

621.313
Э 454

№ 3725

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Методические указания
к расчету курсового проекта
(курсовой работы) по трансформаторам

НОВОСИБИРСК
2009

УДК 621.313(07)

Э 454

Составители: *О.Н. Савилов, В.А. Тюков,*
Д.И. Багазей, Т.В. Честюнина

Рецензент канд. техн. наук, доц. *Г.А. Шаниуров*

Работа подготовлена на кафедре электромеханики

© Новосибирский государственный
технический университет, 2009

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящие методические указания могут быть использованы при выполнении курсового проекта по дисциплинам «Электрические машины» и «Электромеханика». В них приведены необходимые сведения об устройстве и методах расчета трансформаторов на уровне, достаточном для успешного освоения дисциплины.

На протяжении более чем полувека кафедра электромеханики выпускает специалистов электромехаников и неизменно ведет занятия на факультетах электромеханического, электротехнического, энергетического и радиотехнического профилей. Базовая учебная литература издавалась в основном центральными издательствами СССР. Классическим учебным пособием считается: Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. Изд. 5-е, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

Естественно, во многих вузах соответствующего профиля издавались методические указания, руководства и пособия. Достаточное количество работ по освоению трансформаторов создано в различные годы преподавателями НГТУ кафедры «Электромеханика»: Г.Г. Таскиной, А.Л. Мацановой, В.А. Сагайдаком, Э.Е. Савиловой.

Каждое издание методических указаний пригодно для использования студентами примерно шесть лет. Поэтому необходимость настоящего руководства predetermined, в нем учтен весь предыдущий опыт и характерное отношение современных студентов к приобретению знаний и умений.

Руководство соответствует программам дисциплин, читаемых преподавателями кафедры «Электромеханика», и графику учебного процесса НГТУ.

Основная цель выполнения проекта – закрепить знания, полученные студентом при изучении курса электрических машин, и применить их к решению реальных инженерных задач.

В процессе работы над проектом студент должен углубить свои знания по теории трансформаторов, ознакомиться с современной практикой проектирования трансформаторов, научиться пользоваться рекомендуемой литературой, справочниками, каталогами, стандартами, заводскими чертежами.

При работе над проектом студент должен стремиться к творческому решению конкретных задач, должен научиться анализировать достоинства и недостатки возможных проектных решений и использовать в проекте достижения трансформаторостроения. В проекте выполняется расчет силового трехфазного трансформатора воздушного (сухого) или масляного охлаждения. Магнитопровод трансформатора трехстержневой, плоский. Рассчитанный трансформатор должен отвечать действующим ГОСТам.

В задании на проектирование трансформатора указываются следующие данные:

- 1) тип трансформатора (способ охлаждения), схема и группа соединения обмоток;
- 2) частота питающей сети $f = 50$ Гц;
- 3) номинальная мощность трансформатора S_n , кВ · А;
- 4) номинальное линейное напряжение обмотки высокого напряжения (ВН) $U_{вн}$, кВ;
- 5) номинальное линейное напряжение обмотки низкого напряжения (НН) $U_{нн}$, кВ;
- 6) потери короткого замыкания P_k , Вт;
- 7) потери холостого хода P_x , Вт;
- 8) напряжение короткого замыкания U_k , %;
- 9) ток холостого хода i_x , %;
- 10) режим работы S1 (длительный);
- 11) изоляция класса А;
- 12) материал проводников обмоток – алюминий.

Проект состоит из двух частей – расчетной и графической. Расчетная часть включает в себя следующие разделы.

1. Расчет основных электрических величин.
2. Определение основных размеров трансформатора.
3. Расчет обмоток.
4. Расчет потерь короткого замыкания.

5. Расчет напряжения короткого замыкания.

6. Расчет магнитной цепи.

7. Расчет характеристик трансформатора.

По результатам расчета оформляется расчетно-пояснительная записка (формат А-4).

Графическая часть выполняется на листе ватмана (или миллиметровой бумаги) формата А-2 и содержит две проекции остова с закрепленными обмотками: выполненные с разрезами и основными размерами (*Приложение 1*).

1. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

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

$$I_{ВН} = \frac{S_{н}}{\sqrt{3}U_{ВН}}.$$

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

$$I_{НН} = \frac{S_{н}}{\sqrt{3}U_{НН}}.$$

3. Фазный ток обмотки ВН (действующее значение), А:

$$I_{фВН} = I_{ВН} \text{ при соединении в звезду,}$$

$$I_{фВН} = \frac{I_{ВН}}{\sqrt{3}} \text{ при соединении в треугольник.}$$

4. Фазный ток обмотки НН (действующее значение), А:

$$I_{фНН} = I_{НН} \text{ при соединении в звезду,}$$

$$I_{фНН} = \frac{I_{НН}}{\sqrt{3}} \text{ при соединении в треугольник.}$$

5. Фазное напряжение обмотки ВН (действующее значение), В:

$$U_{фВН} = U_{ВН} \text{ при соединении в треугольник,}$$

$$U_{\text{фВН}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{\sqrt{3}} \text{ при соединении в звезду.}$$

6. Фазное напряжение обмотки НН (действующее значение), В:

$$U_{\text{фНН}} = U_{\text{НН}} \text{ при соединении в треугольник,}$$

$$U_{\text{фНН}} = \frac{U_{\text{НН}}}{\sqrt{3}} \text{ при соединении в звезду.}$$

7. Нормированные испытательные напряжения обмоток трансформатора $U_{\text{исп ВН}}$ и $U_{\text{исп НН}}$ определяются по величине заданных линейных напряжений $U_{\text{ВН}}$ и $U_{\text{НН}}$ (табл. 1.1). При $U_{\text{НН}} < 1$ кВ $U_{\text{исп НН}}$ равно 5 кВ для масляных трансформаторов, 3 кВ для сухих трансформаторов.

Таблица 1.1

Нормированные испытательные напряжения силовых трансформаторов

Значение заданного напряжения, кВ	3	6	10	15	20	35
Испытательное напряжение для масляного трансформатора, кВ	18	25	35	45	55	85
Испытательное напряжение для сухого трансформатора, кВ	10	16	24	37	—	—

Примечание. При отличии заданного напряжения от табличного брать ближайшее по значению.

8. Изоляционные расстояния главной изоляции в трансформаторе выбираются в зависимости от испытательных напряжений по табл. 1.2 и 1.3.

Таблица 1.2

Минимальные изоляционные расстояния обмоток НН

Мощность S_H , кВт · А	$U_{\text{исп НН}}$, кВ	a_{01} , мм	Вид изоляции	l_{01} , мм	Вид изоляции
Масляные трансформаторы					
25...250	5	4	Масляный промежуток и картон, 2×0,5 мм	15	Опорная изоля- ция из дерева или элект- рокартона
400...630	5 (прим. 1)	5		Принимается равным най- денному по $U_{\text{исп ВН}}$ l_{02} (табл. 1.3)	
1000...2500	5	15			
630...1600	18; 25; 35	15			
630 и выше	45	20			
630 и выше	55	23	Масляный промежуток с бумажно-бакелитовым цилиндром толщиной 4...6 мм		
Все мощности	85	30			
Сухие трансформаторы					
Определяется только испыта- тельным напря- жением	3 (прим. 2)	10	Воздушный промежуток и картон, 2×0,5 мм	15	Опорная изоля- ция из дерева или электрокартона
	10 (прим. 2)	14	Воздушный промежуток с бумажно-бакелитовым цилиндром толщиной 2,5...6 мм	30	
	16	27		55	
	24	40		90	

П р и м е ч а н и я.

1. Для винтовой обмотки при $U_{\text{исп НН}} = 5$ кВ размеры взять из следующей строки для мощностей 1000...2500 кВ · А.

2. Для винтовой обмотки при $U_{\text{исп НН}} = 3...10$ кВ a_{01} принимать не менее 20 мм.

3. Размеры каналов a_{01} и a_{02} являются минимальными с точки зрения изоляции обмоток. Эти размеры не могут быть меньше ширины каналов охлаждения и должны быть проверены по условиям отвода тепла по табл. 4.1–4.3 после расчета плотностей теплового потока обмоток.

Таблица 1.3

Минимальные изоляционные расстояния обмоток ВН

Мощность S_H , кВ · А	$U_{\text{испВН}}$, кВ	a_{12} , мм	Вид изоляции	l_{02} , мм	Вид изоляции	a_{22} , мм	Вид изоляции	
Масляные трансформаторы								
25...100 160...630	18; 25; 35 18; 25; 35	9 9	Масляный промежуток с бу- мажно-бакелито- вым цилиндром толщиной 2,5...5 мм	20 30	Опорная изоля- ция из электро- картона или дерева	8 10	Масляный промежуток	
1000...6300 630 и выше 630 и выше 160...630 1000...6300	18; 25; 35 45 55 85 85	20 20 20 27 27	Масляный проме- жуток с бумажно- бакелитовым ци- линдром толщиной 4...5 мм	50 50 50 75 75		18 18 20 20 30	Масляный промежуток с перегородкой из электрокартона толщиной 2...3 мм	
Сухие трансформаторы								
Определяется только испыта- тельным на- пряжением	3	10	Картон 2×0,5 мм	15		Опорная изоля- ция из электро- картона	10	Воздушный промежуток из картона с перегородкой из электрокартона толщиной 2...3 мм
	10	15	Воздушный проме- жуток с бумажно- бакелитовым ци- линдром толщиной 2,5×5 мм	20			10	
	16 24	22 40		45 80	25 45			

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА

Наиболее распространенной конструкцией силового трансформатора является плоская магнитная система стержневого типа со ступенчатой формой поперечного сечения стержня и ярма, вписанного в окружность, и с концентрическим расположением обмоток. (Все конструктивные размеры см. в *Приложении 2*.)

В данной работе предлагается провести проверочный расчет такого трансформатора.

1. Диаметр стержня трансформатора d и марка стали магнитопровода влияют на главный экономический показатель – соотношение затрат обмоточного провода и стали магнитопровода. Так как подробный экономический расчет не входит в задачу настоящего проекта, при выборе диаметра стержня и индукции в стержне рекомендуется пользоваться данными табл. 2.1 и 2.2, выполнив пересчет d и B_c пропорционально заданной мощности, если она является промежуточной между значениями, указанными в таблицах. После определения диаметра стержня его величина уточняется по нормализованному ряду: $d_n = 0,08; 0,085; 0,09; 0,092; 0,095; 0,10; 0,105; 0,11; 0,115; 0,12; 0,125; 0,13; 0,14; 0,15; 0,16; 0,17; 0,18; 0,19; 0,20; 0,21; 0,22; 0,225; 0,23; 0,24; 0,245; 0,25; 0,26; 0,27; 0,28; 0,29; 0,30; 0,31; 0,32$.

2. Ориентировочная высота обмоток, выполненных из алюминиевого провода, м:

$$l = (4,4 \dots 4,8) \frac{d_n}{\beta},$$

где $\beta = \frac{\pi d_{12}}{l}$ – коэффициент геометрии трансформатора; d_{12} – средний диаметр канала a_{12} между обмотками НН и ВН (в начале расчета d_{12} неизвестен).

