагрузки, определяют расстояние между соседними охлаждающими каналами $c'_{пред}$ с помощью рис.5.34 или формул (5.6) и (5.7) [1]. Если $b_{max} < c'_{пред} < 2b_{max}$, то принимают сдвоенные катушки.

б) Выбирают ширину масляных или воздушных каналов согласно рекомендациям, изложенным в п.2.4 [1]. Имеются дополнительные указания о выборе ширины каналов в непрерывных катушечных обмотках [1, с. 290]:

– при $S = 160 \div 6300$ кВА и $U_2 \leq 35$ кВ ширина каналов масляных трансформаторов – от 0.4 до 0.6 см, в сухих трансформаторах – от 1.0 до 2.0 см;

– в трансформаторах большей мощности и при напряжениях 110 и 220 кВ ширина каналов может быть выбрана от 4 до 10-15 см.

в) По сортаменту обмоточных проводов [1, табл.5.2 или табл.5.3] выбирают высоту провода b так, чтобы соблюдались условия: $b \leq b_{max}$; $b' \leq c'_{пред}$.

По технологическим причинам выгодно применять провода возможно больших размеров с учетом ограничений по условиям охлаждения и величине добавочных потерь.

Если $c'_{пред}$ незначительно превышает b'_{max} , то выбирается провод максимальной ($b = b_{max}$) или близкой к ней высоты.

Если $c'_{пред} \geq (1.5 \div 2.0)b'_{max}$, то рекомендуется использовать сдвоенные катушки, предусмотрев между катушками две шайбы из электрокартона толщиной по 0.05 см.

Таким образом, на этом этапе решается вопрос об использовании полного или неполного числа каналов между катушками.

г) Зная высоту провода и ширину каналов, определяют число катушек в обмотке с полным числом каналов:

$$n_{кат1} = \frac{l_l - \Delta l_l}{b' + K_{yc} h_k}, \quad (61)$$

где $\Delta l_l = -2K_{yc} h_k$; $K_{yc} = 0.94 \div 0.96$.

При использовании сдвоенных катушек

$$n_{кат1} = \frac{l_1 - \Delta l_1}{[b' + K_{yc}(h_k + \delta_{ин})/2]}, \quad (62)$$

где $\delta_{ин} = 0.1 \div 0.15$ см.

Полученное значение $n_{кат1}$ округляется до целого числа так, чтобы получить в п.7.4,е целое или несколько меньшее целого число витков в катушке $w_{кат1}$. При сдвоенных катушках число $n_{кат1}$ должно быть четным.

Для трансформаторов ТРДН и ТРДНС число катушек одной части определяют по (61) или (62), заменив l_1 на $l_1' = (l_1 - \Delta l_{pl})/2$, где $\Delta l_{pl} = 2$ см.

д) Зная b и Π_1 , по сортаменту обмоточных проводов [1, табл.5.2 или табл.5.3] перебором размера a подбираем число параллельных проводов n_{el} и радиальный размер провода a так, чтобы

$$n_{el} \Pi_{np1} = \Pi_1 \quad (\text{с точностью } 1 \div 3\%), \quad (63)$$

где n_{el} – целое число;

Π_{np1} – поперечное сечение одиночного провода с размерами a и b .

е) Число витков в катушке ориентировочно

$$w_{кат1} = w_1 / n_{кат1}. \quad (64)$$

Далее производится распределение витков по катушкам и одновременно уточняется число катушек $n_{кат1}$.

Число витков в катушках может быть целым или дробным; в последнем случае знаменатель дроби должен быть равен числу реек по окружности обмотки N_p . Значение N_p берется из п.5. Распределение витков по катушкам должно быть таким, чтобы радиальные размеры катушек стержня отличались не более чем на двойную толщину провода [1, с.253]. В соответствии с этим рекомендуется:

При числе параллельных проводов в витке не более двух ($n_{el} \leq 2$) обмотку выполнять из двух типов катушек с целыми числами витков, отличающимися на единицу. При этом берется:

$$\left. \begin{array}{l} x \text{ катушек по } (w_{кат1}) \text{ витков;} \\ (n_{кат1} - x) \text{ катушек по } [(w_{кат1}) - 1] \text{ витков.} \end{array} \right\}, \quad (65)$$

где $x = w_1 - n_{кат1}[(w_{кат1}) - 1]$;

$w_{кат1}$ – округленное до большего целого значения число витков в катушке.

При $n_{el} > 2$ обмотку выполнять из двух типов катушек с дробными числами витков, отличающимися на $1/N_p$ часть витка, т.е. отличающимися на одно межпрокладочное расстояние. При этом берется:

$$\left. \begin{array}{l} x \text{ катушек по } (w_{кат1p}) / N_p \text{ витков;} \\ (n_{кат1} - x) \text{ катушек по } [(w_{кат1p}) - 1] / N_p \text{ витков.} \end{array} \right\}, \quad (66)$$

где $x = w_1 N_p - n_{\text{кат}1} [(w_{\text{кат}1 p}) - l]$;

$(w_{\text{кат}1 p}) = (w_{\text{кат}1} N_p)$ – округленное до большего целого значения число межреечных промежутков в катушке.

