

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**РЕМОНТ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.
ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по аграрному техническому образованию в качестве
учебно-методического пособия для студентов учреждений
высшего образования по направлению специальности
1-74 06 05-01 «Энергетическое обеспечение
сельского хозяйства (электроэнергетика)»*

Минск
БГАТУ
2022

УДК 621.31(07)
ББК 31.28я7
Р37

Составители:
старший преподаватель *О. Ю. Селицкая*,
старший преподаватель *Е. А. Сакович*,
ассистент *Е. В. Трешко*

Рецензенты:
кафедра «Электроснабжение»
Белорусского национального технического университета
(кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой *В. Б. Козловская*);
кандидат технических наук, доцент,
заместитель директора РНПУП «Институт энергетики
НАН Беларуси» *Н. Е. Шевчик*

Ремонт электрооборудования. Практикум : учебно-методическое
Р37 пособие / сост.: О. Ю. Селицкая, Е. А. Сакович, Е. В. Трешко. –
Минск : БГАТУ, 2022. – 184 с.
ISBN 978-985-25-0165-1.

Включает в себя общие теоретические сведения и практические задания, связанные с расчетами электрооборудования при ремонте, с примерами их выполнения, а также содержит все необходимые справочные данные для решения практических задач.

Предназначено для студентов учреждений высшего образования по направлениям специальностей: 1-74 06 05-01 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика)»; 1-53 01 01-09 «Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство)».

УДК 621.31(07)
ББК 31.28я7

ISBN 978-985-25-0165-1

© БГАТУ, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Обмер магнитопровода трехфазного электродвигателя и обработка полученных данных	5
2. Схемы статорных обмоток электрических машин переменного тока.....	20
3. Схемы концентрических статорных обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей	46
4. Расчет числа витков в обмотке одной фазы и одной секции.....	56
5. Выбор марки и расчет сечения обмоточного провода. Определение параметров обмотки.....	78
6. Расчет номинальных данных трехфазного асинхронного электродвигателя	91
7. Пересчет трехфазного асинхронного электродвигателя на параметры, отличные от номинальных	101
8. Обмер магнитопровода трансформатора. Обработка данных обмера магнитопровода трансформатора и определение его рациональной нагрузки	116
9. Расчет оптимального числа витков обмоток и определение их конструктивных размеров для трехфазного трансформатора с естественным масляным охлаждением	140
Список литературы.....	167
Приложения	169

ВВЕДЕНИЕ

При изучении учебной дисциплины «Ремонт электрооборудования» студенты агроэнергетического факультета направлений специальности 1-74 06 05-01 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика)» и 1-53 01 01-09 «Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство)» на практических занятиях должны освоить расчеты обмоток трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и силовых трансформаторов, которые выполняются при ремонте.

При расчете обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей рассматриваются следующие вопросы:

- обмер магнитопровода трехфазного асинхронного электродвигателя и обработка полученных данных;
- схемы статорных обмоток электрических машин переменного тока;
- схемы концентрических статорных обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей;
- расчет числа витков в обмотке одной фазы и одной секции;
- выбор марки и расчет сечения обмоточного провода. Определение параметров обмотки;
- расчет номинальных данных трехфазного асинхронного электродвигателя;
- пересчет трехфазного асинхронного электродвигателя на параметры, отличные от номинальных.

При расчете обмоток трехфазных трансформаторов рассматриваются темы:

- обработка данных обмера магнитопровода трансформатора и определение его рациональной магнитной нагрузки;
- расчет оптимального числа витков обмоток и определение их конструктивных размеров.

Целью практических занятий является освоение методик расчетов трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и силовых трансформаторов, а также закрепление теоретического материала курса.

1. ОБМЕР МАГНИТОПРОВОДА ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Цель работы: уметь выполнять все необходимые расчеты, связанные с методикой обмера магнитопровода трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором для упрощения расчетов обмотки электрической машины, включающие определение площадей по участкам магнитной цепи.

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомиться с основными размерами магнитопровода, конфигурацией профилей пазов и техническими условиями потребителя (заказчика).

2. Рассчитать три площади, необходимые для расчета магнитных нагрузок:

- площадь полюса в воздушном зазоре (Q_{δ} , м²);
- площадь полюса в зубцовой зоне статора (Q_z , м²);
- площадь поперечного сечения спинки статора (Q_c , м²).

3. Рассчитать площадь паза в свету (Q_{II} , мм²) для определения сечения обмоточного провода.

Общие теоретические сведения

Расчет обмотки асинхронного двигателя начинают с обмера магнитопровода ремонтируемой машины (рис. 1.1). Измерения выполняются с помощью линеек, штангенциркулей, угольников и других приспособлений. При этом определяются следующие данные:

D – внутренний диаметр сердечника статора, мм;

D_a – внешний диаметр сердечника статора, мм;

l – полная длина сердечника статора, мм;

Z – число пазов (зубцов), шт.;

δ – толщина листов стали, мм;

род изоляции, которая укладывается между листами электро-технической стали, выбирается по заданию.

Вместе с размерами магнитопровода асинхронного двигателя для расчета обмотки необходимо знание технических условий потребителя (заказчика), в которые входят:

n – частота вращения магнитного поля статора, мин⁻¹;

U_{ϕ} – фазное напряжение обмотки статора, В;

f – частота тока, Гц;

Y/Δ – схема соединения фазных обмоток (звезда/треугольник).

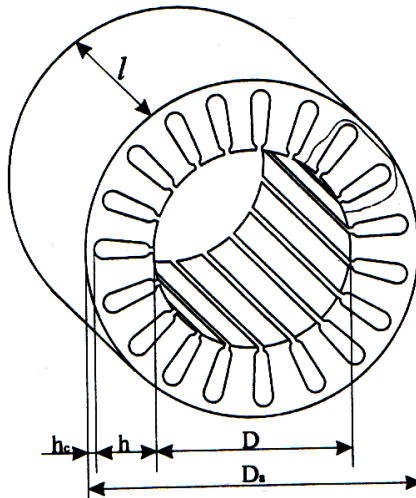


Рис. 1.1. Магнитопровод трехфазного асинхронного электродвигателя

Для определения сечения обмоточного провода необходимо знать площадь паза. Причем профиль его может быть самой различной конфигурации (рис. 1.2). В зависимости от сложности конфигурации паз осевыми линиями делится на простые геометрические фигуры, площадь которых определить несложно, а общая площадь паза равна сумме найденных простых площадей.

Например, профиль паза 1 (рис. 1.2) осевыми линиями разделяется на площади следующих пяти фигур: полуокружности с диаметром b' , трапеции с основаниями b и b' , прямоугольника с шириной r и длиной $(b - 2 \cdot r)$, двух четвертей окружности с радиусом r .

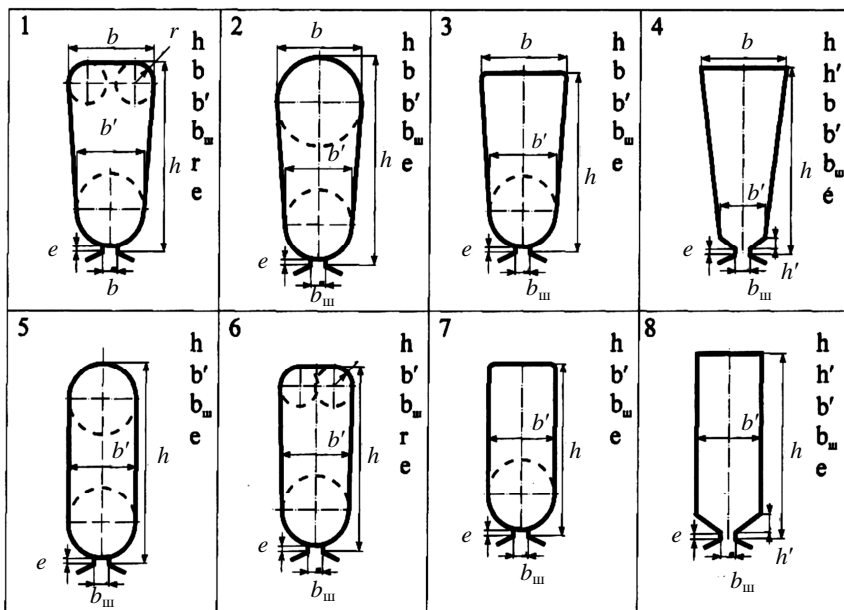


Рис. 1.2. Наиболее употребляемые профили пазов магнитопроводов трехфазных асинхронных машин:

b – больший размер ширины паза, мм; b' – меньший размер ширины паза, мм;

$b_{\text{ш}}$ – ширина шлица паза, мм; h – полная высота паза, мм;

e – высота усика паза, мм; r – радиус закругления углов, мм;

h' – высота трапеции. В профилях 5–8 размеры b и b' равны ($b = b'$)

В целях упрощения выполнения расчетов обмотки асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором проводится обработка полученных выше результатов измерений.

Методика выполнения задания

Площадь полюса в воздушном зазоре

В воздушном зазоре сопротивление магнитному потоку по всей площади равномерное, следовательно

$$Q_{\delta} = \tau l_p, \quad (1.1)$$

где τ – полюсное деление (ширина полюса в воздушном зазоре), м:

$$\tau = \frac{\pi D}{2P}, \quad (1.2)$$

где P – количество пар полюсов, шт.:

$$P = \frac{60f}{n}; \quad (1.3)$$

l_p – расчетная длина сердечника статора (без дополнительных поперечных каналов для его охлаждения), мм:

$$l_p = l - l_k n_k, \quad (1.4)$$

где l – полная длина магнитопровода, м;

l_k и n_k – ширина поперечных каналов (м) и их число соответственно; если каналов нет $l_p = l$.

Площадь полюса в зубцовой зоне статора

В зубцовой зоне статора магнитный поток протекает только по листам электротехнической стали, так как ее магнитная проницаемость μ много больше, чем изоляции. Следовательно, длина магнитопровода l , а значит, и площадь полюса Q_z , сократятся (на площадь, занимаемую изоляцией).

Отсюда Q_z будет равна произведению активной площади зубца на количество зубцов в полюсе, м²:

$$Q_z = Q_{IZ} \cdot N_z, \quad (1.5)$$

где Q_{IZ} – площадь одного зубца, м²;

N_z – количество зубцов под полюсом, шт.

$$Q_{IZ} = l_a \cdot b_z, \quad (1.6)$$

где l_a – активная длина магнитопровода (без изоляции листов), м;

b_z – расчетная средняя ширина зубца, м;

$$l_a = K_c \cdot l_p, \quad (1.7)$$

где K_c – коэффициент, учитывающий заполнение пакета магнитопровода сталью, зависящий от рода изоляции и толщины листов стали (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Коэффициенты заполнения листов магнитопровода сталью

Толщина листов стали статора δ , мм	Род изоляции, K_c	
	Лак	Оксидная пленка
0,50	0,93	0,95
0,35	0,90	0,93

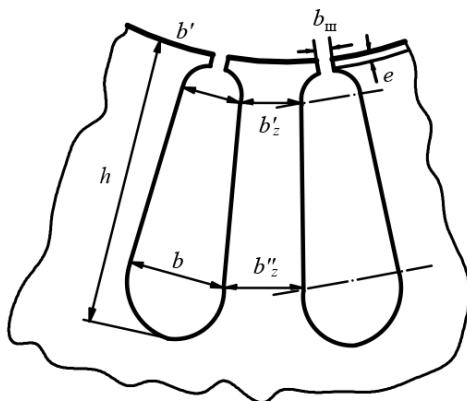


Рис. 1.3. Эскиз зубца магнитопровода асинхронного двигателя

Средняя ширина зуба определяется из выражения, м:

$$b_z = \frac{1}{3}(2b'_z + b''_z), \quad (1.8)$$

где b'_z и b''_z – ширина зуба в узком и широком местах соответственно, м.

Где находится узкое (b'_z) и где широкое (b''_z) место у профиля зуба (рис. 1.3), зависит от размеров магнитопровода и формы паза, поэтому вначале находятся размеры зуба у расточки статора b^* , а затем у его основания b^{**} .

Ширина зуба у расточки, м:

$$b_z^* = \frac{\pi(D + 2e + b')}{Z} - b'. \quad (1.9)$$

Ширина зуба у основания, м:

$$b_z^{**} = \frac{\pi(D + 2h) - b}{Z} - b. \quad (1.10)$$

По полученным значениям величин b^* и b^{**} находят: ширину зубца в узком месте (b_z') и в широком (b_z'').

Количество зубцов под полюсом определяется из выражения, шт.:

$$N_z = \frac{Z}{2P}. \quad (1.11)$$

Площадь магнитопровода в спинке статора

Площадь спинки статора, перпендикулярная магнитному потоку Q_C , равна произведению ее высоты h_C на активную длину магнитопровода l_a , м²:

$$Q_C = h_C l_a, \quad (1.12)$$

где

$$h_C = \frac{D_a - (D + 2h)}{2}. \quad (1.13)$$

Площадь паза в свету

Площадь паза в свету Q_{Π} , мм², требуется знать при расчете сечения обмоточного провода.

В зависимости от профиля пазов магнитопроводов, приведенных на рис. 1.2, после разбивки их площадей осевыми линиями на простые фигуры (по вышеприведенному примеру) для определения указанных площадей можно воспользоваться предназначенными для этого выражениями.

Профиль 1:

$$Q_{\Pi} = Q_{b'} + Q_{\Gamma} + Q_{np} + Q_r, \quad (1.14)$$

где $Q_{b'}$ – площадь полуокружности с диаметром b' , который равен меньшему размеру ширины паза, мм²:

$$Q_{b'} = \frac{\pi \cdot (b')^2}{8}; \quad (1.15)$$

Q_T – площадь трапеции, мм², с основаниями b и b' , высотой h_T , мм:

$$h_T = h - e - \frac{b'}{2} - r, \quad (1.16)$$

тогда

$$Q_T = \frac{b' + b}{2} h_T; \quad (1.17)$$

Q_{np} – площадь прямоугольника, мм²:

$$Q_{np} = (b - 2r)r; \quad (1.18)$$

Q_r – площадь четверти окружностей закругления паза на углах с радиусами r , мм²:

$$Q_r = \frac{\pi r^2}{4}. \quad (1.19)$$

Окончательно для профиля 1 формула площади паза в свету имеет вид, мм²:

$$Q_{II} = \frac{\pi (b')^2}{8} + \frac{b' + b}{2} h_T + (b - 2r)r + 2 \frac{\pi r^2}{4}. \quad (1.20)$$

Аналогично получены формулы площадей пазов для остальных профилей пазов (см. рис. 1.2).

Профиль 2:

$$Q_{II} = \frac{\pi (b')^2}{8} + \frac{b' + b}{2} h_T + \frac{\pi b^2}{8}, \quad (1.21)$$

где h_T – высота трапеции, мм²:

$$h_T = h - e - \frac{b}{2} - \frac{b'}{2}. \quad (1.22)$$

Профиль 3:

$$Q_{II} = \frac{\pi(b')^2}{8} + \frac{b'+b}{2}h_T, \quad (1.23)$$

где h_T – высота трапеции, мм²:

$$h_T = h - e - \frac{b'}{2}. \quad (1.24)$$

Профиль 4:

$$Q_{II} = \frac{(b_{ш} + b')}{2}h' + \frac{b'+b}{2}(h - e - h'). \quad (1.25)$$

Профиль 5:

$$Q_{II} = \frac{\pi(b')^2}{8} + b' \left(h - e - 2\frac{b'}{2} \right) + \frac{\pi(b')^2}{8}. \quad (1.26)$$

Профиль 6:

$$Q_{II} = \frac{\pi(b')^2}{8} + b' \left(h - e - 2\frac{b'}{2} - r \right) + r(b' - 2r) + 2\frac{\pi r^2}{4}. \quad (1.27)$$

Профиль 7:

$$Q_{II} = \frac{\pi(b')^2}{8} + b' \left(h - e - \frac{b'}{2} \right). \quad (1.28)$$

Профиль 8:

$$Q_{II} = \frac{(b_{ш} + b')}{2}h' + b'(h - e - h'). \quad (1.29)$$

Задание для самостоятельного расчета

Задание. Определить площади магнитной цепи (см. рис. 1.1) и паза магнитопровода трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (см. рис. 1.2), профиль 2.

Данные для самостоятельного расчета взять из табл. 1.2 в соответствии с вариантом, заданным преподавателем.

Пример выполнения задания. Данные обмера магнитопровода и паза свести в таблицу.

Значения параметров магнитопровода

№ варианта	D , м м	D_a мм	l , мм	Z , шт.	b , мм	b' , мм	$b_{ш}$, мм	h , мм	e , мм	Q , мм	Род изоляции
	110	191	125	24	12,6	10,5	3,5	15,1	0,5	0,35	Лак

Технические условия заказчика

n , мин ⁻¹	U_{ϕ} , В	f^* , Гц	Схема соединения обмоток
3000	220	50	Y/Δ

Решение:

1. Определяем площадь полюса в воздушном зазоре Q_{δ} .

Для этого находим:

– количество пар полюсов по выражению (1.3):

$$P = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1 \text{ шт.}$$

Следовательно, количество полюсов будет $2P = 2 \cdot 1 = 2$ шт.;

– полюсное деление (ширину полюса в воздушном зазоре) по выражению (1.2):

$$\tau = \frac{\pi D}{2P} = \frac{3,14 \cdot 0,11}{2} = 0,173 \text{ м;}$$

– расчетную длину сердечника статора (так как поперечные каналы для охлаждения магнитопровода отсутствуют):

$$l_p = l = 0,125 \text{ м.}$$

Площадь полюса в воздушном зазоре по формуле (1.1):

$$Q_\delta = \tau l_p = 0,173 \cdot 0,125 = 0,0216 \text{ м}^2.$$

2. Определяем площадь полюса в зубцовой зоне Q_Z . Для этого находим:

– активную длину магнитопровода. По табл. 1.1 определяем, что при $\delta = 0,35$ мм и изоляции между листами электротехнической стали – лак, коэффициент K_c будет равен 0,9, тогда по формуле (1.7):

$$l_a = K_c l_p = 0,9 \cdot 0,125 = 0,1125 \text{ м;}$$

– ширину зуба у расточки сердечника АД, по выражению (1.9), рис. 1.3:

$$\begin{aligned} b_z^* &= \frac{\pi(D + 2e + b')}{Z} - b' = \\ &= \frac{3,14 \cdot (0,11 + 2 \cdot 0,0005 + 0,0105)}{24} - 0,0105 = 0,0054 \text{ м;} \end{aligned}$$

– ширину зуба у основания сердечника АД, по выражению (1.10):

$$\begin{aligned} b_z^{**} &= \frac{\pi(D + 2h) - b}{Z} - b = \\ &= \frac{3,14 \cdot (0,11 + 2 \cdot 0,0151) - 0,0126}{24} - 0,0126 = 0,0041 \text{ м;} \end{aligned}$$

– среднюю ширину зуба b_z . Из выполненных расчетов зуба следует, что узкое его место будет у основания, а широкое – у расточки магнитопровода АД. Отсюда $b'_z = b_z^{**}$ и $b''_z = b_z^*$. Тогда, по выражению (1.8)

$$b_z = \frac{1}{3}(2b'_z + b''_z) = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot 0,0041 + 0,0054) = 0,0045 \text{ м;}$$

– площадь одного зуба магнитопровода по выражению (1.6):

$$Q_{Iz} = l_a b_z = 0,1125 \cdot 0,0045 = 0,00051 \text{ м}^2;$$

– количество зубцов под одним полюсом по выражению (1.11):

$$N_z = \frac{Z}{2P} = \frac{24}{2 \cdot 1} = 12 \text{ шт.}$$

Площадь полюса в зубцовой зоне находим по формуле (1.5):

$$Q_z = Q_{Iz} N_z = 0,00051 \cdot 12 = 0,0061 \text{ м}^2.$$

3. Определяем площадь магнитопровода в спинке статора Q_c .

Для этого находим:

– высоту спинки статора по формуле (1.13), см. рис. 1.1:

$$h_c = \frac{D_a - (D + 2h)}{2} = \frac{0,191 - (0,11 + 2 \cdot 0,0151)}{2} = 0,0254 \text{ м.}$$

Тогда по формуле (1.12)

$$Q_c = h_c \cdot l_a = 0,0254 \cdot 0,1125 = 0,0029 \text{ м}^2.$$

4. Определяем площадь паза магнитопровода в свету Q_{II} для профиля 2 (см. рис. 1.2). Для этого сложную форму паза разделяем осевыми линиями на простые фигуры (две полуокружности и трапецию), отсюда находим:

– площадь полуокружности с диаметром b' :

$$Q_{b'} = \frac{\pi(b')^2}{8} = \frac{3,14 \cdot 10,5^2}{8} = 43,27 \text{ мм}^2;$$

– высоту трапеции:

$$h_T = h - e - \frac{b}{2} - \frac{b'}{2} = 15,1 - 0,5 - \frac{12,6}{2} - \frac{10,5}{2} = 3,05 \text{ мм};$$

– площадь трапеции:

$$Q_T = \frac{b' + b}{2} \cdot h_T = \frac{12,6 + 10,5}{2} \cdot 3,05 = 35,22 \text{ мм}^2;$$

– площадь полуокружности с диаметром b :

$$Q_b = \frac{\pi \cdot b^2}{8} = \frac{3,14 \cdot 12,6^2}{8} = 62,3 \text{ мм}^2.$$

Площадь паза в свету определяем по выражению (1.21):

$$Q_{\Pi} = Q_T + Q_{b'} + Q_b = 43,27 + 35,22 + 62,3 = 140,79 \text{ мм}^2.$$

В заключение выполненных расчетов площадей магнитной цепи следует провести анализ полученных результатов путем их сопоставления. Величина площади полюса в зубцовой зоне должна составлять примерно около половины ее площади в воздушном зазоре. В случае если частота вращения, заданная заказчиком, соответствует частоте вращения поля статора, на которую изначально был рассчитан асинхронный двигатель, тогда площадь полюса в зубцовой зоне не сильно отличается от двойной величины площади в спинке статора.

Контрольные вопросы

1. Какими основными габаритными размерами характеризуется магнитопровод?
2. Какие площади необходимы для расчета магнитных нагрузок?
3. Как определить площадь полюса в воздушном зазоре?
4. Как определить площадь полюса в зубцовой зоне статора?
5. Как определить площадь поперечного сечения спинки статора?
6. Как рассчитать площадь паза в свету?

Индивидуальные задания

Таблица 1.2

Исходные данные для расчета площадей: Q_{δ} , Q_Z , Q_C , Q_{Π}

Вариант	D , мм	D_a , мм	l , мм	Z	δ , мм	Род изоляции	n , мин ⁻¹	U_{ϕ} , В	f	h , мм	b , мм	b' , мм	$b_{ш}$, мм	e , мм	r , мм	h' , мм	Профиль
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	211	313	180	48	0,35	Оксидная пленка	3000	220	50	23,7	11,0	8,2	3,7	1,0			3
2	84	131	78	36	0,35	Без изоляции	1500	220	50	12,1	6,0	4,4	2,5	0,5	2,1		1
3	65	115	74	24	0,50	Оксидная пленка	1500	220	50	9,3	7,8	5,7	2,0	0,5		2,0	4
4	194	349	200	36	0,35	Лак	1500	220	50	28,2	12,7	12,7	4,0	1,0			7
5	61	100	56	24	0,50	Оксидная пленка	1500	220	50	10,4	6,5	4,7	2,0	0,5			3
6	113	168	110	36	0,35	Без изоляции	1000	220	50	15,4	6,4	6,4	3,0	0,5	1,0		6
7	84	149	100	24	0,35	Без изоляции	3000	220	50	12,6	10,1	8,1	3,5	0,5	2,2		1
8	158	225	160	48	0,50	Оксидная пленка	750	220	50	17,6	6,6	6,6	3,5	0,9		2,5	8
9	100	149	110	36	0,50	Оксидная пленка	3000	220	50	13,8	6,6	4,7	2,7	0,5			2
10	126	191	125	36	0,50	Лак	1500	220	50	14,3	8,2	6,4	3,5	0,5			3

Продолжение таблицы 1.2

Вариант	D , мм	D_a , мм	l , мм	Z	δ , мм	Род изоляции	n , мин ⁻¹	U_{ϕ} , В	f	h , мм	b , мм	b' , мм	$b_{ш}$, мм	e , мм	r , мм	h' , мм	Про- филь
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
11	232	437	200	48	0,50	Оксидная пленка	1500	220	50	32,3	12,7	8,7	4,0	1,0		2,7	4
12	54	100	50	24	0,50	Оксидная пленка	3000	220	50	9,0	5,4	5,4	2,0	0,5		2,2	8
13	145	225	115	36	0,50	Оксидная пленка	1500	220	50	17,8	7,6	7,6	3,5	1,0			7
14	232	437	230	48	0,35	Лак	1500	220	50	32,3	12,7	8,7	4,0	1,0			2
15	95	149	100	36	0,35	Лак	3000	220	50	12,9	6,5	4,8	2,5	0,5	2,0		1
16	105	168	100	36	0,50	Без изоляции	3000	220	50	15,8	7,1	5,2	3,0	0,5			3
17	197	272	145	48	0,35	Оксидная пленка	3000	220	50	19,1	9,2	6,5	3,7	1,0			2
18	145	225	160	36	0,50	Оксидная пленка	3000	220	50	17,8	7,5	7,5	3,7	1,0			
19	110	191	125	24	0,50	Лак	3000	220	50	15,1	12,6	10,5	3,5	0,5		2,3	4
20	185	272	140	48	0,35	Оксидная пленка	1500	220	50	20,5	9,9	7,3	3,0	1,0			2
21	95	168	130	24	0,50	Лак	750	220	50	14,1	11,3	9,1	3,5	0,5	2,8		1
22	54	100	65	24	0,50	Лак	1500	220	50	9,0	6,3	4,8	2,0	0,5			3
23	194	349	200	36	0,35	Лак	1000	220	50	14,9	12,5	12,5	4,0	1,0			5

Вариант	D , мм	D_a , мм	l , мм	Z	δ , мм	Род изоляции	n , мин ⁻¹	U_ϕ , В	f	h , мм	b , мм	b' , мм	$b_{ш}$, мм	e , мм	r , мм	h' , мм	Профиль
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
24	185	272	180	48	0,50	Оксидная пленка	750	220	50	20,5	8,6	8,6	3,5	1,0			7
25	84	131	98	36	0,35	Оксидная пленка	1500	220	50	12,1	6,0	4,4	2,0	0,5		1,3	4
26	95	168	100	24	0,35	Без изоляции	1500	220	50	14,1	9,2	9,2	3,5	0,5	3,1		6
27	130	225	130	24	0,50	Лак	3000	220	50	16,5	13,4	10,2	3,7	1,0	3,0		1
28	88	131	78	36	0,35	Без изоляции	3000	220	50	13,0	5,1	5,1	2,0	0,5		2,5	8
29	197	272	200	48	0,35	Оксидная пленка	1500	220	50	19,1	8,2	8,2	3,7	1,0			5
30	54	100	56	24	0,50	Лак	1500	220	50	9,0	5,5	5,5	2,0	0,5	1,5		6

Примечание: D – внутренний диаметр магнитопровода, мм; D_a – наружный диаметр магнитопровода, мм; l – длина магнитопровода, мм; Z – число зубцов магнитопровода; δ – толщина листов стали; n – частота вращения магнитного поля статора, мин⁻¹; U_ϕ – фазное напряжение, В; f – частота тока, Гц; h – полная высота паза, мм; b – больший размер ширины паза, мм; b' – меньший размер ширины паза, мм; $b_{ш}$ – ширина шлица паза, мм; e – высота усика паза, мм; r – радиус закругления углов, мм; h' – высота трапеции, мм.

2. СХЕМЫ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: уметь ориентироваться в типах статорных обмоток трехфазных асинхронных машин переменного тока; рассчитывать основные обмоточные данные для построения статорных обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в соответствии с требованиями потребителя; выполнить обмотку статора по полученным данным.

Порядок выполнения работы:

1. Рассчитать обмоточные данные для построения двухслойных статорных обмоток с укороченным шагом (по заданию преподавателя).
2. Построить развернутую схему двухслойной петлевой статорной обмотки с векторной диаграммой фазных токов в принятый момент времени t и расстановкой полюсов в расточке статора электрической машины.

Общие теоретические сведения

Полная обмотка трехфазного асинхронного двигателя выполняется из витков обмоточного провода (то есть проводника, покрытого тонкой изоляцией с высокой электрической прочностью), которые размещаются в пазах магнитопровода машины для получения вращающегося магнитного поля.

В свою очередь, она состоит из трех совершенно одинаковых обмоток со своими началами и концами, обозначаемыми в соответствии с ГОСТ 26772-85 и СТ СЭВ 3170-81 (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Маркировка обмоток статора по ГОСТ

Фаза	Двигатели старых модификаций		Новые разрабатываемые двигатели	
	Начало	Конец	Начало	Конец
А	С1	С4	U1	U2
В	С2	С5	V1	V2
С	С3	С6	W1	W2

Они отличаются только тем, что по ним протекают токи, смещенные во времени (или иначе по фазе) на одну треть периода (то есть при частоте 50 Гц – на 1/150 с). В электротехнике фазы принято обозначать буквами А, В, С, составляющие три обмотки называют фазными обмотками.

Каждый виток – проводник, имеющий соответствующую форму, состоит из двух активных сторон, это те части витка, которые уложены в пазы и двух лобовых частей соединяющих активные проводники. Активными проводники в пазу называются потому, что именно в них магнитные силовые линии потока Φ при пересечении индуцируют ЭДС (в отличие от лобовых).

Витки, связанные общей осью, принято называть катушкой, а если эта катушка принадлежит одной фазе в одной паре полюсов, то фазной катушкой. При числе пазов на полюс и фазу более единицы ($q > 1$) фазная катушка делится на части (катушки с меньшим числом витков). В переводе с латыни секция означает часть.

Отсюда секция – катушка из обмоточного провода – является частью катушечной группы. Она, как и виток, состоит из двух активных и двух лобовых частей. Секция может состоять из одного витка, но в общем случае число витков в ней определяется специальным расчетом.

Фазную катушку при $q > 1$ чаще называют катушечной группой или полюсной группой, так как она в этом случае состоит из двух или более последовательно соединенных катушек (секций), которые укладываются в рядом лежащие пазы магнитопровода. Соединенные соответствующим образом (последовательно, параллельно или комбинированно) фазные катушки одной и той же фазы образуют фазную обмотку.

Полюсом в общем случае называют сечение, через которое магнитный поток переходит из одной среды в другую. Причем, если магнитные силовые линии выходят из полюса – его принято называть северным (N), если входят – южным (S).

Полюсом в асинхронной машине, так как он в ней является «бегающим» (вращающимся), называют часть пространства расточки статора, охватывающего рядом лежащие пазы магнитопровода с одинаковым направлением тока в активных проводниках (независимо от фазности катушек).

В создании каждого полюса принимают участие все три фазы тока, следовательно, в каждом полюсе должны быть их фазные катушки.

Таким образом, изготовление обмотки трехфазного асинхронного двигателя проходит следующий путь:

Проводник \Rightarrow *Виток* \Rightarrow *Секция* \Rightarrow *Фазная катушка (катушечная группа)* \Rightarrow *Фазная обмотка* \Rightarrow *Полная обмотка трехфазного асинхронного двигателя.*

Выбор типа обмотки

Выбор делается исходя:

- из экономической целесообразности;
- минимального расхода обмоточного провода;
- номинальных мощности и напряжения;
- формы паза;
- достоинств и недостатков рассматриваемых обмоток;
- технической возможности выполнения обмотки.

Схемы статорных обмоток трехфазных электрических машин разделяют:

– по числу активных сторон секций в пазу: на однослойные (у которых активная сторона одной и той же катушки занимает весь паз) и двухслойные (активная сторона занимает половину паза);

– размеру шага: на обмотки с полным шагом (при $y = y'$) и с укороченным шагом (при $y < y'$);

– частоте вращения магнитного поля статора: на односкоростные и многоскоростные;

– числу секций в катушечных группах (фазных катушек): на обмотки с одинаковым числом секций в группе (q равно целому числу) и разным (q равно дробному числу).