В силовых трансформаторах β изменяется в диапазоне от 1,1 до 3,5. Окончательное значение β и, следовательно, l можно установить только после расчета u_k . С ростом β увеличивается реактивная составляющая напряжения короткого замыкания.

3. Активное сечение стержня, m^2 :

$$P_c = P_{\phi c} k_3 10^{-4},$$

где $P_{\phi c}$ – сечение стержня, определяется по таблице *Приложения 2*; k_3 – коэффициент заполнения ступенчатой фигуры сталью, который определяется по табл. 2.3.

Таблица 2.1

Данные для расчета трехфазных масляных трансформаторов

Мощность S_H , кВ·А	До 16	16	25	40...100	160...630			1000...1600	
Ориентировочный диаметр стержня d , м	До 0,08	0,08	0,09	0,1...0,14	0,16... 0,18	0,20	0,22	0,24... 0,26	0,28... 0,30
Рекомендуемая индукция в стержнях для марок стали 3404, 3405 B_c , Тл	1,5...1,55		1,55...1,6		1,6...1,65				

Таблица 2.2

Данные для расчета трехфазных сухих трансформаторов

Мощность S_H , кВ·А	До 10	10	16...100	160...400	630...1000	1600
Ориентировочный диаметр стержня d , м	До 0,08	0,08	0,09...0,14	0,16...0,22	0,24...0,26	0,28...0,32
Рекомендуемая индукция в стержнях для марок стали 3404, 3405 B_c , Тл	1,35...1,4		1,45...1,55	1,55...1,6		

Таблица 2.3

Коэффициент заполнения k_3 для рулонной холоднокатаной стали

Марка стали	Толщина, мм	Вид изоляционного покрытия	k_3
3404, 3405, 3406, 3407, 3408	0,35	Нагревостойкое	0,97
	0,30		0,96
3404, 3406, 3407, 3408	0,27		0,95
3404, 3405, 3406, 3407, 3408	0,35	Нагревостойкое плюс однократная лакировка	0,965
	0,3		0,955
3404, 3406, 3407, 3408	0,27		0,945

Примечания.

1. При прессовке стержней путем расклинивания с внутренней обмоткой (до 630 кВ·А), а также в навитых элементах пространственных магнитных систем k_3 уменьшают на 0,01.

2. По этой таблице можно определить также значение для стали тех же толщин, выпускаемой иностранными фирмами.

3. При использовании листовой холоднокатаной стали толщиной 0,35 мм уменьшают k_3 , полученное из таблицы, на 0,01 дополнительно к прим. 1.

4. Для стали толщиной 0,35 мм без электроизоляционного покрытия при двукратной лакировке $k_3 = 0,92...0,93$.

3. РАСЧЕТ ОБМОТОК НИЗКОГО И ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Как правило, ближе к стержню располагают обмотку НН, которую называют внутренней. Обмотку ВН называют наружной.

3.1. Электродвижущая сила одного витка, В:

$$U_{\text{в}} = 4,44 f B_{\text{с}} \text{П}_{\text{с}} ,$$

где f – частота питающей сети, Гц; $B_{\text{с}}$ – индукция в стержне, Тл, выбирается по табл. 2.1; $\text{П}_{\text{с}}$ – активное сечение стержня, м².

3.2. Число витков обмотки НН:

$$W_{\text{НН}} = \frac{U_{\text{фНН}}}{U_{\text{в}}}$$

(округлить до ближайшего целого числа).

3.3. Заданный коэффициент трансформации

$$K_{\text{е}} = \frac{U_{\text{фВН}}}{U_{\text{фНН}}} .$$

3.4. Число витков обмотки ВН:

$$W_{\text{ВН}} = W_{\text{НН}} K_{\text{е}}$$

(округлить до ближайшего целого числа).

3.5. Число витков для регулирования напряжения со стороны обмотки ВН:

$$W_{\text{р}} = 0,05 W_{\text{ВН}}$$

(ближайшее целое четное число). Это число витков учитывается при определении размеров обмотки ВН, но не учитывается при определении потерь короткого замыкания.

3.6. Предварительное значение плотности тока для трансформаторов с естественным масляным охлаждением обычно принимают

$$j \approx 1,2 \dots 1,8 \text{ А/мм}^2 ,$$

для трансформаторов с естественным воздушным охлаждением (сухих)

$$j \approx 0,8 \dots 1,3 \text{ А/мм}^2.$$

При выборе плотности тока можно увеличить плотность тока в наружной обмотке $j_{\text{ВН}}$ по сравнению с плотностью тока во внутренней обмотке $j_{\text{НН}}$ по отношению к среднему значению $j_{\text{ср}} = \frac{j_{\text{ВН}} + j_{\text{НН}}}{2}$ не более чем на 10 % в масляных трансформаторах и не более чем на 30 % в сухих.

Окончательное значение средней плотности тока в обмотках устанавливается после определения потерь короткого замыкания, и оно может отличаться от указанного диапазона.

3.7. Ориентировочное сечение витка обмотки ВН, мм²:

$$\Pi_{\text{ВН}} = \frac{I_{\text{фВН}}}{j_{\text{ВН}}}.$$

3.8. Ориентировочное сечение витка обмотки НН, мм²:

$$\Pi_{\text{НН}} = \frac{I_{\text{фНН}}}{j_{\text{НН}}}.$$

3.9. Тип обмотки можно выбрать по табл. 5.8 [1]. Основным критерием при выборе типа обмотки предлагается считать сечение витка. Типы обмоток ВН и НН могут быть разными, если $\Pi_{\text{ВН}}$ и $\Pi_{\text{НН}}$ значительно отличаются друг от друга.

В проекте рекомендуется использовать следующие типы обмоток:

- при сечении витка менее 21 мм² – цилиндрическую многослойную из круглого провода;
- при сечении витка от 21 до 300 мм² – цилиндрическую многослойную из прямоугольного провода;
- при сечении витка свыше 300 мм² – винтовую обмотку.

Независимо от типов обмоток ВН и НН минимальное число элементарных проводников (параллельных проводников) в одном эффективном определяется технологическими причинами:

- при $\Pi_{\text{НН}} \text{ВН} < 80 \text{ мм}^2$ $n'_{\text{эл ВН, НН}} = 1$;

– при $\Pi_{\text{НН ВН}} > 80 \text{ мм}^2$ $n'_{\text{эл НН, ВН}} = \frac{\Pi_{\text{НН ВН}}}{80}$ (округлить до большего

целого числа).

Увеличение $n_{\text{эл}}$ по сравнению с минимально возможным приводит к увеличению продольной изоляции обмоток и может быть оправдано:

– в винтовых обмотках, для которых $n_{\text{эл}} \geq 4$, число $n_{\text{эл}}$ должно быть кратно числу ходов обмотки, и случаях, когда увеличение $n_{\text{эл}}$ приводит к снижению радиального размера проводника и существенному снижению добавочных потерь от скин-эффекта;

– в цилиндрических обмотках из прямоугольного провода в случаях, когда увеличение $n_{\text{эл}}$ приводит к уменьшению поперечного сечения обмотки из-за лучшего заполнения последнего слоя.

3.10. Расчет обмотки НН выполняется в первую очередь. Ниже излагается порядок расчета обмотки НН для двух типов: цилиндрической из прямоугольного провода (п. 3.10.1) и винтовой (п. 3.10.2). Расчет обмотки НН цилиндрического типа из круглого провода выполняется аналогично расчету обмотки ВН (п. 3.11), при этом необходимо внести следующие изменения:

1) индексы «ВН» и «2» заменить на «НН» и «1»;

2) в п. 3.11.1.4 при вычислении числа слоев $n_{\text{сл}}$ число регулировочных витков W_p не учитывать; п. 3.11.1.7 и 3.11.1.8 заменить на п. 3.10.1.10 и 3.10.1.11.

3.10.1. Цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода может быть выполнена в один-два слоя, соединенных последовательно, и многослойной (при числе слоев больше двух). В первом случае число элементарных проводов $n_{\text{эл}}$ (параллельных) до восьми, намотка плашмя или на ребро. При намотке на ребро отношение сторон поперечного сечения провода должно быть не менее 1,3 и не более 3. В многослойной обмотке – намотка только плашмя, число параллельных проводов до 4–8, слои соединяются последовательно, охлаждение осуществляется вертикальными каналами (рис. 3.1). В цилиндрических обмотках разбиение витка на параллельные проводники проводится только по оси обмотки.

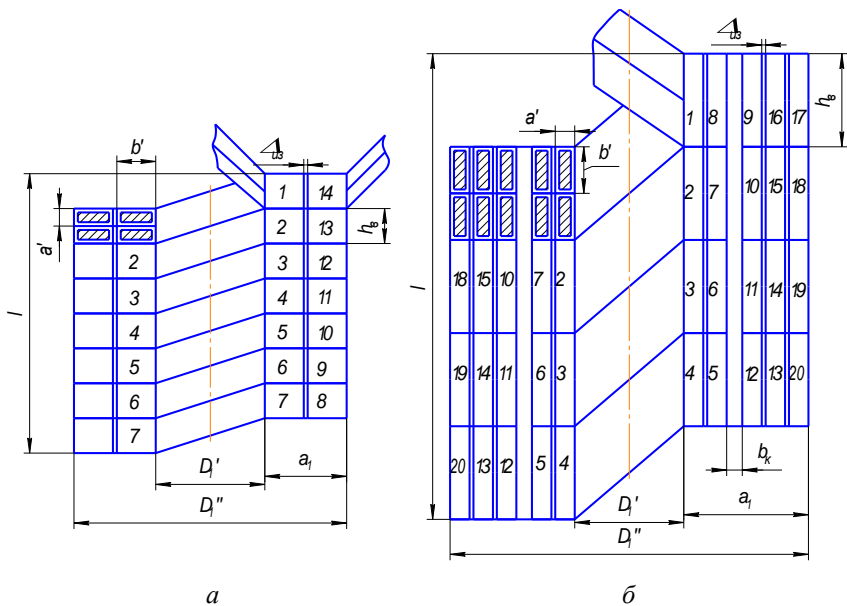


Рис. 3.1. Цилиндрическая обмотка:

a – двухслойная обмотка из 14 витков, намотанных двумя параллельными проводами на ребро $W_{\text{HH}} = 14$, $n_{\text{сл}} = 2$, $n_{\text{эл}} = 2$; *б* – пятислойная обмотка из 20 витков, намотанных двумя параллельными проводами площадью $W_{\text{HH}} = 20$, $n_{\text{сл}} = 5$, $n_{\text{эл}} = 2$

3.10.1.1. Ориентировочная высота витка, мм:

$$h_{\text{в}} = \frac{l}{W_{\text{сл}} + 1},$$

где $W_{\text{сл}} = \frac{W_{\text{HH}}}{n_{\text{сл}}}$ – число витков в слое, округлять до большего целого

числа; $n_{\text{сл}} = 1, 2, 3, \dots, 16$ – число слоев обмотки, определяется путем рассмотрения ряда вариантов (п. 3.10.1.2). Критерием окончательного выбора $n_{\text{сл}}$ и $n_{\text{эл}}$ является минимальное значение произведения $l_{\text{HH}} a_1$ (п. 3.10.1.8 и п. 3.10.1.9) при условии $l_{\text{HH}} \approx l$.

