

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Амурский государственный университет»

В.Л. Русинов, Н.С. Бодруг, О.В. Скрипко

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Учебное пособие



Благовещенск
2025

ББК 31.26
УДК 621.313
P88

*Печатается по решению
редакционно-издательского совета
Амурского государственного
университета*

Рецензенты:

- Казакул Алексей Александрович – *заместитель главного инженера по оперативно-технологическому и ситуационному управлению – начальник управления АО «ДРСК», канд. техн. наук, доцент*
- Проценко Палина Павловна – *доцент кафедры Электроэнергетики и электротехники Электроэнергетического факультета ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»*

Русинов В.Л.

Проектирование силовых трансформаторов: учебное пособие / В.Л. Русинов, Н.С. Бодруг, О.В. Скрипко ; Амур. гос. ун-т, Энергет. фак. – Благовещенск: АмГУ, 2025. – 69 с.

Учебное пособие предназначено для подготовки бакалавров очной и заочной форм обучения по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника». В учебном пособии приводятся краткие теоретические сведения и рекомендации по проектированию трансформаторов и пример расчета силового трансформатора по общему курсу «Электрические машины».

В авторской редакции.

©Амурский государственный университет, 2025
© Русинов В.Л., Бодруг Н.С., Скрипко О.В., 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Определение основных размеров трансформатора	8
1.1. Исходные данные для расчета трансформатора	8
1.2. Расчет основных электрических величин	9
1.3. Выбор главной изоляции	10
1.4. Определение основных размеров	12
2. Расчет обмотки низшего напряжения (НН)	15
2.1. Выбор провода	15
2.2. Определение размеров обмотки	18
3. Расчет обмотки высшего напряжения (ВН)	21
3.1. Определение сечения витка и выбор типа обмотки	21
3.2. Расчёт многослойной цилиндрической обмотки ВН из прямо- угольного провода	22
4. Расчет параметров короткого замыкания	25
4.1. Определение потерь короткого замыкания	25
4.2. Расчет напряжения короткого замыкания	27
4.3. Расчёт механических сил в обмотках	28
5. Расчет магнитной системы, потерь и тока холостого хода	30
5.1. Определение размеров магнитной системы	30
5.2. Определение потерь холостого хода	32
5.3. Определение тока холостого хода	34
6. Дополнительные расчеты	36
6.1. Расчёт винтовой обмотки низшего напряжения	36
6.2. Расчёт многослойной цилиндрической ОВН из круглого прово-	40

да

6.3. Расчёт параметров короткого замыкания трансформатора с многослойной цилиндрической обмоткой ВН из круглого провода 42

Заключение 47

Приложение 50

Список литературы 68

ВВЕДЕНИЕ

Силовой трансформатор – один из важнейших элементов энергетической системы, и будущий инженер - электроэнергетик должен научиться проектировать силовые трансформаторы, рассчитывать их характеристики, уметь анализировать влияние исходных данных на параметры трансформатора и даже решать задачи выбора оптимального варианта. При этом студент проектирует отдельный трансформатор, входящий в уже известную серию, который отвечает требованиям ГОСТ в отношении номинальной мощности и напряжений обмоток, параметров холостого хода и короткого замыкания. Знания, полученные студентом при проектировании силового трансформатора, понадобятся ему в дальнейшем при выборе трансформаторов в электрических сетях и на предприятиях. Данное пособие по проектированию трансформаторов позволяют студенту полностью рассчитать трансформатор, используя персональный компьютер. Замечательным учебным пособием по проектированию трансформаторов является книга П.М. Тихомирова «Расчет трансформаторов» (М.,1986), которая, к сожалению, стала библиографической редкостью.

Наличие большого количества трансформаторов в энергетических системах, несмотря на высокое значение коэффициент полезного действия отдельного трансформатора (98-99 % и более), приводит к тому, что общие потери энергии во всем парке трансформаторов достигают существенных значений. Поэтому задача уменьшения потерь электроэнергии в трансформаторах, то есть потерь холостого хода и короткого замыкания, является одной из важнейших задач энергосберегающей политики страны. Потери холостого хода — это потери в «стали» трансформатора, поэтому уменьшение этого вида потерь достигается главным образом путем применения холоднокатаной рулонной электротехнической стали с улучшенными магнитными свойствами, низкими удельными потерями и низкой удельной намагничивающей мощностью марок «3404», «3405», «3406» по ГОСТ 21427-83, допускающей магнитную индукцию до 1,6-1,65 Тл. Потери короткого замыкания – это потери в «меди» трансформатора,

поэтому уменьшение потерь короткого замыкания достигается понижением плотности тока за счет увеличения массы металла в обмотках. В значительной степени этого удалось добиться путем замены обмоточного медного провода алюминиевым в силовых трансформаторах общего назначения мощностью до 16000 кВА. Перевод этих трансформаторов на алюминиевые обмотки позволил достичь большой экономии меди, необходимой для увеличения выпуска трансформаторов больших мощностей.

Полной взаимозаменяемости в эксплуатации трансформаторов с медными и алюминиевыми обмотками можно добиться, проектируя те и другие с одинаковыми параметрами и напряжением короткого замыкания, потерями и током холостого хода, при одинаковых марках стали, магнитной индукции в стержне, коэффициенте заполнения сталью сечения стержня и т.д. При этом «алюминиевые» трансформаторы имеют одинаковую с «медными» массу стали, меньшую массу, но больший объем металла обмоток, большую высоту магнитной системы (магнитная система алюминиевого варианта должна быть уже и выше, чем медного). Опыт выпуска трансформаторов с алюминиевыми обмотками, показал, что эти трансформаторы обеспечивают полноценную замену трансформаторов с медными обмотками при одинаковой стоимости всего трансформатора, то есть являются равноценными с "медными" трансформаторами в техническом и экономическом отношении.

В большинстве масляных трансформаторов применяется медный марки «ПБ» или алюминиевый марки «АПБ» обмоточный провод с изоляцией из кабельной бумаги класса нагревостойкости А (предельно допустимая температура 105°C) общей толщиной 0,45-0,50 мм на две стороны. Главным изоляционным материалом в силовых трансформаторах является трансформаторное масло жидкий диэлектрик, сочетающий высокие изоляционные свойства со свойствами охлаждающей среды и теплоносителя. Масло для трансформаторов должно обладать определенными электрическими, механическими и химическими свойствами, но в отличие от других изоляционных материалов один и тот же объем масла не может использоваться в течение всего срока службы трансфор-

матора. В процессе работы трансформатора масло стареет: ухудшает качества и требует систематического ухода сушки, фильтрации, очистки, замены. Основным фактором, влияющим на старение масла, является температура. Предельной температурой масла в работающем трансформаторе является 95°C , однако в эксплуатации стараются не превосходить 85°C .

В основу структуры пособия положен пример расчета конкретного трансформатора, по ходу которого приводятся краткие теоретические сведения и рекомендации, которые должны помочь студенту в проектировании. Весь теоретический материал взят из пособия П.М. Тихомирова. В основной части и приложении приведены необходимые таблицы. Предлагаемая методика проектирования трансформатора прошла апробацию на кафедре автоматизации производственных процессов и электротехника Амурского государственного университета, при выполнении курсового проекта по расчету силовых масляных трансформаторов студентами электроэнергетических специальностей очной и заочной форм обучения.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатор, предназначенный для преобразования параметров электрической энергии в сетях энергосистем и потребителей электроэнергии, называется силовым. В конструктивном отношении силовой трансформатор состоит из трех основных систем: магнитной, системы обмоток с их изоляцией, системы охлаждения и вспомогательных систем (устройства регулирования напряжения, измерительных и защитных устройств, арматуры и др.).

1.1 Исходные данные для расчета трансформатора

Полная мощность трансформатора, кВА	$S = 6300$
Номинальное линейное напряжение обмотки ВН, кВ	$U_2 = 35 \quad + - 5\%$
Номинальное линейное напряжение обмотки НН, кВ	$U_1 = 3,15$
Потери холостого хода, Вт	$P_x = 7600$
Потери короткого замыкания, Вт	$P_k = 46500$
Напряжение короткого замыкания, %	$u_k = 7,5$
Ток холостого хода, %	$i_o = 0,8$
Схема и группа соединений	$Y/\Delta - 11$
Частота, Гц	$f = 50$

Нагрузка длительная.

Материал магнитопровода – рулонная холоднокатаная электротехническая сталь марки «3404» толщиной 0,35 мм.

Материал обмоток – алюминий.

Конструктивная схема трансформатора – трёхстержневой с концентрическими обмотками.

1.2 Расчет основных электрических величин

Расчет трансформатора начинается с определения основных электрических величин – мощности на одну фазу и стержень, номинальных токов на стороне ВН и НН, фазных токов и напряжений.

1.2.1. Мощность одной фазы трансформатора, кВА:

$$S \text{ — } \underline{\hspace{2cm}}$$

1.2.2. Мощность на одном стержне, кВА:

$$\text{— } \underline{\hspace{2cm}}$$

1.2.3. Номинальный (линейный) ток обмотки НН, А:

$$\underline{\hspace{2cm}} \quad \underline{\hspace{2cm}}$$

1.2.4. Номинальный (линейный) ток обмотки ВН, А:

$$\underline{\hspace{2cm}} \quad \underline{\hspace{2cm}}$$

Фазный ток обмотки одного стержня трёхфазного трансформатора при соединении обмоток в звезду равен линейному:

$$I$$

При соединении обмоток в треугольник фазный ток меньше линейного в $\sqrt{3}$:

$$\frac{I}{\sqrt{3}}$$

1.2.5. Фазный ток обмотки НН, соединённой в треугольник (Δ), А:

$$\underline{\hspace{2cm}} \quad \underline{\hspace{2cm}}$$

1.2.6. Фазный ток обмотки ВН, соединённой в звезду (Y), А:

Фазное напряжение трёхфазного трансформатора при соединении обмоток в звезду меньше линейного в $\sqrt{3}$:

$$\text{—}$$

При соединении обмоток в треугольник фазное напряжение равно линейному:

1.2.7. Фазное напряжение обмотки НН, кВ:

1.2.8. Фазное напряжение обмотки ВН, кВ:

== ==

1.3 Выбор главной изоляции

Испытательные напряжения обмоток определяются по таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Наибольшие рабочие и испытательные напряжения, кВ

Класс напряжения, кВ	1	3	6	10	15	20	35
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	1	3,6	7,2	12	17,5	24	40,5
Испытательное напряжение, кВ	5	18	25	35	45	55	85

Рабочее напряжение обмотки:

- Высокое напряжение обмотки (ВН), кВ: исп2
- Низкое напряжение обмотки (НН), кВ: исп1

Выбор изоляционных расстояний следует начинать с главной изоляции обмоток ВН по таблице 1.2.

Расстояния:

- Расстояние обмотки ВН от ярма, мм:
- Расстояние между обмотками ВН и НН, мм:
- Расстояние между обмотками ВН и ВН, мм:
- Расстояние обмотки НН от ярма, мм
- Расстояние обмотки НН от стержня, мм:

Таблица 1.2 – Главная изоляция. Минимальные изоляционные расстояния обмоток НН

Мощность тр-ра, кВА	U _{исп} для НН, кВ	НН от ярма l ₀₁ , мм	НН от стержня, мм			
			δ ₀₁	a _{ц1}	a ₀₁	l _{ц1}
25-250	5	15	Картон 2×0,5	-	4	-
400-630*	5*	Принимается равным найденному по испытательному напряжению обмотки ВН	То же	-	5	-
1000-2500	5		4	6	15	18
630-1600	18; 25 и 35		4	6	15	25
2500-6300	18; 25 и 35		4	8	17,5	25
630 и выше	45		5	10	20	30
630 и выше	55		5	13	23	45
Все мощности	85		6	19	30	70

* Для винтовой обмотки с испытательным напряжением U_{исп} = 5 кВ размеры взять из следующей строки для мощностей 1000-2500 кВА.

Таблица 1.3 – Главная изоляция. Минимальные изоляционные расстояния обмотки ВН (СН) с учетом конструктивных требований

Мощность тр-ра S, Ква	U _{исп} для ВН(СН) кВА	ВН от ярма, мм		Между ВН и НН, мм		Выступ цилиндра l _{ц2} , мм	Между ВН и ВН, мм	
		l ₀₂	δ _{нн}	a ₁₂	δ ₁₂		a ₂₂	δ ₂₂
25-100	18; 25 и 35	20	-	9	2,5	10	8	-
160-630	18; 25 и 35	30	-	9	3	15	10	-
1000-6300	18; 25 и 35	50	-	20	4	20	18	-
630 и выше	45	50	2	20	4	20	18	2
630 и выше	55	50	2	20	5	30	20	3
160-630	85 (прим1)	75	2	27	5	50	20	3
1000-6300	85 (прим1)	75	2	27	5	50	30	3
10000 и выше	85	80	3	30	6	50	30	3

Примечания:

1. Для цилиндрических обмоток минимальное допустимое изоляционное расстояние a₁₂ = 27 мм. Электростатический экран с изоляцией 3 мм.