– по способу выполнения (укладки):

○ на шаблонно-рассыпные (или всыпные), или обмотки с мягкими секциями. У таких обмоток секции укладываются по одному проводнику через прорезь (шлиц) полузакрытого паза. Применяются для машин малой и средней мощности с U_H до 500 В;

○ протяжные – выполняются протяжкой провода через пазы с торца. Используются для машин напряжением до 10 000 В при закрытых или полузакрытых пазух. Способ укладки обмоток трудоемок. В настоящее время используются в основном при частичном ремонте обмоток.

○ обмотки с жесткими секциями – готовые, изолированные секции, несущие на активных частях пазовую изоляцию, которые укладываются в открытые пазы. Используются для машин средней и большой мощности с напряжением до 10 000 В (и даже более);

– по способу размещения секций катушечных групп в расточке статора, а также размещения лобовых частей:

○ на концентрические – с размещением секций (катушек) одна внутри другой и расположением лобовых частей в двух или трех плоскостях. Такие обмотки выполняются обычно вразвалку;

○ шаблонные – с одинаковыми секциями катушечных групп. Они могут выполняться и простыми, и вразвалку. Если в шаблонной однослойной обмотке вразвалку выполнить не по полугруппам, а по отдельным катушкам, получим схему цепной обмотки.

Однослойные обмотки, главным образом, выполняются петлевыми, простыми шаблонными, шаблонными вразвалку, цепными, концентрическими.

Основные достоинства однослойной обмотки по сравнению с двухслойной:

1. Отсутствие межслоевой изоляции, что повышает коэффициент заполнения паза, а следовательно, ток и мощность двигателя.

2. Простота изготовления.

3. Большая возможность применения автоматизации при укладке обмоток.

Основные недостатки однослойной обмотки:

1. Повышенный расход проводникового материала.

2. Сложность укорочения шага, а следовательно, компенсации высших гармоник магнитного потока.

3. Ограниченные возможности построения обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу.

4. Более трудоемкое изготовление и монтаж катушек для крупных электродвигателей высокого напряжения.

Двухслойные обмотки в основном выполняются с одинаковыми секциями, петлевые, цепные, реже делаются концентрические.

Основные достоинства двухслойной обмотки по сравнению с однослойной:

1. Возможность любого укорочения шага, что позволяет:

а) снизить расход обмоточного провода за счет уменьшения длины лобовой части секций;

б) уменьшить высшие гармонические составляющие магнитного потока, то есть снизить потери в магнитопроводе двигателя.

2. Простота технологического процесса изготовления катушек (многие операции можно механизировать).

3. Возможность выполнения обмотки почти с любой дробностью q , что обеспечивает изготовление обмотки при ремонте асинхронных двигателей с изменением частоты вращения ротора. Кроме того, это является одним из способов приближения формы поля к синусоиде.

4. Возможность образования большего числа параллельных ветвей.

Основные недостатки двухслойной обмотки:

1. Меньший коэффициент заполнения паза (вследствие наличия межслоевой изоляции).

2. Некоторая сложность при укладке последних секций обмотки.

3. Необходимость поднимать целый шаг обмотки при повреждении нижней стороны секции.

По приведенным соображениям, в настоящее время в ремонтной практике машин переменного тока двухслойные обмотки получили наибольшее применение. Они дают возможность (особенно при укороченном шаге) сократить до минимума, по сравнению с другими типами обмоток, расход обмоточного провода на единицу мощности АД. Обладают такими существенными достоинствами, как простота технологии изготовления, высокая степень компенсации гармонических составляющих магнитного потока и пр. Следует добавить, что двухслойные обмотки без укорочения шага практически не делаются.

Методика выполнения задания

Расчет обмоточных данных

Любой тип обмотки трехфазной машины переменного тока характеризуется следующими обмоточными данными:

N – число катушечных групп, шт.

y – шаг обмотки,

q – число пазов на полюс и фазу (равно числу секций в катушечной группе),

α – число электрических градусов, приходящихся на один паз,

a – число параллельных ветвей.

Число катушечных групп. Так как в витке ток в активных проводниках направлен встречно, каждая фазная катушка обмотки участвует в создании пары полюсов. Следовательно, между числом катушечных групп и числом пар полюсов имеется жесткая связь и для однослойной обмотки – число катушечных групп в одной фазе однослойной обмотки равно

$$N_{1\Phi}^{(1)} = P, \quad (2.1)$$

где P – число пар полюсов, определяется по формуле (1.3).

Так как каждую пару полюсов создают все три фазы переменного тока, следовательно, число катушечных групп обмотки асинхронного двигателя увеличивается в m раз:

$$N_{3\Phi}^{(1)} = P \cdot m. \quad (2.2)$$

В двухслойных обмотках число катушечных групп механически увеличивается в два раза (фазные катушки однослойной обмотки по всем секциям разделяют пополам), поэтому в каждой секции число витков будет в два раза меньше, число же катушечных групп в два раза больше, следовательно, число катушечных групп в одной фазе двухслойной обмотки равно

$$N_{1\Phi}^{(2)} = 2P, \quad (2.3)$$

На три фазы:
$$N_{3\Phi}^{(2)} = 2P \cdot m. \quad (2.4)$$

Шаг обмотки (y). Ток, протекающий по виткам катушки, внутрь которой вставлен ферромагнитный стержень, создает в нем магнитный поток. В магнитопроводе АД секции (катушки) уложены в пазы, охватывающие стальные зубцы, поэтому текущий в них ток в воздушном зазоре создает полюс. Следовательно, активные стороны секций смещены в расточке статора на расстояние полюса. Отсюда шаг обмотки (y) – это расстояние, выраженное в зубцах (или пазух), между активными сторонами одной и той же секции, он определяется по формуле:

$$y' = \frac{Z}{2P} \pm \varepsilon, \quad (2.5)$$

где y' – расчетный шаг (равен полюсному делению, выраженному в зубцах);

ε – произвольное число меньше 1, доводящее расчетный шаг (y') до целого значения.

Если между активными сторонами секции помещается полюс, такой шаг (y) называется полным или диаметральной, если же он меньше размера полюсного деления ($y < y'$), его называют укороченным.

На практике принято шаг определять в пазах, поэтому при раскладке вторая сторона секции ложиться в паз $y + 1$.

Число пазов на полюс и фазу (q). Находится для того, чтобы определить число секций в катушечной группе. Действительно, если в полюсе на одну фазу приходится более одного паза, витки фазной сосредоточенной катушки разделяют на такое количество секций, которое равно

$$q = \frac{Z}{2P \cdot m}, \quad (2.6)$$

где m – число фаз.

При $q = 1$ в полюсе статора на одну фазу приходится только один паз, значит катушка этой фазы не может быть разделена на секции. Такая обмотка называется сосредоточенной.

При $q > 1$ обмотка называется рассредоточенной, при этом фазные катушки должны быть разделены на секции, число которых равно величине q .

При $q = 1$ катушечная группа будет состоять из двух секций, при $q = 1$ – из трех секций и т. д.

Суммарное число витков этих секций равно числу витков сосредоточенной фазной катушки.

Число электрических градусов на один паз (α).

В расточке статора асинхронного двигателя распределение магнитного потока под одной парой полюсов подчиняется синусоидальному закону, то есть по краям полюсов магнитных силовых линий нет, при приближении к центру число их плавно возрастает и в центре полюса достигает максимума.

Это показывает изменение ЭДС (e) в проводнике, если его провести (или сделать один оборот ротора) под одной парой полюсов.

Известно, что $e = B \cdot l \cdot v$, где B – магнитная индукция, l – длина проводника, v – скорость его движения. Следовательно, при постоянных l и v изменение величины e зависит только от изменения величины B (рис. 2.1, а).

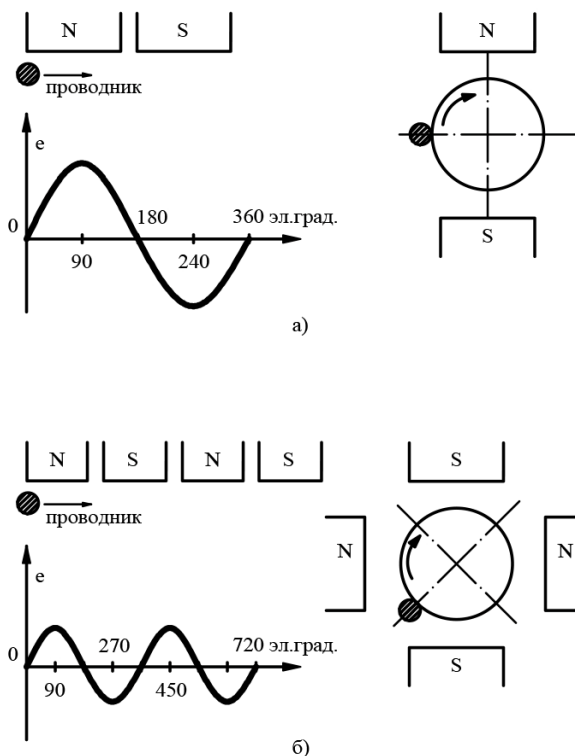


Рис. 2.1. Число электрических градусов в расточке статора электромашин в зависимости от числа пар полюсов: а – при одной паре; б – при двух парах

При перемещении происходит полный цикл изменения величины e в проводнике, следовательно, меняется и магнитный поток (и индукция – B). Синусоида делится на 360° , значит на одну пару полюсов приходится 360 электрических градусов ($^\circ$ эл.).

При движении проводника под двумя парами полюсов (за один оборот) (рис. 2.1, б) ЭДС в нем изменится два раза по 360° эл. ($360^\circ \cdot 2 = 720^\circ$ эл.), то есть, в общем случае, в любой машине число электрических градусов в расточке статора можно определить по формуле:

$$\alpha = 360 \cdot P. \quad (2.7)$$

Если магнитопровод имеет число пазов равное Z , то число электрических градусов, приходящихся на один паз, или иначе угловой сдвиг между рядом лежащими пазами α равен:

$$\alpha = \frac{360 \cdot P}{Z}. \quad (2.8)$$

Число параллельных ветвей (a). Параллельные ветви в обмотке асинхронного двигателя делаются для сокращения сечения обмоточного провода, кроме того, в определенной мере, это дает возможность лучше загрузить магнитную систему машины.

Все катушечные группы обмотки одной фазы могут быть соединены последовательно, как это показано на рис. 2.2. В этом случае число параллельных ветвей равно 1 ($a = 1$), буквами Н, К и цифрами обозначены соответственно начала и концы фазных катушек.

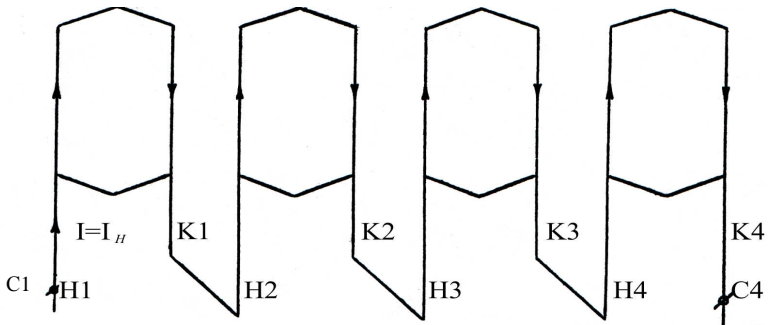


Рис. 2.2. Катушечные группы, включенные в одну параллельную ветвь, $a = 1$

При параллельном включении катушечных групп максимальное число параллельных ветвей равняется числу фазных катушек в обмотке одной фазы $N_{1\phi}$, например, на рис. 2.3, а, $a = 4$.

Можно катушечные группы обмотки одной фазы соединять комбинированно (часть последовательно и часть параллельно), как показано на рис. 2.3, б, но при этом число катушечных групп в каждой параллельной ветви должно быть строго одинаковым.

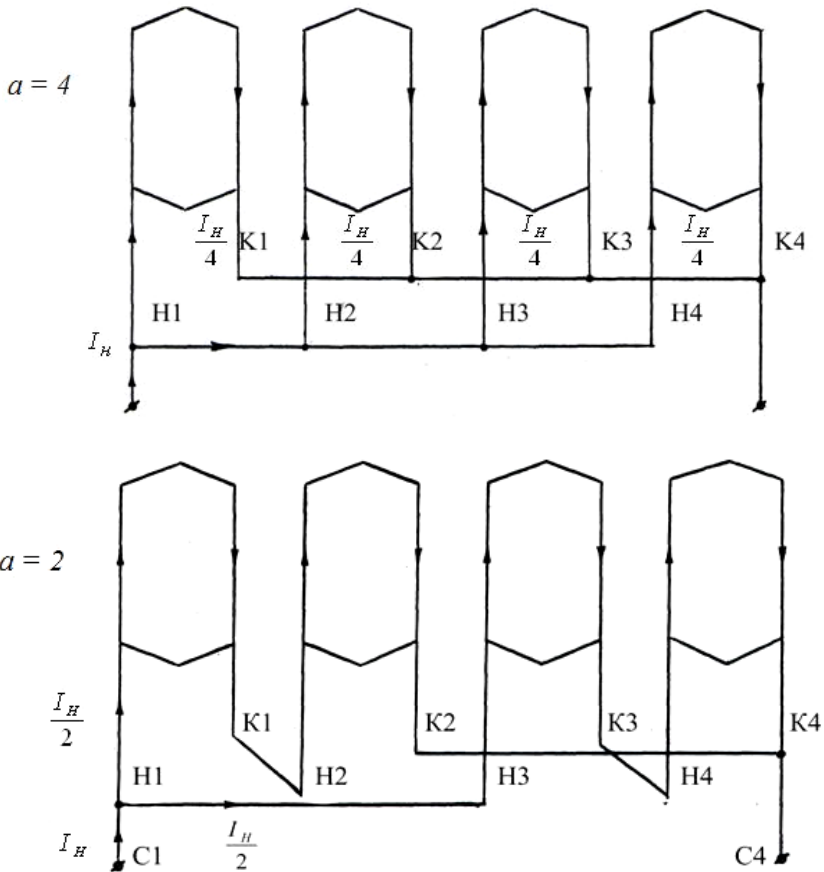


Рис. 2.3. Катушечные группы обмотки одной фазы включенные:
 а – в четыре параллельных ветви ($a = 4$),
 б – в две параллельные ветви ($a = 2$)

Важно! Решение о рациональном числе параллельных ветвей принимается только после разделения обмоточного провода на параллельные сечения – a' . Число параллельных сечений (то есть взятых для изготовления секций обмоточных проводов) в сумме по площади должно быть равно расчетной площади. Например, если по расчету сечение (площадь) обмоточного провода должно быть равно 20 мм^2 , а такого провода нет или он не входит через шлиц паза, можно взять два провода по 10 мм^2 или четыре по 5 мм^2 . Однако число a' не должно быть больше 4. Если $a' > 4$, тогда (для сокращения диаметра провода) увеличивают число параллельных ветвей.

Рассчитанные обмоточные данные используются по ниже приведенным методикам, в частности, для построения однослойных и двухслойных петлевых обмоток. Отличия в исполнении других обмоток незначительны.

Принцип построения схемы статорной обмотки трехфазного асинхронного двигателя

Для получения вращающегося магнитного поля трехфазного асинхронного двигателя при любой схеме обмотки требуется:

1. Смещение в пространстве расточки статора АД фазных обмоток одна относительно другой на 120° эл.;

2. Смещение во времени токов, протекающих по этим обмоткам, на одну треть периода (следовательно, вектора, изображающие указанные токи на плоскости, будут сдвинуты на 120° электрических градусов).

Первое условие выполняется соответствующей укладкой катушечных групп трехфазной обмотки, второе – подключением асинхронных двигателей к сети трехфазного тока, в которой временной сдвиг между напряжениями трех фаз обеспечивается генераторами электрических станций. Эти напряжения в замкнутых цепях обмоток машин создают нужный сдвиг токов.

Задания для самостоятельного расчета

Данные для самостоятельного выполнения заданий представлены в табл. 2.5 в соответствии с вариантом, заданным преподавателем.

Задание 2.1. Построить развернутую схему однослойной статорной обмотки трехфазного АД с короткозамкнутым ротором с указанием векторной диаграммы фазных токов в принятый момент времени t и расстановкой полюсов в расточке статора электрической машины.

Технические требования заказчика: синхронная частота вращения магнитного поля $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, частота тока $f = 50 \text{ Гц}$, количество пазов магнитопровода $Z = 24$, число фаз $m = 3$.

Решение. При построении схемы обмотка первой фазы может начинаться с любого паз. В данном случае первую активную сторону секции помещаем в первый паз (рис. 2.4).

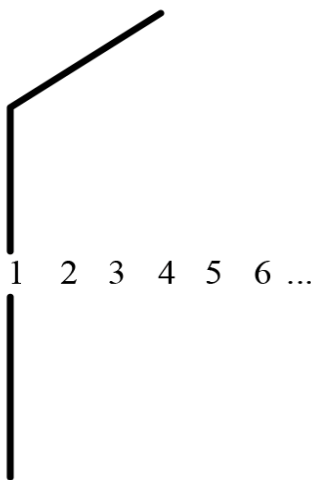


Рис. 2.4. Размещение первой активной стороны секции в магнитопроводе

1. Определяем число пар полюсов по формуле (1.3):

$$P = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2.$$

2. Находим шаг обмотки (секции) по формуле (2.5):

$$y' = \frac{Z}{2P} \pm \varepsilon = \frac{24}{2 \cdot 2} = 6.$$

Следовательно, при $y = y'$ вторую активную сторону секции помещаем через шесть зубцов – в седьмой паз (рис. 2.5), $y + 1 = 6 + 1 = 7$.

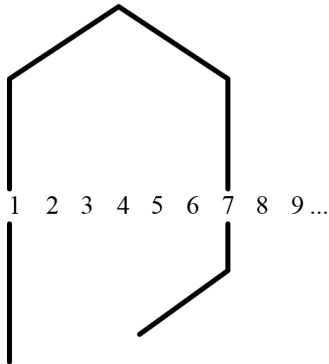


Рис. 2.5. Размещение второй активной стороны секции в магнитопроводе

3. Определяем число пазов на полюс и фазу по формуле (2.6):

$$q = \frac{Z}{2P \cdot m} = \frac{24}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 2.$$

Отсюда одна катушечная группа имеет две секции, тогда вторая секция занимает соответственно пазы 2 и 8 (рис. 2.6).

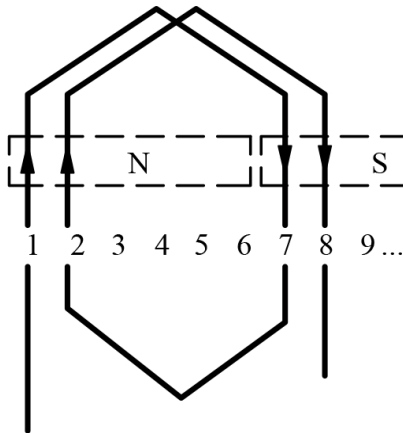


Рис. 2.6. Размещение в магнитопроводе первой катушечной группы обмотки

4. Число катушечных групп в однослойной обмотке одной фазы определим по формуле (2.1):

$$N_{\text{ф}}^{(1)} = P = 2.$$

5. Определение расположения второй катушечной группы, принадлежащей этой же фазе.

В однослойной обмотке первая катушечная группа участвует в создании первой пары полюсов (рис. 2.7), вторая – должна создавать вторую пару полюсов, следовательно, расстояние между ними должно соответствовать одной паре полюсов, то есть 360° эл.

Отсюда сдвиг между катушечными группами одной фазы в пазах равен

$$A \rightarrow \frac{360}{\alpha},$$

где α – число электрических градусов на один паз, определяемое по формуле:

$$\alpha = \frac{360 \cdot P}{Z} = \frac{360 \cdot 2}{24} = 30^\circ \text{ эл.} \quad (2.9)$$

Тогда, смещение между катушечными группами в фазе А (это будет верно и для фаз В и С) будет составлять:

$$A \rightarrow \frac{360}{\alpha} = \frac{360}{30} = 12 \text{ пазов.} \quad (2.10)$$

Следовательно, вторая катушечная группа фазы «А» начинается с 13-го паза (рис. 2.7).

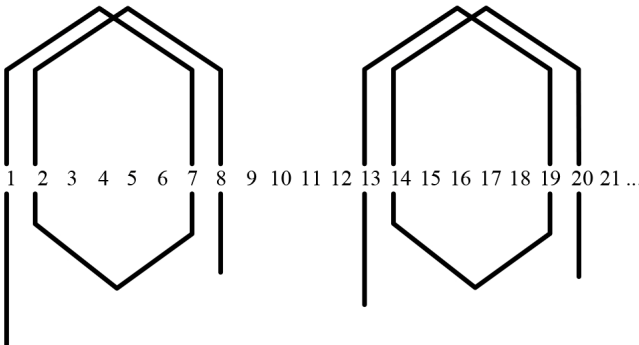


Рис. 2.7. Размещение катушечных групп обмотки одной фазы

6. Как соединить между собой уложенные катушечные группы?

Чтобы ответить на этот вопрос, вначале необходимо принять число параллельных ветвей (a), которое далее уточняется после расчета сечения обмоточного провода (Π_p). В предварительном расчете число параллельных ветвей можно брать произвольно, их максимальное количество, как указывалось ранее, может быть равным числу катушечных групп в одной фазе – $N_{1\phi}^{(1)}$.

Однако, пока не известно (Π_p), рационально принимать $a = 1$.

Затем необходимо показать направления токов в активных проводниках катушек, исходя из требуемого чередования полюсов.

Если в машине 4 полюса (рис. 2.8), то по направлению тока их можно соединить только таким образом: конец первой катушечной группы с началом второй, что является законом для однослойных обмоток.

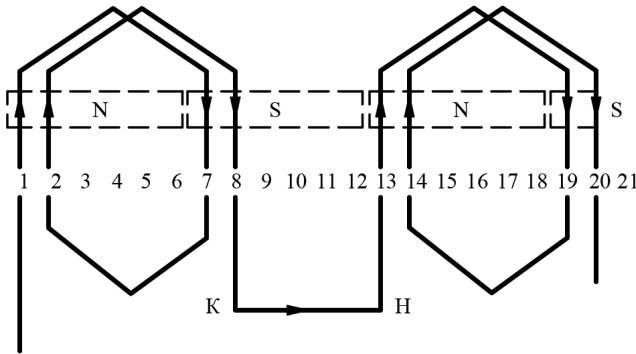


Рис. 2.8. Направление токов в активных сторонах секций, уложенных катушечных групп обмотки одной фазы и их соединение

Обмотки фаз «В» и «С» выполняются аналогично, но, согласно условию получения вращающегося магнитного поля в расточке статора, они сдвинуты соответственно на 120° эл. и 240° эл. относительно обмотки фазы «А», то есть

$$B \rightarrow \frac{120}{\alpha} = \frac{120}{30} = 4, \quad C \rightarrow \frac{240}{\alpha} = \frac{240}{30} = 8.$$

Следовательно, обмотки фаз «В» и «С» начинаются в пятом и девятом пазах соответственно. Укладка катушечных групп обмоток этих фаз аналогична обмотке фазы «А». В результате получаем статорную обмотку асинхронного двигателя (рис. 2.9).

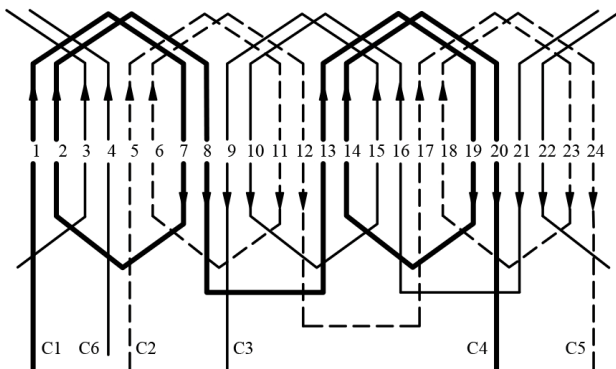


Рис. 2.9. Развернутая схема однослойной статорной обмотки при $N_{3\phi}^{(1)} = 6$; $y = 6$; $q = 2$; $\alpha = 30^\circ$; $a = 1$

е) Как определяются полюса в расточке статора?

Направления токов в активных проводниках обмоток, а значит и положение полюсов в расточке статора, могут быть показаны только для данного момента времени t (рис. 2.10): Оно берется произвольно, например, для принятого момента (t_1) на развертке $I = f(t)$ (рис. 2.10, а) соответствует векторная диаграмма токов рис. 2.10, б. Из последней следует, что в момент t_1 токи в обмотках фаз «А» и «В» текут в одном направлении, а в обмотке фазы «С» в противоположном, причем сумма первых ($I_a + I_b$) равна I_c (согласно первому закону Кирхгофа).

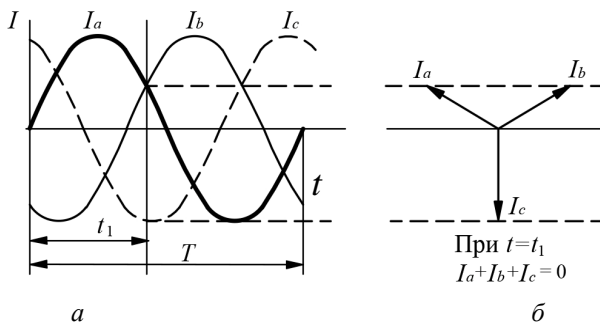
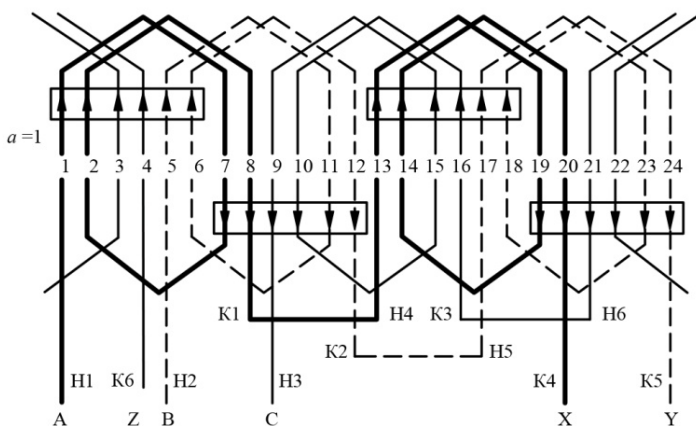
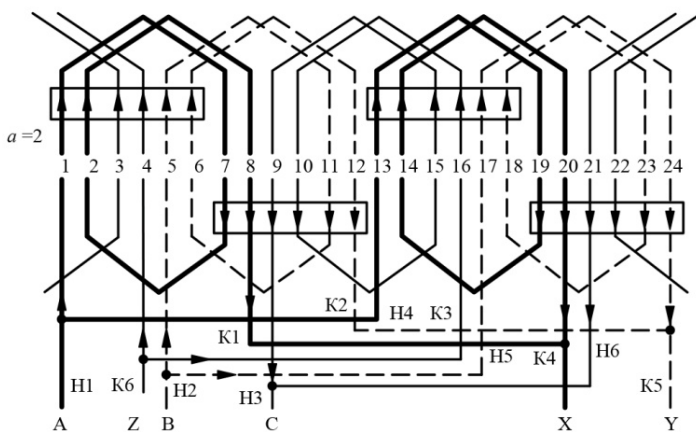


Рис. 2.10. Развертка зависимости токов от времени $I = f(t)$ – (а) и векторная диаграмма токов для момента времени t_1 – (б)



а)



б)

Рис. 2.11. Развернутая схема однослойной статорной обмотки с положением полюсов соответствующих моменту времени t_1

а) при $a = 1$; б) при $a = 2$

Расстановка токов в активных проводниках по пазам расточки статора в соответствии с векторной диаграммой на рис. 2.11, а при $a = 1$ и на рис. 2.11, б при $a = 2$, дает возможность найти положения полюсов для момента принятого времени.

Задание 2.2. Построить развернутую схему двухслойной (с укороченным шагом) статорной обмотки трехфазного АД с короткозамкнутым ротором с векторной диаграммой фазных токов в принятый момент времени и положением полюсов в расточке статора электрической машины.

Технические требования заказчика: синхронная частота вращения магнитного поля $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, частота тока $f = 50 \text{ Гц}$, количество пазов магнитопровода $Z = 24$, число фаз $m = 3$.

Решение. Исходя из указанных условий, определяем обмоточные данные:

1. Число пар полюсов по формуле (1.3):

$$P = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2.$$

2. Полный диаметальный шаг обмотки находим по выражению (2.5):

$$y' = \frac{Z}{2P} = \frac{24}{2 \cdot 2} = 6.$$

3. С учетом коэффициента укорочения

$$y = (y' \cdot 0,8) = 6 \cdot 0,8 = 4,8.$$

Принимаем $y = 5$.

4. Число пазов на полюс и фазу по формуле (2.6):

$$q = \frac{Z}{2Pm} = \frac{24}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 2.$$

5. Число катушечных групп на одну фазу определяем по формуле (2.3):

$$N_{1\Phi}^{(2)} = 2P = 4.$$

6. Общее число катушечных групп в обмотке определяем по формуле (2.4):

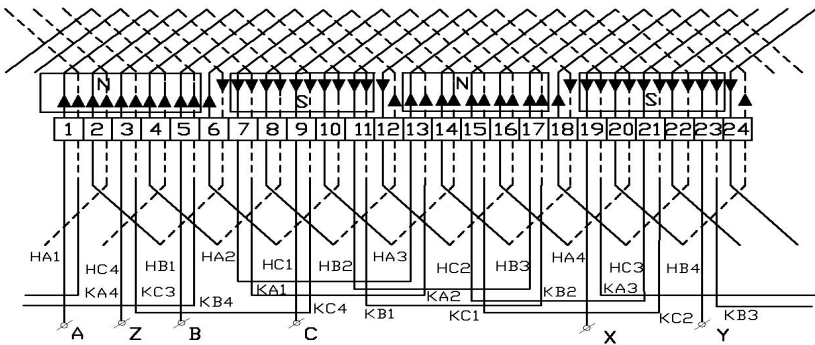
$$N_{3\Phi}^{(2)} = 2Pm = 12.$$

7. Число электрических градусов, приходящихся на один паз, находим по формуле (2.8):

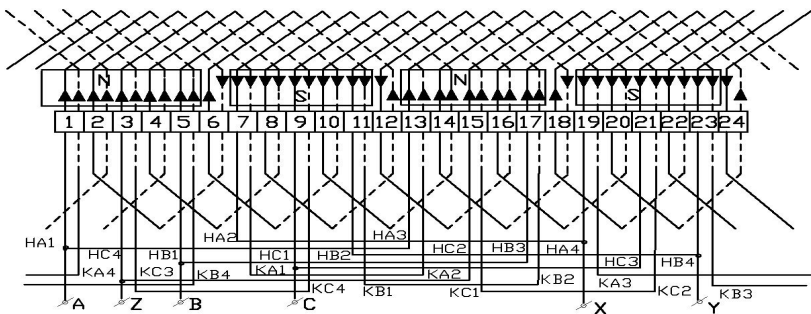
$$\alpha = \frac{360 \cdot P}{Z} = \frac{360 \cdot 2}{24} = 30^\circ \text{ эл.}$$

8. Число параллельных ветвей a принимаем равным 1.

Кроме того, у одной и той же фазы они сдвигаются не на 360° эл. (как в однослойных обмотках), а на 180° эл. Соединяются они между собой так: конец предыдущей катушечной группы с концом последующей, а начало – с началом (этого требует направление токов).



a



б

Рис. 2.12. Развернутая схема двухслойной статорной обмотки:

а) при $N_{3\phi}^{(2)} = 12$; $y = 5$; $q = 2$; $\alpha = 30^\circ$; $a = 1$;

б) при $N_{3\phi}^{(2)} = 12$; $y = 5$; $q = 2$; $\alpha = 30^\circ$; $a = 2$

Порядок построения двухслойной обмотки (рис. 2.12, а, б) принципиально ничем не отличается от построения однослойной и выполняется по следующим этапам:

- укладываются секции катушечных групп всех трех фаз;
- проводится соответствующее соединение этих групп в обмотки с требуемым числом параллельных ветвей;
- для принятого момента времени (t_1) (см. рис. 2.10) показываются направления фазных токов в расточке статора, находится положение полюсов.