3.10.1.2. Ориентировочные осевые размеры изолированного элементарного проводника, мм:

$$b' = \frac{h_{\text{в}}}{n_{\text{эл}}} - \text{намотка плашмя (рис. 3.1, б);}$$

$$a' = \frac{h_{\text{в}}}{n_{\text{эл}}} - \text{намотка на ребро (рис. 3.1, а).}$$

3.10.1.3. Размеры элементарного проводника в миллиметрах выбираются по табл. 3.1 исходя из ориентировочного осевого размера проводника без изоляции $b = b' - 0,5$ ($a = a' - 0,5$) и ориентировочного сечения элементарного проводника $\Pi_{\text{нн эл}} = \frac{\Pi_{\text{нн}}}{n_{\text{эл}}}$. Радиальный размер выбранного провода не должен превышать предельного размера из табл. 3.1 по условию получения добавочных потерь не выше 5 % потерь $P_{\text{к}}$.

Таблица 3.1

Предельный радиальный размер провода

Число слоев $n_{\text{сл}}$ обмотки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Радиальный размер про- вода, мм	11,8	8,0	6,7	5,6	5,0	4,75	4,5	4,0	3,75	3,75

3.10.1.4. В качестве витковой изоляции используется собственная изоляция обмоточного провода. Для учебного проекта рекомендуется провод марки АПБ, изолированный лентами кабельной бумаги, как для сухих, так и для масляных трансформаторов, класс изоляции А (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Нормальная междуслойная изоляция в многослойных цилиндрических обмотках

Суммарное рабочее напряжение двух слоев обмотки, $W_{\text{сл}}, \text{В}$	Число слоев кабельной бумаги на толщину листов, $\Delta_{\text{из}}, \text{мм}$
До 1000	$2 \times 0,12 = 0,24$
От 1001...2000	$3 \times 0,12 = 0,36$
2001...3000	$4 \times 0,12 = 0,48$
3001...3500	$5 \times 0,12 = 0,6$
3501...4000	$6 \times 0,12 = 0,72$
4001...4500	$7 \times 0,12 = 0,84$
4501...5000	$8 \times 0,12 = 0,96$
5001...5500	$9 \times 0,12 = 1,08$
До 6000	$10 \times 0,12 = 1,2$

Запись выбранного проводника рекомендуется проводить в виде

$$\text{провод АПБ} \times n_{\text{эл}} \times \frac{a \times b}{a' \times b'} \times \Pi_{\text{ГОСТ}},$$

где $n_{\text{эл}}$ – число параллельных проводов; $\frac{a \times b}{a' \times b'}$ – размеры провода без изоляции/размеры провода с изоляцией; $a' = a + 2\delta$; $b' = b + 2\delta$; 2δ – двусторонняя толщина изоляции для прямоугольного провода 0,5 мм, для круглого 0,4 мм; $\Pi_{\text{ГОСТ}}$ – нормализованное сечение элементарного проводника.

После выбора размеров проводника необходимо выполнить в масштабе эскиз витка по аналогии с рис. 3.2.

3.10.1.5. Высота витка, мм:

$$h_{\text{в расч}} = a' n_{\text{эл}} - \text{намотка на ребро};$$

$$h_{\text{в расч}} = b' n_{\text{эл}} - \text{намотка плашмя}.$$

3.10.1.6. Сечение витка, мм^2 :

$$\Pi_{\text{нн п}} = \Pi_{\text{ГОСТ}} n_{\text{эл}}.$$

Таблица 3.3

Номинальные размеры и сечения алюминиевого обмоточного провода марки АПБ
(размеры a и b – в мм, сечения – в мм²)

$b \backslash a$	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	6,39	—	7,14	—	8,04	—	8,83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,75
4,00	6,84	7,24	7,64	8,12	8,60	8,89	9,45	10,1	10,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,00
4,25	7,29	—	8,14	—	9,16	—	10,1	—	11,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,25
4,50	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	8,19	—	9,14	—	10,3	—	11,3	—	12,8	—	14,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,75
5,00	8,64	9,14	9,64	10,2	10,8	11,3	12,0	12,7	13,5	11,5	15,2	16,2	17,2	—	—	—	—	—	—	—	—	5,00
5,30	9,18	—	10,2	—	1,5	—	12,7	—	14,3	—	16,2	—	18,3	—	—	—	—	—	—	—	—	5,30
5,60	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	10,4	—	11,6	—	13,1	—	14,5	—	16,3	—	18,4	—	20,8	—	23,1	—	—	—	—	—	—	6,00
6,30	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	11,7	—	13,0	—	14,7	—	16,2	—	18,2	—	20,6	—	23,2	—	25,9	—	29,3	—	—	—	—	6,70
7,10	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	13,1	—	14,6	—	16,4	—	18,2	—	20,5	—	23,1	—	26,1	—	29,1	—	32,9	—	36,6	—	—	7,50
8,00	14,0	14,8	15,6	16,6	17,6	18,3	19,5	20,7	21,7	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	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	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	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	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	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	—	—	—	23,4	24,7	25,9	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	—	—	—	—	26,1	—	29,0	—	32,5	—	36,6	—	41,3	—	46,3	—	52,2	—	58,1	—	65,2	11,80
12,50	—	—	—	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	—	—	—	—	—	—	32,5	—	36,4	—	41,0	—	46,3	—	51,9	—	58,5	—	65,1	—	73,1	13,20
14,00	—	—	—	—	—	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	—	—	—	—	—	—	37,0	—	41,5	—	46,7	—	52,7	—	59,1	—	66,6	—	74,1	—	83,1	15,00
16,00	—	—	—	—	—	—	—	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	—	84,1	—	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

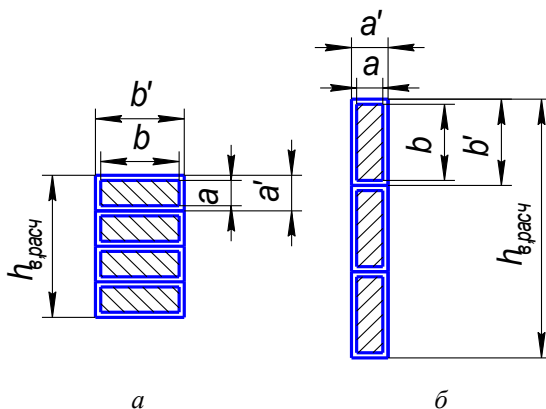


Рис. 3.2. Сечения витка:

a – при $n_{\text{эл}} = 4$, намотанных на ребро; $б$ – при $n_{\text{эл}} = 3$, намотанных плашмя

3.10.1.7. Уточненная плотность тока:

$$j_{\text{НН р}} = \frac{I_{\Phi \text{ НН}}}{\Pi_{\text{НН р}}}.$$

3.10.1.8. Осовой размер обмотки, мм:

$$l_{\text{НН}} = h_{\text{в расч}} (W_{\text{сл}} + 1) \approx l.$$

3.10.1.9. Радиальный размер обмотки, мм:

– обмотка без вертикальных каналов (здесь и ниже индекс «1» в размерах обмотки соответствует обмотке НН)

$$a_1 = a' n_{\text{сл}} + \Delta_{\text{из}} n_{\text{сл}} - 1 \quad \text{– намотка плашмя;}$$

$$a_1 = b' n_{\text{сл}} + \Delta_{\text{из}} n_{\text{сл}} - 1 \quad \text{– намотка на ребро;}$$

– обмотка с вертикальными каналами

$$a_1 = a' n_{\text{сл}} + b_{\text{к}} n_{\text{к}} + \Delta_{\text{из}} [n_{\text{сл}} - n_{\text{к}} + 1] \quad \text{– намотка плашмя,}$$

$$a_1 = b' n_{\text{сл}} + b_{\text{к}} n_{\text{к}} + \Delta_{\text{из}} [n_{\text{сл}} - n_{\text{к}} + 1] \quad \text{– намотка на ребро,}$$

где $\Delta_{\text{из}}$ – междуслойная изоляция, выбирается по табл. 3.2 исходя из величины рабочего напряжения между слоями $U_{\text{сл}} = 2W_{\text{сл}}U_{\text{в}}$; $n_{\text{к}}$ – число вертикальных каналов; предварительное число вертикальных каналов можно определить по заданным потерям короткого замыкания:

$$n_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{q9\pi l_{\text{НН}} \left[d_{\text{н}} + 2a_{01} + 2a_1 + a_{12} \cdot 10^{-3} \right]} - 1,$$

$n_{\text{к}}$ – округлить до большего целого числа; при $n_{\text{к}} \leq 0$ принять $n_{\text{к}} = 0$.
Здесь a_1 – радикальный размер для обмотки без каналов; $q = 1400 \text{ Вт/м}^2$ – для масляных трансформаторов; $q = 380 \text{ Вт/м}^2$ – для сухих трансформаторов. Ширина канала $b_{\text{к}}$ (в целых числах) определяется по табл. 4.1 и 4.2. Окончательные величины $n_{\text{к}}$ и $b_{\text{к}}$ определяются после расчета $q_{\text{ВН}}$ и $q_{\text{НН}}$ (п. 4.6).

3.10.1.10. Внутренний диаметр обмотки, м:

$$D'_1 = d_{\text{н}} + 2a_{01},$$

где a_{01} – изоляционное расстояние от стержня до обмотки НН, выбирается исходя из $U_{\text{исп НН}}$ по табл. 1.2 и корректируется после выбора $b_{\text{к}}$ (см. примечания к табл. 1.2 и 1.3).

3.10.1.11. Наружный диаметр обмотки, м:

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

3.10.1.12. Поверхность охлаждения обмоток НН, м^2 :

– обмотка без вертикальных каналов

$$\Pi_{\text{охл НН}} = 3\kappa\pi (D'_1 + D''_1) l_{\text{НН}},$$

– обмотка с вертикальными каналами

$$\Pi_{\text{охл НН}} = 3(n_{\text{к}} + 1)\kappa\pi (D'_1 + D''_1) l_{\text{НН}},$$

где $\kappa = 0,75$ – коэффициент, учитывающий части поверхности обмотки, закрытие рейками и другими изоляционными деталями.

3.10.1.13. Масса металла обмотки, кг:

$$G_{\text{НН}} = 3\pi \frac{D_1' + D_1''}{2} W_{\text{НН}} \Pi_{\text{ННр}} \gamma_{\text{Al}},$$

где $\gamma_{\text{Al}} = 2700 \text{ кг/м}^3$; D_1' , D_1'' , $\Pi_{\text{ННр}}$ – в метрах и метрах квадратных.

3.10.2. Винтовая обмотка применяется только как обмотка НН.

Минимальное число параллельных проводов 4, намотка – только плашмя. Подобно резьбе винта обмотка может быть одноходовой (рис. 3.3, а), двухходовой (рис. 3.3, б), в отдельных случаях – четырехходовой.

В большинстве случаев в двух- и четырехходовых обмотках горизонтальные каналы делаются как между витками (рис. 3.3, б), так и внутри витка.