2. При наличии прессующих колец расстояние от верхнего ярма l_{01} принимать увеличенным против данных таблицы 1.2 для трансформаторов 1000 – 6300 кВА на 45 мм.

1.4 Определение основных размеров

1.4.1. Отношение средней длины окружности канала между обмотками к высоте обмотки (таблица 1.4). Принимаем $\beta = 1,2$.

Таблица 1.4 – Рекомендуемые значения β . Масляные трансформаторы

Мощность, кВА	Алюминий			Медь		
	6 и 10 кВ	35 кВ	110 кВ	6 и 10 кВ	35 кВ	110 кВ
25-100	1,2-1,6	-	-	1,8-2,4	-	-
160-630	1,2-1,6	1,2-1,5	-	1,8-2,4	1,8-2,4	-
1000-6300	1,3-1,7	1,2-1,6	-	2,0-2,6	1,8-2,4	-
6300-16000	-	1,1-1,3	1,1-1,3	-	1,7-2,0	1,6-2,0

1.4.2. Ширина приведенного канала рассеяния

Ширина приведенного канала в предварительном расчете может определяться только приблизительно по формуле

$$b_{\text{пр}} = \dots, \text{ мм.}$$

Таблица 1.5 – Значения коэффициента k в формуле для масляных трехфазных двухобмоточных трансформаторов ПБВ с медными обмотками и потерями короткого замыкания по ГОСТ

Мощность трансформатора, кВА	Класс напряжения, кВ	
	10	35
До 250	0,63	0,65-0,58
400-630	0,53	0,58-0,52
1000-6300	0,51-0,43	0,52-0,48

Примечания. Для обмоток из алюминиевого провода значение k , найденное из таблицы, умножить на 1,25.

$$k_{\text{ал}} = k_{\text{мед}} \cdot 1,25 = 0,63 \cdot 1,25 = 0,7875$$

Тогда ширина приведённого канала, мм:

1.4.3. Коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному полю (коэффициент Роговского) приблизительно принимается в предварительном расчете:

$$k_p = 0,95.$$

1.4.4. Составляющие напряжения короткого замыкания, %:

- активная составляющая:

- реактивная составляющая:

1.4.5. Индукция в стержне B_c :

Рекомендуемые значения расчетной индукции в стержнях современных масляных трансформаторов при использовании современных марок холоднокатаной стали приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Рекомендуемая индукция в стержнях масляных трансформаторов B_c , Тл

Марка стали	Мощность трансформатора S , кВА		
	До 16	25-100	160 и более
3411, 3412, 3413	1,45-1,50	1,5-1,55	1,55-1,6
3404, 3405, 3406, 3407, 3408	1,05-1,55	1,55-1,6	1,55-1,65

Пусть индукция в стержне имеет значение, Тл:

1.4.6. Общий коэффициент заполнения сталью k_c :

1.4.7. Диаметр стержня, м:

Полученный диаметр округляем до ближайшего нормализованного значения, м:

0,105; 0,11; 0,115; 0,12; 0,125; 0,13; 0,14; 0,15; 0,16; 0,17; 0,18; 0,19; 0,20; 0,21;
0,22; 0,225; 0,23; 0,24; 0,25; 0,26; 0,27; 0,28; 0,29; 0,30; 0,31; 0,32; 0,33; 0,34;
0,35; 0,36; 0,37; 0,38; 0,39; 0,40; 0,42; 0,45; 0,48; 0,50.

$$d_H = 0,35$$

1.4.8. Значение коэффициента β , соответствующее нормализованному диаметру:

1.4.9. Средний диаметр канала между обмотками _____ в предварительном расчёте определяется приближенно с использованием коэффициента _____. Для трансформаторов мощностью 25-630 кВА - _____ 1, трансформаторов мощностью 1000-6300 кВА - _____

Принимаем $k_1 = 1,4$.

Радиальный размер обмотки НН, мм:

Средний диаметр канала между обмотками, мм:

1.4.10. Предварительная высота обмотки, мм:

1.4.11. Активное сечение стержня P_c , м²:

1.4.12. Электродвижущая сила одного витка, В:

2. РАСЧЕТ ОБМОТКИ НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ (НН)

Обмотки трансформатора служат непосредственно для преобразования параметров электрической энергии. Основным элементом обмотки является виток – электрический проводник или несколько параллельно соединяемых проводников, однократно охватывающих часть магнитной системы. Обмоткой называется совокупность витков, образующих электрическую цепь, в которой суммируются ЭДС, наведенные в витках, с целью получения высшего или низшего напряжения в двухобмоточном трансформаторе. Все обмотки трансформатора по характеру намотки можно разделить на следующие основные типы: 1) цилиндрические; 2) винтовые; 3) катушечные.

Цилиндрическая обмотка может быть намотана из круглого или прямоугольного провода. Цилиндрические обмотки из круглого медного или алюминиевого провода нашли применение в качестве обмоток ВН при напряжениях от 3 кВ до 35 кВ и обмоток НН при напряжениях от 3 кВ до 10 кВ. В проекте применены цилиндрические обмотки из прямоугольного провода как для обмотки НН, так и для обмотки ВН.

2.1 Выбор провода

2.1.1 Число витков на одну фазу:

2.1.2 Уточняем ЭДС одного витка, В:

2.1.3 Уточняем индукцию в стержне, Тл:

2.1.4 Средняя плотность тока, А/мм²:

Значения коэффициента : для меди = 0,746, для алюминия –

Принимаем

Значения коэффициента k_d выбираем из таблицы 2.1.

Таблица 2.1 – Значения k_d для трехфазных трансформаторов

Мощность трансформатора, кВА	До 100	160-630	1000-6300
k_d	0,97	0,96 - 0,93	0,93 - 0,85

Принимаем $k_d = 0,85$.

2.1.5. Ориентировочное сечение витка, мм²:

По таблице в приложении П.17 «Основные свойства и нормальные пределы применения различных типов обмоток масляных трансформаторов» выбираем цилиндрическую обмотку из прямоугольного провода.

2.1.6. Общий суммарный размер проводов b_{1p} в радиальном направлении, мм:

2.1.7. Число слоев обмотки выбираем с помощью таблицы 2.2.

Число слоев обмотки n

2.1.8. Число витков в одном слое:

2.1.9. Ориентировочный осевой размер витка, мм:

Таблица 2.2 – Ориентировочные предельные радиальные размеры провода – a , мм, цилиндрических обмоток из провода прямоугольного сечения при добавочных потерях, не превышающих 5 %

Число слоёв обмотки	Медные обмотки		Алюминиевые обмотки	
	Добавочные потери и b_1		Добавочные потери и b_1	
	5 %	b_1	5 %	b_1
1	9,00	9,0	11,80	11,8
2	6,30	12,6	8,00	16,0
3	5,30	15,9	6,70	20,1
4	4,50	18,0	5,60	22,4
5	4,00	20,0	5,00	25,0
6	3,75	22,5	4,75	28,5
7	3,35	23,5	4,50	31,5
8	3,35	26,8	4,00	32,0
9	3,15	28,3	3,75	33,8
10	3,00	30,0	3,75	37,5
11	2,80	30,8	3,55	39,1
12	2,65	31,8	3,35	40,2
13	2,50	32,5	3,00	39,0
14	2,36	33,0	3,00	42,0

В таблице в столбце под цифрой 5% находятся предельные радиальные размеры провода a , а в столбце под буквой b_1 – общий суммарный размер проводов в радиальном направлении, мм. Учитывая, что $b_1 D > b_1$, приходим к выводу, что число слоев должно быть больше 8.

Принимаем $n_{1сл1} = 9$. При этом предельный радиальный размер провода .75. Можно принять и $a_{пр} = 4,00$ мм.

2.1.10. Подбор провода

По значениям h'_{B1} и P'_{B1} по сортаменту обмоточного провода для трансформаторов подбираем подходящие провода, используя таблицу П.18 (приложения) для прямоугольного провода.

Подобранные размеры провода, мм, записываются таким образом: число параллельных проводов умножается на размеры провода без изоляции / размеры с изоляцией

С учетом сказанного и принимая в данном случае добавочные потери равными 5%, выбираем прямоугольный провод со следующими размерами:

Число параллельных проводов

Сечение одного провода, мм²

Толщина изоляции на две стороны, мм

Осевой размер провода, мм

Осевой размер витка, мм

Радиальный размер витка, мм

2.1.11. Уточненная плотность тока, А/мм²:

— —

2.2 Определение размеров обмотки

2.2.1. Осевой размер обмотки l_1 , мм.

Расчётная величина обмотки должна быть больше L на 5...15 мм, поэтому вводим $dL = 5...15$ мм:

Длина обмотки, найденная выше, мм:

Погрешность определения высоты не должна быть более 10%:

— —

2.2.2. Радиальный размер обмотки a_1 , мм.

Обмотку, имеющую 9 слоев, выполняем в виде двух концентрических катушек, число слоев внутренней катушки равно 3, наружной - 6, между катуш-

ками - канал шириной a'_{11} . Ширина канала определяется по таблице 2.4 (см. ниже).

Таблица 2.3 – Нормальная междуслойная изоляция в многослойных цилиндрических обмотках

Суммарное рабочее напряжение двух слоев обмотки, В	Число слоев кабельной бумаги на толщину листов, мм	Выступ междуслойной изоляции на торцах обмотки (на одну сторону), мм
До 1000	2×0,12	10
От 1001 до 2000	3×0,12	16
От 2001 до 3000	4×0,12	16
От 3001 до 3500	5×0,12	16
От 3501 до 4000	6×0,12	22
От 4001 до 4500	7×0,12	22
От 4501 до 5000	8×0,12	22
От 5001 до 5500	9×0,12	22

В обмотках, состоящих из нескольких слоев круглого или прямоугольного провода, собственная изоляция витков может оказаться недостаточной, и возникает необходимость введения добавочной изоляции между слоями, тем большей, чем больше суммарное рабочее (а, следовательно, и испытательное) напряжение двух соседних слоев. Межслоевой изоляции можно добиться прокладкой между слоями витков обмотки полос кабельной или телефонной бумаги, электроизоляционного картона либо оставлением между слоями осевого масляного или воздушного канала, обеспечивающего как достаточную изоляцию, так и свободный доступ к обмотке охлаждающего масла или воздуха (в сухих трансформаторах).

В таблице 2.3 даны рекомендации по выбору междуслойной изоляции в многослойных цилиндрических обмотках из круглого и прямоугольного провода. Материалом является кабельная бумага марки "К-120" толщиной 0,12 мм. Число слоев кабельной бумаги между двумя слоями витков определяется по суммарному рабочему напряжению двух слоев обмотки.

Суммарное рабочее напряжение двух слоев:

По рабочему напряжению двух слоев по табл. 2.5 выбираем число слоёв и толщину $\delta_{\text{мсл}}$ кабельной бумаги, мм:

Радиальный размер вертикального канала a_{11} (мм) выбираем по табл. 2.6 из столбца "обмотка-обмотка". Длина канала равна высоте обмотки. Горизонтальных каналов обмотка не имеет.

Радиальный размер обмотки, мм:

Таблица 2.4 – Минимальная ширина охлаждающих каналов в обмотках. Масляные трансформаторы

Вертикальные каналы, ширина				Горизонтальные каналы, ширина	
Длина канала, мм	Обмотка-обмотка, мм	Обмотка-цилиндр, мм	Обмотка-стержень, мм	Длина канала, мм	Обмотка-обмотка, мм
До 300	4-5	4	4-5	До 40	4
300-500	4-6	5	5-6	40-60	5
500-1000	6-8	5-6	6-8	60-70	6
1000-1500	8-10	6-8	8-10	70-80	7

2.2.3. Внутренний диаметр обмотки, мм:

2.2.4. Наружный диаметр обмотки, мм:

2.2.5. Средний диаметр обмотки, мм:

2.2.6. Средний диаметр канала между обмотками НН и ВН, мм:

3. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ВЫСШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ (ВН)

подавляющее большинство всех силовых трансформаторов выполняется с концентрическими обмотками. В этом случае обмотки НН и ВН выполняются каждая в виде цилиндра и располагаются на стержне концентрически одна относительно другой. Осевые размеры обмоток, как правило, делаются одинаковыми. При концентрическом расположении обмотка НН обычно располагается внутри, а обмотка ВН – снаружи. При расположении обмотки ВН снаружи упрощается вывод от нее ответвлений и уменьшаются размеры внутренних изоляционных каналов между внутренней обмоткой и стержнем.

3.1 Определение сечения витка и выбор типа обмотки

3.1.1. Расчет обмоток ВН начинается с определения числа витков, необходимого для получения номинального напряжения и напряжений всех ответвлений. Число витков при номинальном напряжении определяется по формуле:

—

Число витков на одной ступени регулирования напряжения:

—

где $dU = U_{\phi 2}$ – фазное напряжение на одной ступени регулирования обмотки или разность напряжений двух соседних ответвлений, В; u_b – напряжение одного витка обмотки, В.