Дробную часть витка избегают делать меньше половины, так как это увеличивает радиальный размер обмотки [4].

ж) Высота обмотки с полным числом каналов и при сдвоенных катушках соответственно:

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= n_{\text{кат}1} (b' + K_{yc} h_k) + \Delta l_1; \\ l_1 &= n_{\text{кат}1} [b' + K_{yc} (h_k + \delta_{us}) / 2] + \Delta l_1. \end{aligned} \right\}, \quad (67)$$

причем в случае обмотки НН $\Delta l_1 = -h_k$.

з) Радиальный размер обмотки НН

$$a_1 = (w_{\text{кат}1}) n_{\text{вл}} a'_{11}. \quad (68)$$

Зная a_1 уточняют размер h_k по [1, табл.9.2,а].

и) Проверяют радиальный размер провода a по величине добавочных потерь: по формуле (28) определяют значение $K_{\text{доб}1}$ и проверяют условие $K_{\text{доб}1} \leq 1.05$. В случае необходимости возвращаются к п.6.4,д и выбирают новые значения $n_{\text{вл}}$ и a .

к) Записываем провод в виде : Марка $\times n_{\text{вл}} \times \frac{a \times b}{a' \times b'}$

л) Уточняем значение плотности тока.

м) Определяют массу проводов M_{oi} по формуле (33), электрические потери $P_{\text{э}i}$ – по формуле (35) и тепловую нагрузку q_1 – по формуле (25).

8. Расчет обмоток высшего напряжения

8.1. Выбор схемы регулирования напряжения производится в соответствии с заданием на курсовую работу (табл.1). В трансформаторах с регулированием напряжения на стороне ВН путем переключения ответвлений без возбуждения (ПВВ) должно предусматриваться изменение числа витков ОВН на $\pm 2 \times 2.5 = \pm 5.0\%$ от номинального значения. В трансформаторах с переключением ответвлений под нагрузкой должно предусматриваться изменение числа витков ОВН в пределах, указанных в табл.6.

Таблица 6

$S_n, \text{кВА}$	$U_2, \text{кВ}$	Пределы регулирования, %
63–630	6, 10, 20, 35	$\pm 6 \times 1,67 = \pm 10,0$
1000–6300	6, 10	$\pm 8 \times 1,25 = \pm 10,0$
1000–6300	20, 35	$\pm 6 \times 1,5 = \pm 9,0$
10000–63000	от 10 до 35	$\pm 8 \times 1,5 = \pm 12,0$
6300–80000	110	$\pm 9 \times 1,78 = \pm 16,0$

Для уменьшения осевых сил, возникающих при коротких замыканиях, в случае применения в качестве ОВН многослойных цилиндрических обмоток регулировочные витки размещают равномерно по высоте в отдельных слоях [1, рис.6.6,а,б, 6.9,а].

В случае непрерывных катушечных обмоток ВН используют схемы регулирования с двумя различными способами размещения регулировочных катушек (витков):

1) В общем центре с нерегулируемой частью в середине высоты обмотки. Этот способ используется в трансформаторах с ПБВ [1, рис.6.6,в,г], а также в трансформаторах с РПН при напряжениях до 35 кВ [1, рис.6.7,а,б].

2) В отдельных центрах, в трансформаторах с РПН при напряжении 110 кВ [1, рис.6.9,б,в].

8.2. Расчет многослойной цилиндрической обмотки ВН из круглого провода.

В многослойной цилиндрической обмотке из круглого провода параллельные провода в витке располагаются в осевом направлении, а слои располагаются в радиальном направлении, поэтому высота обмотки $l_2 = l_1$ не ограничивает выбора диаметра провода.

Рекомендуется следующий порядок расчета обмотки:

а) Число витков на одной ступени регулирования

$$w_{p2} = w_{2\text{ном}} \Delta U_{cm}^* \quad (69)$$

где $w_{2\text{ном}}$ – число витков обмотки ВН при номинальном напряжении (берется из п.5.2);

$$\Delta U_{cm}^* = \frac{\Delta U_{cm} \%}{100} \quad \text{– относительное значения напряжения из одной ступени}$$

регулирования.