Задание 2.3. Построить развернутую схему двухслойной статорной обмотки трехфазного АД с короткозамкнутым ротором с векторной диаграммой фазных токов в принятый момент времени и положением полюсов в расточке статора электрической машины по следующим данным: $Z = 27$; $P = 3$; $n = 1000$ мин⁻¹; $m = 3$; $y' = 4,5$; $y = 4$; $q = 1,5 = 1\frac{1}{2} = \frac{3}{2}$; $\alpha = 40^\circ$ эл.; $a = 1$.

Решение. Дробное число пазов на полюс и фазу означает, что в данной обмотке число секций в катушечных группах неодинаково, то есть в одних катушечных группах число катушек на одну больше, чем в других.

Разница по сравнению с обмотками, имеющими целое число пазов на полюс и фазу, заключается в том, что при дробном числе q обмотку приходится комбинировать из катушечных групп, состоящих из неодинакового числа секций. При этом в каждой фазе должно быть одинаковое число пазов, иначе обмотка получится несимметричной.

Перед выполнением обмотки следует проверить, будет такая обмотка симметричной или нет. Для получения симметрии двухслойной обмотки необходимо, чтобы $\frac{Z}{tm}$ равнялось целому числу, где Z – число пазов; t – наибольший общий делитель для Z и P ; m – число фаз.

Катушечные группы в обмотке с дробным числом пазов на полюс и фазу легко распределить при помощи таблицы с числом строк, равным числу полюсов, и числом клеток в строке, равным $3c$, где c – числитель неправильной дроби, выражающей число пазов на полюс и фазу.

Таблицу разделяют на три одинаковых столбца с числом клеток в столбце, равным c . Затем в клетки вписывают в последовательном порядке номера пазов с шагом между ними, равным d , где d – знаменатель дроби, выражающей число пазов на полюс и фазу.

Для этой обмотки $t = 3$. Тогда:

$$\frac{Z}{tm} = \frac{27}{3 \cdot 3} = 3.$$

Таким образом, обмотка удовлетворяет условиям симметрии. Составим таблицу обмотки с числом клеток 3 в каждой колонке и впишем номера пазов с интервалом 2, то есть, пропуская 1 клетку (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Распределение пазов и секций по фазам обмотки

Полюсы	Фаза А			Фаза С			Фаза В		
	1		2		3		4		5
<i>N</i>		6		7		8		9	
<i>S</i>	10		11		12		13		14
<i>N</i>		15		16		17		18	
<i>S</i>	19		20		21		22		23
<i>N</i>		24		25		26		27	

Читая горизонтальные строки таблицы, будем записывать обозначения фаз столько раз, сколько номеров стоит в столбце фазы. Это покажет группировку катушек по фазам: АА С ВВ А СС В АА С ВВ А СС В АА С ВВ А СС В.

Буквы обозначают фазы, а число одинаковых букв подряд показывает, сколько содержится секций в катушечной группе. Для данной обмотки необходимо заготовить 9 катушечных групп по две секции и 9 одиночных. Они займут $(9 \cdot 2) + 9 = 27$ пазов.

При укладке в пазы, согласно группировке, после каждой катушечной группы, состоящей из двух секции, надо класть катушечную группу, состоящую из одной секции. Схема обмотки показана на рис. 2.13.

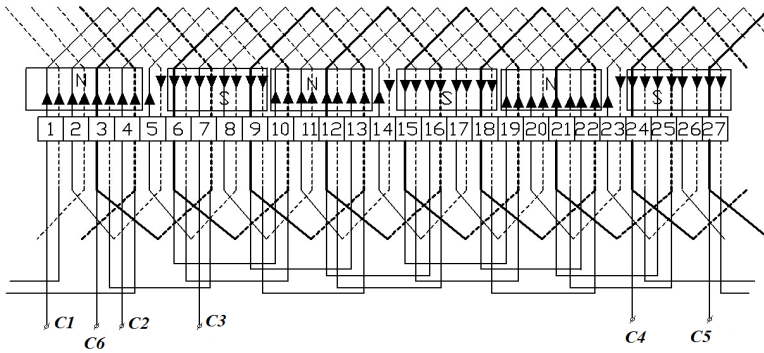


Рис. 2.13. Схема двухслойной статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя с дробным числом пазов на полюс и фазу

Задание 2.4. Определить возможность выполнения статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором по следующим данным: $Z = 54$;

$$P = 4 \left(n = 750 \text{ мин}^{-1} \right); m = 3; y' = 6,75; y = 5; q = 2,25 = 2\frac{1}{4} = \frac{9}{4};$$

$$\alpha = 26,6^\circ \text{ эл.}; a = 1.$$

Решение. Для проверки условия симметрии находим, есть ли общий делитель для Z и P . Для чисел 54 и 4 общим делителем t является число 2. Следовательно, условие симметрии выполняется.

$$\frac{Z}{tm} = \frac{54}{2 \cdot 3} = 9.$$

Составим таблицу обмотки с числом клеток 9 в каждой колонке и впишем номера пазов с интервалом 4, то есть пропуская 3 клетки (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Распределение пазов и секций по фазам обмотки по следующим данным:

$$Z = 54; P = 4; m = 3; q = 2,25 = 2\frac{1}{4} = \frac{9}{4}$$

P	Фаза А			Фаза С			Фаза В												
N	1		2			3			4			5			6			7	
S		8			9		10			11			12			13			14

P	Фаза А						Фаза С						Фаза В									
	N			15			16			17			18			19			20			
S			22			23			24			25			26			27				
N	28				29			30			31			32			33			34		
S	35				36			37			38			39			40			41		
N			42			43			44			45			46			47				48
S			49			50			51			52			53			54				

Определим порядок чередования катушечных групп: AAA CC BB AA CCC BB AA CC BBB AA CC BB и т. д.

Катушечные группы расположены в таком порядке:

$(3-2-2-2)-(3-2-2-2)-(3-2-2-2)-\dots$

Как видно из порядка чередования, оно повторяется через четыре цифры. Значит, порядок укладки катушечных групп будет следующий: тройная–двойная–двойная–двойная и т. д.

Сумма цифр в одном чередовании показывает число секций, которое равно $9 \cdot (3+2+2+2)$. Всего катушек должно быть 54, поэтому по всей обмотке будет $54:9=6$ чередований. В каждом чередовании одна тройная катушечная группа (из трех секций) и три двойные (из двух секций). Всего на статор потребуется 6 катушечных групп тройных и 18 двойных.

При помощи таких таблиц можно определить чередование катушечных групп для любой обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу.

В табл. 2.4 показано чередование катушечных групп для наиболее часто встречающихся в практике чисел пазов на полюс и фазу.

Если целое число перед дробью больше 1, то в таблице чередований надо прибавить к каждой цифре разницу между этим числом и единицей. Так, например, при $q=1\frac{1}{2}$ в таблице чередуются катушечные группы из 1 и 2 катушек (1–2), а при $q=2\frac{1}{2}$ чередуются катушечные группы из 2 и 3 катушек (2–3).

Порядок чередования катушечных групп при дробных числах пазов на полюс и фазу

Число пазов на полюс и фазу	Порядок чередования катушечных групп
$1^{1/2}$	(1-2), (1-2), (1-2), (1-2) и т. д.
$1^{1/4}$	(1-1-1-2), (1-1-1-2) и т. д.
$1^{3/4}$	(1-2-2-2), (1-2-2-2) и т. д.
$1^{1/5}$	(1-1-1-1-2), (1-1-1-1-2) и т. д.
$1^{2/5}$	(2-1-2-1-1), (2-1-2-1-1) и т. д.
$1^{3/5}$	(1-2-1-2-2), (1-2-1-2-2) и т. д.
$2^{1/2}$	(2-3), (2-3) и т. д.
$3^{1/4}$	(3-3-3-4), (3-3-3-4) и т. д.
$4^{1/5}$	(4-4-4-4-5), (4-4-4-4-5) и т. д.

Цифры в данной таблице чередуются не в беспорядке, а определенными периодами. Число цифр в периоде равно знаменателю неправильной дроби d , а сумма цифр в периоде равна числителю неправильной дроби c .

Например, при $q = 2\frac{3}{5} = \frac{8}{5}$ период состоит из пяти цифр (1-2-1-2-2). Сумма этих цифр равна 8, то есть числителю дроби.

В заключение можно отметить, что во всех обмотках расстояние между началами фаз равно $2q$. В обмотках, имеющих дробное число на полюс и фазу, произведение $2q$ не всегда может выражаться целым числом. В таких случаях за $2q$ принимается ближайшее целое число или смещение между началами и концами фаз должно составлять не 120° эл., а 480° эл., так как $\sin 120^\circ = \sin 480^\circ$. Тогда смещение между фазами в пазах n_z будет равно

$$n_z = \frac{480}{\alpha}.$$

Если принять, что фаза «А» будет начинаться с паза, условно принятого за первый, то есть $H_A = 1$, то начала фаз «В» и «С» сместятся: $H_B = n_z + 1$; $H_C = 2n_z + 1$.

В обмотках с дробным q , имеющих дробь $\frac{1}{2}$, отпадает необходимость определять, сколько будет катушечных групп с целым числом секций, равным b , и сколько будет катушечных групп с числом секций, равным $b + 1$. Во всех обмотках, имеющих дробное q с дробью, равной $\frac{1}{2}$, числа катушечных групп с меньшим и большим количеством секций распределяются поровну, и поэтому, зная число секций в фазе, легко подсчитать, сколько будет больших и малых катушечных групп.

Индивидуальные задания

Таблица 2.5

Данные для решения практических задач

Вариант	Z	$n, \text{мин}^{-1}$	$U_{\phi}, \text{В}$	$f, \text{Гц}$
1	24	1500	380	50
2	36	1500	127	50
3	48	1500	380	50
4	24	3000	127	50
5	36	1500	380	50
6	48	1500	127	50
7	24	1500	380	50
8	36	3000	127	50
9	48	1500	380	50
10	24	750	127	50
11	36	1500	380	50
12	48	750	127	50
13	24	3000	380	50
14	36	1500	127	50
15	48	3000	380	50
16	24	3000	127	50
17	36	3000	380	50
18	48	1500	127	50

Вариант	Z	$n, \text{мин}^{-1}$	$U_{\Phi}, \text{В}$	$f, \text{Гц}$
19	24	3000	380	50
20	36	3000	127	50
21	24	1500	380	50
22	36	3000	127	50
23	24	1500	380	50
24	36	3000	127	50
25	36	1000	380	50
26	48	3000	127	50
27	36	1000	380	50
28	24	1500	127	50
29	36	1000	380	50
30	48	750	127	50

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите основные элементы статорных обмоток асинхронных двигателей и дайте их определение.

2. Назовите основные обмоточные данные. Как они определяются?

3. Какие принципы заложены в построение схем обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей для получения вращающего магнитного поля в расточке статора?

4. Назовите достоинства (недостатки) однослойных статорных обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

5. Назовите достоинства (недостатки) двухслойных статорных обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

6. Как выполняются статорные обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу?

3. СХЕМЫ КОНЦЕНТРИЧЕСКИХ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Цель работы: уметь рассчитывать основные обмоточные данные для построения концентрических однослойных статорных обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в соответствии с требованиями потребителя, выполнять обмотку статора по полученным данным.

Порядок выполнения работы:

1. Рассчитать обмоточные данные для построения однослойных статорных обмоток (по заданию преподавателя).
2. Построить развернутую схему однослойной концентрической статорной обмотки с векторной диаграммой фазных токов в принятый момент времени и положением полюсов в расточке статора электрической машины.

Методика выполнения задания

Как было указано ранее, однослойными называются обмотки, у которых в одном пазу находятся проводники, принадлежащие активной стороне одной секции. Трехфазные однослойные обмотки подразделяются на равнокатушечные или петлевые (имеющие одинаковый расчетный шаг на каждую секцию в катушечной группе) и концентрические (обмотки, у которых секции, komponующие катушечную группу, имеют разный расчетный шаг, а укладка таких секций идет одна внутрь другой).

Для построения схемы обмотки определяем обмоточные данные:

- число пар полюсов по формуле (1.3):

$$P = \frac{60f}{n};$$

- полный диаметральный шаг обмотки находим по выражению (2.5):

$$y' = \frac{Z}{2P} \pm \epsilon;$$

- число пазов на полюс и фазу (2.6):

$$q = \frac{Z}{2Pm};$$

– число катушечных групп на одну фазу определяем по формуле (2.1):

$$N_{1\Phi}^{(1)} = P;$$

– общее число катушечных групп в обмотке по формуле (2.2):

$$N_{3\Phi}^{(1)} = P \cdot m;$$

– число электрических градусов, приходящихся на один паз, по формуле (2.8):

$$\alpha = \frac{360 \cdot P}{Z};$$

– число параллельных ветвей a принимаем равным 1.

Катушечные группы у одной и той же фазы сдвигаются на 360° эл. Соединяются между собой так: конец предыдущей катушечной группы с началом следующей.

Задание для самостоятельного расчета

Данные для самостоятельного выполнения задания представлены в табл. 3.1 в соответствии с вариантом, заданным преподавателем.

Задание. Построить схему статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя по заданию: $Z = 24$ $n = 1500$ мин⁻¹; $f = 50$ Гц; $m = 3$.

Решение. Рассмотрим сходства и отличия в построении схем разных типов обмоток.

Для определения обмоточных данных необходимо знать полюсность машины. Для этого число пар полюсов находим по выражению (1.3):

$$P = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2.$$

Расчет обмоточных данных начинаем с определения шага обмотки по формуле (2.5):

$$y' = \frac{Z}{2P} \pm \varepsilon = \frac{24}{2 \cdot 2} = 6.$$

Полученный расчетный шаг подходит для построения схемы однослойной петлевой статорной обмотки независимо от того, сколько секций приходится на одну катушечную группу. Для построения схемы концентрической обмотки надо знать конкретное число секций, так как ранее было отмечено, что каждая секция, входящая в катушечную группу, для концентрической обмотки имеет свой расчетный шаг. Поэтому для дальнейших расчетов необходимо определить число секций на одну катушечную группу q . Это значение находим по формуле (2.6):

$$q = \frac{Z}{2Pm} = \frac{24}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 2.$$

Исходя из полученного значения, можно сделать вывод, что каждая фазная катушка (как для однослойной петлевой обмотки, так и для однослойной концентрической обмотки) в рассматриваемом примере будет состоять из двух секций.

Если укладку обмотки начать с первого пазы, то катушечная группа однослойной петлевой обмотки займет пазы 1–7 и 2–8 (рис. 3.1).

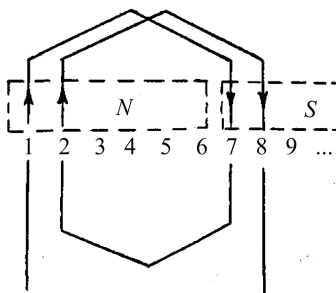


Рис. 3.1. Катушечная группа однослойной петлевой обмотки при $q = 2$ и $y' = 6$

Для построения схемы однослойной концентрической обмотки для данного примера (при $q = 2$) необходимо знать два шага y_1 и y_2 .

Если принять за первый шаг y_1 шаг, который относительно других секций имеет больший размер, то в зависимости от числа секций, входящих в катушечную группу, этот шаг будет определяться как

$$y_1 = 4q - 1. \quad (3.1)$$

Для рассматриваемого примера выше было определено, что число секций, приходящихся на одну катушечную группу, равно 2, следовательно, шаг первой секции y_1 будет равен

$$y_1 = 4 \cdot 2 - 1 = 7.$$

Шаг второй секции этой катушечной группы, которая должна располагаться внутри первой катушечной группы, должен быть меньше первого на 2 (так как одна секция имеет две активные стороны):

$$y_2 = y_1 - 2. \quad (3.2)$$

При расчете это будет составлять

$$y_2 = 7 - 2 = 5.$$

Таким образом, при $q = 2$ и $y_1 = 6$, получаем $y_1 = 7$, $y_2 = 5$.

Для того чтобы убедиться в правильности расчета, проводится проверка по выражению

$$\frac{y_1 + \dots + y_n}{q_n} = y', \quad (3.3)$$

где n – число секций, входящих в катушечную группу, то есть $n = q$.

Для нашего примера такая проверка должна выглядеть следующим образом:

$$\frac{y_1 + y_2}{2} = 6.$$

Подставляем найденные значения y_1 и y_2 :

$$\frac{7 + 5}{2} = 6.$$

Следовательно, расчет выполнен верно.

Катушечная группа однослойной concentрической обмотки при $q = 2$ и $y_1 = 7$, $y_2 = 5$ показана на рис. 3.2.

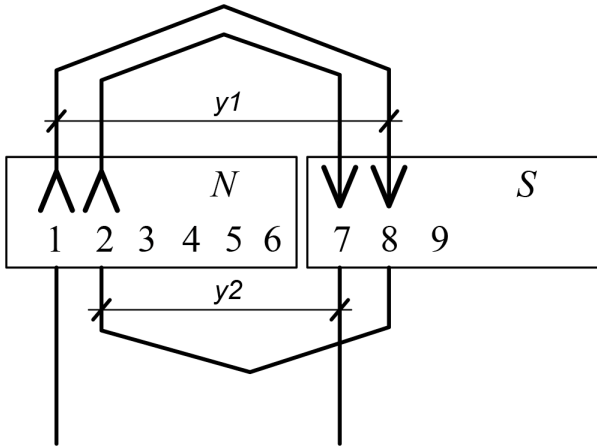


Рис. 3.2. Катушечная группа однослойной concentрической обмотки с указанием направления тока в активных проводниках при $q = 2$ и $y_1 = 7$, $y_2 = 5$

Число катушечных групп в одной фазе для однослойной петлевой и concentрической статорной обмотки определим по формуле (2.1):

$$N_{1\Phi}^{(1)} = P = 2.$$

На три фазы, соответственно, число катушечных групп будет определяться по формуле (2.2) и будет равно

$$N_{3\Phi}^{(1)} = P \cdot m = 2 \cdot 3 = 6.$$

Для того чтобы определить смещение катушечных групп относительно друг друга внутри фазы, необходимо знать следующую величину, относящуюся к обмоточным данным: число электрических градусов, приходящихся на один паз α , определяемое по формуле (2.8):

$$\alpha = \frac{360 \cdot P}{Z} = \frac{360 \cdot 2}{24} = 30^\circ \text{ эл.}$$

В однослойной обмотке первая катушечная группа участвует в создании первой пары полюсов (рис. 3.3), вторая должна создавать вторую пару полюсов, следовательно, расстояние между ними должно быть равно одной паре полюсов, то есть 360° эл.

Отсюда сдвиг между катушечными группами одной фазы в пазах равен

$$A = B = C = \frac{360}{\alpha} = \frac{360}{30} = 12 \text{ пазов.}$$

Следовательно, если первую катушечную группу начали укладывать с 1-го паза, то начало второй катушечной группы должно размещаться через 360° эл., что согласно вышеприведенному расчету составляет 12 пазов. Тогда вторая катушечная группа фазы «А» должна начаться через двенадцать пазов относительно первого, то есть – с 13-го паза (рис. 3.3, 3.4).

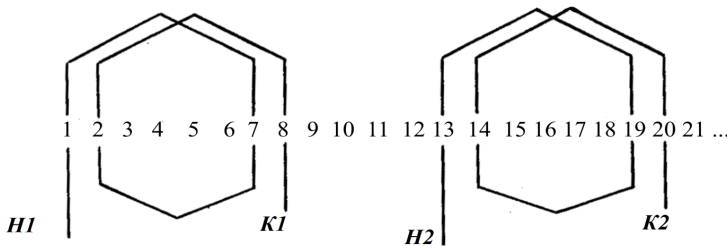


Рис. 3.3. Размещение катушечных групп в одной фазе однослойной петлевой статорной обмотке при $Z = 24$; $P = 2$; $N_{1\phi}^{(1)} = 2$

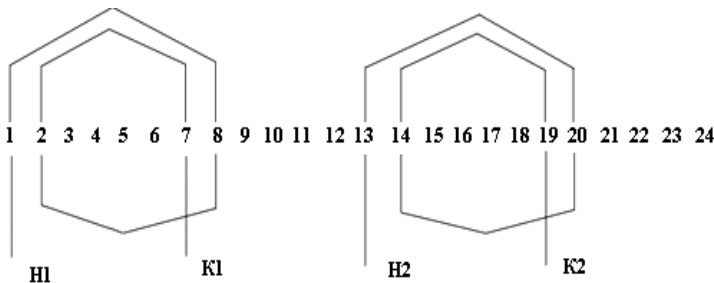


Рис. 3.4. Размещение катушечных групп в одной фазе однослойной концентрической статорной обмотке при $Z = 24$; $P = 2$; $N_{1\phi}^{(1)} = 2$

Как правило, на клеммный щиток машины выводятся 6 выводов, три из которых – начала фаз, которые присоединяются к источнику питания по линиям $L1, L2, L3$, и три – концы фаз, которые участвуют в создании схемы соединения обмоток («звезда» Y или «треугольник» Δ). Но до этого внутри каждой фазы необходимо произвести соединение катушечных групп. Для однослойных обмоток любого типа, для соблюдения полюсности (синхронной частоты вращения магнитного поля статора) в обмотке, необходимо соединять катушечные группы последовательно, то есть конец предыдущей катушечной группы с началом следующей.

В нашем случае катушечные группы будут соединяться внутрифазно так, как это показано на рис. 3.5 для однослойной петлевой обмотки. Для однослойной концентрической обмотки соединение катушечных групп внутри фазы будет выполнено аналогично.

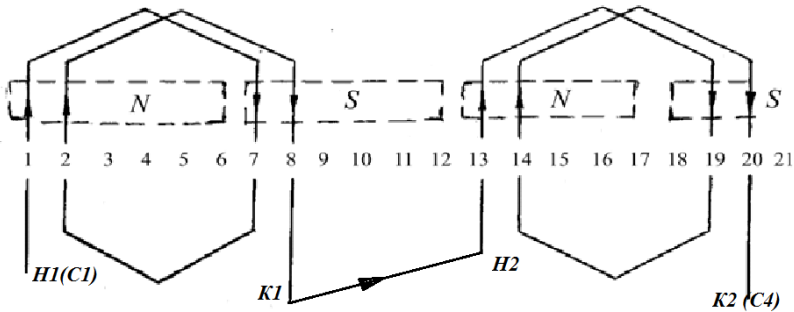


Рис. 3.5. Внутрифазное соединение катушечных групп с указанием направления токов в активных сторонах секций

Последовательность укладки и внутрифазное соединение двух катушечных групп оставшихся двух фаз должно быть выполнено аналогично, как и для первой фазы. Особенность укладки состоит только в том, что для получения в расточке статора вращающегося переменного магнитного поля, согласно первому условию, эти фазы должны быть смещены в пространстве относительно первой на 120° эл. и 240° эл. соответственно.

$$B = \frac{120}{\alpha}; \quad (3.4)$$

$$C = \frac{240}{\alpha}. \quad (3.5)$$

То есть смещение фаз в пазах для рассматриваемого варианта должно составлять

$$B = \frac{120}{\alpha} = \frac{120}{30} = 4, \quad C = \frac{240}{\alpha} = \frac{240}{30} = 8.$$

Исходя из расчета, получаем, что вторая фаза относительно первой должна быть смещена на 4 паза, то есть ее начало будет находиться в пазу 5, а третья фаза относительно второй должна быть смещена также на 4 паза или на 8 относительно первой, то есть начало третьей фазы будет находиться в пазу 9.

Полностью выполненная схема однослойной петлевой статорной обмотки с расстановкой токов в активных проводниках согласно второму условию получения вращающегося поля представлена на рис. 3.6.

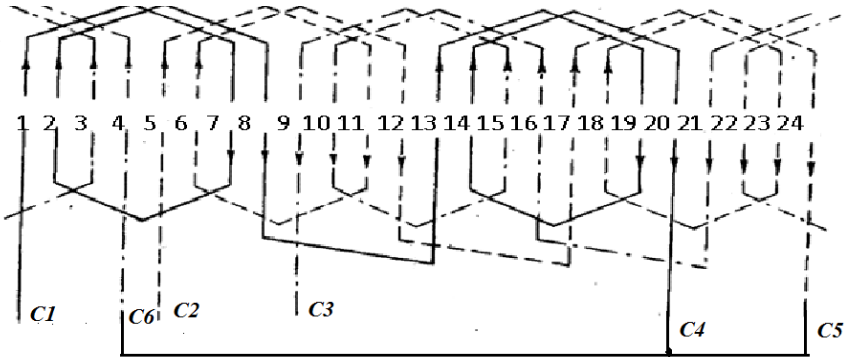


Рис. 3.6. Развернутая схема однослойной петлевой статорной обмотки при $N_{3\Phi}^{(1)} = 6$; $y' = 6$; $q = 2$; $\alpha = 30^\circ$; $a = 1$

Схема однослойной концентрической обмотки на $Z = 24$ и $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ показана на рис. 3.7.

Указанное направление токов в активных проводниках и расстановка полюсов на приведенных схемах соответствует принятому моменту времени t_1 , равному $1/150 \text{ с}$ (одна треть периода трехфазного тока по времени).

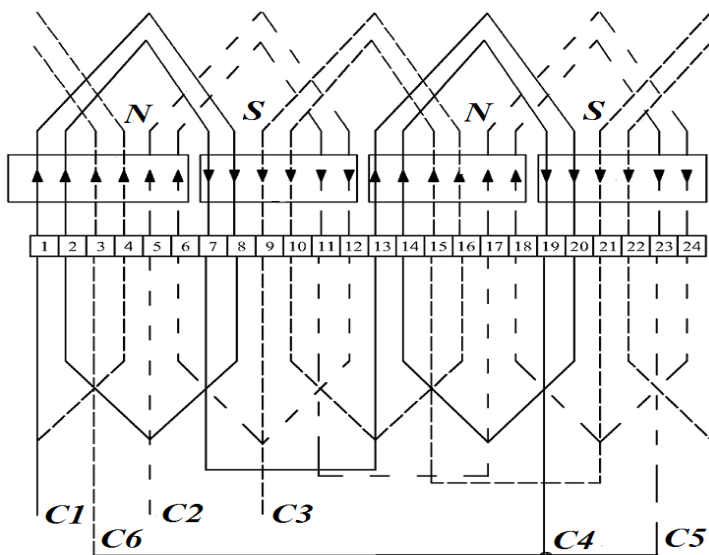


Рис. 3.7. Развернутая схема однослойной концентрической статорной обмотки при $N_{3\Phi}^{(1)} = 6$; $y' = 6$; $q = 2$; $\alpha = 30^\circ$ эл.; $a = 1$

Индивидуальные задания

Таблица 3.1

Данные для решения практической задачи

Вариант	Z	n , мин ⁻¹	U_{Φ} , В	f , Гц
1	24	1500	220	50
2	36	1500	220	50
3	48	1500	220	50
4	24	3000	220	50
5	36	1500	220	50
6	48	1500	220	50
7	24	1500	220	50
8	36	3000	220	50
9	48	1500	220	50
10	24	750	220	50
11	36	1500	220	50
12	48	750	220	50

Вариант	Z	$n, \text{мин}^{-1}$	$U_{\phi}, \text{В}$	$f, \text{Гц}$
13	24	3000	220	50
14	36	1500	220	50
15	48	3000	220	50
16	24	3000	220	50
17	36	3000	220	50
18	48	1500	220	50
19	24	3000	220	50
20	36	3000	220	50
21	48	1500	220	50
22	24	3000	220	50
23	36	1500	220	50
24	48	3000	220	50
25	24	1000	220	50
26	36	3000	220	50
27	48	1000	220	50
28	24	1500	220	50
29	36	1000	220	50
30	48	3000	220	50

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите основные элементы статорных обмоток асинхронных двигателей и дайте их определение.
2. Назовите основные обмоточные данные. Как они определяются?
3. Какие принципы заложены в построение схем обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей для получения вращающего магнитного поля в расточке статора?
4. В чем принципиальное отличие расчета обмоточных данных для концентрических статорных обмоток?
5. Назовите достоинства (недостатки) однослойных статорных обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.
6. Назовите достоинства (недостатки) двухслойных статорных обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

4. РАСЧЕТ ЧИСЛА ВИТКОВ В ОБМОТКЕ ОДНОЙ ФАЗЫ И ОДНОЙ СЕКЦИИ

Цель работы: уметь определять число витков в обмотке одной фазы асинхронного двигателя (W_{Φ}) и в катушке одной ее секции ($W_{сек}$).

Порядок выполнения работы:

1. Определить величину магнитного потока.
2. Выполнить проверку магнитного потока на оптимальное значение относительно числа витков, приходящихся на фазу.
3. Определить оптимальное значение магнитных нагрузок по участкам статора относительно магнитного потока.
4. Определить число активных проводников в одном пазу.
5. Определить число витков в одной секции.

Общие теоретические сведения

При подаче напряжения U_{Φ} на обмотку по ней потечет ток холостого хода I_{xx} (рис. 4.1). Так как напряжение изменяется по синусоидальному закону, ток тоже будет переменным. В свою очередь он создаст в магнитной системе машины магнитный поток Φ , который также будет переменным.

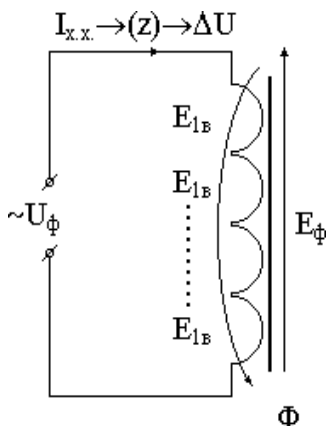


Рис. 4.1. Принципиальная схема работы асинхронного двигателя в режиме холостого хода

Переменный магнитный поток Φ индуцирует в витках обмотки, которая его создала, ЭДС (E_Φ), направленную встречно приложенному напряжению (закон электромагнитной индукции).

ЭДС фазной обмотки E_Φ будет слагаться из суммы ЭДС отдельных витков E_{1B} , В:

$$E_\Phi = \sum E_{1B}, \quad \text{или} \quad E_\Phi = E_{1B} \cdot W_\Phi. \quad (4.1)$$

где W_Φ – количество витков в обмотке одной фазы, шт.

Кроме того, ток I_{xx} создает на активном и реактивном сопротивлениях обмотки r и x падение напряжения $\Delta U = I \cdot r_1 + I \cdot x_1$.

Таким образом, приложенное к обмотке напряжение U_Φ уравновешивается ЭДС E_Φ и падением напряжения в обмотке ΔU .

Математически, в векторной форме, все сказанное выше приведено на упрощенной векторной диаграмме асинхронного двигателя (рис. 4.2, а). Для наглядности рядом показана фактическая векторная диаграмма электромашин, при этом $U_\Phi = U_1$, а $E_\Phi = E_1$.

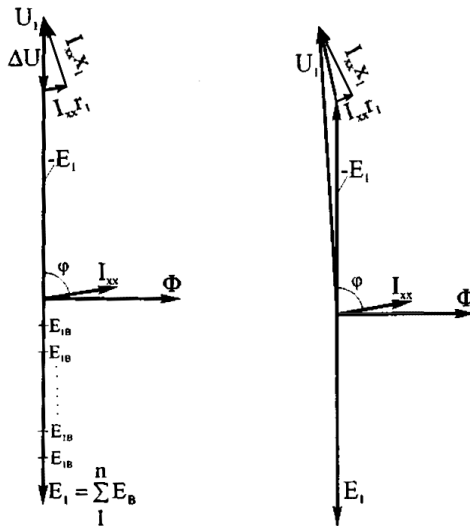


Рис. 4.2. Векторные диаграммы асинхронного двигателя
а – упрощенная; б – фактическая

Методика выполнения задания

Число витков в обмотке одной фазы равно

$$W_{\Phi} = \frac{E_{\Phi}}{E_{1B}}, \quad (4.2)$$

где E_{Φ} – ЭДС обмотки фазы, В;

E_{1B} – ЭДС одного витка обмотки, В.