Обычно ступени регулирования напряжения выполняются равными между собой, чем обуславливается равенство числа витков на ступенях. В этом случае число витков обмотки на ответвлениях при двух ступенях определяется следующим образом:

верхняя ступень напряжения w

при номинальном напряжении

нижняя ступень напряжения w

Плотность тока в обмотке ВН предварительно определяется по формуле:

Сечение витка обмотки ВН предварительно определяется по формуле:

—

3.1.2. Число витков при номинальном напряжении:

— —

Принимаем: w

3.1.3. Напряжение на одной ступени регулирования напряжения, В:

3.1.4. Число витков на одной ступени регулирования напряжения:

— —

Принимаем: $w_p=35$

3.1.5. Число витков обмотки на ответвлениях:

- верхняя ступень
- при номинальном напряжении
- нижняя ступень

3.1.6. Плотность тока в обмотке ВН, А/мм²:

3.1.7. Сечение витка обмотки ВН, мм²:

— —

3.2 Расчёт многослойной цилиндрической обмотки ВН из прямо-угольного провода

3.2.1. Размер проводов в радиальном направлении:

— —

При этом значении $b_2 p$ предельный радиальный размер провода составляет:

мм

3.2.2. По значениям Π'_2 по сортаменту обмоточного провода для трансформаторов подбираем подходящие провода, используя таблицу П.18 для прямоугольного провода (или таблицу П.19 для круглого провода):

АПБ 4 x 3.155.3 /3.65.75 $a_{ВН}$ ВН

Число параллельных проводов: пр2

Сечение одного провода, мм²:

Толщина изоляции на две стороны, мм:

Осевой размер провода, мм:

ВН ВН

Осевой размер витка, мм:

пр2 ВН

Полное сечение витка из $n_{пр2}$ параллельных проводов, мм²:

пр2

3.2.3. Уточняем плотность тока, А/мм²:

$\frac{\phi^2}{\text{_____}}$

3.2.4. Число витков в слое:

сл2 $\frac{\text{_____}}{\text{пр2 ВН}}$ _____

Принимаем: $w_{сл2} =$

3.2.5. Число слоев в обмотке:

сл2 $\frac{\text{_____}}{\text{сл2}}$ _____

Принимаем: $n_{сл2} =$

3.2.6. Суммарное рабочее напряжение двух слоев:

мсл2 сл2 в

По рабочему напряжению двух слоев (таблица 2.4) выбираем число слоев и толщину $\delta_{мсл}$ кабельной бумаги, мм:

$$\delta_{\text{мсл}2} = 7 \cdot 0,12 = 0,84$$

Обмотка ВН имеет $n_{\text{сл}2} = 13$ слоев. Выполняем её в виде двух концентрических катушек с числом слоев 5 и 8.

Радиальный размер канала a'_{22} , между катушками, выбираем по табл. 2.5, мм:

$$a'_{22} = 8$$

3.2.7. Радиальный размер обмотки, мм

В обмотках классов напряжения 20 и 35 кВ под внутренним слоем устанавливают металлический экран — незамкнутый цилиндр из немагнитного металла. За счет экрана и изоляции, накладываемой на экран с двух сторон, радиальный размер обмотки увеличивается на величину a_3 :

Принимаем: $a_3 = 3$ мм

$$\begin{aligned} a_2 &= a'_{\text{ВН}} \cdot n_{\text{сл}2} + \delta_{\text{мсл}2} \cdot (n_{\text{сл}2} - 1) + a'_{22} + a_3 \\ &= 3,6 \cdot 13 + 0,84 \cdot (13 - 1) + 8 + 3 = 67,9 \end{aligned}$$

В трансформаторах мощностью $S < 10000$ кВА радиальные размеры обмоток a_1 и a_2 различаются мало.

3.2.8. Внутренний диаметр обмотки, мм:

$$D_{B2} = D_{H1} + 2 \cdot a_{12} = 489,4 + 2 \cdot 27 = 543,4$$

3.2.9. Наружный диаметр обмотки, мм:

$$D_{H2} = D_{B2} + 2 \cdot a_2 = 543,4 + 2 \cdot 67,9 = 679,2$$

3.2.10. Средний диаметр обмотки, мм:

$$D_{\text{ср}2} = \frac{D_{B2} + D_{H2}}{2} = 611,3$$

4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Потерями короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называются потери, имеющие место в трансформаторе при установлении в одной из обмоток тока, соответствующего номинальной мощности и замкнутой накоротко другой обмотке. В этом случае ток в обмотках, называется током короткого замыкания.

Напряжением короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называется напряжение, которое следует подвести при номинальной частоте к зажимам одной из обмоток при замкнутой накоротко другой обмотке, чтобы в обеих обмотках установились номинальные. Напряжение короткого замыкания определяет падение напряжения в трансформаторе, его внешнюю характеристику и ток короткого замыкания. Оно учитывается также при подборе трансформаторов для параллельной работы.

4.1 Определение потерь короткого замыкания

4.1.1. Масса металла обмотки низшего напряжения (НН), кг:

4.1.2. Масса металла обмотки высшего напряжения (ВН), кг:

4.1.3. Электрические потери в обмотке низшего напряжения (НН), Вт:

— _____

4.1.4. Электрические потери в обмотке высшего напряжения (ВН), Вт:

— _____

4.1.5. Коэффициент _____, учитывающий добавочные потери в обмотке НН:

4.1.6. Коэффициент _____, учитывающий добавочные потери в обмотке ВН:

4.1.7 Масса металла проводов отводов обмотки НН, кг.

Расчет основных потерь в отводах сводится к определению длины проводников и массы металла в отводах. Принимая сечение отвода равным сечению витка обмотки, общую длину проводов, в метрах, можно определять по формулам:

- общая длина отводов обмотки ВН для соединения в треугольник, м:

$$3 \cdot \text{отв1}$$

- сечение отвода, м²

$$\frac{\text{отв1}}{3}$$

- масса металла проводов отводов обмотки НН, кг:

$$\frac{\text{отв1}}{3} \cdot \text{отв1} \cdot 3$$

4.1.8 Электрические потери в отводах обмотки НН, Вт:

$$\frac{\text{отв1}}{3} \cdot \frac{\text{отв1}}{3} \cdot 3$$

4.1.9. Масса металла проводов отводов обмотки ВН, кг:

- общая длина отводов обмотки ВН для соединения в звезду

$$3 \cdot \text{отв2}$$

- сечение отвода, м²

$$\frac{\text{отв2}}{3}$$

- масса металла проводов отводов обмотки ВН, кг:

$$\frac{\text{отв2}}{3} \cdot \text{отв2} \cdot 3$$

4.1.10. Электрические потери в отводах обмотки ВН, Вт:

$$\frac{\text{отв2}}{3} \cdot \frac{\text{отв2}}{3} \cdot 3$$

4.1.11. Потери в стенках бака и других элементах конструкции, Вт.

На этапе расчета обмоток, когда размеры бака еще неизвестны, для трансформаторов мощностью от 100 до 63000 кВА можно с достаточным приближением определить потери в баке и деталях конструкции по формуле:

Коэффициент k_6 определяется по таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения коэффициента k_6 для определения потерь в баке.

Мощность, кВА	До 1000	1000-4000	6300-10000
k_6	0,017	0,032	0,042

Принимаем

4.1.12. Полные потери короткого замыкания, Вт:

При расчете не следует допускать отклонения по модулю расчетных потерь короткого замыкания от гарантийного значения более чем на 10%:

Если это условие не выполняется, следует уменьшить плотность тока в обмотках; при небольших отклонениях рекомендуется пересчитать только одну обмотку на меньшую плотность тока, обычно обмотку ВН.

4.2 Расчет напряжения короткого замыкания

4.2.1. Активная составляющая напряжения короткого замыкания, %:

4.2.2. Уточненное значение коэффициента β :

4.2.3. Уточненная ширина приведенного канала рассеяния, мм.

Ориентировочная ширина канала, мм:

Уточненная ширина, мм:

4.2.4. Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %:

4.2.5. Напряжение короткого замыкания _____, %:

Отклонение расчётного напряжения короткого замыкания от гарантийного, %:

$$\frac{K}{K} \quad \text{---}$$

При расчёте не следует допускать отклонения модуля напряжения короткого замыкания от гарантийного более чем на 10 %. В противном случае необходимо изменить u_k в нужном направлении за счет изменения реактивной составляющей. Значительное изменение u_p достигается изменением напряжения одного витка u_v за счет увеличения или уменьшения

4.3 Расчёт механических сил в обмотках

4.3.1. Установившийся ток короткого замыкания обмотки ВН, А

4.3.2. Мгновенное максимальное значение тока короткого замыкания обмотки ВН, А:

—

4.3.3. Коэффициент приведения поля рассеяния:

4.3.4. Радиальная сила, действующая на обмотку ВН, Н:

4.3.5. Растягивающее в проводе обмотки ВН и сжимающее в проводе обмотки НН напряжение, МПа:

Проверка условия прочности

30 МПа для меди 15 МПа для алюминия

4.3.6. Осевые силы, обусловленные конечным соотношением высоты и ширины обмоток, $F_{ос}$, Н:

4.3.7. Максимальные сжимающие силы в обмотке, Н:

4.3.8. Напряжение сжатия на опорных поверхностях, МПа:

число прокладок по окружности обмотки

ширина прокладки, мм

Проверяем условие σ

20 МПа

4.3.9. Температура обмоток через _____ с после возникновения короткого замыкания, θ_k :

для меди

5, для алюминия

Температура обмоток не должна превышать 250 _____ для меди и 200 _____ для алюминия.

5. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ, ПОТЕРЬ И ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА

Основой конструкции трансформатора является его магнитная система. Основные размеры обмоток и магнитной системы определяют главные размеры активной части и всего трансформатора. Наибольшее распространение в практике трансформаторостроения получили плоские магнитные системы стержневого типа со ступенчатой формой поперечного сечения стержня, вписанной в окружность, и с обмотками в виде круговых цилиндров.

5.1 Определение размеров магнитной системы

5.1.1. Размеры пакетов стержня и ярма для выбранного диаметра стержня выбираются по таблицам П.9, П.10 и П.11.

Ширина и толщина пластин в пакетах, мм:

Номер пакета	Ширина пластин	Толщина пластин
--------------	----------------	-----------------

Общая толщина пакета стержня (ширина ярма), мм:

я

Ширина наибольшей пластины, составляет 340 мм или 0,34 м:

5.1.2. Площади ступенчатой фигуры сечения стержня и ярма (см^2) и объем угла (см^3) выбираются из таблицы П.12, ниже приводится фрагмент таблицы:

Таблица 5.1 – Площади ступенчатой фигуры сечения стержня и ярма (см²) и объем угла (см³)

d, м	П _{фс} , см ²	П _{фя} , см ²	V _у , см ³
0,35	903,6	927,6	26814

Максимальная ширина пластин, мм:

Коэффициент заполнения сталью площади ступенчатой фигуры:

5.1.3. Активное сечение стержня, м²:

5.1.4. Активное сечение ярма, м²:

5.1.5. Объем стали угла магнитной системы, м³:

5.1.6. Длина стержня.

Приращение расстояния, мм:

Длина стержня, мм:

5.1.7. Расстояние между осями соседних стержней, мм:

Полученные размеры магнитопровода проставить на эскизе. Выбрать конструкцию шихтованного магнитопровода с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми на среднем стержне.

5.1.8. Плотность холоднокатаной стали, кг/м³:

5.1.9. Масса стали угла магнитной системы, кг:

5.1.10. Масса стали ярем, кг:

я ст я

5.1.11. Масса стали стержней, кг:

5.1.12. Общая масса стали магнитной системы, кг:

ст я с

5.2 Определение потерь холостого хода

Магнитная индукция в стержнях и ярмах плоской шихтованной магнитной системы определяется для рассчитанного напряжения витка обмотки и окончательно установленных значений активных сечений стержня и ярма.

5.2.1. Индукция в стержне, Тл:

$$C \frac{B}{C} \text{ —————}$$

5.2.2. Индукция в ярме, Тл:

$$я \quad C \frac{C}{я} \text{ —————}$$

5.2.3. Индукция в косом стыке, Тл:

$$Кос \quad C \text{ — —}$$

5.2.4. Потери холостого хода

Значения удельных потерь и полной намагничивающей мощности приведены в таблице П.13, фрагмент таблицы приводится ниже.

Таблица 5.2. – Значения удельных потерь и полной намагничивающей мощности

В, Тл	р, Вт/кг	р _з , Вт/м ²	q, ВА/кг	q _з , ВА/м ²
1,50	1,100	570	1,330	16600
1,52	1,134	585	1,408	17960

При нахождении вручную промежуточных значений удельных потерь можно использовать формулу

Здесь α и β – промежуточные значения; α и β – меньшие значения; γ и δ – большие значения.

Эта формула применима и для нахождения вручную промежуточных значений удельных намагничивающих мощностей.

Удельные потери в стали стержня, Вт/кг:

Удельные потери в других частях магнитной системы трансформатора находятся аналогично:

- в зоне стыка стержня, Вт/м²:
- в стали ярма, Вт/кг:
- в зоне стыка ярма, Вт/м²:
- в зоне косоугольного стыка, Вт/м²:

Коэффициент перешихтовки $k_{пш}$ зависит от мощности трансформатора:

- коэффициент формы сечения ярма;
- коэффициент прессовки.