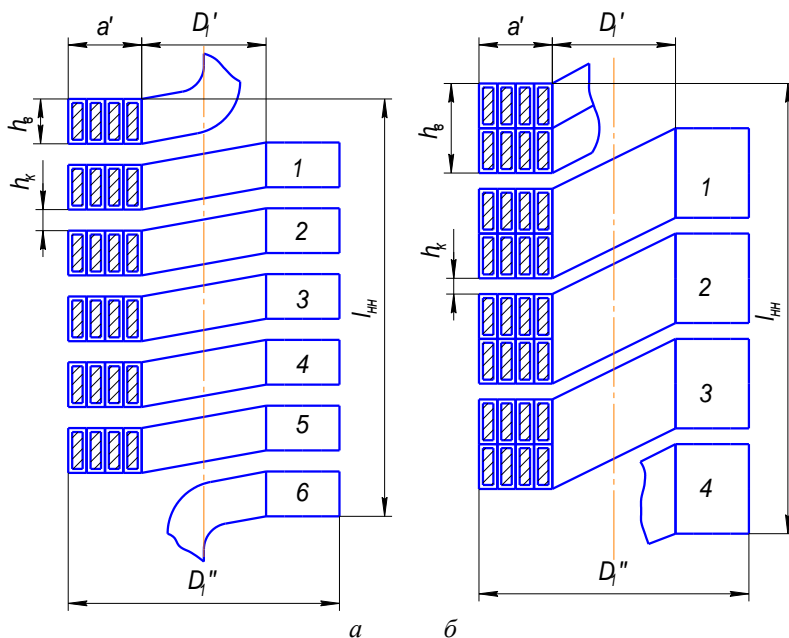


Рис. 3.3. Винтовая обмотка:

a – одноходовая из шести витков, $n_{\text{эл}} = 4$; $б$ – двухходовая из четырех витков без радиальных (горизонтальных) каналов внутри витка, $n_{\text{эл}} = 8$

3.10.2.1. Ориентировочная высота витка h_b , мм, определяет количество ходов обмотки. Одноходовая винтовая обмотка выполняется при условии

$$h_b = \frac{l}{W_{HH} + 4} - h_k \leq 18;$$

двухходовая винтовая обмотка – при условии

$$h_b = \frac{l}{W_{HH} + 1} - h_k \leq 36;$$

четырёхходовая винтовая обмотка – при условии

$$h_b = \frac{l}{W_{HH} + 1} - 2h_k > 36,$$

где h_k – величина горизонтального канала между витками, выбирается по табл. 4.1 и 4.3.

3.10.2.2. Ориентировочный осевой размер изолированного проводника, мм:

$b' = h_b$ – для одноходовой обмотки,	}	Без канала внутри витка
$b' = \frac{h_b}{2}$ – для двухходовой обмотки,		
$b' = \frac{h_b}{4}$ – для четырёхходовой обмотки,		
$b' = \frac{h_b - h_k}{2}$ – для двухходовой обмотки,	}	При наличии одного канала внутри витка
$b' = \frac{h_b - h_k}{4}$ – для четырёхходовой обмотки.		

3.10.2.3. Размеры элементарного неизолированного проводника в миллиметрах выбираются по табл. 3.1 по ориентировочному осевому размеру $b = b' - 0,5$ подбором числа $n_{эл} \approx \frac{\Pi_{HH}}{\Pi_{ГОСТ}}$ таким образом, чтобы число элементарных проводников было кратным числу ходов обмотки.

Запись выбранного проводника рекомендуется проводить в виде:

$$\text{провод АПБ}n_{\text{эл}} \frac{a \times b}{a' \times b'} \Pi_{\text{ГОСТ}},$$

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

$$\frac{a \times b}{a' \times b'} = \frac{\text{размеры провода без изоляции}}{\text{размеры провода с изоляцией}};$$

$a' = a + 0,5$, $b' = b + 0,5$; $\Pi_{\text{ГОСТ}}$ – нормализованное сечение элементарного проводника.

После выбора размеров проводника необходимо выполнить в масштабе эскиз витка по аналогии с рис. 3.3.

3.10.2.4. Сечение витка, мм²:

$$\Pi_{\text{ННр}} = \Pi_{\text{ГОСТ}} n_{\text{эл}}.$$

3.10.2.5. Уточненное значение плотности тока:

$$j_{\text{ННр}} = \frac{I_{\text{ф НН}}}{\Pi_{\text{ННр}}}.$$

3.10.2.6. Высота обмотки, мм:

одноходовой

$$l_{\text{НН}} = (W_{\text{НН}} + 4)(b' + h_{\text{к}}),$$

двухходовой без канала внутри витка

$$l_{\text{НН}} = (W_{\text{НН}} + 1)(2b' + h_{\text{к}}),$$

четырёхходовой без канала внутри витка

$$l_{\text{НН}} = 2(W_{\text{НН}} + 1)(2b' + h_{\text{к}}).$$

3.10.2.7. Радиальный размер обмотки, мм:

одноходовой

$$a_1 = n_{\text{эл}} a';$$

двухходовой

$$a_1 = \frac{n_{\text{эл}}}{2} a';$$

четырёхходовой

$$a_1 = \frac{n_{\text{эл}}}{4} a'.$$

3.10.2.8. Внутренний диаметр обмотки, м:

$$D'_1 = d_{\text{н}} + 2a_{01},$$

где a_{01} – изоляционное расстояние от стержня до обмотки НН, выбирается исходя из $U_{\text{исп НН}}$ по табл. 1.2 и уточняется после выбора $b_{\text{к}}$.

3.10.2.9. Наружный диаметр обмотки, мм:

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

3.10.2.10. Масса металла обмотки, кг:

$$G_{\text{НН}} = 3\pi \frac{D'_1 + D''_1}{2} W_{\text{НН}} \Pi_{\text{НН р}} \gamma_{\text{Ал}},$$

где $\gamma_{\text{Ал}} = 2700 \text{ кг/м}^3$; D'_1 , D''_1 , $\Pi_{\text{НН р}}$ – в метрах и метрах квадратных.

3.10.2.11. Поверхность охлаждения обмотки, м^2 :
одноходовой

$$\Pi_{\text{охл НН}} = 3\pi W_{\text{НН}} (D'_1 + D''_1) b' + a_1 \kappa;$$

двухходовой без канала внутри витка

$$\Pi_{\text{охл НН}} = 3\pi W_{\text{НН}} (D'_1 + D''_1) 2b' + a_1 \kappa;$$

четырёхходовой с одним каналом внутри витка

$$\Pi_{\text{охл НН}} = 3\pi W_{\text{НН}} 4(D'_1 + D''_1) \left(b' + \frac{a_1}{2} \right) \kappa;$$

где $\kappa = 0,75$ – коэффициент, учитывающий уменьшение поверхности за счет реек и изоляционных деталей.

3.11. **Расчет обмотки ВН** показан на примере многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода. Расчет обмотки ВН цилиндрического типа из прямоугольного провода выполняется аналогично расчету обмотки НН (п. 3.10.1), при этом необходимо внести следующие изменения:

- 1) индексы «НН» и «1» заменить на «ВН» и «2»;
- 2) в п. 3.10.1.1 при вычислении $W_{\text{сл}}$ учесть $W_{\text{р}}$;

3) п. 3.10.1.10 и 3.10.1.11 заменить на п. 3.11.1.7 и 3.11.1.8;

4) в п. 3.10.1.1 l заменить на l_{HH} .

3.11.1. Многослойная цилиндрическая обмотка из круглого провода наиболее часто применяется для обмотки ВН, при этом число параллельных проводов выбирается не более двух.

3.11.1.1. Размеры проводника, мм. По рассчитанному сечению $\Pi_{\text{ВН}}$ подбираются нормализованное сечение и диаметр – по табл. 3.4. Запись выбранного проводника рекомендуется проводить в виде

$$\text{Провод АПБ} \times n_{\text{эл}} \times \frac{d}{d_{\text{из}}} \times \Pi_{\text{ГОСТ}},$$

где d и $d_{\text{из}}$ – диаметры неизолированного и изолированного проводов соответственно; $d_{\text{из}} = d + 2\delta$; 2δ – двухсторонняя толщина изоляции по п. 3.10.1.4.

Таблица 3.4

**Номинальные размеры сечения круглого алюминиевого
неизолированного провода марки АПБ**

Сечение $\Pi_{\text{ГОСТ}}, \text{мм}^2$	Диаметр $d, \text{мм}$	Сечение $\Pi_{\text{ГОСТ}}, \text{мм}^2$	Диаметр $d, \text{мм}$	Сечение $\Pi_{\text{ГОСТ}}, \text{мм}^2$	Диаметр $d, \text{мм}$
1,37	1,32	4,375	2,36	13,2	4,10
1,51	1,40	4,91	2,50	14,2	4,25
1,77	1,50	5,515	2,65	15,9	4,5
2,015	1,60	6,16	2,80	17,7	4,75
2,27	1,70	7,07	3,00	19,63	5,00
2,545	1,80	7,795	3,15	21,22	5,20
2,805	1,90	8,81	3,35	22,06	5,30
3,14	2,00	9,895	3,55	28,26	6,00
3,53	2,12	11,05	3,75	50,24	8,00
3,94	2,24	12,55	4,00		

3.11.1.2. Уточненная плотность тока, А/мм^2 :

$$j_{\text{ВНр}} = \frac{I_{\text{фВН}}}{\Pi_{\text{ВНр}}},$$

где $\Pi_{\text{ВНр}} = \Pi_{\text{ГОСТ}} n_{\text{эл}}$.

3.11.1.3. Число витков в слое

$$W_{\text{сл}} = \frac{l_{\text{НН}}}{n_{\text{эл}} d_{\text{из}}} - 1$$

округляем до ближайшего целого числа.

3.11.1.4. Число слоев в обмотке

$$n_{\text{сл}} = \frac{W_{\text{ВН}} + W_{\text{р}}}{W_{\text{сл}}}$$

округляем до целого большего числа.

3.11.1.5. Радиальный размер обмотки ВН, мм:

(здесь и ниже индекс «2» в размерах обмотки соответствует обмотке ВН). Обмотка без вертикальных каналов

$$a_2 = d_{\text{из}} n_{\text{сл}} + \Delta_{\text{из}} (n_{\text{сл}} - 1);$$

обмотка с вертикальными каналами

$$a_2 = d_{\text{из}} n_{\text{сл}} + \Delta_{\text{из}} [n_{\text{сл}} - n_{\text{к}} + 1] + b_{\text{к}} n_{\text{к}},$$

где $\Delta_{\text{из}}$ – толщина междуслойной изоляции, выбирается по табл. 3.2 по величине рабочего напряжения между слоями $U_{\text{сл}} = 2W_{\text{сл}} U_{\text{в}}$; $n_{\text{к}}$ – число вертикальных каналов и $b_{\text{к}}$ – ширина канала, они принимаются такими же, как и в обмотке НН (см. п. 3.10.1.9).

3.11.1.6. Высота обмотки ВН, мм:

$$l_{\text{ВН}} = d_{\text{из}} n_{\text{эл}} (W_{\text{сл}} + 1).$$

3.11.1.7. Внутренний диаметр обмотки ВН, м:

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

где a_{12} – изоляционное расстояние от обмотки НН до обмотки ВН, выбирается исходя из $U_{\text{исп ВН}}$ по табл. 1.3.