Падение напряжения ΔU в обмотке АД приблизительно составляет 2,5–4,0 % от U_{Φ} (в среднем около 3 %). Отсюда без ущерба для точности расчета можно записать, что ЭДС обмотки фазы (E_{Φ}) будет равна

$$E_{\Phi} = 0,97 \cdot U_{\Phi}, \quad (4.3)$$

где U_{Φ} – фазное напряжение, В.

Учитывая выражение (4.3), уравнение (4.2) можно записать как

$$W_{\Phi} = \frac{0,97 \cdot U_{\Phi}}{E_{1B}}. \quad (4.4)$$

Мгновенное значение ЭДС одного витка, как известно из теоретической электротехники, определяется из выражения

$$e_{1B} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (4.5)$$

где t – время, с.

Магнитный поток изменяется по закону

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t, \quad (4.6)$$

где Φ_m – амплитудное значение магнитного потока, Вб;

ω – угловая частота вращения поля.

Подставив уравнение (4.6) в (4.5) и взяв производную, получим

$$e_{1B} = -\omega \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t = \omega \cdot \Phi_m \cdot \sin (\omega \cdot t - \pi / 2). \quad (4.7)$$

Максимальное значение ЭДС одного витка будет когда

$$\sin (\omega \cdot t - \pi / 2) = 1 .$$

Так как $\omega = 2\pi \cdot f$, тогда

$$E_{1Вм} = \omega \cdot \Phi_m = 2\pi \cdot f \cdot \Phi_m . \quad (4.8)$$

Действующее значение отличается от максимального на $\sqrt{2}$, значит

$$E_{1В} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot \Phi_m . \quad (4.9)$$

У асинхронного двигателя обмотка редко бывает сосредоточенной, чаще всего $q > 1$. При этом часть магнитного потока Φ рассеивается, что учитывается коэффициентом распределения K_p :

$$K_p = \frac{\sin(\alpha \cdot q / 2)}{q \cdot \sin(\alpha / 2)} . \quad (4.10)$$

Практически все двухслойные обмотки выполняются только с укороченным шагом. Это приводит к тому, что на границах полюсов в секциях разных фаз, лежащих в одном пазу, направление токов будет встречное. Следовательно, суммарный магнитный поток от этих секций будет равен нулю, что уменьшает общий магнитный поток Φ . Указанное явление учитывается коэффициентом укорочения K_y .

Примечание. Для получения наиболее рационального K_y , при котором обеспечивается подавление высших гармоник магнитного потока наиболее искажающих форму кривой его изменения, рекомендуется коэффициент укорочения шага брать равным 0,8.

Отсюда шаг $y = 0,8 \cdot y'$. Следовательно, K_y можно определить из выражения

$$K_y = \sin \left(90^\circ \cdot \frac{y}{y'} \right) . \quad (4.11)$$

Для удобства расчетов пользуются произведением этих коэффициентов, которое называется обмоточным коэффициентом $K_{об}$:

$$K_{об} = K_p \cdot K_y . \quad (4.12)$$

Тогда окончательно ЭДС одного витка равна

$$E_{1B} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot K_{OB}. \quad (4.13)$$

Подставляя выражение (4.13) в (4.4), получим

$$W_{\Phi} = \frac{0,97 \cdot U_{\Phi}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot K_{OB}}. \quad (4.14)$$

В выражении (4.14) U_{Φ} и f заданы заказчиком, следовательно, для расчета W_{Φ} требуется знать лишь магнитный поток Φ . Последний под полюсом распределяется неравномерно (рис. 4.3). Однако при равенстве площадей прямоугольника со стороной B_{CP} и полусинусоиды с максимальным значением B_{δ} величина магнитного поля Φ под полюсом в любой точке будет одинаковой.

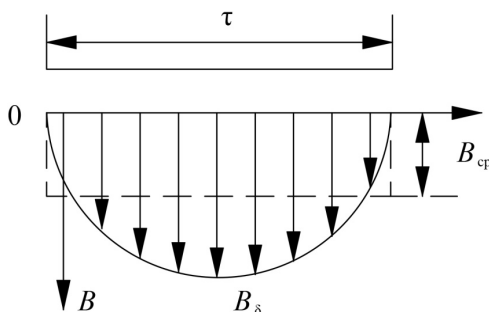


Рис. 4.3. Распределение B под полюсом в воздушном зазоре

Значит

$$B_{CP} = \frac{B_{\delta}}{\pi/2} = 2/\pi \cdot B_{\delta}, \quad (4.15)$$

где $2/\pi$ – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения магнитного потока под полюсом;

B_{CP} – среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл;

B_{δ} – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл. Берется из табл. 4.1.

Отсюда величина магнитного потока (B_δ) находится по формуле

$$\Phi = 2 / \pi \cdot B_\delta \cdot Q_\delta, \quad (4.16)$$

где Q_δ – площадь полюса в воздушном зазоре, м².

Расчет оптимального числа витков в обмотке одной фазы

Цель расчета – определение рационального числа витков в равносекционной обмотке одной фазы асинхронного двигателя – W'_Φ , при котором величины магнитных нагрузок (B_δ, B_z, B_c) будут оптимальны на всех участках магнитной цепи для данного АД (приблизительную полную мощность АД можно принять по приложению 1, $S_{дв} = f(D)$).

Такой расчет выполняется методом подбора. Полученная по формуле (4.16) величина магнитного потока Φ^* требует уточнения, так как, если подставить ее в формулу (4.14), дает, как правило, дробное число витков в обмотке W_Φ или такое число, при котором они не могут быть разложены равномерно по секциям фазных катушек. Естественно, такая обмотка невыполнима, потому что с одной стороны часть витка в пазы уложить нельзя, с другой, секции в ней получаются с разным числом витков. Получение же нужной величины магнитного потока возможно, так как допустимые пределы магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ (табл. 4.1) позволяют взять ее такой, при которой обмотка будет равносекционной, то есть с одинаковым числом витков в каждой секции.

Условие равносекционности обмотки вытекает из выражения числа активных проводников в одном пазу, шт.:

$$N_{\Pi} = \frac{2 \cdot W_\Phi \cdot m \cdot a}{Z}, \quad (4.17)$$

где a – число параллельных ветвей, шт.

Виток имеет два активных проводника, тогда $2W_\Phi \cdot m \cdot a$ – полное число активных проводников в обмотке АД. Из выражения (4.17) можно сделать следующий вывод: чтобы число витков в секциях обмотки было одинаковым, необходимо число активных проводников в пазу N_{Π} округлить, при этом для однослойной обмотки просто до целого значения, а для двухслойной – до целого и четного.

После округления N_{Π} выполняется уточнение числа витков в фазе W''_Φ , шт., по формуле

$$W_{\Phi}'' = \frac{N_{\Pi} \cdot Z}{2 \cdot m \cdot a}. \quad (4.18)$$

Таблица 4.1

Нормированные электромагнитные нагрузки АД

Наименование	Мощность, кВт		
	до 1	1–10	10–100
Индукция в воздушном зазоре (B_{δ}), Тл	0,3–0,6	0,6–0,7	0,7–0,9
Индукция в зубцах статора (B_z), Тл	1,3–1,5	1,4–1,6	1,4–1,8
Индукция в спинке статора (B_c), Тл	1,1–1,5	1,2–1,6	1,3–1,6

Примечание. Однослойные обмотки, как правило, не дают возможности укорачивать шаг для подавления высших гармоник. Это ведет к дополнительному нагреву стали магнитопровода (по сравнению с двигателями, у которых двухслойная обмотка имеет укороченный шаг). Исходя из этого, для электрической машины с однослойной обмоткой магнитные индукции на всех участках магнитной цепи берутся ближе к нижнему пределу, для двухслойных – к большему. Если асинхронный двигатель работает в помещениях с постоянной повышенной температурой, следует брать магнитные индукции (B_{δ} , B_z , B_c) ближе к нижнему пределу.

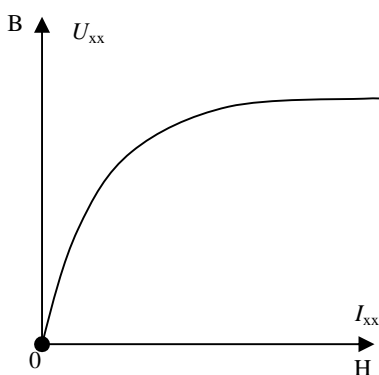


Рис. 4.4. Зависимость $B = f(H)$

Полученная равносекционная обмотка с числом витков на фазу W_{Φ}'' должна полностью использовать магнитную систему двигателя по магнитной нагрузке на всех участках ее цепи. В первую очередь, должны строго входить в нормы величины B_Z и B_C , приведенные в табл. 4.1. Дело в том, что электротехническая сталь, как известно, обладает насыщением. Поэтому расчетное повышение магнитных нагрузок (B_Z, B_C) сверх рекомендованных не приведет к их значительному увеличению. Резко возрастет лишь ток холостого хода I_{XX} (см. зависимость $B = f(H)$, рис. 4.4), причем он может оказаться значительно больше номинального. Следовательно, завышение величин B и I_{XX} увеличит только нагрев стали сердечника (так как $P_{XX} = B^2$) и вызовет перегрев обмотки (так как $P_{КЗ} = I^2$). Занижение величин B , а значит, и магнитного потока Φ занизит мощность машины.

Проверка равносекционной обмотки по нагрузкам магнитной цепи. Магнитные индукции зависят от величины магнитного потока Φ , который при округлении до W_{Φ}'' изменится и будет равен, Вб:

$$\Phi'' = \frac{0,97 \cdot U_{\Phi}}{4,44 \cdot f \cdot K_{об} \cdot W_{\Phi}''}. \quad (4.19)$$

Так как поток Φ'' в магнитной системе электромашины на всех участках неизменный ($\Phi = \text{const}$), то значения B_{δ}, B_Z, B_C зависят от площадей участков магнитной цепи: в воздушном зазоре – Q_{δ} , в зубцовой зоне – Q_Z , в спинке статора – Q_C .

Следовательно, плотности магнитного потока (магнитные индукции) на указанных участках будут неодинаковыми и равными, Тл:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi''}{2 / \pi \cdot Q_{\delta}}; \quad (4.20)$$

$$B_Z = \frac{\Phi''}{2 / \pi \cdot Q_Z} = B_{\delta} \cdot \frac{Q_{\delta}}{Q_Z}; \quad (4.21)$$

$$B_C = \frac{\Phi''}{2 \cdot Q_C} = B_{\delta} \cdot 2 / \pi \cdot \frac{Q_{\delta}}{2 \cdot Q_C}. \quad (4.22)$$

В зубцовой зоне магнитопровода АД распределение магнитной индукции B_z практически остается таким же, как в воздушном зазоре, поэтому коэффициент $2/\pi$ в выражении (4.21) сохраняется, как и при определении B_δ .

В формуле расчета B_c (4.22) учитывается, что магнитный поток Φ'' в спинке статора распределяется по всей площади равномерно (отсюда коэффициента $2/\pi$ – нет), а также то, что в спинке магнитопровода этот поток разделяется на две части (рис. 4.5). (Поэтому в знаменателе формулы появилась цифра 2)

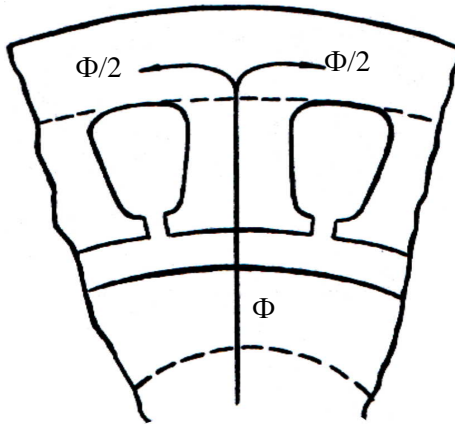


Рис. 4.5. Распределение магнитного потока в спинке статора

Полученные магнитные нагрузки B_z и B_c сравниваются с допустимыми. Они должны быть в пределах величин, указанных в табл. 4.1, то есть оптимальными (самыми выгодными).

Если магнитная нагрузка на каком-либо участке магнитной цепи (в электротехнической стали) выше нормы, необходимо повторить расчет, начиная с формулы (4.18), увеличив число проводников в пазу N_{Π} ; если ниже – необходимо уменьшить число проводников в пазу. Тем самым соответственно уменьшается или увеличивается магнитный поток Φ'' .

Однако даже если на всех участках магнитной цепи индукции вошли в пределы установленных норм, это не значит, что расчет может быть окончен. Рассчитываемый двигатель должен иметь оптимальные параметры, то есть из его магнитопровода должна быть «выжата» максимально-возможная мощность. Естественно, при этом B_δ , B_z , B_c должны иметь наибольшие значения из приведенных в табл. 4.1 норм с учетом состояния электротехнической стали (при новой – B_δ , B_z , B_c берутся ближе к большему пределу, и наоборот). Вот почему, выполняя поставленную цель, меняют N_{II} и выполняют несколько вариантов расчетов магнитных нагрузок.

Для наглядности проводимого подбора рационального числа витков в обмотке одной фазы асинхронного двигателя результаты всех расчетов W_ϕ обычно сводятся в таблицу (например, по форме табл. 4.2).

Таблица 4.2

Нагрузка магнитной цепи при числе витков W_ϕ''

Наименование величин	Расчетная формула	Варианты расчета			Допустимые пределы
		1	2	3	
Число проводников в пазу, N_{II} , шт.	$N_{II} = \frac{2 \cdot W_\phi' \cdot m \cdot a}{Z}$				
Число витков в обмотке одной фазы, W_ϕ'' , шт.	$W_\phi'' = \frac{N_{II} \cdot Z}{2 \cdot m \cdot a}$				
Величина магнитного потока при W_ϕ'' , Вб	$\Phi = \frac{0,97 \cdot U_\phi}{4,44 \cdot f \cdot K_{об} \cdot W_\phi''}$				
Индукция в воздушном зазоре B_δ , Тл	$B_\delta = \frac{\pi \cdot \Phi}{2 \cdot Q_\delta}$				Табл. 4.1
Индукция в зубцовой зоне B_z , Тл	$B_z = \frac{\Phi}{2 / \pi \cdot Q_z} = B_\delta \cdot \frac{Q_\delta}{Q_z}$				Табл. 4.1

Наименование величин	Расчетная формула	Варианты расчета			Допустимые пределы
		1	2	3	
Индукция в спинке статора B_c , Тл	$B_c = \frac{\Phi}{2 \cdot Q_c} =$ $= B_\delta \cdot 2 / \pi \cdot \frac{Q_\delta}{2 \cdot Q_c}$				Табл. 4.1

Исходя из вышеизложенного, учитывается, что при пересчете АД на другую частоту вращения нарушается согласование площадей участков магнитной цепи (B_δ , B_z , B_c). Отсюда магнитная индукция одного из участков в стали (B_z или B_c) может оказаться меньше нормы, тогда как другая в норме. Однако если увеличить магнитную индукцию в первом участке, во втором она увеличится сверх нормы. Такое превышение вызывает перегрев стали, ускоренное старение изоляции и выход машины из строя (она просто «сгорит»). Поэтому, несмотря на то, что один из участков магнитной цепи оказывается недогруженным, а следовательно, будет иметь место некоторое занижение мощности асинхронного двигателя, рациональным числом витков W_ϕ принимается то, при котором ни B_z , ни B_c не выходят за пределы норм.

Кроме того, при изменении частоты вращения у асинхронного двигателя после ремонта могут иметь место: «залипание» – ротор не проворачивается при включении машины в сеть, «застревание» – ротор вращается на значительно пониженных оборотах, «повышенный шум».

Причины кроются в содержании высших гармонических составляющих в магнитном потоке электромашин, а это связано с нарушением соотношения между числами зубцов магнитопровода статора (Z_1) и ротора (Z_2). Вот почему при такой модернизации асинхронного двигателя обязательно проводится проверка на допустимость ее проведения:

1. Для предупреждения «прилипания» ротора в момент пуска требуется, чтобы

$$Z_2 \neq Z_1; Z_2 \neq 0,5 \cdot Z_1; Z_2 \neq 2 \cdot Z_1. \quad (4.23)$$

Кроме того,

$$Z_2 = (2p \cdot 3) \cdot i, \quad (4.24)$$

где i – любое целое число;

p – число пар полюсов.

2. Для предупреждения «застывания» ротора на пониженной частоте вращения требуется, чтобы

$$Z_2 \neq 2 \cdot p \cdot 3 \cdot i + 2p = 2p \cdot (3 \cdot i + 1). \quad (4.25)$$

Кроме того,

$$\begin{array}{l} Z_2 \neq Z_1 \pm p \\ Z_2 \neq 0,5 \cdot Z_1 \pm p \end{array} \quad \begin{array}{l} Z_2 \neq Z_1 \pm 2p \\ Z_2 \neq 2 \cdot Z_1 \pm 2p \end{array}. \quad (4.26)$$

3. Для предупреждения повышенного шума электродвигателя требуется, чтобы

$$Z_2 \neq 2p \cdot 3i \pm 1,$$

$$Z_2 \neq 2p \cdot 3i \pm (2p \pm 1). \quad (4.27)$$

Упрощенное определение числа проводников в одном пазу N_{Π}

Целью расчета является сокращение вычислений подбора рационального числа витков W_{Φ} .

Для этого в выражение (4.17) подставляется значение W_{Φ} (формула (4.14)) и получается, что

$$N_{\Pi} = \frac{2 \cdot m \cdot a \cdot 0,97 \cdot U_{\Phi}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot K_{об} \cdot Z}. \quad (4.28)$$

Если $f = 50$ Гц, коэффициент $K_{об} \approx 0,97$, то с допустимыми округлениями формула (4.28) принимает вид

$$N_{\Pi} = \frac{a \cdot U_{\Phi}}{37 \cdot \Phi \cdot Z}. \quad (4.29)$$

В полученном выражении неизвестен только магнитный поток Φ . Его можно определить по известным допустимым величинам магнитной индукции (табл. 4.1) или в зубцовой зоне B_Z по формуле (4.30), или в спинке статора B_C по формуле (4.31), так как Φ на всех участках магнитной цепи неизменен.

Тогда

$$\Phi = 2 / \pi \cdot B_Z \cdot Q_Z, \quad (4.30)$$

или

$$\Phi = 2 \cdot B_C \cdot Q_C. \quad (4.31)$$

где $2 / \pi$ – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения магнитного потока в зубцовой зоне сердечника статора;

2 – коэффициент в формуле (4.31) учитывает разделение магнитного потока Φ в спинке статора на два направления.

Следует учитывать, что если магнитопровод рассчитываемой электромашинны был выполнен для числа полюсов, не соответствующих запроектированной частоте вращения (то есть n_n – изменено), между площадями магнитной цепи (Q_δ , Q_C и Q_Z), как уже говорилось, нарушается согласование. В этом случае формула расчета магнитного потока Φ зависит от соотношения площадей Q_Z и Q_C .

Причем, если

$$\frac{2Q_C}{Q_Z} \geq 1,15, \quad (4.32)$$

то есть $n_3 < n_n$ (где n_3 – заданная заказчиком частота вращения поля), Φ следует определять только по магнитной индукции в зубцовой зоне B_Z (4.30), если менее $0,75$ ($n_3 > n_n$), то рассчитывать Φ можно только по магнитной индукции в спинке статора B_C (4.31).

Полученную из формулы (4.29) величину числа активных проводников в пазу N_{Π} подставляют в выражение (4.18) и находят число витков в обмотке одной фазы W_{Φ}'' . При этом, в случае сомнения,

можно вновь определить уточненный магнитный поток – Φ (4.19) и индукции: в зубцовой зоне – B_Z (4.21), а также в спинке статора – B_C (4.22), затем сравнить полученные результаты с допустимыми величинами табл. 4.1. Если потребуется – проводится коррекция.

Число витков в секции обмотки

В однослойной обмотке активные проводники N_{Π} одной секции полностью занимают паз, поэтому число витков ($W_{\text{сек}}^{(1)}$) в ней равно числу этих проводников в пазу.

$$W_{\text{сек}}^{(1)} = N_{\Pi}. \quad (4.33)$$

В двухслойной обмотке в одном пазу лежат активные проводники двух секций, следовательно, число витков в секции ($W_{\text{сек}}^{(2)}$) равно половине числа активных проводников в пазу:

$$W_{\text{сек}}^{(2)} = \frac{N_{\Pi}}{2}. \quad (4.34)$$

Задания для самостоятельного расчета

Данные для самостоятельного выполнения заданий представлены в табл. 4.4 в соответствии с вариантом, заданным преподавателем.

Задание 4.1. Определить рациональное число витков в двухслойной обмотке одной фазы и одной секции трехфазного асинхронного двигателя с параметрами: фазное напряжение $U_{\Phi} = 220$ В; частота вращения поля в расточке статора $n = 1500$ мин⁻¹; частота тока, $f = 50$ Гц; число пазов в магнитопроводе $Z = 48$ шт.; внутренний диаметр расточки магнитопровода статора $D = 197$ мм; площадь полюса в воздушном зазоре $Q_{\delta} = 0,0224$ м²; площадь полюса в зубцовой зоне $Q_Z = 0,013$ м²; площадь поперечного сечения спинки статора $Q_C = 0,0051$ м²; полный (диаметральный) шаг обмотки $y = 12$; число пазов на полюс и фазу $q = 4$; число электрических градусов $\alpha = 15^{\circ}$ эл.; число параллельных ветвей обмотки принять равной единице ($a = 1$).

Решение. Рассчитаем число витков в обмотке одной фазы трехфазного асинхронного двигателя – W_{Φ} .

Для упрощения расчета определяем дополнительные исходные данные.

Количество пар полюсов (формула (1.3)):

$$P = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2 \text{ шт.}$$

Приблизительную полную мощность $S_{\text{дв}}$ асинхронного двигателя находим по зависимости от внутреннего диаметра магнитопровода статора $S_{\text{дв}} = f(D)$ (см. приложение 1). При $D = 197$ мм и числе пар полюсов $P = 2$ шт., $S_{\text{дв}} \approx 17 - 18$ кВт·А.

Укороченный шаг обмотки с округлением:

$$y = 0,8 \cdot y' = 0,8 \cdot 12 = 10 \text{ зубцов.}$$

Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя ($P_{\text{н}}$) меньше полной на величины $\cos \phi$ и КПД(η). Учитывая это, рекомендованную магнитную индукцию в воздушном зазоре (табл. 4.1) берем в интервале мощностей от 10 до 100 кВт ($B_{\delta} = 0,7 - 0,9$ Тл). Допустим, что по данным осмотра и документов электромашина отработала более половины своего ресурса, отсюда принимаем $B_{\delta} = 0,75$ Тл.

Величина магнитного потока (формула (4.16)):

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot B_{\delta} \cdot Q_{\delta} = \frac{2}{3,14} \cdot 0,75 \cdot 0,0224 = 0,011 \text{ Вб.}$$

Предварительное число витков в обмотке одной фазы (формула (4.14)):

$$W_{\Phi} = \frac{0,97 \cdot U_{\Phi}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot K_{\text{об}}} = \frac{0,97 \cdot 220}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,011 \cdot 0,925} = 94,48 \text{ шт.},$$

где $K_{\text{об}}$ – обмоточный коэффициент, который находим:

– по коэффициенту распределения обмотки (формула (4.10)):

$$K_p = \frac{\sin(\alpha \cdot q / 2)}{q \cdot \sin(\alpha / 2)} = \frac{\sin(15 \cdot 4 / 2)}{4 \cdot \sin(15 / 2)} = 0,958;$$

– по коэффициенту укорочения (формула (4.11)):

$$K_y = \sin \cdot (90^\circ \cdot \frac{y}{y'}) = \sin \cdot (90^\circ \cdot \frac{10}{12}) = 0,966;$$

следовательно, $K_{об}$ равно (формула (4.12)):

$$K_{об} = K_p \cdot K_y = 0,958 \cdot 0,966 = 0,925.$$

Число витков в обмотке W_ϕ не может быть дробным, так как 0,48 витка положить в паз невозможно, отсюда (после округления) $W'_\phi = 94$ шт.

Для выполнения условия равносекционности определяем число активных проводников в одном пазу по формуле (4.17):

$$N_{II} = \frac{2 \cdot W'_\phi \cdot m \cdot a}{Z} = \frac{2 \cdot 94 \cdot 3 \cdot 1}{48} = 11,75 \text{ шт.}$$

После округления для двухслойной обмотки $N_{II} = 12$.

Следовательно, предварительное число витков в обмотке одной фазы будет равно (формула (4.18)):

$$W''_\phi = \frac{N_{II} \cdot Z}{2 \cdot m \cdot a} = \frac{12 \cdot 48}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 96,$$

где W''_ϕ – целое и четное число, а значит округлений и изменений не требует.

Проверяем нагрузку магнитной цепи сердечника статора АД при $W''_\phi = 96$ витков.

Магнитный поток (4.19):

$$\Phi = \frac{0,97 \cdot U_\phi}{4,44 \cdot f \cdot K_{об} \cdot W''_\phi} = \frac{0,97 \cdot 220}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,925 \cdot 96} = 0,0108 \text{ Вб.}$$

Магнитные индукции (с округлениями):

– в воздушном зазоре из формулы (4.20)

$$B_\delta = \frac{\Phi}{2 / \pi \cdot Q_\delta} = \frac{0,0108}{2 / 3,14 \cdot 0,0224} = 0,727 \text{ Тл;}$$

– в зубцовой зоне из формулы (4.21)

$$B_z = \frac{\Phi}{2/\pi \cdot Q_z} = \frac{0,0108}{2/3,14 \cdot 0,013} = 1,3 \text{ Тл};$$

– в спинке статора из формулы (4.22)

$$B_c = \frac{\Phi}{2 \cdot Q_c} = \frac{0,0108}{2 \cdot 0,0051} = 1,06 \text{ Тл.}$$

Из табл. 4.1 следует, что полученные магнитные нагрузки B_c и B_z меньше допустимых, что позволяет увеличить магнитный поток Φ (без перегрева стали) путем уменьшения числа витков в обмотке. А это, в свою очередь, разрешает увеличить сечение провода в пазу, номинальный ток и, наконец, мощность АД (см. формулы расчета далее).

Изменение N_{Π} меняет W_{Φ} , поэтому в формуле (4.18) принимаем $N_{\Pi} = 10$ (вместо $N_{\Pi} = 12$), тогда

$$W_{\Phi}'' = \frac{N_{\Pi} \cdot Z}{2 \cdot m \cdot a} = \frac{10 \cdot 48}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 80 \text{ витков.}$$

Далее расчет выполняется в том же порядке, как и ранее: по формулам (4.19), (4.21), (4.22) рассчитываются Φ , B_c и B_z с проверкой последних по допустимым величинам табл. 4.1. Для удобства все расчеты сводим в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Нагрузка магнитной цепи при числе витков W_{Φ}''

Наименование величин	Расчетная формула	Варианты расчета			Допустимые пределы
		1	2	3	
Число проводников в пазу, N_{Π} , шт.	$N_{\Pi} = \frac{2 \cdot W_{\Phi}' \cdot m \cdot a}{Z}$	12	10	8	
Число витков в обмотке одной фазы, W_{Φ}'' , шт.	$W_{\Phi}'' = \frac{N_{\Pi} \cdot Z}{2 \cdot m \cdot a}$	96	80	64	

Наименование величин	Расчетная формула	Варианты расчета			Допустимые пределы
		1	2	3	
Величина магнитного потока при W_Φ'' , Вб	$\Phi = \frac{0,97 \cdot U_\Phi}{4,44 \cdot f \cdot K_{об} \cdot W_\Phi''}$	0,0108	0,0130	0,016	
Индукция в воздушном зазоре B_δ , Тл	$B_\delta = \frac{\pi \cdot \Phi}{2 \cdot Q_\delta}$	0,757	0,91	1,12	0,7–0,9
Индукция в зубцовой зоне B_z , Тл	$B_z = \frac{\Phi}{2 / \pi \cdot Q_z}$	1,3	1,57	1,93	1,4–1,8
Индукция в спинке статора B_c , Тл	$B_c = \frac{\Phi}{2 \cdot Q_c}$	1,06	1,27	1,57	1,3–1,6

Анализ расчетов показывает, что при числе витков в обмотке одной фазы, равном 80, нагрузки в магнитной цепи сердечника АД наиболее удовлетворяют установленным нормам (табл. 4.1). Повышение или понижение W_Φ'' приводит к значительному ухудшению загрузки магнитопровода.

Следовательно, для изготовления двухслойной обмотки трехфазного асинхронного двигателя принимаем число витков $W_\Phi = 80$.

Рассчитаем число витков в одной секции двухслойной обмотки трехфазного асинхронного двигателя – $W_{сек}^{(2)}$.

Так как при числе витков в обмотке одной фазы равной 80, число проводников в одном пазу равно 10 ($N_\Pi = 10$). Тогда для двухслойной обмотки число витков в одной секции рассчитаем по формуле (4.34):

$$W_{сек}^{(2)} = \frac{N_\Pi}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ шт.}$$

Задание 4.2. Определить упрощенным методом рациональное число витков в двухслойной обмотке одной фазы и одной секции трехфазного асинхронного двигателя. Данные магнитопровода: внутренний диаметр расточки статора $D = 105$ мм; площадь полю-

са в зубцовой зоне $Q_z = 0,0032 \text{ м}^2$; площадь спинки статора $Q_c = 0,0019 \text{ м}^2$; число пазов $Z = 36$ шт. Технические задания заказчика: фазное напряжение $U_\Phi = 220 \text{ В}$; частота вращения поля в расточке статора $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$; частота тока $f = 50 \text{ Гц}$. Число параллельных ветвей обмотки принять равной единице ($a = 1$).

Решение. Рассчитаем число витков в обмотке одной фазы трехфазного асинхронного двигателя – W_Φ .

Количество пар полюсов из выражения (1.3) будет равно

$$P = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1000} = 3 \text{ шт.}$$

Находим приблизительную полную мощность асинхронного двигателя $S_{\text{дв}}$ по зависимости от внутреннего диаметра магнитопровода статора $S_{\text{дв}} = f(D)$ (см. приложение 1). При $D = 105 \text{ мм}$ и числе пар полюсов $P = 3$ шт., $S_{\text{дв}} \approx 1 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. С учетом $\cos\varphi$ и КПД (η) мощность АД $P_{\text{н}}$ будет менее 1 кВт.

Определяем соотношение площадей в спинке статора и зубцовой зоне магнитопровода по формуле (4.32):

$$\frac{2 \cdot Q_c}{Q_z} = \frac{2 \cdot 0,0019}{0,0032} = 1,18.$$

Следовательно, расчет магнитного потока выполняем по формуле (4.30), так как $1,18 > 1,15$, то есть $n_z < n_n$. Для этого по табл. 4.1 (в интервале $P_{\text{н}}$ до 1 кВт) берем B_z равной 1,4 Тл:

$$\Phi = 2 / \pi \cdot B_z \cdot Q_z = 0,637 \cdot 1,4 \cdot 0,0032 = 0,0029 \text{ Вб.}$$

Число активных проводников в одном пазу определяется по формуле (4.29):

$$N_{\text{п}} = \frac{U_\Phi \cdot a}{37 \cdot \Phi \cdot Z} = \frac{220 \cdot 1}{37 \cdot 0,0029 \cdot 36} = 56,95 \text{ шт.}$$

Округляем полученную величину до целого и четного значения $N_{\text{п}} = 58$ проводников.