Значение коэффициента увеличения потерь в углах для различных сочетаний формы стыков приведены в таблице 5.3:

Потери холостого хода, для удобства записи, представим в виде суммы частичных потерь, Вт:

Я С Т Я Я ————— Я ПУ

ПШ

Таблица 5.3 – Значение коэффициента $k_{п,у}$ при $B = 0,9-1,7$ Тл

Число углов со стыками		Марка стали и ее толщина	
Косым	Прямыми	3404 0,35 мм	3405 0,35 мм
6	-	8,58	8,75
4	2	10,18	10,45

Заданные потери холостого хода:

В расчёте следует выдерживать потери холостого хода в пределах нормы соответствующего ГОСТ плюс 15%:

5.3 Определение тока холостого хода

5.3.1. Полные удельные намагничивающие мощности

Удельные намагничивающие мощности:

- в стержне, ВА/кг:
- в ярме, ВА/кг:
- в зоне косого стыка, ВА/м²:
- для зазоров в стержне и ярме:

6. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

В данной главе приведен расчет винтовой обмотки НН и цилиндрической обмотки ВН из круглого провода рассматриваемого трансформатора, а также расчет параметров короткого замыкания для обмотки ВН.

6.1 Расчёт винтовой обмотки низшего напряжения

При больших сечениях витка используется винтовая обмотка (ВО).

Одноходовой называется ВО, витки которой следуют один за другим в осевом направлении по винтовой линии, а сечение каждого витка образовано сечениями нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения, расположенными в один ряд в радиальном направлении обмотки (рисунок 1).

Обычно витки ВО разделяются радиальными или воздушными охлаждающими каналами. Одноходовая ВО может быть намотана и без радиальных каналов.

Обмотка, состоящая из двух (или более) одноходовых обмоток, взаимно расположенных подобно ходам резьбы двухходового (многоходового) винта, называется двухходовой (многоходовой) ВО. Сечение витка при этом образуется общим поперечным сечением проводов всех ходов. Эта обмотка также может быть выполнена с радиальными каналами между всеми витками и внутри витков между образующими их ходами, или с каналами только между каналами и без каналов внутри витков, или совсем без каналов с плотным прилеганием всех ходов. ВО выполняется только из прямоугольного провода. При этом все параллельные провода этой обмотки обязательно должны иметь равные не только площади, но и размеры поперечного сечения.

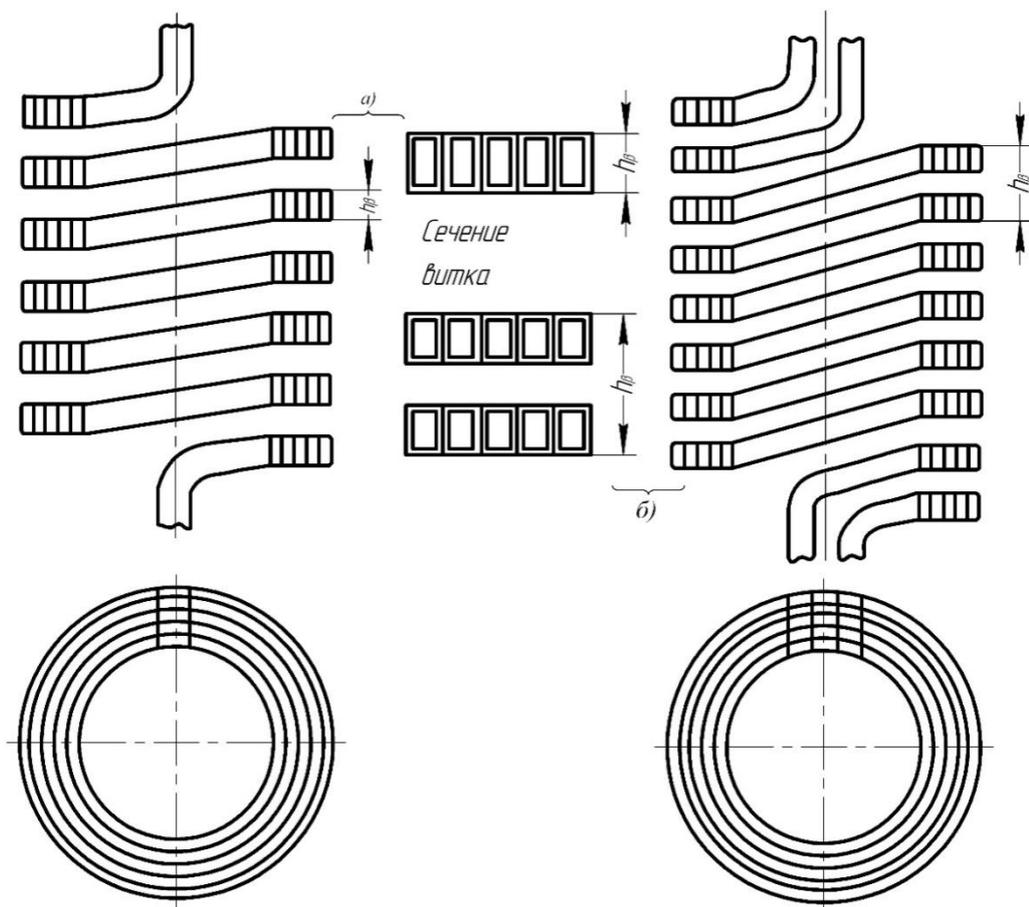


Рисунок 1 – Винтовая параллельная обмотка

a – одноходовая из шести витков; *б* – двухходовая из четырех витков

Выбор одноходовой или двухходовой (многоходовой) обмотки зависит от осевого размера (высоты) одного витка, ориентировочно определяемого по формулам:

- для одноходовой обмотки

Ориентировочно _____, но не менее 4 мм:

Для двухходовой обмотки с равномерно распределенной транспозицией:

где h_{k1} - осевой размер масляного охлаждающего канала между витками.

Максимально возможный осевой размер витка одноходовой обмотки равен максимальному размеру обмоточного провода в изоляции, т. е. не может превышать 15,5 для медного и 18,5 мм для алюминиевого провода. Поэтому при получении $h_B \leq 15,5$ для медного и $h_B \leq 18,5$ мм для алюминиевого провода следует применять одноходовую обмотку. При получении 3,

,5 (или 18,5 мм) по конструктивным соображениям может быть применена двухходовая обмотка. Более точное определение h_B в этом случае дает формула для расчета двухходовой обмотки с равномерно распределенной трансляцией. В редких случаях может быть применена четырехходовая обмотка.

После окончательного выбора конструкции обмотки к полученным ориентировочным значениям P_B и h_{B0} по справочнику обмоточного провода подбирают подходящее сечение провода с соблюдением следующих требований:

- минимальное число параллельных проводов в одноходовой обмотке - четыре, в двухходовой - восемь;
- все параллельные провода одинаковые;
- расчетная высота обмотки при выбранных размерах проводов и радиальных каналов равна предварительно рассчитанному значению.

Выбираем одноходовую обмотку. Размеры провода, мм: АПБ 13 x 4,5 x 7,1 / 4,95 x 7,55

$$a=4,5$$

$$b=7,1$$

Число параллельных проводов

Сечение одного провода, мм²

Толщина изоляции на две стороны, мм,

$$\delta_1=0,45$$

Осевой размер провода, мм:

Осевой размер витка, мм:

Радиальный размер провода:

Полное сечение витка из _____ параллельных проводов, мм²:

Радиальный размер обмотки:

Плотность тока, А/мм²:

Осевой размер (высота) обмотки, отпрессованной после сушки трансформатора, определяется по следующим формулам:

- для одноходовой обмотки с тремя транспозициями:

- для двухходовой обмотки с равномерно распределенной транспозицией:

Коэффициент k_y учитывает усадку межкатушечных прокладок после сушки и опрессовки обмотки и может быть принят равным 0,94 – 0,96 (в некоторых случаях 0,9):

Внутренний диаметр обмотки, мм:

Наружный диаметр обмотки, мм:

$$D_{H1} = D_{B1} + 2 \cdot a_1 = 385 + 2 \cdot 64,4 = 514$$

Средний диаметр обмотки, мм:

$$D_{cp1} = \frac{D_{B1} + D_{H1}}{2} = \frac{385 + 514}{2} = 450$$

6.2 Расчёт многослойной цилиндрической ОВН из круглого провода

По сечению Π_2 и сортаменту обмоточного провода для трансформаторов (таблица П.18) подбираем подходящие провода.

Расчитанное ранее сечение витка, мм²:

$$\Pi_2 = 64,8$$

Выбираем диаметр провода, мм:

$$d_2 = 4,5$$

Сечение одного провода, мм²:

$$\Pi_{пр2} = 15,9$$

Толщина изоляции на две стороны, мм:

$$\delta_2 = 0,40$$

Число параллельных проводов:

$$n_{пр2} = 4$$

Диаметр провода с изоляцией, мм:

$$d_{п2} = d_2 + \delta_2 = 4,5 + 0,4 = 4,9$$

Полное сечение витка, мм²:

$$\Pi_2 = n_{пр2} \cdot \Pi_{пр2} = 4 \cdot 15,9 = 63,6$$

Уточняем плотность тока, А/мм²:

$$J_2 = \frac{I_{\Phi 2}}{\Pi_2} = \frac{103,9}{63,6} = 1,63$$

Число витков в слое:

$$l_{21} = l_{11} = 1457$$
$$w_{сл2} = \frac{l_{21}}{n_{пр2} \cdot d_{п2}} - 1 = \frac{1457}{4 \cdot 4,9} - 1 = 73,34$$

Расчитанное число витков округляем до ближайшего большего целого числа:

$$w_{сл2} = 74$$

Число слоев в обмотке:

— —

Рассчитанное число слоев округляем до ближайшего большего целого числа:

Рабочее напряжение двух слоев, В:

По таблице 2.3 выбираем число слоев и общую толщину кабельной бумаги в изоляции между двумя слоями обмотки, мм:

Минимальная ширина масляного канала между катушками a'_{22} выбирается по таблице 2.4, причём число слоев внутренней катушки при этом должно составлять не более $1/3-2/5$ общего числа слоев обмотки, мм:

Радиальный размер обмотки, мм:

В трансформаторах мощностью $S < 10000$ кВ*А радиальные размеры обмоток a_1 и a_2 мало отличаются друг от друга.

Внутренний диаметр обмотки, мм:

Наружный диаметр обмотки с экраном, мм:

Средний диаметр обмотки, мм:

————— —————

6.3 Расчёт параметров короткого замыкания трансформатора с многослойной цилиндрической обмоткой ВН из круглого провода

1. Определение потерь короткого замыкания

1.1. Масса металла обмотки низшего напряжения (НН), кг: удельная плотность, кг/м³ меди $\gamma=8900$, алюминия $\gamma=2700$

$$G_1 = 3 \cdot \pi \cdot D_{cp1} \cdot W_1 \cdot \Pi_1 \cdot 10^{-9} \\ = 3 \cdot 3,1415 \cdot 449,4 \cdot 107,4 \cdot 404,3 \cdot 2700 \cdot 10^{-9} = 494,7$$

1.2. Масса металла обмотки высшего напряжения (ВН), кг:

$$G_2 = 3 \cdot \pi \cdot D_{cp2} \cdot w_2 \cdot \Pi_2 \cdot \gamma \cdot 10^{-9} \\ = 3 \cdot 3,1416 \cdot 632,3 \cdot 722 \cdot 63,6 \cdot 2700 \cdot 10^{-9} = 738,8$$

1.3. Электрические потери в обмотке низшего напряжения (НН), Вт:

удельное электрическое сопротивление ρ при $t = 75$ °С, мкОм*м
меди $\rho=0,02135$ алюминия $\rho=0,0344$

Принимаем $\rho=0,0344$

$$P_{очн1} = \rho \cdot \frac{G_1}{\gamma} \cdot J_1^2 \cdot 10^6 = 0,0344 \cdot \frac{494,7}{2700} \cdot 1,65^2 \cdot 10^6 = 17136$$

1.4. Электрические потери в обмотке высшего напряжения (ВН), Вт:

$$P_{очн2} = \frac{\rho}{\gamma} \cdot J_2^2 \cdot G_2 \cdot 10^6 = 0,0344 \cdot \frac{738,8}{2700} \cdot 1,63^2 \cdot 10^6 = 25132$$

1.5. Коэффициент $k_{д1}$, учитывающий добавочные потери в обмотке НН:

$$k_{д1} = 1,05$$

1.6. Коэффициент $k_{д2}$, учитывающий добавочные потери в обмотке ВН:

$$k_{д2} = 1,05$$

1.7. Масса металла проводов отводов обмотки НН, кг:

Расчет основных потерь в отводах сводится к определению длины проводников и массы металла в отводах. Принимая сечение отвода равным сечению витка обмотки, общую длину проводов, в метрах, можно определять по формулам:

- общая длина отводов обмотки ВН для соединения в треугольник, м:

$$L_{\text{отв1}} = 14 \cdot l_1 \cdot 10^{-3} = 14 \cdot 1373 \cdot 10^{-3} = 19,22$$