б) Число витков на ответвлениях:

$$\text{ступень } U_{2\text{max}} : w_{2\text{max}} = w_{2\text{ном}} + k_{p2} w_{p2} \quad ,$$

где k_{p2} – число ступеней регулирования вниз и вверх от номинального;

$$\text{ступень } U_{2\text{ном}} : w_{2\text{ном}} ;$$

$$\text{ступень } U_{2\text{min}} : w_{2\text{min}} = w_{2\text{ном}} - k_{p2} w_{p2} .$$

в) Ориентировочная плотность тока

$$J'_2 = 2 J_{cp} - J_1 \quad (70)$$

Ориентировочное сечение витка

$$\Pi'_2 = I_2 / J'_2 \quad (71)$$

г) Выбор типа обмотки и схемы регулирования напряжения.

д) По [1, табл.5.1] выбираем один провод нужного сечения диаметром d_2/d'_2 . Если одного провода недостаточно, можно взять $n_{\text{в2}} = 2 \div 3$ так, чтобы

$$n_{\text{в2}} \Pi_{np2} = \Pi'_2 \quad (72)$$

Фактическая плотность тока

$$J_2 = I_2 / \Pi_2 \quad (73)$$

е) Число витков в слое ориентировочно

$$w'_{сл2} = \frac{l_2}{n_{в2} d_2} - 1. \quad (74)$$

Округляем до целой части.

ж) Число слоев ориентировочно

$$N'_{сл2} = w_{2max} / w_{сл2}. \quad (75)$$

Округляется до большего целого числа.

з) Рабочее напряжение двух слоев

$$U_{мсл} = 2 w_{сл2} E_в. \quad (76)$$

По рабочему напряжению двух слоев по [1, табл.4.7] выбирается число слоев и общая толщина кабельной бумаги.

и) Распределение витков по слоям:

один слой: $2 w_{р2} k_{р2}$ витков,

$\left(\frac{w_{2min}}{w_{сл2}} \right)$ слоев по $w_{сл2}$ витков,

один слой: $\left\{ w_{2min} - w_{сл2} \left(\frac{w_{2min}}{w_{сл2}} \right) \right\}$ витков.

Всего w_{2max} витков.

Здесь $\left(\frac{w_{2min}}{w_{сл2}} \right)$ – целая часть числа $(w_{2min} / w_{сл2})$.

к) Разбиваем обмотку на две катушки с осевым каналом между катушками. Число слоев внутренней катушки $1/3 \div 2/5$ от $N_{сл2}$. Минимальная ширина канала a'_{22} выбирается по [1, табл.9.2].

В обмотках класса напряжения 35 кВ под внутренним слоем обмотки устанавливается экран – незамкнутый цилиндр из латуни толщиной $\delta_{экр} = 0.05 \text{ см}$, изолированный с обеих сторон листом картона толщиной $\delta_{изэкр} = 0.1 \text{ см}$. Радиальный размер обмотки с экраном и каналом

$$a_2 = d'_2 N_{сл2} + \delta_{мсл} (N_{сл2} - 1) + (\delta_{экр} + 2\delta_{изэкр}) + a'_{22}. \quad (77)$$

л) Определяем остальные размеры:

– расчетную ширину канала между обмотками

$$a'_{12} = a_{12} + (\delta_{экр} + 2\delta_{изэкр}). \quad (78)$$

внутренний диаметр обмотки

$$D' = D'_1 + 2a'_{12}, \quad (79)$$

наружный диаметр обмотки

$$D''_2 = D'_2 + 2a_2. \quad (80)$$

м) Поверхность охлаждения при намотке обмотки на рейки и наличии канала между двумя частями, м^2

$$P_{02} = 2c K_{зк} \pi (D'_2 + D''_2) l_2 \cdot 10^{-4}, \quad (81)$$

где $c = 3$ – число стержней;

$K_{зк} = 0.8$ – коэффициент закрытия поверхности охлаждения.

н) Масса металла обмотки – по формуле (33), коэффициент $K_{доб2}$ – по формуле (27), электрические потери в обмотке $P_{э2}$ – по формуле (35) и тепловая нагрузка $q_2 = P_{эл2}/\Pi_{охл2}$, $Вт/м^2$.

8.3. Расчет непрерывной катушечной обмотки ВН, выполненной в одном концентре [1, рис.6.6,а,б; рис.6.7,а,б].

Рекомендуется следующий порядок расчета.

а) Определяют w_{p2} ;

б) Определяют число витков на ответвлениях;

в) Определяют J'_2 ;

г) Выбирают тип обмотки аналогично пп.7.2,а–г;

д) Определяют предельное расстояние между охлаждающими каналами $c_{пред}$ (см. п.6.4,а).

е) Находят ширину каналов h_k (п.7.4,б).

В месте расположения регулировочных витков ОВН ширину каналов в ОНН рекомендуется увеличить.

ж) По сортаменту обмоточных проводов [1, табл.5.2 или табл.5.3] выбирают ширину провода b (п.7.4,в).

В случае обмоток ВН класса напряжения $110 кВ$ для входных обмоток с усиленной изоляцией высота провода $b_{вх}$ выбирается на $7-10\%$ больше высоты провода в основной части обмотки.