Рассчитаем число витков в обмотке одной фазы трехфазного асинхронного двигателя по формуле (4.18):

$$W_{\Phi}'' = \frac{N_{\Pi} \cdot Z}{2 \cdot m \cdot a} = \frac{58 \cdot 36}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 348 \text{ витков.}$$

Проведем проверку полученного числа витков:

– магнитный поток из формулы (4.19):

$$\Phi = \frac{U_{\Phi}}{4,44 \cdot f \cdot W_{\Phi}''} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 348} = 0,00285 \text{ Вб,}$$

где 0,97 в числителе и $K_{\text{Об}}$ в знаменателе сокращены (близкие по значению);

– магнитная индукция в зубцовой зоне из формулы (4.21):

$$B_z = \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot Q_z} = \frac{0,00285}{2 / 3,14 \cdot 0,0032} = 1,398 \text{ Тл;}$$

– магнитная индукция в спинке статора из формулы (4.22):

$$B_c = \frac{\Phi}{2 \cdot Q_c} = \frac{0,00285}{2 \cdot 0,0019} = 0,75 \text{ Тл.}$$

Величина магнитной индукции B_c значительно ниже допустимой, что объясняется нарушением согласования площадей магнитной цепи, так как заданная заказчиком частота вращения поля в расточке статора ($n_3 = 1000 \text{ мин}^{-1}$) не соответствует той, на которую изначально был номинально рассчитан магнитопровод электромашин. Это позволяет, не смотря на остаточный ресурс машины, увеличить индукцию B_z до предельного верхнего значения (1,5 Тл), путем уменьшения числа витков в обмотке одной фазы, то есть принять N_{Π} равным 54-м активных проводников. Действительно, в этом случае W_{Φ}'' будет равно 324 витка, $\Phi = 0,003 \text{ Вб}$, $B_z = 1,5 \text{ Тл}$, $B_c = 0,79 \text{ Тл}$.

Примечание. В заключение, еще раз следует подчеркнуть, что нарушение согласования площадей в магнитной цепи электрической машины не только понижает ее мощность, но и резко ухудшает эксплуатационные показатели работы двигателя, ведет к перерасходу электрической энергии в сети. Поэтому ремонт АД с изменением номинальной частоты вращения должен быть обязательно технико-экономически обоснован. Также обязательно требуется проверка согласования числа зубцов статора Z_1 и ротора Z_2 по формулам (4.23–4.27).

Рассчитаем число витков в одной секции двухслойной обмотки трехфазного асинхронного двигателя $W_{\text{сек}}^{(2)}$.

Расчет выполним по выражению (4.34):

$$W_{\text{сек}}^{(2)} = \frac{N_{\text{п}}}{2} = \frac{54}{2} = 27 \text{ витков.}$$

Индивидуальные задания

Таблица 4.4

Исходные данные к расчету задач

Вариант	Исходные данные												
	$U_{\text{Ф}}$, В	n , мин ⁻¹	f , Гц	Z	D , мм	Q_{δ} , М ²	Q_z , М ²	Q_c , М ²	y' / y	q	α , ° эл.	a	$2P$
1	220	1500	50	24	194	0,03050	0,017635	0,008873	6/5	2	30	1	4
2	220	1500	50	36	126	0,01237	0,005187	0,002115	9/7	3	20	1	4
3	220	1500	50	48	232	0,036442	0,01539	0,013337	12/10	4	15	1	4
4	220	3000	50	24	84	0,013194	0,004108	0,00185	12/10	4	15	1	2
5	220	1500	50	36	145	0,013096	0,006634	0,002425	9/7	3	20	1	4
6	220	1500	50	48	232	0,041908	0,017326	0,014015	12/10	4	15	1	4
7	220	1500	50	24	95	0,005461	0,002355	0,002966	6/5	2	30	1	4
8	220	3000	50	36	145	0,036442	0,018462	0,005374	18/14	6	10	1	2
9	220	750	50	48	185	0,01017	0,003926	0,002994	6/5	2	30	1	8
10	220	1500	50	24	95	0,009699	0,003127	0,001766	6/5	2	30	1	4
11	220	1000	50	36	84	0,00343	0,00141	0,000826	6/5	2	30	1	6
12	220	3000	50	48	185	0,052307	0,020626	0,005932	24/19	8	7,5	1	2
13	220	1500	50	24	110	0,010799	0,003541	0,002016	6/5	2	30	1	4
14	220	1000	50	36	84	0,00431	0,001772	0,001038	6/5	2	30	1	6
15	220	750	50	48	198	0,011274	0,004911	0,003357	6/5	2	30	1	8
16	220	3000	50	24	130	0,026546	0,011341	0,003828	12/10	4	15	1	2
17	220	3000	50	36	88	0,010781	0,004834	0,001616	18/14	6	10	1	2
18	220	750	50	48	197	0,015472	0,004956	0,003422	6/5	2	30	1	8
19	220	3000	50	24	54	0,004241	0,001587	0,000664	12/10	4	15	1	2
20	220	1500	50	36	95	0,007461	0,003199	0,001311	9/7	3	20	1	4
21	220	3000	50	24	54	0,00475	0,001778	0,000744	12/10	4	15	1	2
22	220	1500	50	36	100	0,017278	0,008155	0,003118	18/14	6	10	1	4
23	220	3000	50	24	61	0,002682	0,001214	0,000484	6/5	2	30	1	2

Вариант	Исходные данные												
	U_{Φ} , В	n , мин ⁻¹	f , Гц	Z	D , мм	Q_{δ} , м ²	Q_Z , м ²	Q_C , м ²	y'/y	q	α , ° эл.	a	$2P$
24	220	1500	50	36	105	0,008246	0,00392	0,001491	9/7	3	20	1	4
25	220	3000	50	24	54	0,005513	0,002063	0,000864	12/10	4	15	1	2
26	220	3000	50	48	211	0,059879	0,023254	0,007659	24/19	8	7,5	1	2
27	220	1000	50	36	194	0,020303	0,013147	0,003794	6/5	2	30	1	6
28	220	1500	50	24	65	0,003775	0,001492	0,001227	6/5	2	30	1	4
29	220	1000	50	36	113	0,006505	0,002585	0,000931	6/5	2	30	1	6
30	220	750	50	48	158	0,009922	0,003767	0,002788	6/5	2	30	1	8

Примечание: U_{Φ} – фазное напряжение, В; n – частота вращения магнитного поля статора, мин⁻¹; f – частота тока, Гц; Z – число зубцов магнитопровода, шт.; D – внутренний диаметр магнитопровода, мм; Q_{δ} – площадь полюса в воздушном зазоре, м²; Q_Z – площадь полюса в зубцовой зоне, м²; Q_C – площадь спинки магнитопровода статора, м²; y'/y – полный/укороченный шаг обмотки; q – число пазов на полюс и фазу; α – число электрических градусов на один паз, ° эл.; a – число параллельных ветвей обмотки; $2P$ – число полюсов.

Контрольные вопросы и задания

1. Как определить величину магнитного потока?
2. Выполните проверку магнитного потока на оптимальное значение относительно числа витков, приходящихся на фазу.
3. Как рассчитать оптимальное значение магнитных нагрузок по участкам статора относительно магнитного потока?
4. Как определить число активных проводников в одном пазу?
5. Как определить упрощенное число проводников в одном пазу?
6. Как определить число витков в одной секции для однослойной и двухслойной обмоток?

5. ВЫБОР МАРКИ И РАСЧЕТ СЕЧЕНИЯ ОБМОТОЧНОГО ПРОВОДА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТКИ

Цель работы: определить сечение обмоточного провода и параметры статорной обмотки в соответствии с методикой расчета.

Порядок выполнения работы:

1. Выбрать марку обмоточного провода для асинхронного двигателя, работающего в условиях ремонтного цеха, с параметрами, заданными преподавателем.
2. Рассчитать стандартное сечение и диаметр обмоточного провода.
3. Выполнить расчет размеров секции (длины одного витка).
4. Рассчитать массу обмотки.
5. Выполнить расчет электрического сопротивления обмотки одной фазы постоянному току в практически холодном состоянии.

Общие теоретические сведения

Обмоточные провода, используемые при производстве и ремонте обмоток электрических машин, могут быть в зависимости от материала токоведущей жилы медные (Cu) или алюминиевые (Al), круглого или прямоугольного сечения. Обмоточные провода для обмоток электрических машин изготавливаются с волокнистой, эмалевой или комбинированной изоляцией.

Материалы, используемые для волокнистой изоляции:

- бумага (кабельная или телефонная);
- хлопчатобумажная пряжа;
- натуральный и искусственный шелк (капрон, лавсан);
- асбестовые и стеклянные волокна.

Эти материалы могут накладываться в один, два или несколько слоев в виде оплетки (чулка).

Основными материалами для эмалевой изоляции являются:

- эмаль на поливинилацеталевой основе (винифлекс);
- эмаль на полиамиднорезольном лаке;
- эмаль на лаке металвин;
- эмаль на основе терефталевой кислоты;
- кремнийорганическая эмаль.

Обозначения обмоточных проводов

Обозначение всех марок обмоточных проводов начинается с буквы П – провод. Если следующая буква в маркировке провода стоит А, то это указывает на алюминиевую токоведущую жилу. Отсутствие буквы А говорит о том, что токоведущая жила изготовлена из меди.

Волокнистая изоляция провода имеет следующие обозначения:

Б – хлопчатобумажная пряжа;

Ш – натуральный шелк;

ШК или К – искусственный шелк (капрон);

С – стекловолокно;

А – асбестовое волокно.

Эмалевая изоляция провода имеет следующие обозначения:

ЭЛ – эмаль лакостойкая;

ЭВ – эмаль высокопрочная (винифлекс);

ЭТ – эмаль теплостойкая полиэфирная;

ЭВГЛ – эмаль полиуретановая;

ЭЛР – эмаль полиамиднорезольная.

Наличие буквы О (Д) указывает на один (два) слоя изоляции;

Наличие в конце маркировки цифры, указывает:

1 – нормальная толщина изоляции;

2 – усиленная толщина.

Марки обмоточных проводов, изолированных стекловолокном и пропитанных в теплостойком лаке, имеют в своем обозначении букву К, например ПСДК.

Выбор марки провода, применяемого при ремонте обмоток электрических машин, определяется требуемым классом нагревостойкости, номинальной мощности и напряжения, допустимой толщиной изоляции (определяется коэффициентом заполнения паза или располагаемыми габаритами для размещения обмоток), а также требованиями в части влагостойкости, морозостойкости, химостойкости и механической прочности изоляции.

Эмалевая изоляция на обмоточных проводах имеет наименьшую толщину, поэтому провода, имеющие такую изоляцию, рекомендуется применять при высоком коэффициенте заполнения паза. В этом случае гладкая поверхность проводов обеспечивает легкость их укладки в пазы, а малая толщина изоляции не позволяет обмотке перегреваться, несмотря на относительно высокую теплопроводность.

Применение проводов с эмалевой изоляцией обязательно должно быть увязано с видами лаков и разбавителей, которые используются на данном электроремонтном предприятии или которыми оно может обеспечить. Некоторые лаки и разбавители оказывают разрушающее действие на эмалевую изоляцию проводов. Также надо учитывать, что при температуре 160 С–170 °С эмалевая изоляция становится термопластичной, следовательно, провода с такой изоляцией не могут применяться для обмоток, имеющих большую окружную скорость вращения.

Наибольшую толщину изоляции имеют обмоточные провода с волокнистой и комбинированной изоляцией. Не рекомендуется использовать такие провода для обмоток электрических машин, работающих в условиях повышенной влажности и агрессивных средах. В таких условиях лучше применять провода, имеющие стеклянную изоляцию. Однако у такой изоляции имеется существенный недостаток – низкая механическая прочность.

К готовой изоляции предъявляются следующие требования:

- слой изоляции на проводе должен иметь одинаковую толщину;
- оплетка должна быть наложена на провод плотными рядами, без ребристости, просветов и утолщений (в редких случаях в отдельных точках допускаются наплывы эмали или утолщения оплетки в пределах допусков, установленных для каждой марки размера провода);

При выборе марки обмоточного провода следует учитывать, что цена провода одного и того же размера зависит от его марки; для электрических машин низкого напряжения стоимость провода является наиболее высокой слагающей в общей стоимости ремонта. Поэтому при выборе марки провода необходимо учитывать не только техническую, но и экономическую сторону.

Методика выполнения задания

После выбора марки выполняется расчет параметров обмоточного провода.

Расчетное сечение провода с изоляцией определяется по формуле, мм²:

$$\Pi'_p = \frac{Q_{\Pi} \cdot K_3}{N_{\Pi}}, \quad (5.1)$$

где K_3 – коэффициент заполнения паза, учитывающий, что часть пространства в пазу занято изоляционной гильзой, межслоевой прокладкой (при двухслойной обмотке), прокладкой под клин, клином, прокладкой под гильзу, а также учитывающий неплотность укладки активных проводников в пазу.

Отсюда $Q_{\Pi} \cdot K_3$ – это активная площадь паза, то есть та площадь, которая занята в пазу непосредственно изолированными активными проводниками обмотки. Всегда стремятся к тому, чтобы она была как можно больше. Вместе с тем при выборе K_3 следует помнить: если его значение будет больше, чем допускает изоляция паза, возникают трудности с укладкой секции в пазы, если меньше – это потребует занижения сечения обмоточного провода, и, в конечном итоге, снизит мощность двигателя.

Рекомендуемые средние значения коэффициентов заполнения паза даны в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Коэффициенты заполнения паза

Обмотка	K_3 при мощности двигателя, кВт		
	До 1	1–10	10–100
Однослойная	0,40–0,44	0,44–0,48	0,51–0,52
Двухслойная	0,35–0,39	0,38–0,42	0,48–0,52

Меньшие значение заполнения паза берутся для меньшей мощности двигателя и пазовой изоляции на основе толстых диэлектриков, большие – при большей мощности машины и изоляции с использованием тонких диэлектриков.

По сечению провода, исходя из известного выражения площади окружности, определяется расчетный диаметр провода без изоляции, мм²:

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot \Pi'_p}{\pi}}. \quad (5.2)$$

По расчетным Π'_p и d' в таблицах ГОСТ или справочников (приложение 3) выбирается обмоточный провод стандартного сечения без изоляции ($\Pi_{p \text{ ГОСТ}}$), его диаметры: с изоляцией ($d_{\text{ГОСТ}}$) и без ($d'_{\text{ГОСТ}}$). При этом следует не забыть, что $d'_{\text{ГОСТ}}$ определяется толщиной изоляции на проводе, а она зависит от марки и сечения, а также оттого, что диаметр изолированного провода должен быть на 1,5–2,0 мм меньше ширины шлица паза ($b_{\text{ш}}$):

$$d_{\text{ГОСТ}} < b_{\text{ш}} - (1,5 \dots 2,0). \quad (5.3)$$

В тех случаях, когда диаметр изолированного провода не отвечает поставленному условию, необходимо разделить расчетное сечение Π'_p на два, три и т. д. провода с одинаковыми площадями – так называемые параллельные сечения, но в общем случае их не должно быть более четырех.

Расчетный диаметр провода без изоляции и с учетом параллельных сечений, мм²:

$$d' = \sqrt{\frac{4 \Pi'_p}{\pi a'}}, \quad (5.4)$$

где a' – число параллельных сечений.

Вновь по d' выбирается в таблицах ГОСТ или справочниках стандартный диаметр провода для выбранной марки: с изоляцией $d_{\text{ГОСТ}}$ и диаметр провода без изоляции $d'_{\text{ГОСТ}}$, мм.

Если провод удовлетворяет заданному условию, определяют стандартное сечение провода с изоляцией и без, мм²:

$$\Pi_{\text{ГОСТ}} = \frac{(d_{\text{ГОСТ}})^2 \cdot \pi}{4};$$

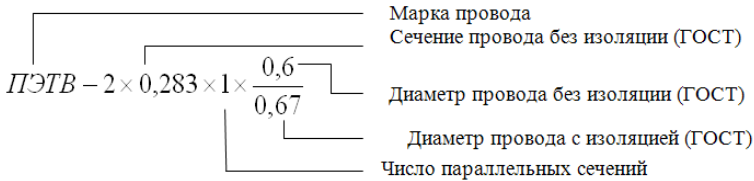
$$\Pi'_{\text{ГОСТ}} = \frac{(d'_{\text{ГОСТ}})^2 \cdot \pi}{4}.$$

Если число параллельных сечений уже равно четырем, а диаметр провода не отвечает ширине шлица паза, уменьшенного на 1,5–2,0 мм, по возможности увеличивается число параллельных ветвей (a). Для этого делается повторный пересчет. Однако если и в этом случае d не отвечает ширине шлица паза, то число a' допускается увеличить до 6.

Фактический коэффициент заполнения паза:

$$K_3 = \frac{I_{\text{ГОСТ}} \cdot N_{\text{П}}}{Q_{\text{П}}}.$$

Пример записи выбранного провода для изготовления обмотки электродвигателя:



Расчет размеров секции

Определение длины витка необходимо для установки шаблона при изготовлении секций катушечных групп, а также для последующих расчетов: массы обмоточного провода, сопротивления постоянному току и пр.

Виток состоит из двух активных и двух лобовых частей, следовательно, средняя длина витка

$$l_{\text{В}} = 2(l_{\text{а}} + l_{\text{л}}), \quad (5.5)$$

где $l_{\text{а}}$ – пазовая (активная) длина витка, м;

$l_{\text{л}}$ – длина лобовой части витка, м.

При отсутствии дополнительных каналов на охлаждение в магнитопроводе $l_{\text{а}} + l$, м.

Длина лобовой части витка обмотки определяется из формулы, м:

$$l_{\text{л}} = kT + l', \quad (5.6)$$

где k – поправочный коэффициент;

T – средняя ширина секции, м;

l' – коэффициент запаса, м.

Коэффициенты поправочный и запаса зависят от метода изготовления обмотки и количества полюсов асинхронного двигателя (табл. 5.2).

Значения поправочного коэффициента и коэффициента запаса

2P	Сердечник статора, намотанный			
	отдельно		непосредственно в корпусе	
–	<i>k</i>	<i>l'</i> , м	<i>k</i>	<i>l'</i> , м
2	1,25	0,02	1,30	0,03
4	1,30	0,02	1,35	0,03
6	1,40	0,02	1,50	0,03
8	1,50	0,02	1,55	0,03

Приведенные в табл. 5.2 величины *k* и *l'* используются при расчете длины лобовой части двухслойных обмоток с укороченным шагом; для однослойных петлевых обмоток *k* и *l'* берутся на 10 %–15 % больше, чем для двухслойных обмоток, а для однослойных концентрических – больше на 20 %–23 %.

Средняя ширина секции (под ней понимается длина дуги окружности, центр которой лежит на оси вращения ротора машины, ограниченная активными сторонами одной и той же секции) определяется по формуле, м:

$$T = \frac{\pi(D+h)}{Z} \text{ у.} \quad (5.7)$$

Расчет массы обмоточного провода

Расчет массы обмотки, в частности, необходим для получения обмоточного провода со склада.

Масса металла обмотки провода определяется путем умножения плотности проводникового материала на объем провода, кг:

$$G = m \cdot \gamma \cdot \Pi_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a' \cdot l_{\text{В}} \cdot W_{\Phi} \cdot 10^{-6}, \quad (5.8)$$

где γ – плотность проводникового материала, кг/м³, (для меди – 8900 кг/м³, для алюминия – 2700 кг/м³);

$\Pi_{\text{ГОСТ}}$ – сечение одной жилы обмоточного провода с изоляцией, мм²;

$\Pi_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a'$ – полное сечение одного витка провода в секции, мм²;

$l_{\text{В}} \cdot W_{\Phi}$ – длина провода обмотки одной фазы, м;

m – число фаз обмотки, шт.

Масса обмотки провода с изоляцией и с учетом «срезок» (обрезки обмоточного провода, образующиеся при выполнении технологических процессов пайки и сварки) ориентировочно равна, кг:

$$G' = 1,05G.$$

Расчет электрического сопротивления обмотки одной фазы постоянному току в практически холодном состоянии

Электрическое сопротивление обмотки одной фазы постоянному току в практически холодном состоянии определяется для сравнения с результатами измерений сопротивлений фазных обмоток отремонтированной машины при приемосдаточных и типовых испытаниях. Сопоставление величин расчета и испытания дает возможность выявления дефектов, допущенных при ремонте обмоток.

Электрическое сопротивление одной фазы обмотки постоянному току в холодном состоянии (R) определяется из выражения, Ом:

$$R = \rho \frac{l_B W_\Phi}{\Pi'_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a'}, \quad (5.9)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника:

- для меди $0,0172 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$;
- для алюминия $0,028 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задания для самостоятельного расчета

Данные для самостоятельного выполнения заданий представлены в табл. 5.3 в соответствии с вариантом, заданным преподавателем.

Задание 5.1. Выбрать марку обмоточного провода для асинхронного двигателя, работающего в условиях ремонтного цеха, с параметрами: номинальное напряжение $380/220 \text{ В}$; частота тока – 50 Гц ; диаметр расточки статора $D = 80 \text{ мм}$; число пар полюсов $P = 1$; площадь паза в свету $Q_{\text{П}} = 72,9 \text{ мм}^2$; ширина шлица паза $b_{\text{ш}} = 3 \text{ мм}$; число активных проводников в пазу $N_{\text{П}} = 88 \text{ шт.}$; обмотка двухслойная. Рассчитать и подобрать по таблицам ГОСТ сечение и диаметр обмоточного провода.

Решение. Определим приблизительную полную мощность двигателя по зависимости от внутреннего диаметра магнитопровода и числа пар полюсов (приложение 1). При $D = 80 \text{ мм}$ и $P = 1 \text{ шт.}$ $S_{\text{дв}} = 1,5 \text{ кВА}$.

Примем во внимание, что нагревостойкость АД в сухом, незапыленном помещении целесообразно отнести к классу В. Номинальная мощность его находится в пределах 1–10 кВт. Номинальное напряжение 380/220 В. С учетом стоимости обмоточного провода наиболее подходящей является марка провода ПЭТВ-2.

Расчетное сечение провода без изоляции определяется по формуле, мм²:

$$P'_p = \frac{Q_{II} \cdot K_3}{N_{II}} = \frac{72,9 \cdot 0,42}{88} = 0,35 \text{ мм}^2,$$

где K_3 – коэффициент заполнения паза (табл. 5.1), принимаем равным $K_3 = 0,42$.

По сечению провода определяется расчетный диаметр провода без изоляции:

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot P'_p}{\pi}},$$

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,35}{3,14}} = 0,67 \text{ мм}.$$

Из таблицы приложения 3 выбираем для провода ПЭТВ-2 стандартный диаметр провода без изоляции:

$$d'_{\text{ГОСТ}} = 0,67 \text{ мм}.$$

Диаметр провода с изоляцией:

$$d_{\text{ГОСТ}} = 0,75 \text{ мм}.$$

Диаметр изолированного провода должен быть на 1,5–2,0 мм меньше ширины шлица паза ($b_{ш}$): $d = 0,75 < b_{ш} - 1,5 = 3,0 - 1,5 = 1,5$ мм.

Наш провод удовлетворяет заданному условию.

Определим стандартное сечение провода без и с изоляцией:

$$P'_{\text{ГОСТ}} = \frac{(d'_{\text{ГОСТ}})^2 \cdot \pi}{4} = \frac{(0,67)^2 \cdot 3,14}{4} = 0,35 \text{ мм}^2;$$

$$\Pi_{\text{ГОСТ}} = \frac{(d_{\text{ГОСТ}})^2 \cdot \pi}{4} = \frac{(0,75)^2 \cdot 3,14}{4} = 0,44 \text{ мм}^2.$$

Фактический коэффициент заполнения паза:

$$K_3 = \frac{\Pi_{\text{ГОСТ}} \cdot N_{\text{II}}}{Q_{\text{II}}} = \frac{0,44 \cdot 88}{72,9} = 0,53.$$

Обмотку двигателя будем выполнять проводом:

$$\text{ПЭТВ} - 2 \times 0,35 \times 1 \times \frac{0,67}{0,75}.$$

Задание 5.2. Рассчитать длину витка секции статорной обмотки асинхронного двигателя с параметрами: внутренний диаметр сердечника статора $D = 74$ мм; высота паза магнитопровода $h = 11,6$ мм; число пазов $Z = 24$; укороченный шаг секции обмотки $y = 10$; полная длина магнитопровода $l = 78$ мм.

Решение. Длина активной части витка $l_a = 78$ мм, так как магнитопровод статора не имеет дополнительных каналов на охлаждение ($l_a = l$).

Средняя ширина секции определяется по формуле (5.7), м:

$$T = \frac{3,14 \cdot (0,074 + 0,0116)}{24} \cdot 10 = 0,112 \text{ м}.$$

Значения поправочного коэффициента и коэффициента запаса принимаем равными $k = 1,3$; $l' = 0,03$ (табл. 5.2).

$$l_{\text{л}} = k \cdot T + l';$$

$$l_{\text{л}} = 1,3 \cdot 0,112 + 0,03 = 0,175 \text{ м};$$

$$l_{\text{в}} = 2(l_a + l_{\text{л}});$$

$$l_{\text{в}} = 2 \cdot (0,078 + 0,175) = 0,507 \text{ м}.$$

Задание 5.3. Рассчитать массу требуемого провода для обмотки трехфазного асинхронного двигателя с параметрами: марка провода – ПЭТ–155; активное сечение провода $\Pi_{\text{ГОСТ}} = 3,14 \text{ мм}^2$; $a = 1$; $a' = 1$; $l_{\text{в}} = 0,73$ м; $W_{\Phi} = 144$.

Решение. Находим массу провода обмотки трехфазного асинхронного двигателя, учитывая, что у марки ПЭТ–155 жила медная. Для получения объема провода в м³ сечение провода $\Pi_{\text{ГОСТ}}$, данное в мм², переводим в м² с помощью множителя 10⁻⁶, отсюда

$$G' = m \cdot \gamma \cdot \Pi_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a' \cdot l_{\text{В}} \cdot W_{\Phi},$$

$$G' = 3 \cdot 8900 \cdot 3,14 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,73 \cdot 144 = 8,8 \text{ кг.}$$

Масса обмотки провода с учетом «срезок» приблизительно равна

$$G' = 1,05 \cdot G = 1,05 \cdot 8,8 = 9,24 \text{ кг.}$$

Задание 5.4. Определить сопротивление постоянному току в практически холодном состоянии обмотки одной фазы отремонтированного трехфазного АД. Параметры обмотки: марка провода ПЭВ–2; длина витка секции $l_{\text{В}} = 0,597$ м; число витков в обмотке одной фазы $W_{\Phi} = 352$; сечение обмоточного провода $\Pi'_{\text{ГОСТ}} = 0,283$ мм²; число параллельных ветвей $a = 1$; число параллельных сечений $a' = 1$.

Решение. Находим сопротивление обмотки по формуле

$$R = \rho \frac{l_{\text{В}} W_{\Phi}}{\Pi'_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a'} = 0,0172 \cdot \frac{0,507 \cdot 352}{0,283 \cdot 1 \cdot 1} = 10,84 \text{ Ом.}$$

Индивидуальные задания

Таблица 5.3

Данные для решения практических задач

Вариант	Исходные данные													
	$U_{\text{н}}$, В	n , мин ⁻¹	f , Гц	Z , шт.	D , мм	l , мм	h , мм	$2P$, шт.	$b_{\text{ш}}$, мм	y'/y	a	$Q_{\text{П}}$, мм ²	$N_{\text{П}}$, шт.	W_{Φ} , шт.
1	380/220	1500	50	24	194	200	28,2	4	2,5	6/5	1	349,27	62	248
2	380/220	1500	50	36	126	125	14,3	4	3,7	9/7	1	153,78	26	156
3	380/220	1500	50	48	232	200	32,3	4	2,0	12/10	1	336,41	98	784
4	380/220	3000	50	24	84	100	12,6	2	3,0	12/10	1	80,36	22	88
5	380/220	1500	50	36	145	115	17,8	4	3,7	9/7	1	253,20	50	300

Вариант	Исходные данные													
	U_n , В	n , мин ⁻¹	f , Гц	Z , шт.	D , мм	l , мм	h , мм	$2P$, шт.	$b_{ш}$, мм	y'/y	a	$Q_{П}$, мм ²	$N_{П}$, шт.	$W_{Ф}$, шт.
6	380/220	1500	50	48	232	230	32,3	4	3,5	12/10	1	378,46	74	592
7	380/220	1500	50	24	95	100	14,1	4	2,0	6/5	1	143,18	112	448
8	380/220	3000	50	36	145	160	17,8	2	3,5	18/14	1	186,92	38	228
9	380/220	750	50	48	185	140	20,5	8	2,0	6/5	1	267,51	210	1680
10	380/220	1500	50	24	95	130	14,1	4	3,7	6/5	1	110,74	28	112
11	380/220	1000	50	36	84	78	12,1	6	2,5	6/5	1	79,85	34	204
12	380/220	3000	50	48	185	180	20,5	2	4,0	24/19	1	153,94	32	256
13	380/220	1500	50	24	110	125	15,1	4	2,0	6/5	1	164,88	216	864
14	380/220	1000	50	36	84	98	12,1	6	2,5	6/5	1	127,54	128	768
15	380/220	750	50	48	198	145	19,1	8	3,0	6/5	1	273,93	68	544
16	380/220	3000	50	24	130	130	16,5	2	2,5	12/10	1	220,37	80	320
17	380/220	3000	50	36	88	78	13,0	2	1,8	18/14	1	125,92	168	1008
18	380/220	750	50	48	197	200	19,1	8	3,7	6/5	1	263,94	52	416
19	380/220	3000	50	24	54	50	9,0	2	4,0	12/10	1	67,35	14	56
20	380/220	1500	50	36	95	100	12,9	4	3,7	9/7	1	122,68	22	132
21	380/220	3000	50	24	54	56	9,0	2	3,0	12/10	1	68,12	16	64
22	380/220	1500	50	36	100	110	13,8	4	3,5	18/14	1	132,66	24	144
23	380/220	3000	50	24	61	56	10,4	2	3,7	6/5	1	84,15	16	64
24	380/220	1500	50	36	105	100	15,8	4	2,0	9/7	1	148,63	118	708
25	380/220	3000	50	24	54	65	9,0	2	4,0	12/10	1	70,10	14	56
26	380/220	3000	50	48	211	180	23,7	2	3,7	24/19	1	239,73	38	304
27	380/220	1000	50	36	194	200	14,9	6	4,0	6/5	1	216,25	42	252
28	380/220	1500	50	24	65	74	9,3	4	2,0	6/5	1	73,58	64	256
29	380/220	1000	50	36	113	110	15,4	6	3,0	6/5	1	125,49	32	192
30	380/220	750	50	48	158	160	17,6	8	3,5	6/5	1	168,22	28	224

Примечание: U_n – номинальное напряжение, В; Z – число зубцов магнитопровода, шт.; D – внутренний диаметр магнитопровода, мм; l – длина магнитопровода; $Q_{П}$ – площадь паза в свету, мм²; h – высота паза; $b_{ш}$ – ширина шлица паза; y'/y – полный/укороченный шаг обмотки; a – число параллельных ветвей обмотки; $2p$ – число полюсов. $W_{Ф}$ – число витков в обмотке одной фазы; $N_{П}$ – число активных проводников в пазу.

Контрольные вопросы

1. По каким критериям проводится выбор марки обмоточного провода для статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя?
2. Как рассчитать сечение и диаметр обмоточного провода?
3. Какой порядок выполнения расчета размеров секции (длины одного витка)?
4. Как рассчитать массу обмоточного провода?
5. Как выполнить расчет электрического сопротивления обмотки одной фазы постоянному току в практически холодном состоянии?

6. РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНЫХ ДАННЫХ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Цель работы: рассчитать номинальные параметры электромашин в соответствии с методикой расчета.

Порядок выполнения работы:

1. Рассчитать номинальный ток электродвигателя.
2. Рассчитать номинальную мощность трехфазного асинхронного электродвигателя.
3. Определить линейную нагрузку и фактическую плотность тока.

Общие теоретические сведения

Номинальными данными называют оптимальные величины параметров, на которые рассчитана нормальная работа электрооборудования. Основные из них приводятся в паспорте (металлической пластине, прикрепленной к корпусу машины).

У асинхронного двигателя к таким расчетным номинальным данным относятся следующие величины:

U_N – номинальное напряжение, В;

I_N – номинальный ток, А;

P_N – номинальная мощность, кВт;

f_N – номинальная частота тока, Гц;

n_N – номинальная частота вращения ротора, мин⁻¹;

$\cos\varphi_N$ – номинальный коэффициент мощности;

η_N – номинальный коэффициент полезного действия (КПД);

Y/Δ – схема соединения обмотки.