- сечение отвода, м²:

$$\Pi_{\text{отв1}} = \Pi_1 \cdot 10^{-6} = 404,3 \cdot 10^{-6} = 4,043 \times 10^{-4}$$

- масса металла проводов отводов обмотки НН, кг:

$$G_{\text{отв1}} = L_{\text{отв1}} \cdot \Pi_{\text{отв1}} \cdot \gamma = 19,22 \cdot 4,043 \cdot 10^{-4} \cdot 2700 = 21$$

1.8. Электрические потери в отводах обмотки НН, Вт:

$$P_{\text{отв1}} = \left(\frac{\rho}{\gamma}\right) \cdot 10^6 \cdot J_1^2 \cdot G_{\text{отв1}} = 0,034 \cdot \frac{21}{2700} \cdot 1,65^2 \cdot 10^6 = 699$$

1.9. Масса металла проводов отводов обмотки ВН, кг:

- общая длина отводов обмотки ВН для соединения в звезду

$$L_{\text{отв2}} = 7,5 \cdot l_1 \cdot 10^{-3} = 7,5 \cdot 1373 \cdot 10^{-3} = 10,3$$

- сечение отвода:

$$P_{\text{отв2}} = \Pi_2 \cdot 10^{-6} = 63,6 \cdot 10^{-6} = 6,36 \cdot 10^{-5}$$

- масса металла проводов отвода обмотки ВН, кг:

$$G_{\text{отв2}} = L_{\text{отв2}} \cdot P_{\text{отв2}} \cdot \gamma = 10,3 \cdot 6,36 \cdot 10^{-5} \cdot 2700 = 1,8$$

1.10. Электрические потери в отводах обмотки ВН, Вт:

$$P_{\text{отв2}} = \frac{\rho}{\gamma} \cdot 10^6 \cdot J_2^2 \cdot G_{\text{отв2}} = 0,0344 \cdot \frac{1,8}{2700} \cdot 1,63^2 \cdot 10^6 = 61$$

1.11. Потери в стенках бака и других элементах конструкции, Вт:

На этапе расчета обмоток, когда размеры бака еще неизвестны, для трансформаторов мощностью от 100 до 63000 кВА можно с достаточным приближением определить потери в баке и деталях конструкции по формуле:

$$P_6 = 10k_6S$$

Коэффициент k_6 определяется по таблице 4.1.

Принимаем $k_6 = 0,042$:

$$P_6 = 10 \cdot k_6 \cdot S = 10 \cdot 0,042 \cdot 6300 = 2646$$

1.12. Полные потери короткого замыкания, Вт:

$$\begin{aligned} P_{\text{кп}} &= P_{\text{осн1}} \cdot k_{д1} + P_{\text{осн2}} \cdot k_{д2} + P_{\text{отв1}} + P_{\text{отв2}} + P_6 \\ &= 17136 \cdot 1,05 + 25132 \cdot 1,05 + 699 + 61 + 2646 = 47816 \end{aligned}$$

Расчет потерь короткого замыкания

Дано: $P_k = 46500$

Отклонение расчётных потерь короткого замыкания от гарантированного значения не должно превышать 10%:

$$\left| \frac{P_{\text{кп}}}{P_k} - 1 \right| = \left| \frac{47816}{46500} - 1 \right| = 2,83\%$$

Если это условие не выполняется, то необходимо уменьшить плотность тока в обмотках. При малых отклонениях рекомендуется пересчитать только одну обмотку на меньшую плотность тока, как правило, высоковольтную.

2. Расчет напряжения короткого замыкания

2.1. Активная составляющая напряжения короткого замыкания, %:

$$U_a = \frac{P_{\text{кп}}}{10 \cdot S} = \frac{47816}{10 \cdot 6300} = 0,76$$

2.2. Уточненное значение коэффициента β :

$$\beta = \frac{\pi \cdot d_{12}}{l_1} = \frac{3,1416 \cdot 516}{1373} = 1,18$$

2.3. Уточненная ширина приведенного канала рассеяния, мм.

$$a_p = \frac{d_{12} \cdot a_{12} + D_{\text{сп1}} \cdot \frac{a_1}{3} + D_{\text{сп2}} \cdot \frac{a_2}{3}}{d_{12}} = \frac{516 \cdot 27 + 449 \cdot \frac{64}{3} + 632 \cdot \frac{64}{3}}{516} = 72$$

2.4. Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %:

$$U_p = \frac{7,9 \cdot f \cdot S' \cdot \beta \cdot a_p \cdot 10^{-4} \cdot k_p}{u_B^2} =$$
$$= \frac{7,9 \cdot 50 \cdot 2100 \cdot 1,18 \cdot 72 \cdot 10^{-4} \cdot 0,95}{29,4^2} = 7,75$$

2.5. Напряжение короткого замыкания U_k , %:

$$U_k = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = \sqrt{0,76^2 + 7,75^2} = 7,79$$

Отклонение расчётного напряжения короткого замыкания от гарантийного, %:

$$\left(\frac{U_k}{u_k} - 1 \right) = \left(\frac{7,77}{7,5} - 1 \right) = 3,6\%$$

При расчёте не следует допускать отклонения расчётного значения напряжения короткого замыкания от гарантийного более чем на +10% или -10%. В противном случае необходимо изменить u_k в нужном направлении за счёт изменения реактивной составляющей. Значительное изменение u_p достигается изменением напряжения одного витка u_B за счёт увеличения или уменьшения диаметра стержня магнитной системы d_H или индукции B_c в нем.

3. Расчёт механических сил в обмотках

3.1. Установившийся ток короткого замыкания обмотки ВН, А:

$$I_{кз} = I_{\phi 2} \cdot \frac{100}{U_k} = 103,9 \cdot \frac{100}{7,77} = 1337$$

3.2. Мгновенное максимальное значение тока короткого замыкания обмотки ВН, А:

$$k_{max} = 1 + e^{\frac{-\pi \cdot U_a}{U_p}} = 1 + e^{\frac{-3,1416 \cdot 0,76}{7,75}} = 1,73$$

$$i_{kmax} = \sqrt{2} \cdot k_{max} \cdot I_{кз} = \sqrt{2} \cdot 1,73 \cdot 1337 = 3280$$

3.3. Коэффициент приведения поля рассеяния:

$$k_{пр} = 1 - \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi \cdot l_1} = 1 - \frac{27 + 64 + 64}{3,1416 \cdot 1373} = 0,96$$

3.4. Радиальная сила, действующая на обмотку ВН, Н:

$$F_p = 0,628 \cdot (i_{kmax} \cdot w_{H2})^2 \cdot \beta \cdot k_{пр} \cdot 10^{-6}$$

$$= 0,628 \cdot (3280 \cdot 687)^2 \cdot 1,18 \cdot 0,96 \cdot 10^{-6} = 3630000$$

3.5. Растягивающее в проводе обмотки ВН и сжимающее в проводе обмотки НН напряжение, МПа:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{2 \cdot \pi \cdot w_{H2} \cdot \Pi_2} = \frac{3630000}{2 \cdot 3,1416 \cdot 687 \cdot 63,6} = 13,2$$

$$\sigma_{сж} = \frac{F_p}{2 \cdot \pi \cdot w_1 \cdot \Pi_1} = \frac{3630000}{2 \cdot 3,1416 \cdot 107 \cdot 404,3} = 13,4$$

Проверяем условие: $\sigma_{сж} = 13,4 < 30$ МПа для меди

$\sigma_{сж} = 13,4 < 15$ МПа для алюминия

3.6. Осевые силы, обусловленные конечным соотношением высоты и ширины обмоток, $F_{ос}$, Н:

$$F_{ос} = F_p \cdot \frac{a_p}{2 \cdot l_1} = 3630000 \cdot \frac{72}{2 \cdot 1373} = 9,518 \times 10^4$$

3.7. Максимальные сжимающие силы в обмотке, Н:

$$F_{сж2} = F_{ос} = 95180$$

$$F_{сж1} = F_{сж2}$$

3.8. Напряжение сжатия на опорных поверхностях, МПа:

число прокладок по окружности обмотки:

$$n_o = 12$$

ширина прокладки, мм:

$$b_{пр} = 50$$

$$\sigma_{сжат} = \frac{F_{сж1}}{n_o \cdot a_1 \cdot b_{пр}} = \frac{95180}{12 \cdot 64 \cdot 50} = 2,5$$

Проверяем условие: $\sigma_{сжат} = 2,5 < 20$ МПа

3.9. Температура обмоток через $t_k = 4$ с после возникновения короткого замыкания, °С:

$$t_k = 4$$

для меди $k_t = 12,5$, для алюминия $k_t = 5,5$:

$$k_t = 5,5$$

$$\theta_k = \frac{670 \cdot t_k}{k_t \cdot \left(\frac{u_k}{J_2}\right)^2 - t_k} + 90 = \frac{670 \cdot 4}{5,5 \cdot \left(\frac{7,5}{1,63}\right)^2 - 4} + 90 = 113,8$$

Температура обмоток не должна превышать 250 °С для меди и 200 °С для алюминия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование влияния индукции на параметры трансформатора потребовалось в то время, когда горячекатаная сталь в магнитных системах силовых трансформаторов в широких масштабах заменялась холоднокатаной и возникла проблема рационального выбора индукции B_c для новых марок стали. Выбор индукции в стержне магнитной системы оказывает существенное влияние на размеры трансформатора и массы его активных материалов. С увеличением индукции диаметр стержня уменьшается при сохранении неизменного значения реактивной составляющей напряжения короткого замыкания u_r . Уменьшение размеров магнитной системы ведет к соответствующему уменьшению массы стали. Напряжение одного витка с изменением B_c остается неизменным. Вследствие этого число витков обмотки при заданном ее напряжении с увеличением индукции остается неизменным, а масса металла обмотки вследствие уменьшения диаметра ее витков уменьшается.

В целях получения наименьшей массы стали магнитной системы и металла обмоток индукцию в стержне B_c стремятся обычно выбирать возможно большей, считаясь, однако, с тем, что увеличение индукции ведет также к увеличению потерь и особенно тока холостого хода. При необходимости снизить потери холостого хода при неизменной индукции целесообразно уменьшать общую массу стали путем уменьшения β в расчете диаметра стержня магнитной системы.

Масса металла обмоток также изменяется с изменением расчетного значения индукции. Это происходит за счет изменения среднего диаметра витка и его сечения при постоянном числе витков. Так, с увеличением индукции уменьшается диаметр витка и масса обмоток, а уменьшение среднего диаметра витка позволяет при заданных потерях P_k увеличить плотность тока и дополнительно уменьшить массу металла обмоток.

Несмотря на более высокую цену и стоимость холоднокатаной стали, осуществленная в свое время замена горячекатаной стали на холоднокатаную с по-

вышением расчетной индукции была оправдана прежде всего тем, что позволила существенно уменьшить расход стали и обмоточного провода, улучшить массогабаритные показатели трансформатора, уменьшить потери и ток холостого хода и, следовательно, издержки в эксплуатации трансформатора.

Экономический расчет показывает, что эта замена, несмотря на увеличение стоимости стали, привела к уменьшению стоимости трансформации энергии, т.е. к уменьшению приведенных затрат на изготовление, установку и эксплуатацию трансформаторов. В пособии П.М. Тихомирова имеются соотношения и графики, позволяющие для любого трансформатора с достаточной точностью оценить, как изменяются масса и стоимость стали магнитной системы и металла обмоток, потери холостого хода и короткого замыкания, ток холостого хода при изменении магнитной индукции.

Расчет отдельного трансформатора обычно проводится на базе существующей серии трансформаторов с определенными конструкциями магнитных систем и обмоток, общей для всей серии конструкции изоляции, установленными изоляционными расстояниями, известными марками активных и изоляционных материалов и общей технологией производства. В этом случае параметры короткого замыкания P_k и u_k , входящие в ряд параметров всей серии, коэффициент заполнения площади круга активным сечением стержня k_c , определяемый выбранной маркой стали и принятой технологией изготовления магнитной системы, и изоляционные расстояния главной изоляции обмоток, зависящие от конструкции главной изоляции и применяемых изоляционных материалов, по существу являются заданными для расчетчика. Изменение потерь короткого замыкания трансформатора может быть произведено изменением плотности тока в обмотках и соответствующим изменением массы металла обмоток. Можно считать, что плотность тока пропорциональна P_k .

Коэффициент заполнения сталью k_c входит в число исходных данных, выбираемых до расчета трансформатора. С ростом k_c уменьшается масса стали и масса металла обмоток, а вместе с ними стоимость активных материалов, потери и ток холостого хода при сохранении неизменных значений P_k и u_k .

Коэффициент заполнения сечения стержня k_3 зависит от толщины, выбранной марки стали (0,35; 0,30 или 0,27 мм) и вида изоляции пластин. Современная холоднокатаная сталь с нагревостойким электроизоляционным покрытием ЭТ имеет коэффициент заполнения для этих толщин соответственно $k_3 = 0,97 - 0,94$ и без покрытия не более 0,97. Коэффициент заполнения круга $k_{кр}$ зависит от числа и размеров ступеней (пакетов) в сечении стержня. Увеличение числа ступеней с уменьшением толщины пакетов позволяет увеличить $k_{кр}$, однако усложнит технологию изготовления магнитной системы.