з) Находят ширину канала $h_{кр}$ в месте расположения регулировочных витков [1, табл.4.9]. Для обмоток класса напряжения $110 кВ$ находят число катушек с усиленной изоляцией и суммарную толщину их дополнительной изоляции по [1, табл.4.10].

Находят размер Δl

$$\Delta l_2 = K_{yc}(h_{кр} - 2h_k) + \Delta_{из доп} + 2(\delta_{емк} + h_{к емк}) + n_{вх}(b'_{вх} - b'_{осн}), \quad (82)$$

где $\delta_{емк} = 2.0 см$ – толщина емкостного кольца; $\Delta_{из доп} = 1.15 см$ (в обмотках ВН с $U_2 = 110 кВ$);

$h_{к емк} = 1 см$ – ширина канала между емкостным кольцом и катушкой (при $U_2 = 110 кВ$);

$b'_{осн}$, $b'_{вх}$ – высота проводов основных и входных катушек с изоляцией соответственно.

и) Определяют число катушек $n_{кат2}$ по формулам (61) или (62), заменив Δl_1 на Δl_2 и приняв $b'_{вх} - b'_{осн} = 0$. Полученное число катушек округляется до четного числа так, чтобы получить близкое к целому число витков в катушках $\omega_{кат2}$, с «недоходом» менее половины.

В случае трансформаторов ТРДН и ТРДС в формулы (61) и (62) подставляют вместо l_2 значение $l_2' = (l_2 - \Delta l_{p2})/2$, где $\Delta l_2 = 20$ см.

к) По сортаменту обмоточных проводов [1, табл.5.2 или табл.5.3] перебором размера a подбираем число параллельных проводов $n_{\epsilon 2}$ и радиальный размер проводов основной части обмотки так, чтобы $n_{\epsilon 2} \Pi_{np2} \approx \Pi_2'$ (с точностью $1 \div 3$ %).

Такая же ширина провода принимается и для входных катушек. При этом поперечное сечение Π_{2ex} будет на $7 - 10$ % больше за счет большей высоты провода, а плотность тока J_{2ex} – на $7 - 10$ % меньше, чем у основных катушек.

л) Число витков в катушке ориентировочно

$$w'_{кат 2} = w_{2max} / n_{кат 2} . \quad (83)$$

Далее производится распределение витков по катушкам и одновременно уточняется число катушек $n_{кат 2}$. При этом регулировочные витки и витки с усиленной изоляцией должны быть уложены в отдельные катушки. Методика подбора чисел витков в катушках основной части обмотки с числом витков w_{2min} такая же, как и в случае расчета обмотки НН (п.7.4,г).

Числа витков катушек с усиленной изоляцией и регулировочных выбирают так, чтобы их радиальные размеры не превышали размер основных катушек.

Число витков в регулировочных катушках $w_{кат рег}$ целесообразно принять равным числу витков между ответвлениями w_{p2} или половине ($w_{p2}/2$), с тем чтобы между ответвлениями включить две полные регулировочные катушки. Если окажется $w'_{кат 2} < w_{2p} < 1.2 w'_{кат 2}$, то рекомендуется принять $w_{кат 2} = w_{кат рег} = w_{2p}$ и уточнить значение $n_{кат 2}$.

м) Далее определяют высоту обмотки по формулам, аналогичным формулам (67). С учетом формулы (82), радиальный размер $a_2 = 10^{-3} n_{\epsilon 2} a'(w_{кат 2})$, массу металла проводов, соответствующую номинальному напряжению, кг

$$M_{02} = K_m c D_{cp 2} w_{2ном} \Pi_2 \cdot 10^{-5} , \quad (84)$$

электрические потери

$$P_{\epsilon 2} = K_{доб 2} K_{\epsilon} M_{02} J_2^2 , \quad (85)$$

тепловую нагрузку – по формуле (25).

8.4. Расчет непрерывной катушечной обмотки, состоящей из нескольких концентров.

а) Обмотка ВН со схемой регулирования [1, рис.6.9,б] состоит из трех частей одинаковой высоты:

– основной части с числом витков

$$w_{2осн} = w_{2ном} - w_3 ; \quad (86)$$

– регулировочной обмотки «грубой» ($PO_{зруб}$) с числом витков

$$w_3 = K_{p2} w_{p2}; \quad (87)$$

где K_{p2} – число ступеней регулирования вверх и вниз от $w_{2ном}$;

– регулировочной обмотки «тонкой» ($PO_{тонк}$), состоящей из девяти слоев по w_{p2} витков в каждом слое.

В случае схемы [1, рис.6.9,в] обмотка ВН состоит из двух частей:

– основной части с $w_{2осн} = w_{2ном}$;

– регулировочной части с $w_3 = K_{p2} w_{p2}$.