Оптимальность этих показателей связана с конструкцией электромашин, материалами из которых она изготовлена, условиями ее работы и другими показателями.

Например, номинальная частота тока f_N в первую очередь связана с ЭДС одного витка (в соответствии с формулой (4.13)): чем больше f , тем выше $E_{1В}$, а следовательно, меньше W_Φ , то есть больше мощность электродвигателя при тех же размерах. Но вместе с увеличением f увеличиваются потери в листах электротехнической стали, а значит, нагрев машины. Вот почему номинальная частота f_N зависит от марки и толщины листов стали сердечника.

Номинальная частота вращения ротора n_n предопределена частотой вращения подвижных частей механизма электродвигателя, которые он приводит в действие.

Номинальная схема соединения обмоток Y/Δ вытекает из требуемой величины напряжения, прилагаемой к фазной обмотке, а также условий пуска машины.

Номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_n$ определяется рациональным соотношением между составляющими (активной P и реактивной Q) полной мощности асинхронного двигателя S . Чем больше активная составляющая P , тем лучше, так как будут меньше потери в сети.

Номинальный коэффициент полезного действия η_n зависит от потерь в электрической машине (в основном в меди обмоток – $P_{кз}$ и стали магнитопровода – P_{xx}).

Номинальное напряжение U_n связано с электрической прочностью изоляции ($E_{пр}$) машины. Причем чем выше напряжение, тем больше должна быть прочность, а это связано с родом и толщиной используемых в изоляции составных диэлектриков, их электрической прочностью.

Номинальный ток I_n устанавливается нагревом изоляции, в первую очередь за счет потерь в меди обмотки. Чем выше нагревостойкость изоляции и меньше потери, тем больше номинальный ток.

Номинальная мощность P_n является производной номинальных тока, напряжения, коэффициентов мощности и полезного действия, а значит зависит от тех же показателей.

U_n , f_n , n_n и схема соединения обмотки машины задаются заказчиком.

Методика выполнения задания

Определение номинального тока электродвигателя

Номинальный фазный ток электродвигателя равен произведению плотности тока на активную площадь обмоточного провода, с учетом параллельных ветвей и сечений, A :

$$I_{\text{нф}} = j \cdot \Pi'_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a', \quad (6.1)$$

где j – плотность тока, А/мм²;

$\Pi'_{\text{ГОСТ}}$ – фактическое сечение провода без изоляции, мм²;

a – число параллельных ветвей обмотки, шт.;

a' – число параллельных сечений, шт.

Плотность тока, как и ток, в первую очередь, определяется допустимой температурой нагрева изоляции. Однако на скорость ее старения оказывают влияние также и многие другие факторы: способ пропитки обмоток, опыт работы обмотчика, охлаждение АД. Поэтому при выборе j в таблицах справочников (табл. 6.1), где они приводятся в зависимости от типа обмоток и мощности двигателей в довольно широких пределах, следует учитывать все параметры. Чтобы не допустить существенной ошибки в выборе плотности тока, найденная по формуле (6.1) величина фазного тока дополнительно проверяется по величине линейной нагрузки (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Нормированные плотности токов
и линейных нагрузок асинхронных двигателей

Наименование		Мощность, кВт		
		до 1	1–10	10–100
Плотность тока в обмотке статора j , А/мм ²	Одно-слойная	5,5–6,5	4,5–5,0	3,5–3,8
	Двух-слойная	6,0–8,0	5,5–6,0	4,0–4,5
Допустимая линейная нагрузка $A_{\text{доп}}$, А/м×10 ³	Одно-слойная	10,0–14,0	18,0–22,5	24,0–30,0
	Двух-слойная	15,0–20,0	25,0–30,0	32,5–40,0

Линейная нагрузка двигателя представляет собой произведение тока и числа активных проводников во всех пазах электромашины, приходящихся на 1 м длины окружности внутренней рашотки статора машины, А/м:

$$A = \frac{I_{\text{нф}} \cdot N_{\text{п}} \cdot Z}{\pi \cdot D \cdot a}, \quad (6.2)$$

где $N_{\text{п}}$ – число активных проводников в одном пазу, шт.;
 Z – количество пазов магнитопровода статора, шт.;
 D – внутренний диаметр расточки статора, м.

Результат вычисления линейной нагрузки сравнивается с допустимыми значениями, приведенными в таблицах. Если будет иметь место расхождение, то необходимо соответствующим образом изменить плотность тока в обмотке. В идеале оптимальной будет наибольшая возможная плотность тока (при допустимой ($A_{\text{доп}}$)), но вместе с тем следует учитывать сопутствующие факторы: состояние магнитопровода, пропитку обмотки и пр.

Определение номинальной мощности электродвигателя

Номинальная мощность электродвигателя – это та мощность, которую трехфазный асинхронный двигатель будет иметь на своем валу. Для расчета номинальной мощности вначале определяется полная мощность трехфазного асинхронного двигателя, которую он забирает из сети, кВ·А:

$$S_{\text{дв}} = 3 \cdot I_{\text{нф}} \cdot U_{\text{нф}} \cdot 10^{-3}, \quad (6.3)$$

где $I_{\text{нф}}$ – номинальный фазный ток, А;

$U_{\text{нф}}$ – номинальное фазное напряжение, В.

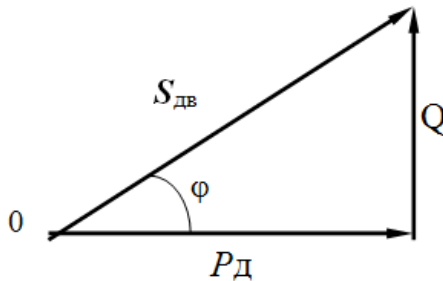


Рис. 6.1. Треугольник мощностей трехфазного асинхронного двигателя

Полученная полная мощность $S_{дв}$ в машине идет на создание вращающегося магнитного поля, на потери и выполнение полезной работы.

Однако реактивная составляющая этой мощности Q , затрачиваемая на создание магнитного потока (величина практически постоянная для данного магнитопровода), как известно из курса электротехники, возвращается обратно в сеть. Это учитывается углом ϕ между полной мощностью и ее активной составляющей. Следовательно (см. треугольник мощностей, рис. 6.1), активная составляющая P (ее называют еще присоединенной мощностью двигателя), определяется из выражения:

$$P_{дв} = 3 \cdot I_{нф} \cdot U_{нф} \cdot \cos \phi_{н} \cdot 10^{-3}, \quad (6.4)$$

где $\cos \phi_{н}$ – номинальный коэффициент мощности.

Расчетная номинальная мощность, кВт, трехфазного асинхронного двигателя (мощность, идущая на выполнение полезной работы, мощность на валу) определяется по выражению:

$$P'_{н} = 3 \cdot I_{нф} \cdot U_{нф} \cdot \cos \phi_{н} \cdot \eta_{н} \cdot 10^{-3}, \quad (6.5)$$

где $\eta_{н}$ – номинальный коэффициент полезного действия, который учитывает все потери в электродвигателе при его работе.

При предварительном расчете номинальной мощности электродвигателя, средние значения коэффициентов мощности $\cos \phi$ и коэффициента полезного действия η можно принять по табл. 6.2.

Полученное значение мощности $P'_{н}$ округляется до ближайшего стандартного $P_{н(ГОСТ)}$, по которому определяется номинальный ток:

$$I_{н(ГОСТ)} = \frac{P_{н} \cdot 10^{-3}}{3 \cdot U_{нф} \cdot \cos \phi \cdot \eta}. \quad (6.6)$$

Полученное значение номинального тока еще раз проверяется по линейной нагрузке по выражению (6.2).

Средние значения $\cos\varphi$ и η трехфазных АД

Частота вращения n , мин ⁻¹	Параметр	Мощность, кВт		
		до 1	1–10	10–100
3000	η	0,60–0,77	0,77–0,88	0,88–0,90
	$\cos\varphi$	0,70–0,87	0,87–0,90	0,90–0,92
1500	η	0,57–0,72	0,75–0,86	0,87–0,92
	$\cos\varphi$	0,65–0,74	0,81–0,86	0,87–0,91
1000	η	0,56–0,69	0,74–0,86	0,86–0,92
	$\cos\varphi$	0,62–0,72	0,74–0,82	0,86–0,89
750	η	0,56–0,68	0,70–0,85	0,86–0,92
	$\cos\varphi$	0,60–0,62	0,68–0,75	0,80–0,85

Примечание. Большие значения $\cos\varphi$ и η берутся для больших мощностей АД.

Если найденная линейная нагрузка удовлетворяет допустимой $A_{\text{доп}}$ (табл. 6.1), определяется фактическая плотность тока по формуле, А/мм²:

$$j = \frac{I_{\text{нф(ГОСТ)}}}{\Pi'_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a'} \quad (6.7)$$

В случае, когда магнитная система ремонтируемой машины не соответствует исходной номинальной частоте вращения n_H , на которую она была рассчитана, то есть нарушена согласованность площадей Q_δ , Q_Z , Q_C , проверку линейной нагрузки после определения j проводить нерационально, можно ограничиться пределами допустимых плотностей тока (табл. 6.1).

Задание для самостоятельного расчета

Данные для самостоятельного выполнения задания представлены в табл. 6.3 в соответствии с вариантом, заданным преподавателем.

Задание. Определить номинальную мощность трехфазного асинхронного двигателя с двухслойной обмоткой и изоляцией класса F , работающего в условиях повышенной температуры, с расчетными параметрами: номинальное напряжение – 380/220 В;

частота тока 50 Гц; частота вращения магнитного поля статора (соответствует расчетной) – 1500 мин^{-1} ; обмоточный провод – ПСД–2,0×4× $1.6/_{1,89}$; число проводников в пазу – 8 шт.; число пазов магнитопровода – 48 шт.; внутренний диаметр расточки статора – 197 мм; число параллельных ветвей – 1.

Решение. Количество пар полюсов находится по выражению (1.3):

$$P = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2 \text{ шт.}$$

Приблизительную полную мощность асинхронного двигателя определяем по приложению 1. Если $D = 197 \text{ мм}$ и число пар полюсов $P = 2$, то $S_{\text{дв}} = f(D) \approx 17\text{--}18 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. С учетом $\cos\varphi$ и КПД, мощность P на валу будет в пределах 10–100 кВт.

Номинальный ток двигателя находим по выражению (6.1):

$$I_{\text{нф}} = j \cdot \Pi'_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a' = 4,5 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 4 = 36 \text{ А},$$

где j принята равной $4,5 \text{ А/мм}^2$, так как обмотка АД двухслойная, изоляция его и обмоточного провода относится к классу F.

Линейная нагрузка при $I_{\text{нф}} = 36 \text{ А}$ определяется по формуле (6.2):

$$A = \frac{I_{\text{нф}} \cdot N_{\text{п}} \cdot Z}{\pi \cdot D \cdot a} = \frac{36 \cdot 10 \cdot 48}{3,14 \cdot 0,197 \cdot 1} = 27934,9 = 27,9 \cdot 10^3 \text{ А/м.}$$

Так как расчетная линейная нагрузка ($A = 27,9 \cdot 10^3 \text{ А/м}$) меньше, чем допустимая для данного электродвигателя (по табл. 6.1 $A_{\text{доп}} = 32,5 \dots 40,0 \cdot 10^3 \text{ А/м}$), принимаем плотность тока $j = 5,4 \text{ А/мм}^2$ (максимально можно увеличивать плотность тока до 40 % от верхней границы по значению плотности тока для рассчитываемой машины), тогда номинальный ток машины равен

$$I_{\text{нф}} = j \cdot \Pi'_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a' = 5,4 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 4 = 43,2 \text{ А.}$$

При этом линейная нагрузка равна

$$A = \frac{I_{\text{нф}} \cdot N_{\text{п}} \cdot Z}{\pi \cdot D \cdot a} = \frac{43,2 \cdot 10 \cdot 48}{3,14 \cdot 0,197 \cdot 1} = 33521,9 = 33,6 \cdot 10^3 \text{ А/м.}$$

Тогда при номинальном токе $I_{\text{НФ}} = 43,2$ А линейная нагрузка находится в пределах нормы $A_{\text{доп}}$.

Полная мощность асинхронного двигателя из выражения (6.3):

$$S_{\text{НФ}} = 3 \cdot I_{\text{НФ}} \cdot U_{\text{НФ}} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 43,2 \cdot 220 \cdot 10^{-3} = 28,5 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

В табл. 6.1 для мощностей АД в пределах 10–100 кВт при числе оборотов магнитного поля в расточке статора 1500 мин^{-1} коэффициент мощности $\cos \phi$ можно принять равным 0,85 и КПД η равным 0,85, тогда:

- присоединенная мощность АД равна (выражение (6.4))

$$P_{\text{ДВ}} = 3 \cdot I_{\text{НФ}} \cdot U_{\text{НФ}} \cdot \cos \phi_{\text{Н}} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 43,2 \cdot 220 \cdot 0,85 \cdot 10^{-3} = 24,2 \text{ кВт};$$

- расчетная номинальная мощность асинхронного двигателя равна (выражение (6.5))

$$P'_{\text{н}} = 3 I_{\text{нФ}} U_{\text{нФ}} \cos \phi \eta \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 43,2 \cdot 220 \cdot 0,85 \cdot 0,85 \cdot 10^{-3} = 20,6 \text{ кВт}.$$

Ближайшая стандартная номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя с расчетными параметрами (по справочнику):

$$P_{\text{н}} = 22 \text{ кВт}; U_{\text{НФ}} = 220 \text{ В}; n_{\text{н}} = 1500 \text{ мин}^{-1}; \cos \phi = 0,89; \eta = 0,9;$$

- номинальный ток равен (выражение (6.6))

$$I_{\text{н(ГОСТ)}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 10^{-3}}{3 \cdot U_{\text{НФ}} \cdot \cos \phi \cdot \eta} = \frac{22 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,89 \cdot 0,9} = 41,61 \text{ А};$$

- линейная нагрузка А асинхронного двигателя при $I_{\text{н}} = 41,61$ А равна

$$A = \frac{I_{\text{НФ}} \cdot N_{\text{п}} \cdot Z}{\pi \cdot D \cdot a} = \frac{41,61 \cdot 10 \cdot 48}{3,14 \cdot 0,197 \cdot 1} = 32,7 \cdot 10^3 \text{ А/м}.$$

Так как расчетная линейная нагрузка ($A = 32,7 \cdot 10^3 \text{ А/м}$) отвечает допустимой (по табл. 6.1 $A_{\text{доп}} = 32,5 \dots 40,0 \cdot 10^3 \text{ А/м}$), определяем фактическую плотность тока по формуле (6.7):

$$j = \frac{I_{\text{НФ(ГОСТ)}}}{\Pi'_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a'} = \frac{32,7}{2 \cdot 1 \cdot 4} = 4,1 \text{ А/мм}^2.$$

Индивидуальные задания

Таблица 6.3

Данные для решения практической задачи

Номер варианта	D , мм	$N_{п}$, шт.	n , мин ⁻¹	Z , шт.	$U_{нф}$, В		$\Pi'_{ГОСТ}$, мм ²	a	a'	$d'_{ГОСТ}/d_{ГОСТ}$	Марка обмоточного провода	f , Гц
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	208	8	3000	36	380/220	220	2,27	2	4	1,70/1,81	ПЭТ-155	50
2	158	20	1000	54	380/220	220	1,37	1	1	1,32/1,43	ПЭМ-2	50
3	185	16	1500	48	380/220	220	2,27	1	1	1,70/1,81	ПЭТ-155	50
4	100	114	750	36	380/220	220	0,18	1	1	0,48/0,55	ПЭВ-2	50
5	74	88	3000	24	380/220	220	0,28	1	1	0,59/0,66	ПЭМ-2	50
6	284	8	1000	48	660/380	380	2,83	1	4	1,90/2,02	ПЭТ-155	50
7	113	76	750	36	380/220	220	0,35	1	1	0,65/0,75	ПЭВ-2	50
8	185	12	1500	48	380/220	220	2,83	1	2	1,90/2,02	ПЭТ-155	50
9	48	170	3000	24	380/220	220	0,03	1	1	0,20/0,24	ПЭВ-2	50
10	65	256	1000	36	380/220	220	0,04	1	1	0,22/0,26	ПЭМ-2	50
11	105	38	1500	36	380/220	220	0,78	1	1	1,00/1,09	ПЭТВ-2	50
12	158	40	750	48	380/220	220	0,78	1	1	1,00/1,09	ПЭТ-155	50
13	95	60	1500	36	380/220	220	0,32	1	1	0,64/0,72	ПЭМ-2	50
14	232	4	3000	48	380/220	220	3,53	2	4	2,12/2,24	ПЭТ-155	50
15	76	132	1000	36	380/220	220	0,1	1	1	0,35/0,42	ПЭМ-2	50
16	264	8	1500	48	660/380	380	1,91	2	4	1,56/1,67	ПЭТ-155	50
17	132	42	750	48	380/220	220	0,68	1	1	0,93/1,02	ПЭВ-2	50
18	70	166	1500	24	380/220	220	0,1	1	1	0,35/0,42	ПЭВ-2	50
19	194	12	3000	36	380/220	220	3,14	1	4	2,00/2,12	ПЭТ-155	50
20	100	74	1000	36	380/220	220	0,31	1	1	0,63/0,70	ПЭВ-2	50
21	211	14	1500	48	380/220	220	3,14	1	2	2,00/2,12	ПЭТ-155	50
22	197	54	1000	54	380/220	220	2,54	1	1	1,80/1,92	ПЭТ-155	50
23	61	260	1500	24	380/220	220	0,05	1	1	0,25/0,30	ПЭМ-2	50
24	130	26	3000	24	380/220	220	2,22	1	1	1,68/1,79	ПЭТВ-2	50
25	113	56	1000	36	380/220	220	0,5	1	1	0,80/0,89	ПЭВ-2	50

Номер варианта	D , мм	$N_{\text{п}}$, шт.	n , мин^{-1}	Z , шт.	$U_{\text{нф}}$, В		$\Pi'_{\text{ГОСТ}}$, мм^2	a	a'	$d'_{\text{ГОСТ}}/d_{\text{ГОСТ}}$	Марка обмоточного провода	f , Гц
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
26	238	8	1500	48	660/380	380	1,65	2	4	1,45/1,56	ПЭТ-155	50
27	55	380	750	24	380/220	220	0,04	1	1	0,20/0,24	ПЭВ-2	50
28	238	10	1500	48	660/380	380	2,54	1	4	1,80/1,92	ПЭТ-155	50
29	171	16	3000	36	380/220	220	3,53	1	2	2,12/2,24	ПЭТ-155	50
30	132	42	1000	54	380/220	220	0,64	1	1	0,85/0,93	ПЭТВ-2	50

Примечание: $U_{\text{нф}}$ – номинальное напряжение, В; n – частота вращения магнитного поля статора, мин^{-1} ; Z – число зубцов магнитопровода, шт.; D – внутренний диаметр магнитопровода, мм; a – число параллельных ветвей обмотки; a' – число параллельных сечений, шт.; $\Pi'_{\text{ГОСТ}}$ – сечение обмоточного провода, мм^2 ; $N_{\text{п}}$ – число активных проводников в пазу, шт.; $d'_{\text{ГОСТ}}/d_{\text{ГОСТ}}$ – диаметр обмоточного провода без изоляции/диаметр обмоточного провода с изоляцией, мм; f – частота тока, Гц.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие величины относятся к номинальным параметрам асинхронного электродвигателя?
2. От чего зависит номинальное напряжение электродвигателя?
3. Поясните физический смысл энергетических показателей $\cos\varphi$ и η (КПД).
4. Назовите порядок расчета номинального тока асинхронного электродвигателя.
5. Как рассчитывается номинальная мощность трехфазного асинхронного электродвигателя?
6. Как определить линейную нагрузку и фактическую плотность тока?

7. ПЕРЕСЧЕТ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ, ОТЛИЧНЫЕ ОТ НОМИНАЛЬНЫХ

Цель работы: выполнить перерасчет на другое напряжение двигателя и другую частоту вращения ротора в соответствии с методикой.

Порядок выполнения работы:

1. Выполнить перерасчет обмотки трехфазного асинхронного двигателя на другое напряжение (по заданию преподавателя).
2. Выполнить перерасчет обмотки трехфазного асинхронного двигателя на другую частоту вращения (по заданию преподавателя).

Общие теоретические сведения

Каждый специалист, связанный с ремонтом электрооборудования, должен владеть методиками расчета по определению основных параметров электрооборудования. Кроме полных методик, на практике могут применяться упрощенные расчеты.

Например, при модернизации трехфазных асинхронных двигателей, когда их надо включить на другое напряжение или получить у электромашин другую частоту вращения ротора, и при этом известны все данные старой обмотки, нет необходимости проводить расчеты новых обмоток в полном объеме, а сделать упрощенный пересчет.

Методика выполнения задания

Перерасчет асинхронного двигателя на другое напряжение

Для определения параметров новой обмотки пользуются формулами ранее проведенных расчетов. Число витков в обмотке одной фазы машины определить по формулам (4.14) и (4.4):

$$W_{\Phi} = \frac{0,97 \cdot U_{\Phi}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot K_{\text{ОБ}}}; \quad W_{\Phi} = \frac{0,97 \cdot U_{\Phi}}{E_{1\text{В}}}.$$

Так как при изменении напряжения старого $U_{\text{ФС}}$ на новое $U_{\text{ФН}}$ магнитная система двигателя и частота тока для рассматриваемых обмоток не меняется, то ЭДС одного витка также величина постоянная ($E_{1\text{В}} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot K_{\text{ОБ}}$).

Следовательно, для старой обмотки, если

$$W_{\text{ФС}} = \frac{0,97 \cdot U_{\text{ФС}}}{E_{1\text{В}}} \Rightarrow E_{1\text{В}} = \frac{0,97 \cdot U_{\text{ФС}}}{W_{\text{ФС}}}. \quad (7.1)$$

Для новой обмотки, если

$$W_{\text{ФН}} = \frac{0,97 \cdot U_{\text{ФН}}}{E_{1\text{В}}} \Rightarrow E_{1\text{В}} = \frac{0,97 \cdot U_{\text{ФН}}}{W_{\text{ФН}}}. \quad (7.2)$$

Из равенства в выражениях (7.1) и (7.2) $E_{1\text{В}}$ получается, что число витков в обмотке одной фазы можно получить из уравнения

$$W_{\text{ФН}} = W_{\text{ФС}} \frac{U_{\text{Н}}}{U_{\text{С}}}. \quad (7.3)$$

Округляем до ближайшего целого и четного значения $W_{\text{ФН}}$, шт.

Изменение числа витков в фазе пропорционально меняет число активных проводников в одном пазу $N_{\text{ПН}}$:

$$N_{\text{ПН}} = N_{\text{ПС}} \frac{U_{\text{Н}}}{U_{\text{С}}}. \quad (7.4)$$

Для двухслойной обмотки округляем $N_{\text{ПН}}$ до целого, четного числа.

Для однослойной обмотки округляем $N_{\text{ПН}}$ до целого числа.

Уточняем количество витков в фазе по формуле (4.18):

$$W'_{\text{Ф}} = \frac{N_{\text{ПН}} \cdot Z}{2 \cdot m \cdot a}.$$

Число витков в одной секции по формуле (4.34):

$$W_{\text{сек}}^{(2)} = \frac{N_{\text{ПН}}}{2}.$$

Сделанные преобразования позволяют получить новые сечение $\Pi_{\text{РН}}$ и диаметр $d'_{\text{Н}}$ провода с изоляцией новой обмотки:

$$\Pi_{\text{РН}} = \Pi_{\text{РС}} \frac{U_{\text{С}}}{U_{\text{Н}}}; \quad (7.5)$$

$$d'_{\text{Н}} = d'_{\text{С}} \sqrt{\frac{U_{\text{С}}}{U_{\text{Н}}}}. \quad (7.6)$$

В таблицах справочников, приложениях (см. приложения 3, 4) принимаем новый стандартный обмоточный провод наружным диаметром с изоляцией $d_{\text{H(ГОСТ)}}$, мм, и без изоляции $d'_{\text{H(ГОСТ)}}$, мм, и сечением $\Pi_{\text{H(ГОСТ)}}$, мм².

Диаметр изолированного провода должен быть на 1,5–2,0 мм меньше ширины шлица паза ($b_{\text{ш}}$): $d_{\text{H}} \leq b_{\text{ш}} - 1,5$.

Если учесть, что количество полюсов при новой обмотке, относительно старой, не изменится, все обмоточные данные ($a, y, q, N_{\text{п}}$ и a') берутся по данным старой обмотки, а значит и схема обмотки останется прежней. Также останутся прежними: размер витка $l_{\text{В}}$, масса обмоточного провода G' , номинальная мощность машины P_{H} (так как изменение номинального тока I_{H} пропорционально номинальному напряжению U_{H}).

В этом случае целесообразно провести проверку только сопротивления обмотки одной фазы постоянному току в холодном состоянии – R .

Сопротивление, Ом, обмотки одной фазы в холодном состоянии (5.9):

$$R = \rho \cdot \frac{l_{\text{В}} \cdot W_{\text{Ф}}}{\Pi'_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a'}$$

где $\rho = 0,0172$ Ом мм²/м – удельное сопротивление меди.

Пересчет асинхронного двигателя на другую частоту вращения

При пересчете на другую частоту вращения вначале следует уточнять допустимость такого пересчета. Так как при изменении частоты после ремонта может иметь место «залипание» (когда ротор не проворачивается при включении машины в сеть), либо «застревание» (ротор вращается на значительно пониженных оборотах), а также может появиться «повышенный шум».

Причинами являются наличие высших гармонических составляющих в магнитном потоке электрической машины, а они связаны с нарушением соотношения между числами зубцов статора (Z_1) и ротора (Z_2) магнитопровода.

Для предупреждения «залипания» ротора в момент пуска требуется выполнение следующих условий:

$$\begin{cases} Z_2 \neq Z_1, \\ Z_2 \neq 0,5 \cdot Z_1, \\ Z_2 \neq 2 \cdot Z_1, \\ Z_2 \neq (2 \cdot p \cdot 3) \cdot i, \end{cases}$$

где i – любое целое число;

p – число пар полюсов.

Для предупреждения «застревания» ротора на пониженной частоте вращения, требуется выполнение следующих условий:

$$\begin{cases} Z_2 \neq 2p(3i + 1), \\ Z_2 \neq Z_1 \pm p, \\ Z_2 \neq 0,5 \cdot Z_1 \pm p, \\ Z_2 \neq Z_1 \pm 2p, \\ Z_2 \neq 2 \cdot Z_1 \pm 2p. \end{cases}$$

Для предупреждения повышенного шума электродвигателя, требуется выполнение следующих условий:

$$\begin{cases} Z_2 \neq 2p \cdot 3i \pm 1, \\ Z_2 \neq 2p \cdot 3i \pm (2p \pm 1). \end{cases}$$

В случае, если расчеты дали положительный результат, можно приступить к пересчету обмотки путем преобразования уже известных выражений:

$$W_\Phi = \frac{0,97 \cdot U_\Phi}{4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot K_{\text{об}}}; \text{ или } 0,97 \cdot U_\Phi = 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot K_{\text{об}} \cdot W_\Phi,$$

но, так как $\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot B_\delta \cdot Q_\delta$, а частота тока $f = \frac{p \cdot n}{60}$, то тогда

$$0,97 \cdot U_{\Phi\text{С}} = 4,44 \frac{P_{\text{С}} \cdot n_{\text{С}}}{60} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot B_{\delta\text{С}} \cdot Q_{\delta\text{С}} \cdot K_{\text{об}} \cdot W_{\Phi\text{С}},$$

$$0,97 \cdot U_{\Phi\text{Н}} = 4,44 \frac{P_{\text{Н}} \cdot n_{\text{Н}}}{60} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot B_{\delta\text{Н}} \cdot Q_{\delta\text{Н}} \cdot K_{\text{об}} \cdot W_{\Phi\text{Н}}.$$

Если величины фазных напряжений равны ($U_{\text{ФС}} = U_{\text{ФН}}$), то

$$\begin{aligned} 4,44 \frac{P_{\text{С}} \cdot n_{\text{С}}}{60} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot B_{\delta} \cdot Q_{\delta\text{С}} \cdot K_{\text{ОБ}} \cdot W_{\text{ФС}} = \\ = 4,44 \frac{P_{\text{Н}} \cdot n_{\text{Н}}}{60} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot B_{\delta} \cdot Q_{\delta\text{Н}} \cdot K_{\text{ОБ}} \cdot W_{\text{ФН}}. \end{aligned}$$

Сокращая в правой и левой части равенства одинаковые величины и учитывая, что произведения $P_{\text{С}} \cdot Q_{\delta\text{С}}$ и $P_{\text{Н}} \cdot Q_{\delta\text{Н}}$ равны (это площадь одной и той же расточки статора), получим 2 варианта:

1) при пересчете электродвигателя на меньшую частоту вращения, то есть при $n_{\text{Н}} < n_{\text{С}}$ воспользуемся выражениями:

$$W_{\text{ФН}} = W_{\text{ФС}} \cdot \frac{n_{\text{С}} \cdot K_{\text{П}}}{n_{\text{Н}}}. \quad (7.7)$$

Тогда и число витков в секции будет равно, шт.:

$$W_{\text{сек Н}} = W_{\text{сек С}} \cdot \frac{n_{\text{С}} \cdot K_{\text{П}}}{n_{\text{Н}}}, \quad (7.8)$$

где $K_{\text{П}}$ – поправочный коэффициент перерасчета, $K_{\text{П}} = 0,65 - 0,85$.

Изменение $W_{\text{Ф}}$ и $W_{\text{сек}}$, а также числа активных проводников в пазу, приведет к изменению сечения обмоточного провода $\Pi_{\text{р}}$ мощности двигателя машины $P_{\text{Н}}$.

$$\Pi_{\text{РН}} = \Pi_{\text{РС}} \cdot \frac{n_{\text{Н}}}{n_{\text{С}} \cdot K_{\text{П}}}, \quad P_{\text{РН}} = P_{\text{РС}} \cdot \frac{n_{\text{Н}}}{n_{\text{С}} \cdot K_{\text{П}}}. \quad (7.9)$$

2) если частота вращения электродвигателя увеличивается, то есть $n_{\text{Н}} \geq n_{\text{С}}$, тогда

$$W_{\text{сек Н}} = W_{\text{сек С}} \cdot \frac{n_{\text{С}}}{n_{\text{Н}} \cdot K_{\text{П}}}; \quad (7.10)$$

$$\Pi_{\text{РН}} = \Pi_{\text{С}} \cdot \frac{n_{\text{Н}} \cdot K_{\text{П}}}{n_{\text{С}}}; \quad P_{\text{Н}} = P_{\text{С}} \cdot \frac{n_{\text{Н}} \cdot K_{\text{П}}}{n_{\text{С}}}. \quad (7.11)$$

Главное условие при пересчете – сохранение допустимых величин магнитных нагрузок в магнитопроводе статора (B_δ , B_z , B_C) неизменными. Не должно меняться также и напряжение, приложенное к обмотке.

Чем больше разница между старой и новой частотой вращения, тем меньшим принимают значение поправочного коэффициента.

Введение поправочного коэффициента обусловлено тем, что при уменьшении числа полюсов (увеличении частоты вращения) и при сохранении индукции в воздушном зазоре возрастает индукция в спинке статора. В зубцовой зоне она остается неизменной. При увеличении числа полюсов (уменьшении частоты вращения) имеет место обратная зависимость.

Пересчитываются и обмоточные данные, при этом шаг обмотки и число пазов на полюс и фазу можно находить по выражениям

$$y'_H = y_C \cdot \frac{n_H}{n_C}; \quad (7.12)$$

$$q_H = q_C \cdot \frac{n_H}{n_C}. \quad (7.13)$$

Схема обмотки при переходе на другую частоту вращения поменяется, значит, необходимо рассчитать все недостающие обмоточные данные.

Задания для самостоятельного расчета

Данные для самостоятельного выполнения заданий представлены в табл. 7.1 в соответствии с вариантом, заданным преподавателем.