3.11.1.8. Наружный диаметр обмотки ВН, м:

$$D''_2 = D'_2 + 2a_2.$$

3.11.1.9. Поверхность охлаждения, м^2 :

– обмотка без вертикальных каналов

$$\Pi_{\text{охл ВН}} = 3\kappa\pi(D'_2 + D''_2)l_{\text{ВН}};$$

– обмотка с вертикальными каналами

$$\Pi_{\text{охл НН}} = 3\kappa\pi(n_{\text{к}} + 1)(D'_2 + D''_2)l_{\text{ВН}},$$

где $\kappa = 0,8$ – коэффициент, учитывающий части поверхности обмотки, закрытые крепящими и изолирующими деталями.

3.11.1.10. Масса металла обмоток, кг:

$$G_{\text{ВН}} = 3\pi \frac{D'_2 + D''_2}{2} W_{\text{ВН}} \Pi_{\text{ВН р}} \gamma_{\text{Al}},$$

где $\gamma_{\text{Al}} = 2700 \text{ кг/м}^3$.

3.11.1.11. Масса металла обмоток НН и ВН, кг:

$$G_0 = G_{\text{НН}} + G_{\text{ВН}}.$$

4. ПОТЕРИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

4.1. Основные потери в обмотках при расчетной температуре 75°C , Вт:

$$P_{\text{осн НН}} = 3I_{\text{ф НН}}^2 r_{\text{НН } 75^\circ},$$

$$P_{\text{осн ВН}} = 3I_{\text{ф ВН}}^2 r_{\text{ВН } 75^\circ},$$

где r – омическое сопротивление, Ом:

$$r_{\text{НН } 75^\circ} = \rho_{75^\circ} \frac{\pi \frac{D'_1 + D''_1}{2} W_{\text{НН}}}{\Pi_{\text{НН р}}},$$

$$r_{\text{ВН } 75^\circ} = \rho_{75^\circ} \frac{\pi \frac{D'_2 + D''_2}{2} W_{\text{ВН}}}{\Pi_{\text{ВН р}}},$$

$\rho_{75^\circ} = 34,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ – удельное сопротивление алюминиевого провода, приведенное к нормированной расчетной температуре обмоток $+75^\circ \text{C}$ (для классов нагревостойкости А и В).

4.2. Средний коэффициент добавочных потерь k_d , учитывающий увеличение основных электрических потерь в обмотках при протекании по ним переменного тока, рассчитывается для обмоток ВН ($k_{d \text{ ВН}}$) и НН ($k_{d \text{ НН}}$). При расчете k_d все размеры подставлять в метрах.

Для обмоток из прямоугольного провода (см. рисунок а)

$$k_d = 1 + 0,037 \beta_1^2 a^4 n^2 10^8,$$

где $\beta_1 = 0,95 \frac{bm}{l}$, $m = W_{\text{сл}} n_{\text{эл}}$ – число элементарных проводников по оси обмотки; b – размер неизолированного проводника по оси обмотки; a – размер неизолированного проводника по радиусу обмотки; l – высота обмотки (соответственно $l_{\text{ВН}}$ или $l_{\text{НН}}$), $n = n_{\text{сл}}$ – число элементарных проводников по радиусу обмотки.

Примечание. При намотке на ребро: a – размер неизолированного проводника по оси обмотки; b – размер неизолированного проводника по радиусу обмотки.

Для цилиндрической обмотки из круглого провода (см. рисунок б)

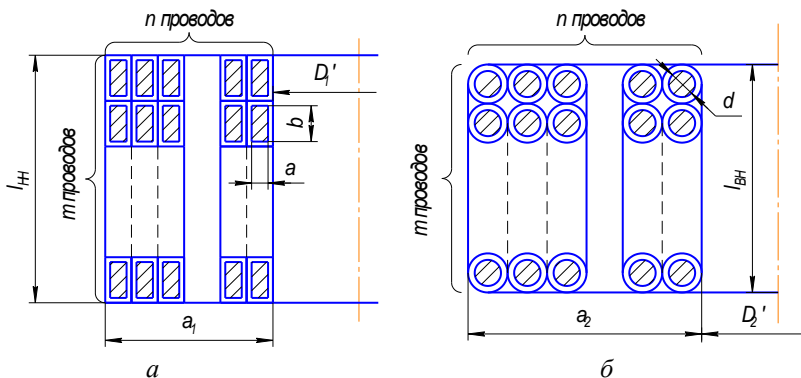
$$k_d = 1 + 0,017 \beta_2^2 d^4 n^2 10^8,$$

где $\beta_2 = 0,95 \frac{dm}{l}$; $m = W_{\text{сл}} n_{\text{эл}}$ – число элементарных проводников по оси обмотки; d – диаметр неизолированного провода; l – высота обмотки (соответственно $l_{\text{ВН}}$ или $l_{\text{НН}}$), $n = n_{\text{сл}}$ – число элементарных проводников по радиусу обмотки.

Обычно $k_d \leq 1,01 \dots 1,05$ для правильно выбранных размеров цилиндрических обмоток.

Для винтовой обмотки при $n > 4$ коэффициент добавочных потерь от вихревых токов необходимо умножить на коэффициент добавочных потерь от циркуляционных токов в параллельных проводниках $k_{d \text{ НН}}$:

$$k_{d \text{ НН}} = 1 + 0,53 \cdot 10^{-2} \beta_1^2 \left(\frac{f}{\rho} \right)^2 a^4 n^4 - 20n^2 + 64,$$



К определению добавочных потерь в обмотках

где $\beta_1 = 0,95 \frac{bm}{l_{\text{нн}}}$; f – частота питающей сети, Гц; $\rho = 0,0344 \frac{\text{мкОм} \cdot \text{м}^2}{\text{м}}$ –

удельное электрическое сопротивление алюминиевого провода;
 $m = W_{\text{нн}} n_{\text{эл}}$ – число элементарных проводников по оси обмотки;
 $n = n_{\text{эл}} / n_{\text{сл}}$ – число элементарных проводников по радиусу обмотки;
 b – размер неизолированного проводника по оси обмотки; a – размер неизолированного проводника по радиусу обмотки, $l_{\text{нн}}$ – высота обмотки НН.

4.3. Потери в отводах, Вт:

$$P_{\text{отв НН}} = 12,75 j_{\text{ННр}}^2 G_{\text{отв НН}};$$

$$P_{\text{отв ВН}} = 12,75 j_{\text{ВНр}}^2 G_{\text{отв ВН}},$$

где $G_{\text{отв НН(ВН)}} = l_{\text{отв НН(ВН)}} \Pi_{\text{НН(ВН)}} \gamma_{\text{Al}}$ – масса отводов, кг; $l_{\text{отв}}$ – общая длина отводов, м:

$$l_{\text{отв}} = 7,5l \text{ – при соединении обмоток в звезду;}$$

$$l_{\text{отв}} = 14l \text{ – при соединении обмоток в треугольник;}$$

$$\gamma_{\text{Al}} = 2700 \text{ кг/м}^3; \quad j \text{ – А/мм}^2; \quad \Pi \text{ – в метрах квадратных.}$$

В силовых трансформаторах общего назначения потери в отводах составляют, как правило, не более 5–8 % потерь короткого замыкания. Добавочными потерями в отводах пренебрегаем.

4.4. Потери в баке и металлических конструкциях, Вт:

$$P_{\delta} = 10kS_{\text{H}},$$

где $k = 0,015 \dots 0,025$; значение S_{H} подставляется в $\text{kB} \cdot \text{A}$.

В сухих трансформаторах потерями в металлических конструкциях пренебрегаем.

4.5. Потери короткого замыкания трансформатора, Вт:

$$P_{\text{кр}} = P_{\text{осн НН}} k_{\text{д НН}} + P_{\text{осн ВН}} k_{\text{д ВН}} + P_{\text{отв НН}} + P_{\text{отв ВН}} + P_{\delta}.$$

Значения $P_{\text{кр}}$ для масляных и сухих трансформаторов общего назначения регламентированы соответствующими стандартами и не должны отклоняться от заданных более чем на 5 %:

$$\left| \frac{P_{\text{кр}} - P_{\text{к}}}{P_{\text{к}}} 100 \% \right| \leq 5 \%.$$

При получении $P_{\text{кр}}$ выше заданного предела необходимо уменьшить плотность тока в обмотках.

4.6. Плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности, Вт/м^2 :
обмотки НН

$$q_{\text{НН}} = \frac{P_{\text{осн НН}} k_{\text{д НН}}}{\Pi_{\text{охл НН}}};$$

обмотки ВН

$$q_{\text{ВН}} = \frac{P_{\text{осн ВН}} k_{\text{д ВН}}}{\Pi_{\text{охл ВН}}}.$$

Для масляных трансформаторов удельный тепловой поток, как правило, не должен быть ниже 800 Вт/м^2 , не должен превышать величину 1400 Вт/м^2 и регулируется количеством каналов $n_{\text{к}}$.

В сухих трансформаторах удельный тепловой поток должен соответствовать табл. 4.1 и 4.2 и регулируется как количеством каналов, так и их шириной (табл. 4.3).

Таблица 4.1

Сухие трансформаторы, вертикальные каналы. Выбор ширины канала по допустимому превышению температуры и плотности теплового потока на поверхности обмотки q

Класс изоляции	Допустимое превышение температуры, °C	Плотность теплового потока, Вт/м ² , при ширине канала, мм		
		7	10	15
A	60	160	300	380
E, B	75...80	230	450	550
F	100	300	600	720
H	125	380	800	950

Таблица 4.2

Сухие трансформаторы, горизонтальные каналы. Выбор ширины канала по допустимому превышению температуры и плотности теплового потока на поверхности обмотки q

Класс изоляции	Допустимое превышение температуры, °C	Плотность теплового потока, Вт/м ² , при ширине канала, мм		
		8	12	15
A	60	280	380	450
E, B	75...80	320	420	540
F	100	420	540	720
H	125	580	720	1000

Таблица 4.3

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 канала, мм	Обмотка – обмотка, мм
До 300	4...5	4	4...5	До 40	4
300...500	5...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

5. НАПРЯЖЕНИЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Напряжение короткого замыкания U_k определяет внешнюю характеристику и ток короткого замыкания трансформатора. Величина U_k является паспортной, и при ее расчете не допускается отклонение более чем на $\pm 5\%$.

Напряжением короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называется приведенное к расчетной температуре напряжение первичной обмотки в режиме короткого замыкания вторичной обмотки при номинальном токе в ней.