б) Основная часть ОВН выполняется в виде непрерывной катушечной обмотки и рассчитывается по методике, изложенной в п.7.4, с учетом наличия входных катушек с усиленной изоляцией и емкостных колец, а также с учетом формулы (82) для определения Δl_2 .

в) Обмотка грубого регулирования $PO_{груб}$ выполняется в виде непрерывной катушечной и рассчитывается по методике, изложенной в п.7.4.

Число катушек на одну параллельную ветвь трансформаторов ТРДН и ТРДНС определяется по (61) и (62) с заменой l_2 на $l'_2 = l_2 - \Delta l_{p1}$, где $\Delta l_{p1} = 0$ для основной части ОВН, 20 см – для $PO_{гр}$ и 32 см – для $PO_{тонк}$.

г) Обмотка тонкого регулирования $PO_{тонк}$ наматывается как двухходовая или четырехходовая винтовая обмотка. При $n_x = 2$ и $K_{p2} = 9$ один ход выполняется из пяти параллельных проводов, а второй – из четырех параллельных проводов и полоски картона [1, рис.10.10], причем каждый слой образует одну ступень регулирования с числом витков w_{p2} . При $n_x = 4$ два хода включаются параллельно. Расчет этой обмотки производится в следующем порядке:

– задаются шириной охлаждающего канала h_k ;

– определяют высоту витка

$$h_{\epsilon l} = \frac{l_1 + h_k}{w_{p1}}, \quad (88)$$

где $w_{p1} = w_{p2} + 1$, $n_x = 2$ или 4;

– определяют высоту провода с изоляцией

$$b' = \frac{h_{\epsilon l}}{n_x} - h_k = \frac{l_1 + h_k}{n_x(w_{p2} + 1)} - h_k; \quad (89)$$

– по сортаменту обмоточных проводов [1, табл.5.2 или табл.5.3] выбирают высоту провода без изоляции b и находят $b' = b + \Delta_{из}$;

– приняв плотность тока в обмотке $PO_{тонк}$ $J_1 = J_2$, определяют предварительно сечение витка

$$\frac{n_x}{2} n_{\epsilon l} \Pi_{np} \cong \Pi'_1; \quad (90)$$

– высота обмотки

$$l_1 = n_x b'(w_{p2} + l) + K_{yc} h_k (n_x w_{p2} + l); \quad (91)$$

– выбирают радиальный размер провода a и число параллельных проводов n_{el} [1, табл.5.2 или табл.5.3] (обычно берут $n_{el} = 1$), так чтобы

$$n_{el} \Pi_{np} \cong \Pi'_1; \quad (92)$$

– уточняют ширину канала.

9. Расчет параметров короткого замыкания

9.1. Определение потерь короткого замыкания. Потери короткого замыкания складываются из:

– электрических потерь (основных и дополнительных) в обмотках НН и ВН;

– электрических потерь в отводах обмоток;

– потерь в стенках бака и других металлических элементах конструкции трансформатора, вызванных полем рассеяния обмоток и отводов. Расчет $P_{\Sigma 2}$ производится для $w_2 = w_{2ном}$.

Электрические потери $P_{\Sigma 1}$ и $P_{\Sigma 2}$ обмоток с учетом добавочных потерь от поля рассеяния определены выше при расчете обмоток.

В винтовых одноходовых ОНН с одной общей и двумя групповыми транспозициями могут возникать добавочные потери от несовершенства транспозиции, т.е. от неравномерного распределения тока между параллельными проводами. Средний коэффициент потерь может быть вычислен по формуле.

$$K_{доб\ трп} = 1 + K_{трп} \cdot 10^{-2} \beta_{zn}^2 a^4 (n_p^4 - 20 n_p^2 + 64), \quad (93)$$

где

$$K_{трп} = \begin{cases} 0,029 & \text{– для медных проводов;} \\ 0,0113 & \text{– для алюминиевых проводов;} \end{cases}$$

a – радиальный размер провода, см;

β_{zn} – определяется так же, как и в п.6.

Потери в отводах определяются по формуле (35), при этом принимают $K_{доб\ отв} = 1$.

Таким образом,

$$P_{отв i} = K_{\Sigma} M_{отв i} J_{отв i}^2, \quad (94)$$

где $J_{отв i}$ – плотность тока в отводах i -й обмотки, $i = 1; 2; 3$ (потери в $PO_{тонк}$ не учитываются);

$$M_{отв i} = l_{отв i} \Pi_{отв i} \gamma, \quad (95)$$

$M_{отв i}$ – масса отводов i -й обмотки, кг;

$l_{отв i}$ – длина отводов i -й обмотки, м²;

$\Pi_{отв i}$ – сечение отвода i -й обмотки, мм².

При соединении обмотки в звезду [1, с.315]: $l_{омвi} \approx 7.5 l_i$, $\Pi_{омвi} = \Pi_i$.