Основные изоляционные расстояния главной изоляции обмоток – ширина канала между обмотками ВН и НН a_{12} , расстояние от обмотки ВН до ярма l_0 и расстояние между обмотками ВН соседних фаз a_{22} – в явном виде входят в формулы, определяющие массу стали магнитной системы, а расстояние a_{12} в скрытом виде входит в выражение, служащее для расчета магнитной системы и обмоток. Влияние размеров изоляционных расстояний на массу активной части сказывается в большей степени в трансформаторах с более высоким номинальным напряжением обмоток ВН, а в трансформаторах с одинаковыми номинальными напряжениями – при относительно меньших мощностях.

В практике трансформаторостроения типом трансформатора принято называть образец конструкции трансформатора, характеризуемой совокупностью определенных признаков: назначением, числом фаз, частотой, мощностью, классом напряжения, числом обмоток, металлом провода обмоток, видом регулирования напряжения и видом охлаждения. При этом определении типа серий трансформаторов называется ряд типов трансформаторов определенного назначения и конструкции, с одинаковым числом фаз, одной частоты, одного класса напряжения, с одним числом обмоток и одним металлом провода обмоток, с одним видом регулирования напряжения и одним видом охлаждения, различных мощностей, нарастающих по определенной шкале в ограниченном диапазоне. При проектировании новых серий всегда стремятся уменьшить изоляционные расстояния применением новых материалов с повышенной электрической прочностью.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1 – Наибольшие рабочие и испытательные напряжения, кВ

Класс напряжения, кВ	1	3	6	10	15	20	35
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	1	3,6	7,2	12	17,5	24	40,5
Испытательное напряжение, кВ	5	18	25	35	45	55	85

Таблица П.2 – Главная изоляция. Минимальные изоляционные расстояния обмоток НН

Мощность тр-ра, кВА	U _{исп} для НН, кВ	НН от ярма l ₀₁ , мм		НН от стержня, мм			
				δ ₀₁	a _{ц1}	a ₀₁	l _{ц1}
25-250	5	15		Картон 2×0,5	-	4	-
400-630*	5*	Принимается равным найденному по испытательному напряжению обмотки ВН		То же	-	5	-
1000-2500	5			4	6	15	18
630-1600	18; 25 и 35			4	6	15	25
2500-6300	18; 25 и 35			4	8	17,5	25
630 и выше	45			5	10	20	30
630 и выше	55			5	13	23	45
все мощности	85			6	19	30	70

* Для винтовой обмотки с испытательным напряжением U_{исп} = 5 кВ размеры взять из следующей строки для мощностей 1000-2500 кВА.

Таблица П.3 – Главная изоляция. Минимальные изоляционные расстояния обмотки ВН с учетом конструктивных требований

Мощность тр-ра S, кВА	U _{исп} для ВН кВА	ВН от ярма, мм		Между ВН и НН, мм		Выступ цилиндра l _{ц2} , мм	Между ВН и ВН, мм	
		l ₀₂	δ _ш	a ₁₂	δ ₁₂		a ₂₂	δ ₂₂
25-100	18;25 и 35	20	-	9	2,5	10	8	-
160-630	18;25 и 35	30	-	9	3	15	10	-
1000-6300	18;25 и 35	50	-	20	4	20	18	-
630 и выше	45	50	2	20	4	20	18	2
630 и выше	55	50	2	20	5	30	20	3
160-630	85(прим1)	75	2	27	5	50	20	3
1000-6300	85(прим1)	75	2	27	5	50	30	3

10000 и выше	85	80	3	30	6	50	30	3
--------------	----	----	---	----	---	----	----	---

Примечания:

1. Для цилиндрических обмоток минимальное допустимое изоляционное расстояние $a_{12} = 27$ мм. Электростатический экран с изоляцией 3 мм.

2. При наличии прессующих колец расстояние от верхнего ярма l_{01} принимать увеличенным против данных таблицы 2.2 для трансформаторов 1000 – 6300 кВА, на 45 мм.

Таблица П.4 – Значения коэффициента k в формуле для масляных трехфазных двухобмоточных трансформаторов ПБВ с медными обмотками и потерями короткого замыкания по ГОСТ

Мощность трансформатора, кВА	Класс напряжения, кВ	
	10	35
До 250	0,63	0,65-0,58
400-630	0,53	0,58-0,52
1000-6300	0,51-0,43	0,52-0,48

Таблица П.5 – Рекомендуемая индукция в стержнях масляных трансформаторов В, Тл

Марка стали	Мощность трансформатора S, кВА		
	До 16	25-100	160 и более
3411, 3412, 3413	1,45-1,50	1,50-1,55	1,55-1,60
3404, 3405, 3406, 3407, 3408	1,50-1,55	1,55-1,60	1,55-1,65

Таблица П.6 – Число ступеней в сечении стержня трехфазных масляных трансформаторов

Показатель		Прессовка стержня расклиниванием с обмоткой, сечение стержня без каналов								
Мощность трансформатора S, кВА		До 16			16	25	40-100	160-630		
Ориентировочный диаметр стержня d, м		До 0,08			0,08	0,09	0,1-0,14	0,16-0,18	0,20	0,22
Без прессующей пластины	число ступеней	1	2	3	4	5	6	6	7	8
	коэффициент $k_{кр}$	0,636	0,786	0,851	0,861	0,890	0,91-0,92	0,913	0,918	0,928
С прессующей пластиной	число ступеней	–	–	–	–	–	–	–	6	7
	коэффициент $k_{кр}$	–	–	–	–	–	–	–	0,884	0,901
Показатель		Прессовка стержня бандажами, сечение стержня диаметром от 0,36 и выше имеет продольные каналы								
Мощность трансформатора S, кВА		1000-1600		2500-6300		10000	16000	25000	32000	80000
Ориентировочный диаметр стержня d, м		0,24-0,26	0,28-0,30	0,32-0,34	0,36-0,38	0,40-0,42	0,45-0,50	0,53-0,56	0,60-0,67	0,71-0,75
Без прессующей пластины	число ступеней	8	8	9	9	11	14	15	16	16
	коэффициент $k_{кр}$	0,925	0,928	0,929	0,913	0,922	0,927	0,927	0,929	0,931
С прессующей пластиной	число ступеней	7	7	8	8	10	13	14	15	15
	коэффициент $k_{кр}$	0,900	0,9-0,91	0,912	0,89-0,90	0,907	0,912	0,914	0,918	0,920

Таблица П.7 – Ориентировочные значения $a_s = d_{12}/d$

Мощность трансформатора, кВ*А	Уровень потерь короткого замыкания	Значение a_s при классе напряжения обмотки ВН, кВ			
		10	35	10	35
		медь		алюминий	
До 630	1,2 P_k	1,33	1,37	1,41	1,45
	P_k	1,36	1,4	1,44	1,48
	0,8 P_k	1,4	1,44	1,48	1,53
От 1000 до 6300	1,2 P_k	1,35	1,37	1,43	1,45
	P_k	1,38	1,4	1,46	1,48
	0,8 P_k	1,42	1,44	1,51	1,53

Таблица П.8 – Ориентировочные значения $b = 2a_2/d_c$ для масляных трансформаторов

Мощность трансформатора, кВ*А	Класс напряжения, кВ			
	10	35	10	35
	медь		алюминий	
До 100	0,55	-	0,69	
100 - 630	0,46 - 0,40	-	0,58 - 0,5	
1000 - 6300	0,26 - 0,24	0,32 - 0,28	0,33 - 0,3	0,4 - 0,35

Таблица П.9 – Размеры пакетов– ширина пластин **a** и толщина пакетов **b**, мм, для магнитных систем без прессующей пластины с прессовкой стержня обмоткой без бандажей (**n_c** и **n_я** – число ступеней в сечении стержня и ярма; **a_я** – ширина крайнего наружного пакета ярма; **k_{кр}** – коэффициент заполнения круга для стержня)

Диаметр стержня d, м	n _c	k _{кр}	n _я	a _я , мм	Размер пакетов a × b в стержне, мм					
0,08	4	0,863	3	55	75×14	60×9	55×6	40×5	-	-
0,085	5	0,895	4	50	80×14	70×10	60×6	50×4	40×4	-
0,09	5	0,891	4	55	85×15	75×10	65×6	55×4	40×5	-
0,095	5	0,887	4	50	90×15	80×10	65×9	50×5	40×4	-
0,1	6	0,917	5	55	95×16	85×10	75×7	65×5	55×4	40×4
0,105	6	0,912	5	50	100×16	90×11	80×7	65×7	50×4	40×4
0,110	6	0,905	5	65	105×16	95×11	85×7	75×6	65×4	40×7
0,115	5	0,903	4	65	105×25	95×9	85×6	65×9	40×3	-
0,12	6	0,928	5	60	115×18	105×11	90×10	75×8	60×6	40×4
0,125	6	0,915	5	65	120×18	105×16	95×6	85×6	65×7	40×6
0,13	6	0,918	5	65	125×18	110×16	110×8	80×9	65×5	40×6
0,14	6	0,919	5	65	135×19	120×17	105×10	85×9	65×7	40×5
0,15	6	0,915	5	85	145×19	135×13	120×13	105×9	85×8	55×7
0,16	6	0,913	5	85	155×20	135×23	120×10	105×7	85×7	55×7
0,17	6	0,927	5	85	160×28	145×17	130×10	110×10	85×8	50×8
0,18	6	0,915	5	95	175×21	155×25	135×13	120×8	95×9	65×8

Таблица П.10 – Размеры пакетов – ширина пластин a и толщина пакетов b , мм, для магнитных систем без прессующей пластины с прессовкой стержней бандажами (n_c и n_y – число ступеней в сечении стержня и ярма; a_y – ширина крайнего наружного пакета ярма; $k_{кр}$ – коэффициент заполнения круга для стержня)

Диаметр стержня d , мм	Стержень				Ярмо		Размеры пакетов $a \times b$ в стержне, мм							
	Без прессующей пластины		С прессующей пластиной		n_y	a_y , мм								
	n_c	$k_{кр}$	n_c	$k_{кр}$			1	2	3	4	5	6	7	8
0,19	7	0,927	6	0,890	5	100	180×30	165×17	145×14	130×8	115×7	100×5	75×7	-
0,20	7	0,918	6	0,885	5	120	195×22	175×26	155×15	135×11	120×6	105×5	75×7	-
0,21	7	0,922	6	0,890	5	130	200×32	180×22	160×14	145×8	130×6	110×8	90×6	-
0,22	8	0,929	7	0,901	6	130	215×23	195×28	175×15	155×12	135×9	120×5	105×4	75×7
0,23	8	0,933	7	0,907	6	135	220×34	205×19	185×16	165×12	145×9	130×5	115×5	90×6
0,24	8	0,927	7	0,902	6	140	230×34	215×19	195×17	175×12	155×9	135×8	120×5	95×6
0,25	8	0,929	7	0,909	6	155	240×35	220×24	200×16	180×12	155×11	140×6	120×6	100×5
0,26	8	0,924	7	0,900	6	155	250×35	230×25	215×13	195×13	175×10	155×8	120×9	105×6
0,27	8	0,930	7	0,901	6	155	260×36	240×25	215×20	195×13	170×11	155×5	135×7	105×8
0,28	8	0,927	7	0,903	6	175	270×37	250×26	230×17	215×9	195×11	175×9	135×13	105×7
0,29	8	0,927	7	0,899	6	165	280×37	260×27	235×21	210×15	180×13	165×6	145×6	115×8
0,30	8	0,930	7	0,912	6	175	295×28	270×37	250×18	230×13	215×8	175×18	135×12	105×6

Примечания.

1. В магнитной системе с прессующей пластиной исключить последний – седьмой или восьмой – пакет стержня.
2. Крайний наружный пакет ярма имеет ширину a и толщину, равную суммарной толщине трех крайних пакетов (5-7 или 6-8) при отсутствии прессующей пластины, или двух крайних пакетов (5-6 или 6-7) при ее наличии.