5.1. Параметры схемы замещения при коротком замыкании, Ом (рис. 5.1):

$$r_k = r_1 + r'_2 = \frac{P_{кр}}{3I_{1ф}^2} - \text{активное сопротивление обмоток};$$

$$r_1 \approx r'_2 = \frac{r_k}{2} - \text{активное сопротивление первичной обмотки};$$

$$r_2 = \frac{r'_2}{k_w^2} - \text{активное сопротивление вторичной обмотки};$$

$$x_k - \text{индуктивное сопротивление обмоток (п. 5.3)};$$

$$x_1 \approx x'_2 = \frac{x_k}{2} - \text{индуктивное сопротивление первичной обмотки, эквивалентное потоку рассеяния};$$

$$x_2 = \frac{x'_2}{k_w^2} - \text{индуктивное сопротивление вторичной обмотки, эквивалентное потоку рассеяния}.$$

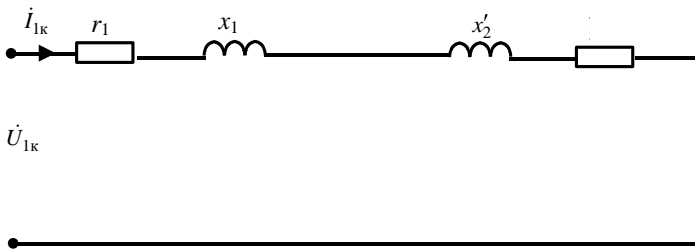


Рис. 5.1. Схема замещения КЗ для одной фазы трансформатора

Первичной считать ту сторону (обмотку), где величина напряжения равна сетевому гостированному напряжению согласно табл. 5.1.

Таблица 5.1

Номинальные междуфазные линейные напряжения

Сетевое гостированное напряжение, кВ	0,22	0,38	0,66	3	6	10	20	35
Первичные обмотки, кВ	0,22	0,38	0,66	3 3,15	6 6,3	10 10,5	20	35
Вторичные обмотки, кВ	0,23	0,4	0,69	3,15 3,3	6,3 6,6	10,5 11	22	38,5

5.2. Активная составляющая напряжения короткого замыкания, В:

$$U_a = I_{1\phi} r_k .$$

5.3. Реактивная составляющая напряжения КЗ, В:

$$U_p = I_{1\phi} x_k ,$$

где

$$x_k = \frac{7,9 f W_1^2 \pi d_{12}}{l_\sigma} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \cdot 10^{-6} \text{ [Ом]},$$

$l_\sigma = l + \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi}$ – средняя длина силовой линии потока рассеяния,

$l = \frac{l_{\text{НН}} + l_{\text{ВН}}}{2}$; $d_{12} = d_{\text{Н}} + 2a_{01} + 2a_1 + a_{12}$ – средний диаметр канала между обмотками (*Приложение 2*). При расчете x_k все размеры подставлять в метрах.

5.4. Расчетное значение напряжения КЗ, %:

$$U_{\text{кр}\%} = \sqrt{U_{\text{а}\%}^2 + U_{\text{р}\%}^2} ,$$

где

$$U_{\text{а}\%} = \frac{U_a}{U_{1\phi}} 100 \% , \quad U_{\text{р}\%} = \frac{U_p}{U_{1\phi}} 100 \% , \quad \left| \frac{U_{\text{кр}\%} - U_{\text{к}\%}}{U_{\text{к}\%}} 100 \% \right| \leq 5 \% .$$

Если $U_{\text{кр}\%}$ много больше (меньше) заданной величины, следует увеличить (уменьшить) l , т. е. изменить β . Эту корректировку целесообразно выполнять начиная с обмотки НН: п. 3.10.1.1, 3.10.1.2

и 3.10.11.3 – для цилиндрических обмоток; п. 3.10.2.1, 3.10.2.2 и 3.10.2.3 – для винтовых обмоток.

Используя табл. 3.3, увеличиваем (уменьшаем) осевой размер проводника b (a – при намотке на ребро), переходя на другой нормализованный размер b . При этом будет уменьшаться радиальный размер проводника, так как сечение элементарного проводника должно остаться на прежнем уровне. При этом возможна корректировка $n_{эл}$.

Затем корректируется обмотка ВН на новую высоту и проводится дальнейший расчет.

5.5. В соответствии с указанием ГОСТ 11677–85 токи короткого замыкания для силовых трансформаторов должны определяться следующим образом:

– установившийся ток короткого замыкания I_k для двухобмоточного трансформатора (при $S_n \leq 1000$ кВА), А:

$$I_k = 100 \frac{I_{фн}}{U_{кр\%}}, \text{ но не более } 25 I_{фн},$$

где $I_{фн}$ – номинальный фазный ток соответствующей обмотки;

– наибольший ударный ток короткого замыкания

$$I_{к уд} = k_{уд} \sqrt{2} I_k,$$

где $k_{уд} \sqrt{2}$ – коэффициент, определяемый по табл. 5.2.

Таблица 5.2

Коэффициент для определения наибольшего ударного тока короткого замыкания

$\frac{U_p}{U_a}$	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	14 и более
$k_{уд} \sqrt{2}$	1,51	1,63	1,75	1,95	2,09	2,19	2,28	2,38	2,46	2,55

Примечание. U_p , U_a – реактивная и активная составляющие напряжения короткого замыкания трансформатора.

Для известного трансформатора, работающего в известной сети, реальный ток КЗ должен рассчитываться по методам, применяемым в расчетах электрических сетей.

5.6. Радиальная механическая сила на одну обмотку, Н:

$$F_p = 0,628(I_{\text{к уд}} W)^2 \beta k_p \cdot 10^{-6},$$

где W – число витков соответствующей обмотки; $\beta = \frac{\pi d_{12}}{l}$;

$$k_p = 1 - \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi l}.$$

5.7. Тангенсальная растягивающая обмотку сила:

$$F_\sigma = \frac{F_p}{2\pi}.$$

5.8. Напряжение на растяжение в алюминиевом проводе:

$$\sigma_p = \frac{F_\sigma}{W\Pi} \leq 15 \text{ МПа},$$

где Π – сечение витка соответствующей обмотки, м².

6. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

6.1. Для нормализованного ряда диаметров стержней магнитных систем силовых трансформаторов нормализованы также число ступеней в сечении стержня и ярма, размеры пакетов пластин, число, размеры и расположение охлаждающих каналов, а следовательно, и площади поперечных сечений стержня $\Pi_{\text{фс}}$ и ярма $\Pi_{\text{фя}}$ и объем угла V_y .

Значения $\Pi_{\text{фя}}$ и V_y выбираются по *Приложению 1*.

6.2. Активное сечение стержня, м², определяется по п. 2.3, где k_3 находится по п. 2.3.

6.3. Активное сечение ярма, м²:

$$\Pi_{\text{я}} = k_3 \Pi_{\text{фя}}.$$

6.4. Индукция в стержне, Тл:

$$B_c = \frac{U_{\text{в}}}{4,44 f \Pi_c},$$

где $U_{\text{в}} = U_{\text{ф вН}} / W_{\text{вН}}$ – напряжение, В.

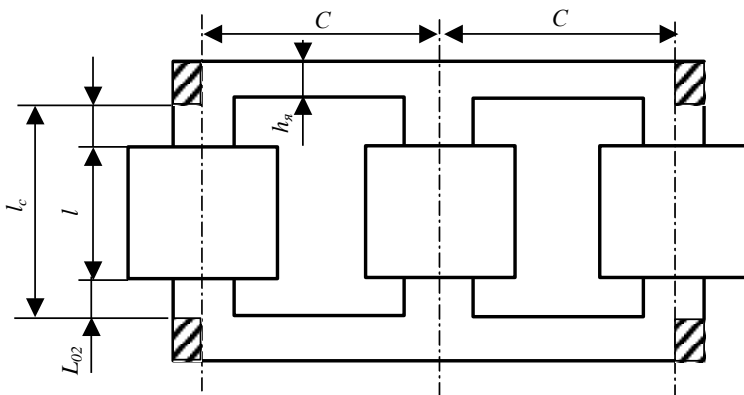
6.5. Индукция в яре, Тл:

$$B_{\text{я}} = \frac{U_{\text{в}}}{4,44 f \Pi_{\text{я}}}.$$

6.6. Масса стали в стержнях (см. рисунок), кг:

$$G_{\text{с}} = G'_{\text{с}} + G''_{\text{с}},$$

где $G'_{\text{с}} = 3l_{\text{с}}\Pi_{\text{с}}\gamma_{\text{ст}}$ – масса стали стержней в пределах окна магнитной системы; $l_{\text{с}} = l_{\text{вн}} + 2l_{02}$ – высота стержня в пределах окна, м; l_{02} – см. разд. 1, п. 8; $\gamma_{\text{ст}} = 7650 \text{ кг/м}^3$ – плотность стали; $G''_{\text{с}} = 3 \Pi_{\text{с}}d_{\text{н}}\gamma_{\text{ст}} - G_{\text{у}}$ – масса стали стержней в пределах углов; $G_{\text{у}} = k_3 V_{\text{у}}\gamma_{\text{ст}}$ – масса стали угла.



К определению размеров плоской магнитной системы

6.7. Масса стали в ярах, кг:

$$G_{\text{я}} = G'_{\text{я}} + G''_{\text{я}},$$

где $G'_{\text{я}} = 4C\Pi_{\text{я}}\gamma_{\text{ст}}$ – масса стали ярм между осями крайних стержней; $G''_{\text{я}} = 2G_{\text{уя}}$; $G_{\text{уя}} = 0,822\Pi_{\text{я}}d_{\text{н}}\gamma_{\text{ст}}$ – масса стали заштрихованных углов; $C = D_2'' + a_{22}$ – расстояние между осями стержней; a_{22} – изоляционное расстояние между обмотками ВН на соседних стержнях, выбирается по табл. 1.3.

6.8. Масса стали магнитопровода, кг:

$$G_{\text{ст}} = G_{\text{с}} + G_{\text{я}}.$$

6.9. Потери холостого хода слагаются из потерь в магнитопроводе, потерь в стальных элементах конструкции остова трансформатора. Потерями в первичной обмотке, вызванными током холостого хода, и диэлектрическими потерями в изоляции пренебрегаем.

$$P_0 = 1,03 \dots 1,13 \left[1,07 \dots 1,17 \times \right. \\ \left. \times \left(p_{\text{с}} G_{\text{с}} + p_{\text{я}} G'_{\text{я}} - 4 p_{\text{я}} G_{\text{у}} + \frac{p_{\text{с}} + p_{\text{я}}}{2} k_{\text{пу}} \left(\frac{G_{\text{ус}} + G_{\text{уя}}}{2} \right) \right) + \sum n_3 p_3 \Pi_3 \right],$$

где $p_{\text{с}}$ и $p_{\text{я}}$ – удельные потери в стали стержня и ярма; определяются по табл. 6.1 для индукций (см. п. 6.4 и 6.5); $k_{\text{пу}}$ – коэффициент увеличения потерь в углах, определяется по табл. 6.2 для выбранной формы стыка; $\sum p_3 \Pi_3$ – сумма потерь в шести стыках выбранной формы; p_3 – удельные потери в стыке, определяются по $B_{\text{с}}$ (п. 6.4) при прямом стыке и по $B_{\text{с}} / \sqrt{2}$ при косом стыке; $\Pi_3 = \Pi_{\text{с}}$ при прямом стыке и $\Pi_3 = \sqrt{2} \Pi_{\text{с}}$ при косом стыке.