При соединении обмотки в треугольник: $l_{омвi} \approx 14 l_i$, $\Pi_{омвi} = \sqrt{3} \Pi_i$.

Значения K_γ в формулу (94) подставляются из табл.5.

Плотность материала обмотки: медь $\gamma = 8900 \text{ кг/м}^3$, алюминий $\gamma = 2700 \text{ кг/м}^3$.

Потери в стенках бака на этапе расчета обмоток, когда размеры бака еще не известны, для трансформаторов мощностью от 100 до 63000 кВА можно определить по приближенной формуле

$$P_{\sigma} \cong 10 k S_H, \quad (96)$$

где k – коэффициент, определяемый по табл.7.1 [1].

После определения всех потерь рекомендуется составить таблицу потерь короткого замыкания.

9.2. Расчет напряжения короткого замыкания. Напряжение короткого замыкания $u_k\%$ рассчитывается по формуле

$$u_k = \sqrt{u_{ка}^2 + u_{кр}^2}. \quad (97)$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_{ка\%} = 100 \frac{P_k}{S_H}, \quad (98)$$

где P_k берется из п.9.1.

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания определяется по формуле

$$u_{кр\%} = \frac{7,9 f \beta S' a_p K_p}{E_g^2} \cdot 10^{-1}, \quad (99)$$

где β – полученное при расчете обмоток отношение $\beta = \pi d_{12}^{(2)} / l$;

$$S' = S_H / c, \text{ кВА.}$$

В случае незначительных расхождений высоты обмоток ОН и ВН при расчете β принимают за l их среднее значение: $l = (l_1 + l_2) / 2$.

Входящая в формулу (99) величина a_p называется приведенной шириной канала рассеяния. Для двухобмоточных трансформаторов, т.е. в случае обмоток ВН цилиндрической многослойной и непрерывной катушечной с расположением регулировочных витков в середине общего центра, значение a_p определяется формулой

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 D_1}{3 d_{12}} + \frac{a_2 D_{11}}{3 d_{12}}, \quad (100)$$

$$\text{где } D_1 = D_{cp1} + a_1 / 2;$$

$$D_{11} = D_{cp2} - a_2 / 2;$$

$$D_{cp1} = \frac{D'_1 + D''_1}{2};$$

$$D_{cp2} = \frac{D'_2 + D''_2}{2}.$$

Для двухобмоточных трансформаторов мощностью до 1000 кВА ($S_n \leq 1000$ кВА) обычно принимают

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}. \quad (101)$$

Для двухобмоточных трансформаторов мощностью от 1000 до 10000 кВА можно принять

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 D_{cp1}}{3 d_{12}} + \frac{a_2 D_{cp2}}{3 d_{12}}. \quad (102)$$

В случае выполнения обмотки ВН в виде концентров по [1, рис.6.9,б] размер a_p рассчитывается по формуле

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 D_1}{3 d_{12}} + \frac{d_2 D'_{11}}{3 d_{12}} + F_3^{*2} \left(a_{23} \frac{d_{23}}{d_{13}} + \frac{a_3 D_{III}}{3 d_{12}} \right), \quad (103)$$

где $D'_{11} \cong (D_2' + a_2/2 F_2^*)(1 + F_3^* + F_3^{*2})$;

$$F_3^* = w_3/w_{2ном} = K_{p2} \Delta U_{cm}^*; \quad F_2^* = 1 - F_3^*;$$

$$d_{12} = \frac{D''_1 + D'_2}{2} = D''_1 + a_{12}; \quad d_{23} = \frac{D''_2 + D'_3}{2} = D''_2 + a_{23},$$

a_{23} – ширина канала между основной частью ОВН и $PO_{зруб}$

$$D_{III} = D'_3 - \frac{3}{2} a_3 = D_{cp3} - a_3/2. \quad (104)$$

Для трансформаторов с $S_n = 6300 \div 80000$ кВА при $U_2 = 110$ кВ:

$$F_3^* = 0.178 \text{ (см. табл.5);}$$

$$F_2^* = 0.822; \quad 1 + F_3^* + F_3^{*2} = 1.186.$$

Коэффициент Роговского

$$K_p \cong 1 - \sigma(1 - e^{-1/\sigma}) \approx 1 - \sigma, \quad (105)$$

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

Если полученное значение u_k отличается от заданного более чем на 5%, то необходимо вернуться к п.4.7 и изменить высоту обмоток l . В случае необходимости можно изменить диаметр стержня или индукцию B . [1, с.327].

10. Расчет магнитной системы трансформатора

10.1. Определение размеров магнитной системы производится в соответствии с [1, § 8.1], [1, с. 400–402, 459–460, 487–489].

Размеры пакетов можно не выписывать, а сослаться на табл.8.3 [1].

10.2. Расчет потерь холостого хода производится согласно [1, §8.2].

10.3. Расчет тока холостого хода трансформатора производится в соответствии с [1, §8.3].