Таблица П.11 – Размеры пакетов стержня – ширина пластин a и толщина пакетов b , мм, для магнитных систем без прессующей пластины и с прессующей пластиной с прессовкой стержней бандажами из стеклоленты (n_c и $n_я$ – число ступеней в сечении стержня и ярма; $a_я$ – ширина крайнего наружного пакета ярма; $k_{кр}$ – коэффициент заполнения круга для стержня)

Диаметр стержня d , мм	Стержень				$n_я$	$a_я$, мм	Толщина пакетов стержня b , мм, при ширине пластин a , мм															
	без прессующей пластины		с прессующей пластиной				310	300	295	280	270	260	250	245	230	215	210	195	190	160	155	132
	n_c	$k_{кр}$	n_c	$k_{кр}$																		
0,31	9	0,930	8	0,905	7	190	-	39	-	28	-	18	-	10	9	-	10	-	9	10	-	7
0,32	9	0,928	8	0,911	7	195	40	-	22	-	24	-	14	-	11	7	-	8	-	-	12	5
							При ширине пластин a , мм															
							325	320	310	295	275	270	265	250	245	230	225	205	195	165	155	135
0,33	9	0,932	8	0,900	7	205	-	40	-	34	17	-	9	-	11	-	10	9	-	11	-	10
0,34	9	0,931	8	0,913	7	195	50	-	19	15	-	19	-	12	-	10	-	-	14	-	11	6
							При ширине пластин a , мм															
							350	340	325	315	295	280	270	260	250	235	230	215	195	180	155	135
0,35	9	0,938	8	0,903	7	215	-	41	-	35	18	11	-	12	-	13	-	9	-	11	-	12
0,36	9	0,913	8	0,894	7	195	42(3)	-	35	-	26	-	16	-	10	-	9	-	13	-	9	7
							При ширине пластин a , мм															
							368	360	350	335	325	310	295	275	250	230	215	200	170	155	135	-
0,37	10	0,920	9	0,902	8	200	-	37(3)	-	38	-	23	11	12	12	9	-	10	10	-	7	-
0,38	10	0,913	9	0,899	8	215	47(3)	-	27	-	24	12	10	-	23	-	13	-	-	15	6	-
							При ширине пластин a , мм															
							380	355	325	310	290	265	240	210	180	140	-	-	-	-	-	-
0,39	10	0,925	9	0,904	8	210	41(3)	37	27	10	12	13	11	10	9	9						

Примечание.

1. В магнитной системе с прессующей пластиной исключить последний пакет стержня с наименьшей шириной пластины a .

2. Крайний наружный пакет ярма имеет ширину a_n и толщину, равную суммарной толщине трех (диаметры 0,31-0,39 мм) крайних пакетов стержня при отсутствии прессующей пластины. При ее наличии число объединенных пакетов ярма уменьшается на единицу. В скобках указана ширина охлаждающего канала, мм.

Таблица П.12 – Площади сечения ступенчатой фигуры стержня $\Pi_{\text{фс}}$ и ярма $\Pi_{\text{фя}}$ и объём угла V_y плоской шихтованной магнитной системы без прессующей пластины

d, м	$\Pi_{\text{фс}}, \text{см}^2$	$\Pi_{\text{фя}}, \text{см}^2$	$V_y, \text{см}^3$
0,080	43,3	44,8	280,8
0,085	50,8	51,6	356,4
0,090	56,7	58,2	426,4
0,095	62,9	63,7	488,0
0,100	72,0	73,2	596,8
0,105	79,3	80,1	683,0
0,110	86,2	89,7	790,2
0,115	93,9	95,4	812,8
0,120	104,9	106,5	1050
0,125	112,3	115,3	1194
0,13	121,9	124,9	1299
0,14	141,5	144,0	1620
0,15	161,7	165,9	2040
0,16	183,5	188,3	2470
0,17	208,5	214,1	2908
0,18	232,8	237,6	3452
0,19	262,8	267,3	4118
0,20	288,4	296,2	4811
0,21	319,2	327,2	5680
0,22	353,0	360,5	6460
0,23	387,7	394,0	7482
0,24	419,3	425,6	8428
0,25	456,2	462,6	9532
0,26	490,6	507,1	10746
0,27	532,6	543,4	12018
0,28	570,9	591,1	13738
0,29	612,4	622,8	14858
0,30	657,2	675,2	16556
0,31	702,0	715,8	18672
0,32	746,2	762,4	20144
0,33	797,1	820,2	22382
0,34	844,8	860,8	23732
0,35	903,6	927,6	26814
0,36	929,2	948,8	27944
0,37	988,8	1003,8	30606
0,38	1035,8	1063,4	33074
0,39	1105,2	1123,6	35966
0,40	1155,6	1167,6	39550

Таблица П.13 – Удельные потери p и p_3 и полная удельная намагничивающая мощность q и q_3 в стали и зоне шихтованного стыка для стали 3404 толщиной 35 мм

В, Тл	p , Вт/кг	p_3 , Вт/м ²	q , ВА/кг	q_3 , ВА/м ²
0,20	0,028	25	0,040	40
0,40	0,093	50	0,120	80
0,60	0,190	100	0,234	140
0,80	0,320	170	0,375	280
1,00	0,475	265	0,548	1000
1,20	0,675	375	0,752	4000
1,22	0,697	387	0,782	4680
1,24	0,719	399	0,811	5360
1,26	0,741	411	0,841	6040
1,28	0,763	423	0,870	6720
1,30	0,785	435	0,900	7400
1,32	0,814	448	0,932	8200
1,34	0,843	461	0,964	9000
1,36	0,872	474	0,996	9800
1,38	0,901	497	1,028	10600
1,40	0,930	500	1,060	11400
1,42	0,964	514	1,114	12440
1,44	0,998	526	1,168	13480
1,46	1,032	542	1,222	14520
1,48	1,066	556	1,276	15560
1,50	1,100	570	1,330	16600
1,52	1,134	585	1,408	17960
1,54	1,168	600	1,486	19320
1,56	1,207	615	1,575	20700
1,58	1,251	630	1,675	22100
1,60	1,295	645	1,775	23500
1,62	1,353	661	1,958	25100
1,64	1,411	677	2,131	26700
1,66	1,472	695	2,556	28600
1,68	1,536	709	3,028	30800
1,70	1,600	725	3,400	33000
1,72	1,672	741	4,480	35400
1,74	1,744	757	5,560	37800
1,76	1,824	773	7,180	40800
1,78	1,912	789	9,340	44400
1,80	2,000	805	11,500	48000
1,82	2,090	822	20,240	52000
1,84	2,180	839	28,980	56000
1,86	2,270	856	37,720	60000
1,88	2,360	873	46,460	64000
1,90	2,450	890	55,200	68000
1,95	2,700	930	89,600	80000

Таблица П.14 – Значения k_d для трехфазных трансформаторов

Мощность трансформатора, кВА	До 100	160-630	1000-6300
K_d	0,97	0,96 - 0,93	0,93 - 0,85

Таблица П.15 – Средняя плотность тока в обмотках J , А/мм²

Мощность трансформатора, кВА	25-40	63-630	1000-6300	10000-16000	25000-80000
Медь	1,8-2,2	2,2-3,5	2,2-3,5	2,0-3,5	2,0-3,5
Алюминий	1,1-1,8	1,2-2,5	1,5-2,6	1,5-2,7	—

Таблица П.16 – Рекомендуемые значения β . Масляные трансформаторы

Мощность, кВА	Алюминий			Медь		
	6 и 10 кВ	35 кВ	110 кВ	6 и 10 кВ	35 кВ	110 кВ
25-100	1,2-1,6	-	-	1,8-2,4	-	-
160-630	1,2-1,6	1,2-1,5	-	1,8-2,4	1,8-2,4	-
1000-6300	1,3-1,7	1,2-1,6	-	2,0-2,6	1,8-2,4	-
6300-16000	-	1,1-1,3	1,1-1,3	-	1,7-2,0	1,6-2,0

Таблица П.17 – Основные свойства и нормальные пределы применения различных типов обмоток масляных тр-ов

Тип обмотки	Применение на стороне		Основные достоинства	Основные недостатки	Материал обмоток	Пределы применения, включительно				Число параллельных проводов	
	главное	возможное				по мощности тр-ра S, кВ*А	по току на стержень I, А	по напряжению U, кВ	по сечению витка П, мм ²		
Цилиндрическая одно- и двухслойная из прямоугольного провода	НН	ВН	Простая технология изготовления, хорошее охлаждение	Малая механическая прочность	Cu	до 630	От 15-18 до 800	До 6	От 5,04 до 250	От 1 до 4-8	
					Al	До 630	От 10-13 до 600-650	До 6	От 6,39 до 300		
Цилиндрическая многослойная из прямоугольного провода	ВН	НН	Хорошее заполнение окна магнитной системы, простая технология изготовления	Уменьшение охлаждаемой поверхности по сравнению с обмотками, имеющими радиальные каналы	Cu	От 630 до 80000	От 15-18 до 1000-1200	10 и 35	От 5,04 до 400	От 1 до 4-8	
					Al	До 16000-25000	От 10-13 до 1000-1200	10 и 35	От 6,39 до 500		
Цилиндрическая многослойная из алюминиевой ленты	НН	--	Простая технология изготовления, хорошее охлаждение, хорошее заполнение окна магнитной системы	Малая механическая прочность в радиальном направлении	Al	От 160 до 1000	От 100 до 1500	До 10	От 100 до 1000	От 1 до 1	
Цилиндрическая многослойная из круглого провода	ВН	НН	Простая технология изготовления	Ухудшение теплоотдачи и уменьшение механической прочности с ростом мощности	Cu	До 630	От 0,3-0,5 до 80-100	До 35	От 1,094 до 42,44	1	2
					Al	До 630	От 2-3 до 125-135	До 35	От 1,37 до 50,24	1	1
Винтовая одно-, двух- и многоходовая из прямоугольного провода	НН	-	Высокая механическая прочность, надёжная изоляция, хорошее охлаждение	Более высокая стоимость по сравнению с цилиндрической обмоткой	Cu	От 160 и выше	От 300 и выше	До 35	От 75-100 и выше	4	12-16 и более
					Al	От 100 и выше	От 150-200 и выше	До 35	От 75-100 и выше		
Непрерывная катушечная из прямоугольного провода	ВН	НН	Высокая электрическая и механическая прочность, хорошее охлаждение	Необходимость перекладки половины катушек при намотке	Cu	От 160 и выше	От 15-18 и выше	От 3 до 110-220	От 5,04 и выше	1	3-5
					Al	от 100 и выше	от 10-13 и выше	от 3 до 110-220	от 6,39 и выше		

Таблица П.18 – Номинальные размеры и сечения медного и алюминиевого обмоточного провода марок ПБ и АПБ (размеры а и b – в мм, сечения – в мм²). Медный провод марки ПБ – все размеры таблицы, за исключением проводов с размером b 17 и 18 мм. Алюминиевый провод марки АПБ – все размеры таблицы вправо и вверх от жирной черты.

b//a	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12	2,24	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60	a/b	
3,75	5,04	-	5,79	-	6,39	-	7,14	-	8,04	-	8,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,75
4,00	5,39	5,79	6,19	6,44	6,84	7,24	7,64	8,12	8,60	8,89	9,45	10,1	10,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,00
4,25	5,74	-	6,59	-	7,29	-	8,14	-	9,16	-	10,1	-	11,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,25
4,50	6,09	6,54	6,99	7,29	7,74	8,19	8,64	9,18	9,72	10,1	10,7	11,4	12,1	13,0	13,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,50
4,75	6,44	-	7,39	-	8,19	-	9,14	-	10,3	-	11,3	-	12,8	-	14,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,75
5,00	6,79	7,29	7,79	8,14	8,64	9,14	9,64	10,2	10,8	11,3	12,0	12,7	13,5	14,5	15,2	16,2	17,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,00
5,30	7,21	-	8,27	-	9,18	-	10,2	-	11,5	-	12,7	-	14,3	-	16,2	-	18,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,30
5,60	7,63	8,19	8,75	9,16	9,72	10,3	10,8	11,5	12,2	12,7	13,5	14,3	15,1	16,3	17,1	18,2	19,3	20,1	21,5	-	-	-	-	-	-	-	5,60
6,00	8,19	-	9,39	-	10,4	-	11,6	-	13,1	-	14,5	-	16,3	-	18,4	-	20,8	-	23,1	-	-	-	-	-	-	-	6,00
6,30	8,61	9,24	9,87	10,4	11,0	11,6	12,2	13,0	13,8	14,3	15,2	16,2	17,1	18,4	19,3	20,6	21,8	22,8	24,3	25,9	27,5	-	-	-	-	-	6,30
6,70	9,17	-	10,5	-	11,7	-	13,0	-	14,7	-	16,2	-	18,2	-	20,6	-	23,2	-	25,9	-	29,3	-	-	-	-	-	6,70
7,10	9,73	10,4	11,2	11,7	12,4	13,1	13,8	14,7	15,5	16,2	17,2	18,3	19,3	20,8	21,8	23,2	24,7	25,8	27,5	29,3	31,1	32,9	34,6	-	-	-	7,10
7,50	10,3	-	11,8	-	13,1	-	14,6	-	16,4	-	18,2	-	20,5	-	23,1	-	26,1	-	29,1	-	32,9	-	36,6	-	-	-	7,50
8,00	11,0	11,8	12,6	13,2	14,0	14,8	15,6	16,6	17,6	18,3	19,5	20,7	21,9	23,5	24,7	26,3	27,9	29,1	31,1	33,1	35,1	37,1	39,2	41,5	43,9	8,00	
8,50	11,7	-	13,4	-	14,9	-	16,6	-	18,7	-	20,7	-	23,3	-	26,2	-	29,6	-	33,1	-	37,4	-	41,6	-	46,7	8,50	
9,00	12,4	13,3	14,2	14,9	15,8	16,7	17,6	18,7	19,8	20,7	22,0	23,3	24,7	26,5	27,8	29,6	31,4	32,9	35,1	37,4	39,6	41,9	44,1	46,8	49,5	9,00	
9,50	13,1	-	15,0	-	16,7	-	18,6	-	20,9	-	23,2	-	26,1	-	29,4	-	33,2	-	37,1	-	41,9	-	46,6	-	52,1	9,50	
10,00	13,8	14,8	15,8	16,6	17,6	18,6	19,6	20,8	22,0	23,1	24,5	26,0	27,5	29,5	31,0	33,0	35,0	36,6	39,1	41,6	44,1	46,6	49,1	52,1	55,1	10,00	
10,60	14,6	-	16,8	-	18,7	-	20,8	-	23,4	-	26,0	-	29,1	-	32,8	-	37,1	-	41,5	-	46,8	-	52,1	-	58,5	10,60	
11,20	15,5	16,6	17,7	18,7	19,8	20,9	22,0	23,4	24,7	28,9	27,5	29,1	30,8	33,1	34,7	37,0	39,2	41,4	43,9	46,7	49,5	52,3	55,1	58,5	61,9	11,20	
11,80	-	-	18,7	-	20,9	-	23,2	-	26,1	-	29,0	-	32,5	-	36,6	-	41,3	-	46,3	-	52,2	-	58,1	-	65,2	11,80	
12,50	-	18,5	19,8	20,9	22,1	23,4	24,6	26,1	27,6	29,0	30,7	32,6	34,5	37,0	38,8	41,3	43,8	46,0	49,1	52,3	55,4	58,5	61,6	65,4	69,1	12,50	
13,20	-	-	-	-	23,4	-	26,0	-	29,2	-	32,5	-	36,4	-	41,0	-	46,3	-	51,9	-	58,5	-	65,1	-	73,1	13,20	
14,00	-	-	-	-	24,8	26,2	27,6	29,3	31,0	32,5	34,5	36,6	38,7	41,5	43,6	46,4	49,2	52,0	55,1	58,6	62,1	65,6	69,1	73,3	77,5	14,00	
15,00	-	-	-	-	-	-	29,6	-	33,2	-	37,0	-	41,5	-	46,7	-	52,7	-	59,1	-	66,6	-	74,1	-	83,1	15,00	
16,00	-	-	-	-	-	-	31,6	33,6	35,5	37,2	39,5	41,9	44,3	47,5	49,9	53,1	56,3	59,1	63,1	67,1	71,1	75,1	79,1	83,9	88,7	16,00	
17,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47,2	-	53,2	-	59,4	-	67,1	-	75,6	-	84,4	-	94,3	17,00	
18,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	53,1	55,8	59,4	63,0	66,6	71,1	75,6	80,1	84,6	89,1	94,5	99,9	18,00	