Задание 7.1. Пересчитать двухслойную обмотку трехфазного асинхронного двигателя с напряжения 380/220 В на напряжение 220/127 В.

Условия работы двигателя оставить без изменения.

Параметры старой обмотки: число витков в обмотке одной фазы $W_{\text{Фс}} = 216$ шт.; число параллельных ветвей $a_C = 1$; длина витка секции обмотки $l_B = 0,53$ м; число проводников в одном пазу

$N_{\text{П}} = 36$ шт.; обмоточный провод ПЭТВ – $2 \times 0,94 \times 1 \times \frac{1,0}{1,09}$; сопро-

тивление обмотки фазы постоянному току $R = 2,1$ Ом; ширина шлица паза $b_{\text{ш}} = 3,7$ мм.

Решение. Определим новые параметры обмотки:

Число витков в обмотке одной фазы:

$$W_{\text{ФН}} = W_{\text{ФС}} \cdot \frac{U_{\text{Н}}}{U_{\text{С}}},$$

$$W_{\text{ФН}} = W_{\text{ФС}} \cdot \frac{U_{\text{Н}}}{U_{\text{С}}} = 216 \cdot \frac{127}{220} = 124,7 \text{ шт.}$$

Округляем до ближайшего целого и четного значения
 $W_{\text{ФН}} = 124$ шт.

Изменение числа витков в фазе пропорционально меняет число активных проводников в пазу:

$$N_{\text{ПН}} = N_{\text{ПС}} \frac{U_{\text{Н}}}{U_{\text{С}}},$$

$$N_{\text{ПН}} = N_{\text{ПС}} \frac{U_{\text{Н}}}{U_{\text{С}}} = 36 \cdot \frac{127}{220} = 20,7 \text{ шт.}$$

Для двухслойной обмотки округляем $N_{\text{ПН}} = 20$ шт.

Число витков в одной секции:

$$W_{\text{сек}}^{(2)} = \frac{N_{\text{П}}}{2} = \frac{20}{2} = 10 \text{ шт.}$$

Выбираем обмоточный провод для новой обмотки. Новое сечение обмоточного провода:

$$\Pi_{\text{РН}} = \Pi_{\text{РС}} \cdot \frac{U_{\text{С}}}{U_{\text{Н}}} = 0,94 \cdot \frac{220}{127} = 1,63 \text{ мм}^2.$$

Диаметр провода с изоляцией новой обмотки:

$$d'_{\text{Н}} = d'_{\text{С}} \cdot \sqrt{\frac{U_{\text{С}}}{U_{\text{Н}}}} = 1,1 \cdot \sqrt{\frac{220}{127}} = 1,45 \text{ мм.}$$

Проверяем возможность прохода провода через шлиц паза. Для этого необходимо выполнение условия

$$d_{\text{н}} \leq b_{\text{ш}} - (1,5 \dots 2,0);$$

$$d' = 1,45 < 3,7 - 1,5 = 2,2 \text{ мм.}$$

Принимаем для изготовления новой обмотки провод.

$$\text{ПЭТВ} - 2 \times 1,36 \times 1 \times \frac{1,32}{1,42}.$$

Сопротивление обмотки одной фазы постоянному току в холодном состоянии:

$$R = \rho \cdot \frac{l_{\text{в}} \cdot W_{\Phi}}{\Pi'_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a'} = 0,0172 \cdot \frac{0,53 \cdot 216}{1,36 \cdot 1 \cdot 1} = 1,45 \text{ Ом.}$$

Задание 7.2. Пересчитать двухслойную обмотку трехфазного асинхронного электродвигателя с частоты вращения $n_{\text{с}} = 1500 \text{ мин}^{-1}$ на частоту $n_{\text{н}} = 3000 \text{ мин}^{-1}$. Условия работы электродвигателя оставить без изменения.

Параметры старой обмотки: петлевая, двухслойная; $U_{\text{н}} = 380/220 \text{ В}$; $P_{\text{н}} = 7,5 \text{ кВт}$; $f = 50 \text{ Гц}$; Y/Δ , $W_{\text{сек}} = 13 \text{ шт.}$;

марка и размеры обмоточного провода ПЭТВ $- 2 \times 2,268 \times 1 \times \frac{1,7}{1,81}$;

число параллельных ветвей $a = 1$; количество фазных катушек $N_{3\Phi}^{(2)} = 12$; число секций в катушечной группе $q = 3$; полный шаг обмотки $y' = 9$; длина витка $l_{\text{в}} = 0,67 \text{ м}$.

Число зубцов статора $Z_1 = 36$; число зубцов ротора $Z_2 = 24$; диаметр внутренней расточки статора $D = 171 \text{ мм}$; длина магнитопровода $l = 145 \text{ мм}$; высота паза $h = 24,7 \text{ мм}$; ширина шлица паза $b_{\text{ш}} = 4 \text{ мм}$.

Проверка. Проверяем допустимость проведения пересчета старой обмотки на новое число оборотов $n_{\text{н}} = 1000 \text{ мин}^{-1}$, в этом случае количество пар полюсов:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1 \text{ шт.}$$

Для предупреждения «залипания» ротора в момент пуска требуется выполнение следующих условий:

$$\begin{cases} Z_2 \neq Z_1, \\ Z_2 \neq 0,5 \cdot Z_1, \\ Z_2 \neq 2 \cdot Z_1, \\ Z_2 = (2 \cdot p \cdot 3) \cdot i. \end{cases}$$

Принимаем $i = 4$, тогда

$$\begin{cases} 24 \neq 36, \\ 24 \neq 0,5 \cdot 36 = 18, \\ 24 \neq 2 \cdot 36 = 72, \\ 24 = (2 \cdot 1 \cdot 3) \cdot 4 = 24. \end{cases}$$

По всем уравнениям требования удовлетворяются.

Для предупреждения «застревания» ротора на пониженной частоте вращения, требуется выполнение следующих условий:

$$\begin{cases} Z_2 \neq 2p(3i + 1), \\ Z_2 \neq Z_1 \pm p, \\ Z_2 \neq 0,5 \cdot Z_1 \pm p, \\ Z_2 \neq Z_1 \pm 2p, \\ Z_2 \neq 2 \cdot Z_1 \pm 2p. \end{cases}$$

$$\begin{cases} 24 \neq 2 \cdot 1 \cdot (3 \cdot 4 + 1) = 26, \\ 24 \neq 36 + 1, \\ 24 \neq 0,5 \cdot 36 \pm 1 = 18 \pm 1, \\ 24 \neq 36 \pm 2 \cdot 1 = 36 \pm 2, \\ 24 \neq 2 \cdot 36 \pm 2 \cdot 1 = 72 \pm 2. \end{cases}$$

По всем уравнениям требования удовлетворяются.

Для предупреждения повышенного шума электродвигателя, требуется выполнение следующих условий:

$$\begin{cases} Z_2 \neq 2p \cdot 3i \pm 1, \\ Z_2 \neq 2p \cdot 3i \pm (2p \pm 1). \end{cases}$$

$$\begin{cases} 24 \neq 2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 4 \pm 1 = 24 \pm 1, \\ 24 \neq 2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 4 \pm (2 \cdot 1 \pm 1) = 24 \pm (2 \pm 1). \end{cases}$$

По всем уравнениям требования удовлетворяются.

Исходя из проведенной проверки, пересчет старой обмотки при частоте вращения поля в расточке статора АД $n_c = 1500 \text{ мин}^{-1}$ на новое число оборотов $n_n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ допускается.

Решение. Проведем расчет параметров новой обмотки с учетом того, что $n_H \geq n_C$:

Число витков в одной секции:

$$W_{\text{сек H}} = W_{\text{сек C}} \cdot \frac{n_C}{n_H \cdot K_{\Pi}} = 13 \cdot \frac{1500}{3000 \cdot 0,7} = 9,3 \text{ шт.}$$

Округляем до целого $W_{\text{сек H}} = 10$ шт., тогда у двухслойной обмотки в пазу $N_{\text{пн}} = 20$ шт., следовательно, число витков в обмотке одной фазы равно

$$W_{\text{фн}} = \frac{N_{\text{пн}} \cdot Z}{2 \cdot m \cdot a} = \frac{20 \cdot 36}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 120 \text{ шт.}$$

Рассчитаем данные нового обмоточного провода и выберем его.

Находим сечение провода:

$$P_{\text{PH}} = P_{\text{PC}} \cdot \frac{n_H \cdot K_{\Pi}}{n_C} = 2,268 \cdot \frac{3000 \cdot 0,7}{1500} = 3,17 \text{ мм}^2.$$

По заданию условия работы двигателя остаются неизменными, поэтому марку провода оставляем прежней – ПЭТВ-2. По полученному сечению $P_{\text{р.н}}$ находим диаметр нового провода:

$$d'_H = \sqrt{\frac{4 \cdot P_{\text{PH}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,17}{3,14}} = 2,02 \text{ мм.}$$

Выбираем новый обмоточный провод:

$$\text{ПЭТВ} - 2 \times 2,83 \times 1 \times \frac{1,9}{2,01}.$$

Выполняем проверку возможности прохода через шлиц паза:

$$d'_{\text{ГОСТ}} < b_{\text{ш}} - 1,5,$$

$$d'_{\text{ГОСТ}} = 1,55 < 4 - 1,5 = 2,5 \text{ мм.}$$

Условия укладки активных проводников в паз выполнено.

Определим новые обмоточные данные.

Шаг обмотки:

$$y'_H = y_C \cdot \frac{n_H}{n_C} = 9 \cdot \frac{3000}{1500} = 18.$$

Укороченный шаг обмотки:

$$y_H = y'_H \cdot 0,8 = 18 \cdot 0,8 = 14,4.$$

Принимаем укороченный шаг равным 14.

Число пазов на полюс и фазу (число секций в фазной катушке):

$$q_H = q_C \cdot \frac{n_H}{n_C} = 3 \cdot \frac{3000}{1500} = 6.$$

Число катушечных групп (фазных катушек):

$$N_{3\Phi}^{(2)} = 2 \cdot p \cdot m = 2 \cdot 1 \cdot 3 = 6.$$

Рассчитаем длину витка секции новой обмотки.

Средняя ширина секции:

$$T = \frac{\pi \cdot (D + h)}{Z} \cdot y = \frac{3,14 \cdot (0,171 + 0,0247)}{36} \cdot 14 = 0,24 \text{ м.}$$

Длина лобовой части витка:

$$l_{л} = k \cdot T + l' = 1,3 \cdot 0,24 + 0,03 = 0,34 \text{ м.}$$

Выбираем из таблицы коэффициенты поправочные и запаса (табл. 5.2).

$2p$	k	l'
2,00	1,30	0,03

Длина витка секции:

$$l_B = 2 \cdot (l_a + l_{л}) = 2 \cdot (0,145 + 0,34) = 0,97 \text{ м.}$$

Определяем массу провода новой обмотки:

$$\begin{aligned} G &= m \cdot \gamma \cdot \Pi_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a' \cdot l_B \cdot W_{\Phi} = \\ &= 3 \cdot 8900 \cdot 3,17 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,97 \cdot 120 = 9,85 \text{ кг.} \end{aligned}$$

С учетом изоляции и «срезок» по уравнению:

$$G' = 1,05 \cdot G = 1,05 \cdot 9,85 = 10,34 \text{ кг.}$$

Определим сопротивления новой обмотки одной фазы постоянному току в холодном состоянии:

$$R = \rho \cdot \frac{l_B \cdot W_\Phi}{\Pi'_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a'} = 0,0172 \cdot \frac{0,97 \cdot 120}{2,83 \cdot 1 \cdot 1} = 0,7 \text{ Ом.}$$

Новая мощность АД после пересчета обмотки на новую частоту вращения поля в расточке статора:

$$P_H = P_C \cdot \frac{n_H \cdot K_\Pi}{n_C} = 7,5 \cdot \frac{3000 \cdot 0,7}{1500} = 10,5 \text{ кВт.}$$

Контрольные вопросы

1. Как выполнить перерасчет статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя на другое напряжение?
2. Как выполнить перерасчет статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя на другую частоту вращения?
3. Как определить число активных проводников в пазу упрощенным способом?
4. Как выполнить перерасчет диаметра и сечения обмоточного провода на другую частоту вращения?
5. Как выполнить перерасчет диаметра и сечения обмоточного провода на другое напряжение?

Индивидуальные задания

Таблица 7.1

Данные для решения практических задач

Вариант	Исходные данные																					
	$U_{НС},$ В	$U_{Ф},$ В	$f,$ Гц	Z_1	Z_2	$D,$ мм	$l,$ мм	$b_{ш},$ мм	$h,$ мм	$n_{с},$ мин ⁻¹	$n'_{н},$ мин ⁻¹	$2p$	y'/y	q	a	a'	$N_n,$ шт.	$W_{Ф},$ шт.	$P_H,$ Вт	Марка прово- да	$d'_{ГОСТ} /$ $d_{ГОСТ},$ мм	$\Pi_{ГОСТ},$ мм ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	380/220	380	50	24	20	194	200	2,5	28,2	1500	3000	4	6/5	2	1	1	62	248	15	ПЭТ-155	0,85/ 0,94	0,567
2	380/220	127	50	36	28	126	125	3,7	14,3	1500	1000	4	9/7	3	1	2	26	156	2,2	ПЭТВ-2	1,70/ 1,81	2,268
3	380/220	380	50	48	44	232	200	2,0	32,3	1500	750	4	12/10	4	1	1	158	1264	20	ПЭТ-155	0,40/ 0,46	0,125
4	380/220	127	50	24	22	84	100	3,0	12,6	3000	1500	2	12/10	4	1	1	22	88	1,1	ПЭТВ-2	1,25/ 1,35	1,226
5	380/220	380	50	36	34	145	115	3,7	17,8	1500	1000	4	9/7	3	1	2	50	300	5,5	ПЭТВ-2	1,60/ 1,71	2,01
6	380/220	127	50	48	44	232	230	3,5	32,3	1500	3000	4	12/10	4	1	1	74	592	18,5	ПЭТ-155	1,50/ 1,61	1,766
7	380/220	380	50	24	20	95	100	2,0	14,1	1500	3000	4	6/5	2	1	1	112	448	1,5	ПЭТВ-2	0,38/ 0,44	0,113
8	380/220	127	50	36	28	145	160	3,5	17,8	3000	1500	2	18/14	6	1	2	38	228	15	ПЭТ-155	1,70/ 1,81	2,268
9	380/220	380	50	48	38	185	140	1,8	20,5	750	1500	8	6/5	2	1	1	210	1680	5,5	ПЭТВ-2	0,20/ 0,24	0,031

Продолжение таблицы 7.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
10	380/220	127	50	24	22	95	130	3,7	14,1	1500	3000	4	6/5	2	1	1	28	112	1,1	ПЭТВ-2	2,00/ 2,12	3,14
11	380/220	380	50	36	34	84	78	2,5	12,1	1000	1500	6	6/5	2	1	2	34	204	0,25	ПЭВ-2	0,71/ 0,79	0,395
12	380/220	127	50	48	44	185	180	4,0	20,5	3000	750	2	24/19	8	1	1	42	336	30	ПЭТ- 155	1,70/ 1,81	2,268
13	380/220	380	50	24	20	110	125	1,8	15,1	1500	3000	4	6/5	2	1	2	216	864	1,5	ПЭТВ-2	0,21/ 0,25	0,034
14	380/220	127	50	36	34	84	98	2,5	12,1	1000	1500	6	6/5	2	1	1	128	768	0,25	ПЭВ-2	0,75/ 0,84	0,441
15	380/220	380	50	48	38	198	145	3,0	19,1	750	3000	8	6/5	2	1	1	68	544	5,5	ПЭТВ-2	1,18/ 1,27	1,093
16	380/220	127	50	24	22	130	130	2,5	16,5	3000	1500	2	12/10	4	1	2	80	320	7,5	ПЭТВ-2	0,90/ 0,99	0,635
17	380/220	380	50	36	28	88	78	1,8	13,0	3000	1000	2	18/14	6	1	1	168	1008	2,2	ПЭТВ-2	0,19/ 0,23	0,028
18	380/220	127	50	48	44	197	200	3,7	19,1	750	3000	8	6/5	2	1	1	52	416	5,5	ПЭТВ-2	1,90/ 2,02	2,833
19	380/220	380	50	24	18	54	50	4,0	9,0	3000	1500	2	12/10	4	1	2	14	56	0,25	ПЭВ-2	2,00/ 2,12	3,14
20	380/220	127	50	36	28	95	100	3,7	12,9	1500	3000	4	9/7	3	1	1	22	132	1,1	ПЭТВ-2	1,06/ 1,15	0,882
21	380/220	380	50	24	22	54	56	3,0	9,0	3000	1500	2	12/10	4	1	1	16	64	0,25	ПЭВ-2	1,18/ 1,28	1,093
22	380/220	127	50	36	34	100	110	3,5	13,8	1500	1000	2	18/14	5	1	1	24	144	1,8	ПЭТВ-2	1,32/ 1,42	1,367

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
23	380/220	380	50	24	18	61	56	3,7	10,4	3000	1500	4	6/5	2	1	2	10	40	0,25	ПЭВ-2	1,60/ 1,71	2,01
24	380/220	127	50	36	28	105	100	2,0	15,8	1500	3000	4	9/7	3	1	1	118	708	1,8	ПЭТВ-2	0,38/ 0,44	0,113
25	380/220	380	50	24	20	54	65	4,0	9,0	3000	1500	2	12/10	4	1	1	14	56	0,37	ПЭВ-2	1,80/ 1,92	2,543
26	380/220	127	50	48	38	211	180	3,7	23,7	3000	750	2	24/19	8	1	2	38	304	22	ПЭТ- 155	1,32/ 1,42	1,367
27	380/220	380	50	36	34	194	200	4,0	14,9	1000	3000	6	6/5	2	1	1	42	252	7,5	ПЭТВ-2	1,70/ 1,81	2,268
28	380/220	127	50	24	22	65	74	2,0	9,3	1500	3000	4	6/5	2	1	1	64	256	0,37	ПЭВ-2	0,28/ 0,33	0,061
29	380/220	380	50	36	28	113	110	3,0	15,4	1000	1500	6	6/5	2	1	1	32	192	0,5	ПЭВ-2	0,85/ 0,93	0,567
30	380/220	127	50	48	44	158	160	3,5	17,6	750	3000	8	6/5	2	1	2	28	224	2,2	ПЭТВ-2	1,80/ 1,91	2,543

Примечание: $U_{\text{нс}}$ – номинальное напряжение, В; $U_{\text{Фн}}$ – фазное напряжение, по заданию на пересчет, В; n_c – частота вращения магнитного поля статора, мин^{-1} ; n'_n – частота вращения магнитного поля статора по заданию на пересчет, мин^{-1} ; f – частота тока, Гц; Z_1 – число зубцов магнитопровода, шт.; Z_2 – число зубцов ротора, шт.; D – внутренний диаметр магнитопровода, мм; l – длина магнитопровода, мм; y'/y – полный/укороченный шаг обмотки; q – число пазов на полюс и фазу; h – высота паза, мм; $b_{\text{ш}}$ – ширина шлица паза; $2p$ – число полюсов; a – число параллельных ветвей обмотки; a' – число параллельных сечений; $N_{\text{п}}$ – число активных проводников в пазу; $W_{\text{ф}}$ – число витков в обмотке одной фазы; $P'_{\text{ГОСТ}}$ – сечение обмоточного провода, мм^2 ; $d'_{\text{ГОСТ}}/d_{\text{ГОСТ}}$ – диаметр обмоточного провода, мм.

8. ОБМЕР МАГНИТОПРОВОДА ТРАНСФОРМАТОРА. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ОБМЕРА МАГНИТОПРОВОДА ТРАНСФОРМАТОРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО РАЦИОНАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

Цель работы: ознакомиться с методикой обмера магнитопровода трансформатора, изучить способы обработки полученных размеров до видов, упрощающих расчеты обмоток трехфазных масляных трансформаторов, изучить методику расчета оптимальной нагрузки магнитной цепи.

Порядок выполнения работы:

1. Определить площади фактического и активного сечения стержня и ярма $P_{\text{фс}}$, $P_{\text{фя}}$, $P_{\text{с}}$, $P_{\text{я}}$.
2. Определить диаметр описанной окружности вокруг стержня $D_{\text{с}}$.
3. Выбрать оптимальную магнитную нагрузку магнитной цепи $B_{\text{с}}$.
4. Рассчитать оптимальную мощность и ток обмоток трансформатора.

Общие теоретические сведения

Задачей обработки размеров магнитопровода является определение фактических площадей магнитной цепи трансформатора: стержней – $P_{\text{фс}}$, ярм – $P_{\text{фя}}$ и активных площадей: стержней – $P_{\text{с}}$, ярм – $P_{\text{я}}$.

Задачей расчета оптимальной нагрузки магнитной цепи является определение целесообразной магнитной индукции в сечениях магнитной цепи: стержнях – $B_{\text{с}}$ и ярмах – $B_{\text{я}}$.

Расчет обмоток трехфазного трансформатора начинается с обмера его магнитопровода (рис. 8.1 и 8.2), который состоит из трех стержней (это те части, на которых размещаются фазные обмотки) и двух ярм (те части магнитопровода, которые соединяют стержни).

При измерении используются: линейки, рулетки, штангенциркули и другие измерительные приборы.

Измерению подлежат следующие размеры:

A_n – ширина пакетов (ступеней $n = 1 \dots$) стали стержней, мм;

a_n – толщина пакетов (ступеней $n = 1 \dots$) стали стержней, мм;

B_n – ширина пакетов (ступеней $n = 1 \dots$) стали ярм, мм;

b_n – толщина пакетов (ступеней $n = 1 \dots$) стали ярм, мм;

δ – толщина листа электротехнической стали, мм;

C – расстояние между осями стержней, мм;

l_c – высота стержня (окна магнитопровода), мм;

$C_{ок}$ – ширина окна магнитопровода, мм.

Вместе с размерами магнитопровода трехфазного трансформатора для расчета его обмоток необходимы технические условия потребителя (заказчика), в которые входят:

$U_{вн}$ – номинальное напряжение обмоток высшего напряжения, кВ;

$U_{нн}$ – номинальное напряжение обмоток низшего напряжения, кВ;

f – частота тока, Гц.

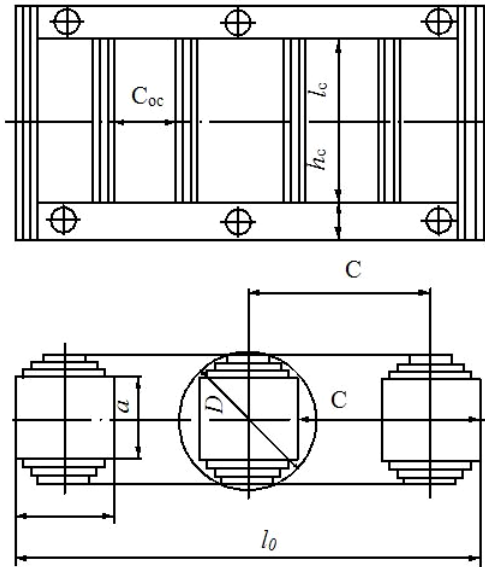


Рис. 8.1. Изображение магнитопровода трехфазного силового трансформатора с указанием основных линейных размеров

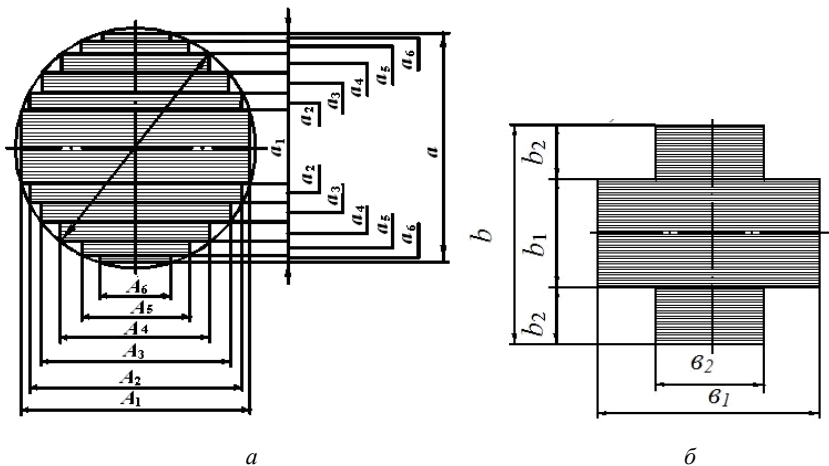


Рис. 8.2. Сечения: а – стержня; б – яра

Система охлаждения в ремонтной практике обычно определяется конструкцией трансформатора, однако нередки случаи, когда заказчику необходима ее модернизация. Например, трансформатор с масляным охлаждением переделать на воздушное охлаждение. Условия работы требуется знать, например, при выборе схемы соединения обмоток.

Методика выполнения задания

Подготовка данных обмера магнитопровода трансформатора

В целях упрощения расчетов обмоток трансформатора данные измерений его магнитопровода подвергаются математической обработке, и по полученным размерам определяются:

Фактическая площадь стержня, м². Площадь – это произведение длины на ширину, а так как площадь стержня $\Pi_{\text{ФС}}$ складывается из площадей отдельных пакетов $A \times a$, формула расчета будет иметь вид

$$\Pi_{\text{ФС}} = A_1 \cdot a_1 + 2 \sum_{i=2}^{i=n} A_i \cdot a_i . \quad (8.1)$$

Активная площадь стержня, м²:

$$\Pi_C = K_C \cdot \Pi_{\text{фс}}, \quad (8.2)$$

где K_C – коэффициент заполнения пакета стали, учитывающий толщину ее изоляции, выбирается по справочникам в зависимости от толщины листа стали δ и толщины изоляции δ^* , но так как толщина изоляции нормирована ГОСТ для каждого ее рода, K_C выбирается по толщине листа стали и рода изоляции (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Коэффициенты заполнения стали (K_C)

Толщина листа стали δ , мм	Род изоляции	
	Лак двукратный	Нагревостойкая
	K_C	K_C
0,35	0,93	0,97

Фактическая площадь ярма, м². Эта площадь определяется по тому же принципу, что и площадь стержня:

$$\Pi_{\text{фя}} = B_1 \cdot b_1 + 2 \sum_{i=2}^{i=n} B_i \cdot b_i. \quad (8.3)$$

Активная площадь ярма, м²:

$$\Pi_{\text{я}} = K_C \cdot \Pi_{\text{фя}}. \quad (8.4)$$

Диаметр окружности описанной вокруг стержня, м:

$$D_C = \sqrt{A_1^2 + a_1^2}. \quad (8.5)$$

Определение оптимальной нагрузки магнитной цепи трансформатора

Расчет рациональной нагрузки магнитопровода трансформатора требует знания схемы соединения его обмоток, номинальной мощности и токов.

Выбор схемы соединения обмоток трансформатора. Выбор схемы соединения обмоток зависит от минимальных расходов на изготовление трансформатора и экономичных условий его работы в электрической сети.

Из предусмотренных ГОСТ 11677–85 схем и групп соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов в сельских электрических сетях получили применение схемы, приведенные в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Схемы и группы соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов с естественным масляным охлаждением

Диаграмма векторов ЭДС		Условные обозначения	
высшего напряжения (ВН)	низшего напряжения (НН)	в чертежах	в тексте
		Y/Δ-11	У/Д-11
		Y/Y-0	У/У _н -0
		Y/Y-11	У/Z _н -11
		Δ/Y-11	Д/У _н -11
		Y/Y-0	У/У _н СУ-0

Примечание. Схема соединения обмоток трансформатора У/У_н СУ-0 узаконена техническими условиями (ТУ) завода изготовителя. Она проверена на соответствие всем требованиям ГОСТ и серийно выпускается Минским электротехническим заводом им. В. И. Козлова.

Для выбора целесообразной схемы соединения обмоток необходимо знать все их основные достоинства и недостатки.

Схема У/Д-11

Достоинства: относительно малый расход электротехнических материалов при изготовлении, простота технологии производства, а следовательно, малая стоимость аппаратов; при неравномерной нагрузке фаз дает сравнительно малое искажение системы фазных напряжений; дает возможность обеспечивать повышенную надежность работы электрической сети.

Недостатки:

– распределение и потребление электрической энергии выполняется при пониженном (фазном) напряжении, что вызывает повышенный расход проводов в линиях электропередач, а также создает повышенные потери электроэнергии, так как понижение напряжения до фазного вызывает рост тока до линейного ($S = U \downarrow I \uparrow = \text{const}$);

– требует укорочения радиуса низковольтных линий;

– трансформаторы У/Д-11 не могут работать параллельно или в кольце с трансформаторами У/У_н-0 (разные группы), а последние в сетях имеют доминирующее применение.

Схема У/У_н-0

Достоинства:

– минимальный расход электротехнических материалов при изготовлении, простота технологии производства трансформаторов и потому их минимальная стоимость;

– распределение электрической энергии выполняется на повышенном (линейном) напряжении, а потребление – на пониженном (фазном);

– обеспечивается относительно повышенный радиус низковольтных линий и понижение в них потерь электроэнергии;

– дает наименьшие, по сравнению с другими трансформаторами, потери короткого замыкания;

– трансформаторы У/У_н-0 просты в эксплуатации.

Недостатки:

Имеют высокую чувствительность к неравномерности нагрузки фаз, тогда:

– резко искажается система фазных напряжений, что приводит к большим отклонениям напряжений на вводах у однофазных токоприемников и появлению поля обратной последовательности у трехфазных асинхронных двигателей, а также уравнильных токов в электрических линиях;

– повышаются потери в электрической сети;

– в трансформаторах появляются потоки нулевой последовательности (Φ_0), дополнительно нагревающие его бак и все ферромагнитные части, что нередко приводит к их возгораниям, в лучшем случае к отказам при суммарной трехфазной нагрузке

ниже номинальной мощности, к тому же при однофазных коротких замыканиях, когда Φ_0 достигает больших значений, оно механически разрушает обмотки трансформатора;

- кроме того, поля обратной последовательности вызывают усиленный шум, что делает невозможным установку таких трансформаторов во встроенные в здания ТП;

- при работе трансформаторов U/U_n-0 на нелинейные нагрузки (выпрямительные установки, дроссели и т. п.) резко искажается кривая изменения напряжения сети;

- значительно усложняется наладка работы защиты.

Схема U/Z_n-11

Достоинства:

- практически отсутствует искажение системы фазных напряжений при неравномерной нагрузке фаз;

- распределение электрической энергии выполняется на повышенном (линейном) напряжении, а потребление – на пониженном (фазном);

- обеспечивается относительно повышенный радиус низковольтных линий и понижение в них потерь электроэнергии;

Недостатки:

- повышенный расход электротехнических материалов при изготовлении и относительно сложная технология производства трансформаторов, отсюда повышенная их стоимость;

- большие потери короткого замыкания по сравнению с трансформаторами U/U_n-0 и U/U_nCU-0 ;

- они не могут работать ни в кольце, ни в параллель с трансформаторами U/U_n-0 , так как принадлежат к разным группам.

Схема Δ/U_n-11

Достоинства:

- уменьшенное искажение системы фазных напряжений при неравномерной нагрузке фаз по сравнению с трансформаторами U/U_n-0 ;

- распределение электрической энергии выполняется на повышенном (линейном) напряжении, а потребление – на пониженном (фазном);

- обеспечивается относительно повышенный радиус низковольтных линий и сравнительное понижение в них потерь электроэнергии.

Недостатки:

- повышенный расход электротехнических материалов при изготовлении и относительно сложная технология производства трансформаторов, отсюда повышенная их стоимость;

- увеличенные потери короткого замыкания по сравнению с трансформаторами $У/У_n-0$ и $У/У_n$ СУ-0;
- не могут работать ни в кольце, ни в параллель с трансформаторами $У/У_n-0$, так как принадлежат с ними к разным группам.

Схема $У/У_n$ СУ-0

Достоинства:

- распределение электрической энергии выполняется на повышенном (линейном) напряжении, а вот потребление – на пониженном (фазном);
- обеспечивается относительно повышенный радиус низковольтных линий и понижение в них потерь электроэнергии;
- дает такие же потери короткого замыкания, как трансформатор $У/У_n-0$;
- трансформаторы $У/У_n$ СУ-0 просты и надежны в эксплуатации;
- свободны от всех недостатков трансформаторов $У/У_n-0$ при работе на несимметричную по фазам нагрузку.