IV. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. –М.: Энергоатомиздат, 1986. –526 с.
2. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов / И.П. Копылов 4-е изд., испр. –М.: Высш. шк., 2004. –607 с.
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Курс электротехники. –5-е изд., стер. – М.: Энергоатомиздат, 2005. –542 с.
4. Основы промышленной электроники. Под ред. В.Г.Герасимова. –М.: Высшая школа, 1986. –340 с.
5. Бородулин Ю.Б, и др. Автоматизированное проектирование электрических машин. –М.: Высшая школа, 1989. –345 с.
6. Забродин Ю. С. Промышленная электроника. –М.: Высшая школа, 1982. –496 с., с ил.

V. ПРИЛОЖЕНИЕ

Габаритные размеры и масса сухих трансформаторов должны иметь значения, не превышающие указанных в табл. П–1

Таблица П–1

Тип трансформатора	Номинальное напряжение обмотки ВН, кВ	Габаритные размеры, мм			Масса трансформатора, кг
		длина	ширина	высота	
ТСЗ–160/10	10, 00; 10,50	1800	950	1700	1400
ТСЗ–250/10	10,00	1850	1000	1850	1800
ТСЗ–250/15	13,8; 15,75	2300	1200	1850	2200
ТСЗ–400/10	13,8; 15,75	2250	1000	2150	2400
ТСЗ–400/15	10,00; 10,50	2450	1200	2150	2700
ТСЗ–630/10	10,00; 10,50	2250	1100	2300	3400
ТСЗ–630/15	10,00; 10,50	2450	1350	2350	4000
ТСЗ–1000/10	13,8; 15,75	2400	1350	2550	4600
ТСЗ–1000/15	13,8; 15,75	2550	1350	2750	5000
ТСЗ–1600/10	10,00	2620	1350	3200	6500
ТСЗ–1600/15	13,8; 15,75	2600	1350	3200	6800

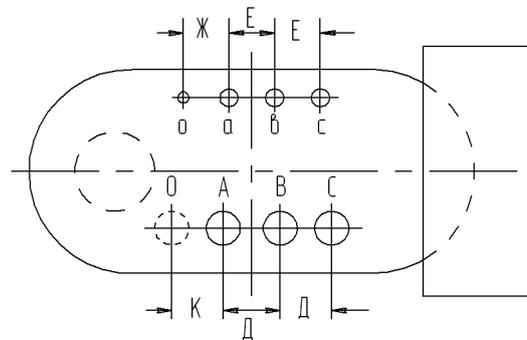
Габаритные размеры и масса масляных трансформаторов должны соответствовать данным, приведенным в табл. П–2

Таблица П–2

Тип трансформатора	Габаритные размеры не более, мм				Полная масса не более, т
	полная высота	высота до крышки	длина	ширина	
ТМН–1000/10	3400	1850	3400	2000	8,0
ТМН–1600/10	3600	2100	3450	2000	8,5
ТМН–2500/10	4000	2250	3650	2230	12,2
ТМН–400/10	4000	2450	3880	3580	16,0
ТМН–6300/10	4200	2550	4100	3650	19,0
ТМН–1000/35	3800	1860	3700	1850	8,1
ТМН–1600/35	4000	2150	3700	1850	9,6
ТМН–2500/35	4000	2250	3700	3500	12,3
ТМН–4000/35	4200	2450	3950	3600	16,3
ТМН–6300/35	4400	2550	4150	3650	19,6
ТД–10000/35	4350	2960	3000	3760	21,8
ТД–16000/35	4860	3250	3950	3970	31,3
ТД–40000/35	5700	3970	5300	4400	52,3
ТРДНС–25000/35	5350	3340	6500	4300	55,0
ТРДНС–40000/35	5550	3500	6800	4500	70,0
ТМТН–6300/35	4500	2800	5200	4300	26,5
ТМТН–10000/35	5200	3050	6000	4300	35,0
ТМТН–16000/35	5500	3480	6500	4500	47,0

Примечание: Для трансформаторов мощностью $1000 \div 63000$ кВА масса и полная высота даны без применения трансформаторов тока. При применении трансформаторов тока, установленных на крышке, полная высота трансформаторов увеличивается на 500 мм, масса – на 400 кг.

а)



б)

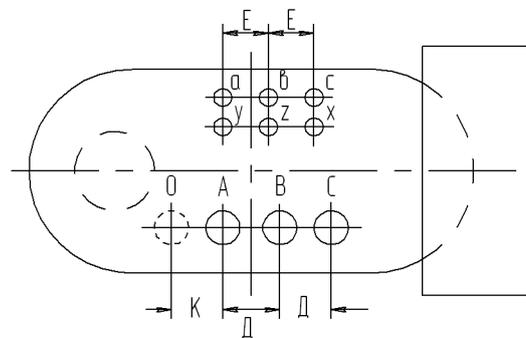


Рис.П–1. Общий вид крышки силового трансформатора в плане: а) схема соединения вторичных обмоток звездой; б) схема соединения вторичных обмоток треугольником.