При пересчете удельных потерь $p_{\text{с}}$, $p_{\text{я}}$, p_3 на индукцию B , не совпадающую с табличными значениями $B_{\text{т}}$, $p_{\text{ст}}$, $p_{\text{ят}}$, $p_{\text{зт}}$, выполняется интерполяция степенной функцией:

$$p_{\text{с}}, p_{\text{я}}, p_3 = p_{\text{ст}}^{\text{н}}, p_{\text{ят}}^{\text{н}}, p_{\text{зт}}^{\text{н}} \left(\frac{B}{B_{\text{т}}^{\text{н}}} \right)^n,$$

где $n = \frac{\log p_{\text{т}}^{\text{в}} / p_{\text{т}}^{\text{н}}}{\log B_{\text{т}}^{\text{в}} / B_{\text{т}}^{\text{н}}}$; $p_{\text{т}}^{\text{в}}$ и $p_{\text{т}}^{\text{н}}$ – большее и меньшее значения соот-

ветствующих удельных потерь, выбираемые по таблице для большего и меньшего значений индукции, выбираемых по таблице того интервала, в который попадает расчетная индукция B . Степень n при пересчете потерь в стали $p_{\text{с}}$, $p_{\text{я}}$ лежит в пределах $2 \dots 3$, при пересчете потерь в стыке – $2.2 \dots 2$.

Меньшие значения коэффициентов (1,03, 1,07) соответствуют более сложной технологии изготовления магнитопровода (снятие заусенцев, отжиг листов и т.п.), большие значения (1,13; 1,17) – более простому технологическому процессу.

Влиять на потери холостого хода можно выбором марки стали (см. табл. 6.1), толщиной листов стали и технологическими факторами.

Потери холостого хода должны отличаться от заданных в пределах

$$\left| \frac{P_{\text{хр}} - P_{\text{х}}}{P_{\text{х}}} 100 \% \right| \leq 7,5 \% .$$

6.10. Ток холостого хода. Ток первичной обмотки трансформатора, возникающий в случае холостого хода при номинальном синусоидальном напряжении и номинальной частоте, называется током холостого хода.

Расчет намагничивающего тока в трансформаторах выполняют по полной намагничивающей мощности, учитывающей как активную, так и реактивную составляющие:

$$Q_{\text{х}} = 1,03...1,13 \left[1,18...1,56 \left(G_{\text{с}} q_{\text{с}} + G_{\text{я}} q_{\text{я}} - 4 q_{\text{я}} G_{\text{у}} + \left(\frac{q_{\text{с}} + q_{\text{я}}}{2} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\frac{G_{\text{ус}} + G_{\text{уя}}}{2} \right) \right) k_{\text{гу}} k_{\text{тпл}} + \sum n_3 q_3 \Pi_3 \right],$$

где $q_{\text{с}}$ и $q_{\text{я}}$ – полные удельные намагничивающие мощности в стержнях и ярме, определяются по табл. 6.3 для индукций (см. п. 6.4 и 6.5); $k_{\text{гу}}$ – коэффициент увеличения намагничивающей мощности в углах; определяется по табл. 6.4 для формы стыка, выбранного при расчете потерь холостого хода; $k_{\text{тпл}}$ – коэффициент увеличения намагничивающей мощности в углах в зависимости от размеров пластин:

$$k_{\text{тпл}} \cong 2,325 - 3,25 d_{\text{н}} \cos[3.875 B_{\text{с}} - 1,5] \cos[\pi 0,3 - d_{\text{н}}];$$

$\sum n_3 q_3 \Pi_3$ – намагничивающая мощность стыков; q_3 – удельная полная намагничивающая мощность зазора стыка, определяется по $B_{\text{с}}$ для прямых стыков при $\Pi_3 = \Pi_{\text{с}}$ и по $B_{\text{с}} / \sqrt{2}$ для косых стыков при $\Pi_3 = \sqrt{2} \Pi_{\text{с}}$.

Таблица 6.1

Удельные потери в стали p и в зоне шихтованного стыка p_z для холоднокатаной стали марок 3404 и 3405 по ГОСТ 21427–83 и для стали иностранного производства марок М6Х и М4Х толщиной 0,35; 0,30; 0,28 мм при различных значениях индукции и $f = 50$ Гц

B , Тл	p , Вт/кг				p_z , Вт/м ²	
	3404, 0,35 мм	3404, 0,30 мм	3405, 0,30 мм	М4Х, 0,28 мм	одна пластина	две пластины
0,20	0,028	0,025	0,023	0,018	25	30
0,40	0,093	0,090	0,085	0,069	50	70
0,60	0,190	0,185	0,130	0,145	100	125
0,80	0,320	0,300	0,280	0,245	170	215
1,00	0,475	0,450	0,425	0,370	265	345
1,20	0,675	0,635	0,610	0,535	375	515
1,22	0,697	0,659	0,631	0,555	387	536
1,24	0,719	0,683	0,652	0,575	399	557
1,26	0,741	0,707	0,673	0,595	411	578
1,28	0,763	0,731	0,694	0,615	423	589
1,30	0,785	0,755	0,715	0,635	435	620
1,32	0,814	0,779	0,739	0,658	448	642
1,34	0,843	0,803	0,763	0,681	461	664
1,36	0,872	0,827	0,787	0,704	474	686
1,38	0,901	0,851	0,811	0,727	497	708
1,40	0,930	0,875	0,835	0,750	500	730
1,42	0,964	0,906	0,860	0,778	514	754
1,44	0,998	0,937	0,869	0,806	526	778
1,46	1,032	0,968	0,916	0,834	542	802
1,48	1,066	0,999	0,943	0,862	556	826
1,50	1,100	1,030	0,970	0,890	570	850
1,52	1,134	1,070	1,004	0,926	585	878
1,54	1,168	1,110	1,038	0,962	600	906
1,56	1,207	1,150	1,074	1,000	615	934
1,58	1,251	1,190	1,112	1,040	630	962
1,60	1,295	1,230	1,150	1,080	645	990
1,62	1,353	1,278	1,194	1,132	661	1017
1,64	1,411	1,326	1,238	1,184	677	1044
1,66	1,472	1,380	1,288	1,244	695	1071

Примечания.

1. Удельные потери для стали марки 3405 толщиной 0,35 принимать по графе для стали 3404 толщиной 0,30 мм.

2. Удельные потери для стали М6Х толщиной 0,35 мм принимать по графе для стали 3404 той же толщины.

Таблица 6.2

Значения коэффициента $k_{\text{пу}}$ для разных вариантов формы стыков

Форма стыка		$k_{\text{пу}}$
прямой	косой	
6	–	13,13
2	4	10,45
–	6	8,75

Таблица 6.3

Полная удельная намагничивающая мощность в стали q и в зоне шихтованного стыка q_s для холоднокатаной стали марок 3404 и 3405 толщиной 0,35 и 0,30 мм при различных значениях индукции и $f = 50$ Гц

B , Тл	Марка стали и ее толщина				q_s , В·А/м ²	
	3404, 0,35 мм	3404, 0,30 мм	3405, 0,35 мм	3405, 0,30 мм	3404	3405
0,20	0,040	0,040	0,039	0,038	40	40
0,40	0,120	0,117	0,117	0,115	80	80
0,60	0,234	0,230	0,227	0,223	140	140
0,80	0,375	0,371	0,366	0,362	280	280
1,00	0,548	0,540	0,533	0,525	1000	900
1,20	0,752	0,742	0,732	0,722	4000	3700
1,22	0,782	0,768	0,758	0,748	4680	4160
1,24	0,811	0,793	0,783	0,773	5360	4620
1,26	0,841	0,819	0,809	0,799	6040	5080
1,28	0,870	0,844	0,834	0,824	6720	5540
1,30	0,900	0,870	0,860	0,850	7400	6000
1,32	0,932	0,904	0,892	0,880	8200	6640
1,34	0,964	0,938	0,924	0,910	9000	7280
1,36	0,996	0,972	0,956	0,940	9800	7920
1,38	1,028	1,006	0,988	0,970	10600	8560
1,40	1,060	1,040	1,020	1,000	11400	9200
1,42	1,114	1,089	1,065	1,041	12440	10120
1,44	1,168	1,139	1,110	1,082	13480	11040
1,46	1,222	1,188	1,156	1,123	14520	11960
1,48	1,276	1,238	1,210	1,161	15560	12880
1,50	1,330	1,289	1,246	1,205	16600	13800
1,52	1,408	1,360	1,311	1,263	17960	14760

B , Тл	Марка стали и ее толщина				q_3 , В·А/м ²	
	3404, 0,35 мм	3404, 0,30 мм	3405, 0,35 мм	3405, 0,30 мм	3404	3405
1,54	1,486	1,431	1,376	1,321	19320	15720
1,56	1,575	1,511	1,447	1,383	20700	16800
1,58	1,675	1,600	1,524	1,449	22100	18000
1,60	1,775	1,688	1,602	1,526	23500	19200
1,62	1,958	1,850	1,748	1,645	25100	20480
1,64	2,131	2,012	1,894	1,775	26700	21760
1,66	2,556	2,289	2,123	1,956	28600	23160

Примечание. В двух последних графах приведена удельная намагничивающая мощность q_3 в зоне шихтованного стыка при шихтовке слоями в две пластины. При шихтовке в одну пластину данные q_3 , полученные из таблицы, умножить на 0,82 для стали марки 3404 и на 0,78 – марки 3405.

Таблица 6.4

Коэффициент увеличения намагничивающей мощности

Форма стыка		$k_{\text{ты}}$
прямой	косой	
6	—	64,7
2	4	41
—	6	27,95

При пересчете удельной намагничивающей мощности q_c , q_y , q_3 на индукцию B , не совпадающую с табличными значениями B_T , q_{CT} , $q_{\text{ЯТ}}$, $q_{\text{ЗТ}}$, выполняется интерполяция степенной функцией

$$q_c, q_y, q_3 = q_{\text{CT}}^H, q_{\text{ЯТ}}^H, q_{\text{ЗТ}}^H \left(\frac{B}{B_T^H} \right)^n,$$

где $m = \frac{\log q_T^B / q_T^H}{\log B_T^B / B_T^H}$; q_T^B , q_T^H – большее и меньшее значения таблич-

ных удельных намагничивающих мощностей для большего и меньшего табличных значений индукции в интервале, в который попадает расчетная индукция B . Степень m при пересчете удельной намагничи-

вающей мощности стали лежат в диапазоне 3...18, при пересчете удельной намагничивающей мощности в стыке – в диапазоне 4...76. Меньшие значения коэффициентов (1,03; 1,18) соответствуют более сложной технологии изготовления магнитопровода, бóльшие (1,13; 1,56) – более простой.

Относительное значение тока холостого хода в процентах номинального тока:

$$J_{xp} = \frac{Q_x}{10S_H \cdot 10^{-3}}.$$

Допустимое отклонение:

$$\frac{J_{xp} - J_x}{J_x} 100 \% \leq 0... + 15 \%.$$

7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРА

Изменение тока нагрузки трансформатора вызывает изменение падения напряжения и потерь активной мощности в его обмотках, что приводит к изменению вторичного напряжения и КПД трансформатора.

7.1. Кривая процентного изменения напряжения при номинальном токе ($k_{нг} = 1$) в зависимости от коэффициента мощности $\Delta U \% = f(\cos \varphi_2)$:

$$\Delta U \% = k_{нг} (U_a \% \cos \varphi_2 + U_p \% \sin \varphi_2) + \frac{k_{нг}^2 (U_p \% \cos \varphi_2 - U_a \% \sin \varphi_2)^2}{200},$$

где $k_{нг} = I_{2ф} / I_{2фн}$ – коэффициент нагрузки.