Таблица П.19 – Номинальные размеры сечения и изоляция круглого медного и алюминиевого обмоточного провода марок ПБ и АПБ с толщиной изоляции на две стороны $2\delta = 0.30 (0.40)$ мм

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

Примечания.

1. Провод марок ПБ и АПБ всех диаметров выпускается с изоляцией на две стороны толщиной $2\delta = 0,30 (0,40)$; $0,72 (0,82)$; $0,96 (1,06)$ и $1,20 (1,35)$ мм; провод диаметром от 2,24 мм и выше также с изоляцией $1,68 (1,83)$ и $1,92 (2,07)$, а провод диаметром от 3,75 мм и выше - также с изоляцией $2,88 (3,08)$; $4,08 (4,33)$ и $5,76 (6,11)$ мм.

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

Таблица П.20 – Ориентировочные предельные радиальные размеры провода **a**, (мм) цилиндрических обмоток из провода прямоугольного сечения при добавочных потерях, не превышающих 5, 10 %

Число слоёв обмотки	Медные обмотки		Алюминиевые обмотки	
	Добавочные потери		Добавочные потери	
	5 %	10 %	5 %	10 %
1	9,00	10,60	11,80	13,20
2	6,30	7,50	8,00	10,00
3	5,30	6,30	6,70	8,00
4	4,50	5,30	5,60	6,70
5	4,00	4,75	5,00	6,00
6	3,75	4,50	4,75	5,60
7	3,35	4,00	4,50	5,00
8	3,35	3,75	4,00	4,75
9	3,15	3,55	3,75	4,50
10	3,00	3,55	3,75	4,50
11	2,80	3,15	3,55	4,00
12	2,65	3,15	3,35	3,75
13	2,50	3,00	3,00	3,75
14	2,36	3,00	3,00	3,55
15	2,36	2,80	3,00	3,55
16	2,24	2,65	2,80	3,35

Таблица П.21 – Нормальная междуслойная изоляция в многослойных цилиндрических обмотках

Суммарное рабочее напряжение двух слоёв обмотки, В	Число слоёв кабельной бумаги на толщину листов, мм	Выступ междуслойной изоляции на торцах обмотки (на одну сторону), мм
До 1000	2×0,12	10
От 1001 до 2000	3×0,12	16
От 2001 до 3000	4×0,12	16
От 3001 до 3500	5×0,12	16
От 3501 до 4000	6×0,12	22
От 4001 до 4500	7×0,12	22
От 4501 до 5000	8×0,12	22
От 5001 до 5500	9×0,12	22

Примечание. Данные таблицы приведены для трансформаторов мощностью до 630 кВА включительно. При мощности от 1000 кВА и выше междуслойную изоляцию следует принимать по таблице, но не менее 4 × 0,12 мм; выступ изоляции не менее 20 мм.

Таблица П.22 – Минимальная ширина охлаждающих каналов в обмотках.
Масляные трансформаторы

Вертикальные каналы				Горизонтальные каналы	
длина канала, мм	обмотка- обмотка, мм	обмотка- цилиндр, мм	обмотка- стержень, мм	длина кана- ла, мм	обмотка- обмотка, мм
До 300	4-5	4	4-5	До 40	4
300-500	4-6	5	5-6	40-60	5
500-1000	6-8	5-6	6-8	60-70	6
1000-1500	8-10	6-8	8-10	70-80	7

Таблица П.23 – Значения коэффициента k_6

Мощность, кВА	До 1000	1000-4000	6300 - 10000	16 000 - 25 000	40 000 - 63 000
k_6	0,015 - 0,02	0,025 - 0,04	0,04 - 0,045	0,045 - 0,053	0,06 - 0,07

Таблица П.24 – Значение коэффициента $k_{п,у}$ при $B = 0,9-1,7$ Тл

Число углов со стыками		Марка стали / ее толщина	
Косым	Прямыми	3404 / 0,35 мм	3405 / 0,35 мм
6	-	8,58	8,75
4	2	10,18	10,45

Таблица П.25 – Удельные теплопроводности λ изоляционных материалов

Материал	λ , Вт/(м*°С)
Бумага кабельная сухая	0,12
Бумага кабельная в масле	0,17
Бумага кабельная, пропитанная лаком	0,17
Электроизоляционный картон	0,17
Лакоткани электроизоляционные	0,25
Гетинакс	0,17-0,175
Текстолит	0,146-0,162
Стеклотекстолит	0,178-0,182
Лак бакелитовый и другие лаки	0,3
Масло при отсутствии конвекции	0,1

Таблица П.26 – Минимально допустимые изоляционные расстояния от отвода до заземленных частей

Испытательное напряжение отвода, кВ	Толщина изоляции на одну сторону, мм	Диаметр стержня, мм	Расстояния от гладкой стенки бака до отводов ВН и НН и отвода ВН до обмотки ВН, мм			Расстояние от заземленной части острой формы, мм		
			$S_{и}$	$S_{к}$	S_1, S_3, S_2	$S_{и}$	$S_{к}$	S
До 25	0	< 6	15	10	25	15	5	20
	0	> 6	12	10	22	12	5	17
	2	-	10	10	20	10	5	15
35	0	< 6	23	10	33	20	5	25
	0	> 6	18	10	28	17	5	22
	2	-	10	10	20	12	5	17
45	0	< 6	32	10	42	28	5	33
	0	> 6	27	10	37	25	5	30
	2	-	15	10	25	18	5	23
55	0	< 6	40	10	50	33	5	38
	0	> 6	35	10	45	32	5	37
	2	-	22	10	32	25	5	30
85	2	-	40	10	50	45	5	50
	4	-	30	10	40	37	5	42
	6	-	25	10	35	35	5	40

Таблица П.27 – Минимально допустимые изоляционные расстояния от отвода до обмотки

Испытательное напряжение, кВ		Толщина изоляции на одну сторону, мм	Изоляционное расстояние отвода, $S_{и}$, мм	Суммарный допуск $S_{к}$, мм	Минимальное расстояние от отвода НН до обмотки ВН (внешней), S_4 , мм
Обмотки	отвода		До основных катушек		До основных катушек
До 25	До 25	Нет	15	10	25
		2	10	10	20
35	До 35	Нет	23	10	33
		2	10	10	20
55	До 35	Нет	40	10	50
		2	20	10	30
85	До 35	Нет	80	10	90
		2	40	10	50

Таблица П.28 – Минимальные расстояния от ярма до крышки бака H_{yc}

Класс напряжения обмотки ВН, кВ	Минимальное расстояние, мм	Примечание
6, 10	160	-
20	300	-
35	400	При переключателе ответвлений, расположенном горизонтально между ярмом и крышкой бака

Таблица П.29 – Основные данные трубчатых радиаторов с прямыми трубами

Размер A_p , мм	Поверхность конвекции труб $P_{ктр}$, M^2	Масса, кг		Размер A_p , мм	Поверхность конвекции труб $P_{ктр}$, M^2	Масса, кг	
		стали, $G_{ст,р}$	масла $G_{м,р}$			стали, $G_{ст,р}$	масла $G_{м,р}$
С одним рядом труб				1400	4,333	53,94	46
710	0,746	12,9	8,5	1615	4,961	67,14	53
900	0,958	15,35	10,9	1800	5,613	73,94	57
С двумя рядами труб				2000	6,253	81,98	64
710	2,135	34,14	24	2200	6,893	89,18	72
900	2,733	41,14	30	2400	7,533	95,68	78
1150	3,533	50,14	38				

Примечания:

1. Поверхность конвекции двух коллекторов $P_{ккол}$ равна $0,15m^2$ при одном ряде труб и $0,34m^2$ при двух рядах. 2. Минимальные расстояния осей фланцев радиаторов от нижнего и верхнего срезов стенки бака c_1 и c_2 – соответственно 85 и 100 мм. 3. $G_{ст,р}$ – масса радиатора без масла; $G_{м,р}$ – масса масла в радиаторе.

Таблица П.30 – Основные данные трубчатых радиаторов с гнутыми трубами

Размер A_p , мм	Одинарный радиатор			Двойной радиатор		
	$P_{ктр}$, M^2	$G_{ст,р}$, кг	$G_{м,р}$, кг	$P_{ктр}$, M^2	$G_{ст,р}$, кг	$G_{м,р}$, кг
1880	11,45	205	161	22,90	380	276
2000	12,10	215	169	24,15	401	291
2285	13,55	236	184	27,05	442	321
2485	14,55	249	194	29,10	468	341
2685	15,60	264	204	31,15	499	362
3000	17,20	285	219	34,35	540	393
3250	18,45	302	232	36,90	575	418
3750	21,00	337	258	42,00	644	469
4000	22,30	352	269	44,60	675	492
4250	24,60	373	284	47,20	716	521

Примечания. 1. Поверхность коллектора $P_{ккол}$ одинарного радиатора равна $0,72m^2$, двойного $0,66m^2$. 2. Минимальные расстояния осей фланцев радиаторов от нижнего и верхнего срезов стенки бака $c_1 = c_2 = 170$ мм. 3. $G_{ст,р}$ – масса радиатора без масла; $G_{м,р}$ – масса масла в радиаторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстрицкий Г.Ф., Кудрин Б.И. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов.- М.: Техническая литература, 2003. – 176 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. Машины постоянного тока и трансформаторы. Учебник для вузов/ А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
3. Кацман М.М. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2004. – 464 с.
4. Перельмутер Н.М. Электромонтер - обмотчик и изолировщик по ремонту электрических машин и трансформаторов. Учебник. – М.: Высшая школа, 1984. – 328 с.
5. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. С.П. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
6. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
7. Щеховцов В.П. Электрическое и электромеханическое оборудование. – М.: Издательство «Профессиональное образование», 2004. – 407 с.

Русинов Владислав Леонидович,
*старший преподаватель кафедры автоматизации производственных
процессов и электротехники ФГБОУ ВО «АмГУ»*

Бодруг Наталья Сергеевна, *кандидат педагогических наук,*
доцент кафедры автоматизации производственных процессов
и электротехники ФГБОУ ВО «АмГУ»

Скрипко Ольга Валерьевна, *доктор технических наук,*
профессор кафедры автоматизации производственных процессов
и электротехники ФГБОУ ВО «АмГУ»

Проектирование силовых трансформаторов

Учебное пособие.

Изд-во АмГУ. Подписано к печати 10.03.2025. Формат 60x84/16. Усл. печ. л.
4,18. Тираж 100. Заказ 294.