Численные значения размеров, представленных на рис. П–1, сведены в табл. П–3.

Таблица П–3

Исполнение трансформаторов при номинальной мощности, кВА	Верхний предел		Расстояние между осями вводов не менее, мм			
	ВН, кВ	НН, кВ	Д	Е	Ж	К
Общего назначения 1000÷6300	10,00	0,69	200	120	120	
		10,50		200	–	200
	35,00	11,00	400	200	–	200
Общего назначения 10000÷40000	38,50	10,50	500	260	–	450
Трехобмоточные 6300÷16000	ВН – 36,75 СН – 15,75 НН – 6,3		500	260	260	450

Примечание: Расстояние между средними линиями катков и ширина колен в зависимости от мощности трансформаторов, рассматриваемых в табл.П–3, должны соответствовать величинам, указанным в табл.П–4.

Таблица П–4

Номинальная мощность трансформатора, <i>кВА</i>	Расстояние между средними линиями гладких катков		Ширина колен для катков с ребордами	
	при продольном перемещении	при поперечном перемещении	при продольном перемещении	при поперечном перемещении
1000 и 1600	1070	1070	–	–
2500	1594	1594	–	–
4000 и 6300	1594	1594	1524	1524
10000÷32000	–	–	1524	1524
40000÷80000	–	–	1524	2000

Таблица П–5

Габаритные размеры массы масляных трансформаторов от 160 до 630 *кВА*

Номинальная мощность трансформатора, <i>кВА</i>	Верхний предел номинального напряжения обмотки ВН, <i>кВ</i>	Габаритные размеры не более, <i>мм</i>				Полная масса, не более, <i>кг</i>
		длина	ширина	Высота		
				полная	до крышки	
160	10	1220	1020	1600	1190	1100
250		1310	1050	1760	1290	1425
400		1400	1080	1900	1440	1900
630		1750	1275	2150	1635	3000
160	35	1400	1000	2260	1600	1700
250		1500	1250	2320	1670	2000
400		1650	1350	2500	1750	2700
630		2100	1450	2750	2000	2500

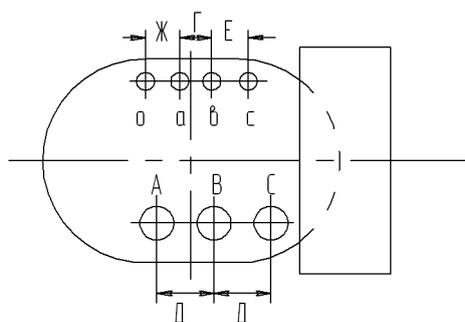


Рис.П–2. Общий вид крышки силового трансформатора в плане.

Численные значения размеров, представленных на рис.П–2, сведены в табл.П–6.

Таблица П–6

Номинальная мощность трансформатора, <i>кВА</i>	Верхний предел номинального напряжения обмотки ВН, <i>кВ</i>	Расстояние между осями вводов не менее, <i>мм</i>		
		Д	Е	Ж
160	10	170	90	90
250			110	110
400			120	120
630	35	400	90	90
160			110	110
250			120	120
400				
630				

Расстояния между средними линиями катков у трансформаторов, рассматриваемых в табл.П–5, приведены в табл.П–7.

Таблица П–7

Номинальная мощность трансформатора, <i>кВА</i>	Верхний предел номинального напряжения обмотки ВН, <i>кВ</i>	Расстояние между осями, <i>мм</i>	
		по длине трансформатора	по ширине трансформатора
160	10	500	
250		660	
400		820	
630	35	660	
160		820	
250			
400			
630			

Габаритные размеры и масса масляных трансформаторов должны соответствовать данным, приведенным в табл.П–8.

Таблица П–8

Тип трансформатора	Габаритные размеры не более, мм				Полная масса не более, т
	полная высота	высота до крышки	длина	ширина	
ТДНС–10000/35	5000	2990	5400	2980	23,8
ТДНС–16000/35	5250	3240	6100	3080	35,8
ТДНС–10000/36,5	5600	3300	4500	3900	30
ТДНС–16000/36,5	6000	3800	5600	4000	39
ТДН–10000/38,5	4300	–	3000	3750	21
ТМН–2500/110	4800	3200	3700	400	31
ТДН–16000/38,5	4000	–	5000	3500	24,5
ТМН–6300/115	5000	2500	6000	3100	34
ТДН–10000/115	5400	3300	6300	3400	42
ТДН–16000/115	6300	3500	6900	4500	55
ТРДН–25000/115	5800	3400	6600	4600	67
ТРДН–40000/115	6200	3500	6900	4800	91