Результаты расчета сводятся в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Характеристика $\Delta U = f(\cos \varphi_2)$

φ_2	-90°	-60°	-30°	-15°	0	$+15^\circ$	$+30^\circ$	$+60^\circ$	$+90^\circ$
$\sin \varphi_2$	-1	-0,866	-0,5	-0,259	0	0,29	0,5	0,866	1
$\cos \varphi_2$	0	0,5	0,866	0,966	1	0,966	0,866	0,5	0
$\Delta U \%$									

Значение $\cos \varphi_2$, при котором ΔU принимает максимальное значение, определяется по разд. 5 расчета.

7.2. Внешние характеристики $U_2 = f(k_{\text{нг}})$ при $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$ строятся в одних осях.

Данные расчета сводятся в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Внешние характеристики

$k_{\text{нг}}$		0	0,25	0,5	0,8	1	1,1
$\Delta U\%$	$\cos \varphi_2 = 1$	0					
$U_2 = 100 - \Delta U\%$		100					
$\Delta U\%$	$\cos \varphi_2 = 0,8$	0					
$U_2 = 100 - \Delta U\%$		100					

7.3. Характеристики КПД $\eta = f(k_{\text{нг}})$ при $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$ строятся в одних осях.

$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{xp}} + k_{\text{нг}}^2 P_{\text{кр}}}{k_{\text{нг}} S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + P_{\text{xp}} + k_{\text{нг}}^2 P_{\text{кр}}}.$$

Данные расчета сводятся в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Характеристики КПД $\eta = f(k_{\text{нг}})$

$k_{\text{нг}}$	0	0,25	0,5	1	1,1
$\eta, \cos \varphi_2 = 1$					
$\eta, \cos \varphi_2 = 0,8$					

При определенном значении $k_{\text{нг}}$ КПД трансформатора достигает максимального значения:

$$k_{\text{нг max}} = \sqrt{\frac{P_{\text{xp}}}{P_{\text{кр}}}}.$$

Следует определить величину $k_{\text{нг max}}$ и значение η_{max} при $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$ для заданных и полученных в расчете потерь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Петров Г.Н.* Электрические машины – В 2 ч. Ч. 1: Введение, Трансформаторы. – Изд. 3-е перераб. – М.: Энергия, 1974.
2. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины. – Изд. 2-е. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. (М.: Энергия 1980).
3. *Тихомиров П.М.* Расчет трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 2: Электротехнические изделия – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 518 с. Т. 2. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. ГОСТ 16110–82. Трансформаторы силовые. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1982.
6. ГОСТ 11677–85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
7. ГОСТ 11920–85. Трансформаторы масляные общего назначения классов напряжения до 35 кВ включительно. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
8. ГОСТ 12965–85 Трансформаторы масляные общего назначения классов напряжения 110 и 150 кВ включительно. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
9. ГОСТ 17544–85 Трансформаторы масляные общего назначения классов напряжения 220, 330, 500 и 750 кВ включительно. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
10. ГОСТ 14209–85. Трансформаторы масляные общего назначения классов напряжения. Допустимые нагрузки. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
11. *Сергиенков Б.Н.* Электрические машины. трансформаторы / Б.Н. Сергиенков, В. М. Киселев, Н. А. Акимова. – М.: Высш. шк., 1989.
- Тюков В.А.* Электрические машины. Трансформаторы / В.А. Тюков, Э.Е. Савилова, З.С. Темлякова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002.

Приложение 1

Площади сечения стержня $\Pi_{ф,с}$ и ярма $\Pi_{ф,я}$ и объем угла V_y плоской шихтованной магнитной системы без прессующей пластины

$d, \text{ м}$	$\Pi_{ф,с}, \text{ см}^2$	$\Pi_{ф,я}, \text{ см}^2$	$V_y, \text{ см}^3$	$d, \text{ м}$	$\Pi_{ф,с}, \text{ см}^2$	$\Pi_{ф,я}, \text{ см}^2$	$V_y, \text{ см}^3$
0,08	43,3	44,8	280,8	0,17	208,5	214,1	2908
0,085	50,8	51,6	356,4	0,18	232,8	237,6	3452
0,095	56,7	58,2	426,4	0,19	262,8	267,3	4118
0,09	62,9	63,7	488,0	0,20	288,4	296,2	4811
0,10	72,0	73,2	596,8	0,21	319,2	327,2	5680
0,105	79,3	80,1	683,0	0,22	353,0	360,5	6460
0,11	86,2	89,7	790,2	0,23	387,7	394,0	7482
0,115	93,9	95,4	812,8	0,24	419,3	425,6	8428
0,12	104,9	106,5	1050	0,25	456,2	462,6	9532
0,125	112,3	115,3	1194	0,26	490,6	507,1	10746
0,13	121,9	124,9	1299	0,27	532,6	543,4	12018
0,14	141,5	144,0	1620	0,28	570,9	591,1	13738
0,15	161,7	165,9	2040	0,29	612,4	622,8	14858
0,16	183,5	188,3	2470	0,30	657,2	675,2	16556

Примечание. Данные, найденные по таблице для сухого трансформатора, при $d = 0,24...0,26$ м умножить на 0,82 (один канал охлаждения в магнитопроводе); при $d = 0,28...0,3$ м умножить на 0,8 (два канала).

Остов с закрепленными обмотками

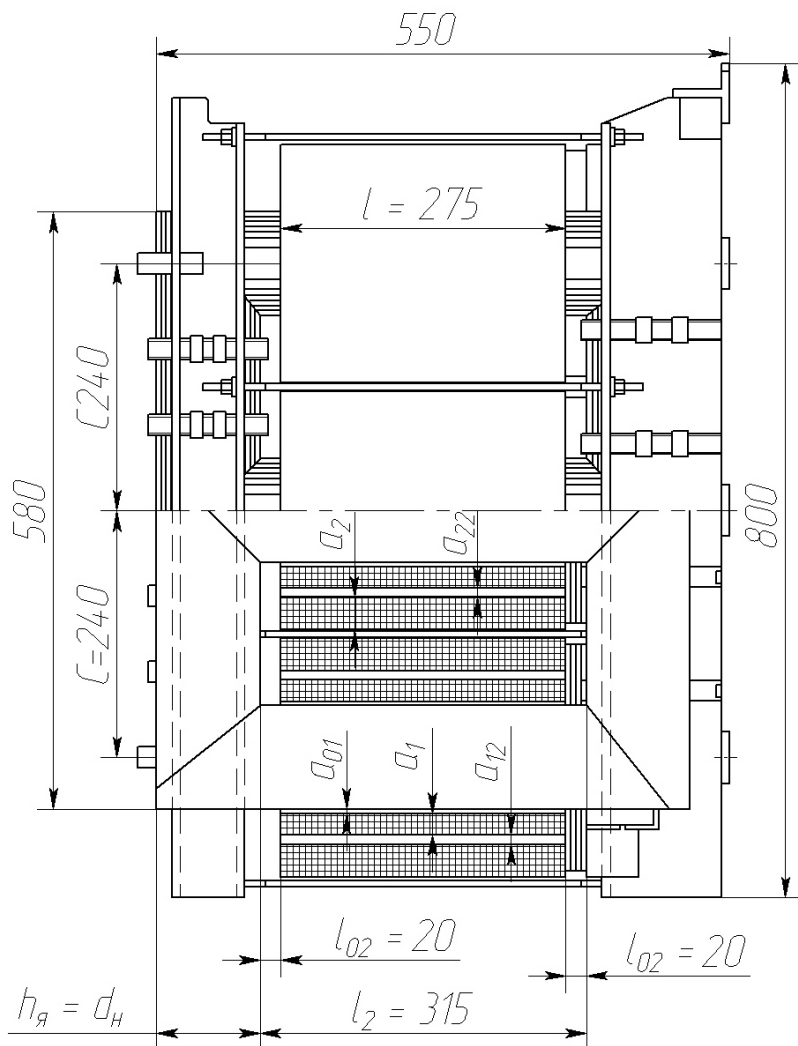


Рис. III.1

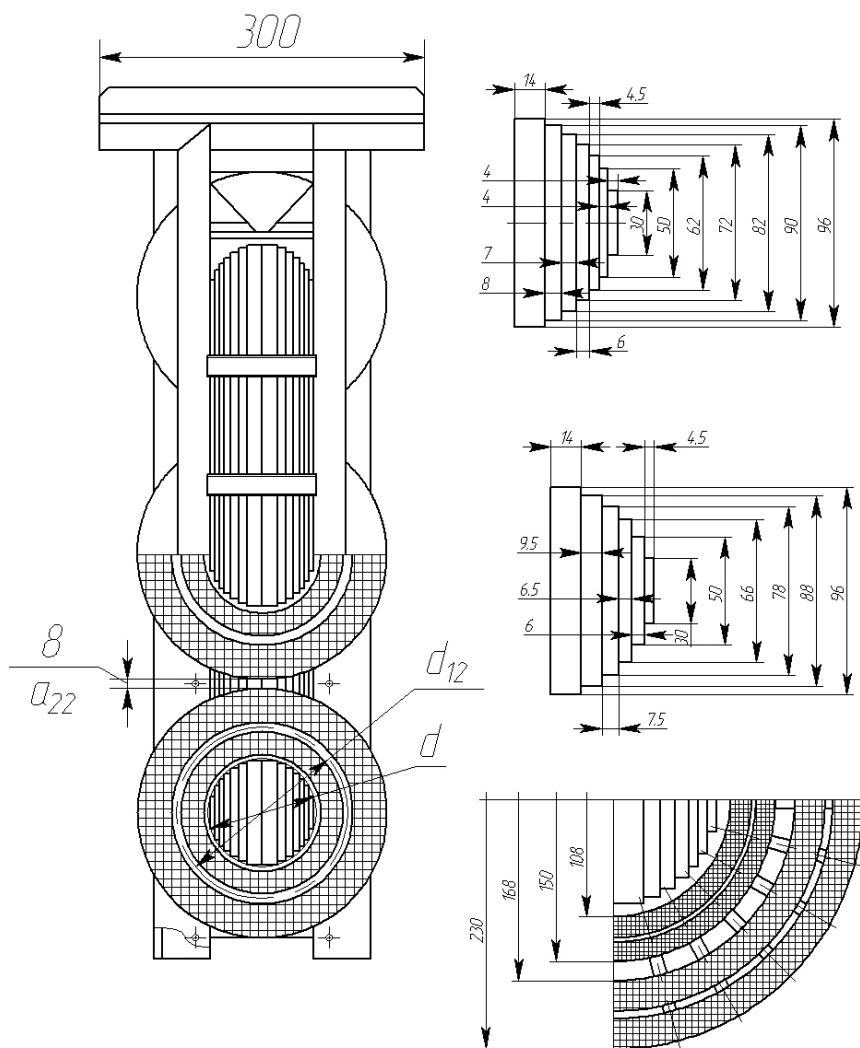


Рис. III.2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Методические указания

Редактор *Т.П. Петроченко*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Компьютерная верстка *В.Ф. Ноздрева*

Подписано в печать 11.11.2009. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экз.
Уч.-изд. л. 2,79. Печ. л. 3,0. Изд. № 180. Заказ № . Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20