Недостатки:

- требуют большего расхода электротехнических материалов на изготовление трансформаторов и несколько сложнее технология производства.

Сравнение достоинств и недостатков схем соединения обмоток трансформаторов дает возможность сделать следующие выводы:

- при равномерной нагрузке фаз целесообразной схемой соединения обмоток трансформатора является самая экономичная из всех – $У/У_n-0$, так как ток в нулевом проводе (или, иначе, ток небаланса) $I_{нб}$, равный тройному значению тока нулевой последовательности ($3I_0$), будет равен нулю, следовательно, и напряжение нулевой последовательности будет равно нулю, так как $U_0 = I_0 Z_0$. А это, в свою очередь, не дает «смещения нулевой точки» векторов фазных напряжений, и искажения системы этих напряжений не будет;
- при неравномерной нагрузке фаз I_0 не равно нулю (так как есть ток в нулевом проводе), тогда и напряжение $U_0 \neq 0$. Отсюда следует: для того чтобы напряжение нулевой последовательности равнялось нулю ($U_0 = I_0 Z_0$) и не было искажения системы векторов фазных напряжений, надо, чтобы Z_0 (то есть сопротивление нулевой последовательности трансформатора, пропорциональное Φ_0)

равнялось нулю. Это возможно только при использовании схем соединения обмоток трансформаторов, способных компенсировать потоки нулевой последовательности Φ_0 (У/З_н-11 или У/У_н СУ-0), либо таких схем, которые его ослабляют (У/Д-11, Д/У_н-11). Значит, при неравномерной загрузке фаз целесообразными являются указанные схемы.

Расчет номинальной мощности и токов обмоток трансформатора

Расчет номинальной мощности. В трансформаторе, как и в электрических машинах, работа выполняется магнитным полем, а так как сталь магнитопровода обладает насыщением, величина мощности зависит от минимальной площади в случае по диаметру окружности D , описанному вокруг стержня, магнитной цепи. Исходя из сказанного, номинальная мощность S_H трансформатора определяется по геометрическим размерам сердечника. Для этого вначале по эмпирическому выражению находится приближенная мощность:

$$S_{TP} = 3 \cdot \left(\frac{100 \cdot D_C}{K} \right)^4, \quad (8.6)$$

где K – коэффициент, зависящий от мощности трансформатора и марки электротехнической стали. При холоднокатаной стали и мощности трансформаторов от 25 до 650 кВ·А он принимается в пределах от 5,0 до 5,3.

По полученному значению мощности S_{TP} берется ближайшая (стандартная) номинальная мощность трансформатора S_H и для нее из таблицы выписываются все расчетные параметры с учетом выбранной схемы соединения обмоток: потери холостого хода P_{XX} , потери короткого замыкания $P_{КЗ}$, напряжение короткого замыкания U_{XX} , ток холостого хода I_{XX} (табл. 8.3).

В заключение выписываются допустимые ГОСТом отклонения этих характеристик, приведены в табл. 8.4.

Таблица 8.3

Расчетные данные трехфазных трансформаторов
с естественным масляным охлаждением, установленные ГОСТ
для номинальных мощностей 25–630 кВ·А

Номинальная мощность трансформатора S_n , кВ·А	Номинальное напряжение обмотки высшего напряжения (ВН) U_n , кВ	Потери, Вт			Напряжение короткого замыкания $u_{кз}$, %		Ток холостого хода, $I_{хх}$, %
		холостого хода $P_{хх}$	короткого замыкания $P_{кз}$		Y/Y_n	Y/Z_n	
			Схема Y/Y_n	Схема Y/Z_n			
25	6, 10	130	600	690	4,5	4,7	3,2
40	6, 10	175	680	1000	4,5	4,7	3,0
63	6, 10	240	1280	1470	4,5	4,7	2,8
	20, 35	270	1280	1470	5,0	5,3	2,8
100	6, 10	330	1970	2270	4,5	4,7	2,6
	20, 35	420	1970	2270	6,5	6,8	2,6
160	6, 10	510	2650	3100	4,5	4,7	2,4
	20, 35	620	2650	3100	4,5	4,7	2,4
50	6, 10	740	3700	4200	4,5	4,7	2,3
	20, 35	900	3700	4200	6,5	6,8	2,3
400	6, 10	950	5500	5900	4,5	4,7	2,1
	20, 35	1200	5500	–	6,5	–	2,1
630	6, 10	1310	7600	8500	5,5	5,5	2,0
	20, 35	1600	7600	–	6,5	–	2,0

Таблица 8.4

Допустимые отклонения характеристик

Потери холостого хода	Потери короткого замыкания	Суммарные потери	Ток холостого хода	Напряжение короткого замыкания	Коэффициент трансформации
+15 %	+10 %	+10 %	+30 %	±10 %	±0,5

Расчет номинальных токов обмоток. Они определяются из известной формулы мощности, А:

$$I_{\text{H(ВН)}}^{(\text{НН})} = \frac{S_{\text{H}}}{\sqrt{3}U_{\text{H(ВН)}}^{(\text{НН})}}, \quad (8.7)$$

где $I_{\text{H(ВН)}}^{(\text{НН})}$ – номинальный ток обмоток высшего напряжения (ВН) и обмоток низшего напряжения (НН) соответственно, кВ;

$U_{\text{H(ВН)}}^{(\text{НН})}$ – номинальное напряжение обмоток высшего напряжения (ВН) и обмоток низшего напряжения (НН) соответственно, кВ.

Расчет оптимальной величины магнитной индукции (нагрузки) в магнитной цепи трансформатора

Рациональная магнитная индукция B , или, иначе, плотность магнитного потока в сердечнике, зависит от установленных ГОСТом для данного трансформатора потерь P_{xx} и тока I_{xx} .

Для определения оптимальной индукции B расчеты выполняются в следующем порядке.

На первом этапе используются рекомендациями производства и принимают в стержнях предварительную величину индукции $B_{\text{с}}$ по табл. 8.5 в зависимости от марки стали и номинальной мощности трансформатора.

Таблица 8.5

Рекомендуемые величины магнитных индукций, Тл

Марка стали	Мощность трансформатора S_{H} , кВ·А	
	25–100	160 и выше
1512, 1513	1,50–1,55	1,55–1,60
3404, 3405	1,55–1,60	1,60–1,65

Для выбранной величины магнитной индукции в стержнях $B_{\text{с}}$, так как магнитный поток ($\Phi = \text{ВП}$) на всех участках магнитной цепи один и тот же, величина магнитной индукции в ярах равна, Тл:

$$B_{\text{я}} = B_{\text{с}} \frac{\Pi_{\text{с}}}{\Pi_{\text{я}}}. \quad (8.8)$$

На втором этапе проводится проверка принятой магнитной индукции по $P_{XX(\text{ГОСТ})}$ и $I_{XX(\text{ГОСТ})}$ для принятой S_N трансформатора, так как завышенная магнитная индукция приводит к перегреву магнитопровода трансформатора и увеличенному току холостого хода, а заниженная B – к перерасходу обмоточных проводов, к сложностям при размещении обмоток в окне магнитопровода.

Проверка магнитной индукции по потерям холостого хода

В ремонтной практике для расчета потерь в магнитной системе трансформатора пользуются следующей формулой, Вт:

$$P_{XX} = K_d (p_c G_c + p_y G_y), \quad (8.9)$$

где K_d – коэффициент добавочных потерь. Для горячекатаных сталей принимается равным 1,0–1,1, для холоднокатаных – 1,25;

p_c , p_y – удельные потери в 1 кг стали соответственно стержня и ярма, Вт/кг. Берутся по таблицам ГОСТа на электротехническую сталь, в зависимости от марки стали, толщины ее листа δ , мм, частоты тока f , Гц, величины магнитной индукции (в стержнях B_c и в ярмах B_y), Тл. Они приведены в табл. 8.6;

G_c , G_y – масса стали соответственно трех стержней и двух ярм, кг:

$$G_c = m \cdot \gamma \cdot \Pi_c \cdot l_c, \quad G_y = n \cdot \gamma \cdot \Pi_y \cdot l_y, \quad (8.10)$$

где m – число стержней магнитопровода, шт.;

γ – плотность электротехнической стали, кг/м³. Для трансформаторной стали $\gamma = 7650$ кг/м³;

l_c – длина (высота) стержня, м;

n – число ярм магнитопровода, шт.;

l_y – полная длина ярма, м.

Для трехстержневого магнитопровода

$$l_y = 2C + A_1, \quad (8.11)$$

где C – расстояние между осями стержней, м;

A_1 – ширина большого пакета стержня, м.

Таблица 8.6

Удельные потери в стали p , Вт/кг, для горячекатаной и холоднокатаной стали, с толщиной листа $\delta = 0,5$ мм, при частоте $f = 50$ Гц в зависимости от величины магнитной индукции в стержнях B_c или в ярмах B_y

$B_c, B_y, \text{Тл}$	Горячекатаная сталь		Холоднокатаная сталь	
	1512	1513	3404	3405
1	2	3	4	5
0,90	0,962	0,836	0,397	0,302
1,00	1,200	1,050	0,475	0,425
1,10	1,460	1,290	0,575	0,505
1,20	1,760	1,560	0,675	0,610
1,30	2,090	1,850	0,785	0,715
1,32	–	–	0,814	0,739
1,34	–	–	0,843	0,763
1,36	–	–	0,872	0,787
1,38	–	–	0,901	0,811
1,40	2,450	2,170	0,930	0,835
1,42	–	–	0,964	0,860
1,44	–	–	0,998	0,869
1,46	–	–	1,032	0,916
1,48	–	–	1,066	0,943
1,50	2,800	2,500	1,100	0,970
1,52	–	–	1,134	1,004
1,54	–	–	1,168	1,038
1,56	–	–	1,207	1,074
1,58	–	–	1,251	1,112
1,60	–	–	1,295	1,150
1,62	–	–	1,353	1,194
1,64	–	–	1,411	1,238
1,66	–	–	1,472	1,288
1,68	–	–	1,536	1,344
1,70	–	–	1,600	1,400

Полученная по выражению (8.9) величина потерь холостого хода P_{XX} сравнивается с допустимой по ГОСТ 11677–85 $P_{XX(\text{ГОСТ})}$ (табл. 8.3), при этом должно выполняться следующее условие:

$$1,15 \cdot P_{XX(\text{ГОСТ})} \geq P_{XX} \geq P_{XX(\text{ГОСТ})}.$$

Если условие не соблюдается, расчет P_{XX} следует повторить, изменив в нужную сторону величину магнитной индукции B_C ; при большой P_{XX} следует уменьшить B_C , при малой P_{XX} следует увеличить B_C .

Примечание. Использование формулы (8.9) для расчета P_{XX} при мощностях трансформаторов более 250 кВ·А, если магнитопровод выполнен из холоднокатаной стали, иногда дает относительно повышенную ошибку, в этом случае целесообразно расчет P_{XX} выполнять по более точной методике.

Проверка магнитной индукции по току холостого хода

Ток I_{XX} холостого хода складывается из активной $I_{XX(a)}$ и реактивной $I_{XX(p)}$ составляющих.

Активная составляющая тока находится по формуле, А:

$$I_{XX(a)} = \frac{P_{XX}}{mU_{\Phi(BH)}}, \quad (8.12)$$

где $U_{\Phi(BH)}$ – фазное напряжение обмотки высшей стороны трансформатора, В.

Реактивная составляющая находится из выражения, А:

$$I_{XX(p)} = \frac{Q_{XX}}{mU_{\Phi(BH)}}, \quad (8.13)$$

где Q_{XX} – полная намагничивающая (реактивная) мощность трансформатора, В·А.

В ремонтной практике с достаточной точностью полная намагничивающая мощность Q_{XX} находится по формуле, В·А:

$$Q_{XX} = K \cdot ((q_C \cdot G_C + q_Y \cdot G_Y) + Q_3), \quad (8.14)$$

где K – коэффициент, учитывающий марку стали, для горячекатаных сталей $K = 1,0$; для холоднокатаных $K = 1,25$;

q_C и q_Y – удельные намагничивающие мощности для 1 кг стали стержней и ярм, В·А. Берутся по таблицам ГОСТ на электротехническую сталь в зависимости от марки стали, толщины листа δ , частоты тока f , величины магнитной индукции (для стержней B_C и для ярм B_Y). В частности, они приведены в табл. 8.7;

Q_3 – намагничивающая мощность зазоров, В·А; может быть с достаточной точностью определена по формуле

$$Q_3 = 3,2 \cdot q_3 \Pi_{\Phi C}, \quad (8.15)$$

где q_3 – удельная намагничивающая мощность зазоров, В·А/м², значения которой также берутся по таблицам (например, табл. 8.7).

Суммарная величина тока холостого хода определяется из выражения, А:

$$I_{XX} = \sqrt{I_{XX(a)}^2 + I_{XX(p)}^2}. \quad (8.16)$$

Полученная величина сравнивается с номинальным током трансформатора I_H , то есть находим отношение тока холостого хода к номинальному (в %):

$$I_{XX\%} = \frac{I_{XX}}{I_H} 100. \quad (8.17)$$

Полученную величину $I_{XX\%}$ сравнивают с допустимой величиной $I_{XX\%(ГОСТ)}$ по табл. 8.3. Она должна отвечать неравенству:

$$1,3 \cdot I_{XX\%(ГОСТ)} \geq I_{XX} \geq I_{XX\%(ГОСТ)}.$$

Завышенный ток холостого хода требует понижения рабочей составляющей тока трансформатора, так как номинальный ток не может быть выше указанного в паспорте (при данной номинальной мощности), следовательно, для понижения тока холостого хода необходимо понижение магнитной индукции B_C и повторный расчет I_{XX} .

Таблица 8.7

Удельная намагничивающая мощность в стали q , Вт/кг,
 для горячекатаной и холоднокатаной стали, с толщиной листа $\delta = 0,5$ мм,
 при частоте $f = 50$ Гц в зависимости от величины магнитной индукции B , Тл

$B_c, B_d,$ Тл	Горячекатаная сталь		Холоднокатаная сталь			
	$q_c, q_d,$ (В·А)/кг	$q_3,$ (В·А)/кг	$q_c, q_d,$ (В·А)/кг		$q_3,$ (В·А)/кг	
	1512–1513	1512–1513	3404	3405	3404	3405
1	2	3	4	5	6	7
0,90	3,5	3030	0,460	0,450	640	590
1,00	4,6	4910	0,548	0,533	1000	900
1,10	6,5	7760	0,650	0,630	2500	2300
1,20	10,0	11 760	0,752	0,732	4000	3700
1,30	15,7	17 220	0,900	0,860	7400	6000
1,32	–	–	0,932	0,892	8200	6640
1,34	–	–	0,964	0,924	9000	7280
1,36	–	–	0,996	0,956	9800	7920
1,38	–	–	1,028	0,988	10 600	8560
1,40	25,8	24 570	1,060	1,020	11 400	9200
1,42	–	–	1,114	1,065	12 440	10 120
1,44	–	–	1,168	1,110	13 480	11 040
1,46	–	–	1,222	1,156	14 520	11 960
1,48	–	–	1,276	1,210	15 560	12 880
1,50	43,5	34 200	1,330	1,246	16 600	13 800
1,52	–	–	1,408	1,311	17 960	14 760
1,54	–	–	1,486	1,376	19 320	15 720
1,56	–	–	1,576	1,447	20 700	16 800
1,58	–	–	1,675	1,524	22 100	18 000
1,60	–	–	1,775	1,602	23 500	19 200
1,62	–	–	1,985	1,748	25 100	20 480
1,64	–	–	2,131	1,894	26 700	21 760
1,66	–	–	2,556	2,123	28 600	23 160
1,68	–	–	3,028	2,435	30 800	24 680
1,70	–	–	3,400	2,747	33 000	27 000

Задание для самостоятельного расчета

Данные для самостоятельного выполнения задания представлены в табл. 8.10 в соответствии с вариантом, заданным преподавателем.

Задание. Обработать данные обмера магнитопровода (табл. 8.8) трехфазного трансформатора с естественным масляным охлаждением: определить площади фактического и активного сечения стержня и ярма $P_{\text{ФС}}$, $P_{\text{ФЯ}}$, $P_{\text{С}}$, $P_{\text{Я}}$, диаметр описанной окружности вокруг стержня $D_{\text{С}}$; выбрать оптимальную магнитную нагрузку магнитной цепи $B_{\text{С}}$.

Таблица 8.8

Параметры магнитопровода трансформатора и условия заказчика

Данные магнитопровода												
C , мм	$l_{\text{С}}$, мм	$C_{\text{ок}}$, мм	A_1 , мм	A_2 , мм	A_3 , мм	A_4 , мм	A_5 , мм	a_1 , мм	a_2 , мм	a_3 , мм	a_4 , мм	a_5 , мм
250	360	155	95	85	75	55	40	31	11	7	7	4
Данные магнитопровода					Условия заказчика							
B_1 , мм	ϵ_1 , мм	δ , мм	Марка стали	Изоляция	$U_{\text{вн}}$, кВ	$U_{\text{нн}}$, кВ	Схема, группа	Пределы ΔU , %	Охлаждение	Условия работы		
85	89	0,3 5	3404	Лак 2-крат.	10	0,4	У/У _Н	2×2,5	ТМ	Коммунально-бытов.		

Решение. Подготовка данных обмера магнитопровода.

Фактическая площадь стержня определяется из выражения (8.1):

$$P_{\text{ФС}} = A_1 \cdot a_1 + 2 \sum_{i=2}^{i=n} A_i \cdot a_i = 0,095 \cdot 0,031 + 2 \cdot (0,085 \cdot 0,011 + 0,075 \cdot 0,007 + 0,055 \cdot 0,007 + 0,004) = 0,0069 \text{ м}^2.$$

Активная площадь стержня находится по формуле (8.2). Из табл. 8.1: при толщине листов стали магнитопровода $\delta = 0,35$ мм и изоляции их двухкратным слоем лака коэффициент заполнения стали $K_{\text{С}} = 0,93$, отсюда получим

$$\Pi_C = K_C \cdot \Pi_{\text{фс}} = 0,93 \cdot 0,069 = 0,0065 \text{ м}^2.$$

Фактическая площадь ярма рассчитывается по выражению (8.3):

$$\Pi_{\text{фя}} = B_1 b_1 + 2 \sum_{i=2}^{i=n} B_i b_i = 0,085 \cdot 0,089 = 0,0076 \text{ м}^2.$$

Активную площадь ярма находим по формуле (8.4). Учитывая, что коэффициент заполнения стали тот же и равен 0,93 (табл. 8.1), получим

$$\Pi_{\text{я}} = K_C \cdot \Pi_{\text{фя}} = 0,93 \cdot 0,0076 = 0,0071 \text{ м}^2.$$

Диаметр окружности, описанной вокруг стержня, рассчитываем по закону Пифагора (8.5):

$$D_C = \sqrt{A_1^2 + a_1^2} = \sqrt{0,095^2 + 0,031^2} = 0,1 \text{ м}.$$

Определение оптимальной нагрузки магнитной цепи трансформатора

Расчет рациональной нагрузки магнитопровода трансформатора требует знания схемы соединения его обмоток, номинальной мощности и токов.

Выбор схемы соединения обмоток трансформатора. Принимая во внимание, что ремонтируемый трансформатор будет питать в основном симметричные трехфазные нагрузки асинхронных двигателей мастерских, а следовательно, ток в нулевом проводе практически будет отсутствовать, наиболее целесообразной схемой соединения его обмоток является самая дешевая – У/У_н, так как при $I_0 = 0$ «смещения нулевой точки» векторов фазных напряжений не будет ($U_0 = I_0 Z_0$).

Расчет номинальной мощности. Воспользуемся экспериментальной формулой (8.6):

$$S_{\text{тр}} = 3 \cdot \left(\frac{100 \cdot D_C}{K} \right)^4.$$

Принимая во внимание, что магнитопровод нашего трансформатора выполнен из холоднокатаной стали 3404, а при найденном

диаметре D_c мощность не может быть большой, коэффициент K берем равным 5, тогда предварительная мощность

$$S_{TP} = 3 \cdot \left(\frac{100 \cdot 0,1}{5} \right)^4 = 48 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

По ГОСТу ближайшая номинальная мощность равна

$$S_H = 40 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Так как по условию ремонта система охлаждения трансформатора не подлежит модернизации, из таблицы ГОСТа выписываем расчетные номинальные параметры стандартного трансформатора ТМ 40-10/04, U/U_H (табл. 8.9) и по табл. 8.4 берем допустимые отклонения характеристик.

Таблица 8.9

Расчетные параметры трансформатора ТМ 40-10/04

Номинальная мощность трансформатора S_H , кВ·А	Номинальное напряжение обмотки высшего напряжения (ВН) U_H , кВ	Потери, Вт		Напряжение короткого замыкания U_{K3} , %	Ток холостого хода I_{XX} , %
		холостого хода P_{XX}	короткого замыкания P_{K3}		
40	10	175	680	4,5	3,0

Расчет номинальных токов обмоток. Они определяются из известной формулы мощности (8.7).

Обмотка высшего напряжения:

$$I_{H(VH)} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{H(VH)}} = \frac{40}{\sqrt{3} \cdot 10} = 2,3 \text{ А}.$$

Обмотка низшего напряжения:

$$I_{H(HH)} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{H(HH)}} = \frac{40}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 57,8 \text{ А}.$$

Расчет рациональной магнитной индукции B , или, иначе, плотности магнитного потока в сердечнике трансформатора.

По табл. 8.5 принимаем рекомендованную практикой для марки стали 3404 и мощности трансформатора 40 кВ·А предварительную величину индукции B_C равной 1,58 Тл.

Следовательно, величина магнитной индукции в ярмах

$$B_{\text{я}} = B_C \frac{\Pi_C}{\Pi_{\text{я}}} = 1,58 \cdot \frac{0,0065}{0,0071} = 1,45 \text{ Тл.}$$

Выполним проверку принятой магнитной индукции для выбранного трансформатора по величине потерь холостого хода $P_{\text{ХХ(ГОСТ)}}$. Для этого определим по формулам:

– массу стержней магнитопровода:

$$G_C = m \cdot \gamma \cdot \Pi_C \cdot l_C = 3 \cdot 7650 \cdot 0,0065 \cdot 0,36 = 53,7 \text{ кг;}$$

– полную длину ярма магнитопровода:

$$l_{\text{я}} = 2C + A_1 = 2 \cdot 0,25 + 0,095 = 0,595 \text{ м;}$$

– массу ярм магнитопровода:

$$G_{\text{я}} = m \cdot \gamma \cdot \Pi_{\text{я}} \cdot l_{\text{я}} = 2 \cdot 7650 \cdot 0,0071 \cdot 0,595 = 64,6 \text{ кг;}$$

– потери холостого хода. По табл. 8.6 при марке стали 3404 и $B_C = 1,58$ Тл удельные потери стержней равны $p_C = 1,251$ Вт/кг, а удельные потери ярм при $B_{\text{я}} = 1,45$ Тл равны $p_{\text{я}} = 1,0$ В·А/кг.

$$P_{\text{ХХ}} = K_{\text{д}} (p_C G_C + p_{\text{я}} G_{\text{я}}) = 1,25 \cdot (1,251 \cdot 53,7 + 1,0 \cdot 64,6) = 164,8 \text{ Вт.}$$

По условию найденная величина потерь холостого хода $P_{\text{ХХ}}$ не должна быть менее $P_{\text{ХХ(ГОСТ)}}$ и больше $1,15 \cdot P_{\text{ХХ(ГОСТ)}}$, следовательно, так как

$$164,8 \text{ Вт} < 175 \text{ Вт}$$

(см. табл. 8.9), величину магнитной индукции следует увеличить.

Принимаем $B_C = 1,64$ Тл, тогда $B_{\text{я}} = 1,5$ Тл.

$$P_{\text{ХХ}} = K_{\text{д}} (p_C G_C + p_{\text{я}} G_{\text{я}}) = 1,25 \cdot (1,411 \cdot 53,7 + 1,1 \cdot 64,6) = 183,5 \text{ Вт.}$$

Так как последние магнитные индукции удовлетворяют условию

$$1,15 \cdot P_{\text{XX(ГОСТ)}} \geq P_{\text{XX}} \geq P_{\text{XX(ГОСТ)}}$$

(183,5 Вт больше 175 Вт, но меньше чем $1,15 \cdot 175 = 201,25$ Вт), $B_C = 1,64$ Тл и $B_{\text{Я}} = 1,5$ Тл. Потери холостого хода $P_{\text{XX}} = 183,5$ Вт принимаем к дальнейшему расчету.

Выполним проверку принятой магнитной индукции для рассчитываемого трансформатора по величине тока холостого хода $I_{\text{XX(ГОСТ)}}$, для этого определим:

– активную составляющую тока по формуле (8.12):

$$I_{\text{XX(a)}} = \frac{P_{\text{XX}}}{mU_{\text{Ф(ВН)}}} = \frac{183,5}{3 \cdot 5780} = 0,01 \text{ А};$$

– намагничивающую мощность зазоров (8.15); выбираем по табл. 8.7 при $B_C = 1,64$ Тл и марке стали 3404 берем удельную намагничивающую мощность зазоров $q_3 = 26700 \text{ В} \cdot \text{А}/\text{м}^2$.

$$Q_3 = 3,2q_3\Pi_{\text{Фс}} = 3,2 \cdot 26700 \cdot 0,0069 = 589,5 \text{ В} \cdot \text{А};$$

– полную намагничивающую мощность (8.14), выбираем по табл.8.7, при марке стали 3404 и $B_C = 1,64$ Тл берем удельную намагничивающую мощность стержней $q_C = 2,131 \text{ В} \cdot \text{А}/\text{кг}$ и удельную намагничивающую мощность ярм при $B_{\text{Я}} = 1,5$ Тл – $q_{\text{Я}} = 1,330 \text{ В} \cdot \text{А}/\text{кг}$.

$$Q_{\text{XX}} = K((q_C G_C + q_{\text{Я}} G_{\text{Я}}) + Q_3) = 1,25 \cdot ((2,131 \cdot 53,7 + 1,330 \cdot 64,6) + 589) = 987,3 \text{ В} \cdot \text{А};$$

– реактивную составляющую – из выражения (8.13):

$$I_{\text{XX(p)}} = \frac{Q_{\text{XX}}}{mU_{\text{Ф(ВН)}}} = \frac{987,3}{3 \cdot 5780} = 0,06 \text{ А};$$

– суммарную величину тока холостого хода – из выражения (8.16):

$$I_{\text{XX}} = \sqrt{I_{\text{XX(a)}}^2 + I_{\text{XX(p)}}^2} = \sqrt{0,01^2 + 0,06^2} = 0,061 \text{ А};$$

– то же в процентах от номинального тока трансформатора по формуле (8.17):

$$I_{XX\%} = \frac{I_{XX}}{I_H} \cdot 100 = \frac{0,061}{2,3} \cdot 100 = 2,65 \%$$

Полученную величину $I_{XX\%}$ сравниваем с допустимой величиной $I_{XX\%(\text{ГОСТ})}$ по табл. 8.9. Так как она удовлетворяет условию:

$$1,3I_{XX\%(\text{ГОСТ})} \geq I_{XX} \geq I_{XX\%(\text{ГОСТ})}$$

($1,3 \cdot 3 = 3,9 \%$ больше $2,65 \%$ и даже меньше 3%), то магнитные нагрузки $B_C = 1,64$ Тл и $B_{Я} = 1,5$ Тл можно принять к дальнейшему расчету и по этому показателю.

Примечание. Завышенный ток холостого хода требует понижения рабочей составляющей тока трансформатора, следовательно, чем ток холостого хода меньше, тем лучше.

Контрольные вопросы

1. Как определить площади фактического и активного сечения стержня и ярма магнитопровода трансформатора?
2. Как определить диаметр описанной окружности вокруг стержня магнитопровода трансформатора?
3. Как выбрать оптимальную магнитную нагрузку магнитной цепи трансформатора?
4. Как рассчитать номинальный ток обмоток трансформатора?
5. Как рассчитать номинальную мощность трансформатора?
6. В чем заключается порядок расчета оптимальной величины магнитной индукции в магнитной цепи трансформатора?

Индивидуальные задания

Таблица 8.10

Индивидуальные задания к практической задаче

Номер варианта	C , мм	I_C , мм	C_{OK} , мм	A_1 , мм	A_2 , мм	A_3 , мм	A_4 , мм	A_5 , мм	A_6 , мм	A_7 , мм	a_1 , мм	a_2 , мм	a_3 , мм	a_4 , мм	a_5 , мм	a_6 , мм	a_7 , мм	B_1 , мм	B_2 , мм	B_3 , мм	b_1 , мм	b_2 , мм	b_3 , мм	U_{BH} , кВ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	26	47	20
2	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	26	47	35
3	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	26	47	35
4	325	624	210	115	105	95	75	55	40	–	34	12	8	9	6	2	–	115	95	–	58	25	–	20
5	400	765	245	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	8	7	7	–	155	135	105	40	23	32	10
6	325	624	210	115	105	95	75	55	40	–	34	12	8	9	6	2	–	115	95	–	58	25	–	35
7	400	765	245	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	8	7	7	–	155	135	105	40	23	32	20
8	307	520	172	135	105	120	85	65	40	–	38	17	11	9	6	5	–	135	120	85	38	17	31	10
9	400	765	245	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	8	7	7	–	155	135	105	40	23	32	35
10	375	745	240	135	120	105	95	75	55	–	36	18	10	5	8	5	–	135	105	–	38	46	–	35
11	330	555	175	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	7	7	7	–	155	135	105	40	23	31	6
12	330	555	175	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	7	7	7	–	155	135	105	40	23	31	10
13	400	765	245	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	8	7	7	–	155	135	105	40	23	32	20
14	360	625	185	175	155	135	105	85	55	–	42	25	14	13	5	6	–	175	135	–	92	38	–	10
15	420	723	215	195	175	155	120	96	65	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	120	46	26	47	10
16	255	434	150	105	95	85	75	55	40	–	33	11	7	5	6	3	–	105	85	–	69	14	–	10
17	270	520	155	115	105	95	75	55	40	–	34	12	8	9	6	2	–	115	85	–	58	25	–	6
18	307	520	172	135	105	120	85	65	40	–	38	17	11	9	6	5	–	135	120	85	38	17	31	6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
19	307	520	172	135	105	120	85	65	40	–	38	17	11	9	6	5	–	135	120	85	38	17	31	6
20	430	840	255	175	155	135	105	85	55	–	42	24	15	13	7	7	–	175	135	120	42	39	26	20
21	250	360	155	105	85	75	55	40	–	–	31	11	7	7	4	–	–	105	85	–	53	18	–	6
22	250	360	155	105	85	75	55	40	–	–	31	11	7	7	4	–	–	105	85	–	53	18	–	10
23	270	535	165	105	95	85	75	55	40	–	33	11	7	5	6	3	–	105	75	–	55	23	–	20
24	400	765	245	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	8	7	7	–	155	135	105	40	23	32	35
25	360	625	185	175	155	135	105	85	55	–	42	25	14	13	5	6	–	175	135	–	92	38	–	6
26	330	555	175	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	7	7	7	–	155	135	105	40	23	31	10
27	250	360	155	105	85	75	55	40	–	–	31	11	7	7	4	–	–	105	85	–	53	18	–	10
28	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	26	47	35
29	270	520	155	120	105	95	75	55	40	–	34	12	8	9	6	2	–	120	85	–	58	25	–	6
30	420	723	215	195	175	155	120	96	65	–	78	36	34	22	18	13	–	195	175	120	78	70	53	6

Примечание:

C – расстояние между осями стержней, мм;

C_{OK} – ширина окна, мм;

I_C – высота стержня (окна), мм;

$U_{ВН}$ – номинальное напряжение обмотки ВН, кВ;

У/Ун – 0 – схема и группа соединения обмоток;

толщина электротехнической стали – 0,35 мм, марка – Э3404;

вид изоляционного покрытия – нагревостойкое;

пределы регулирования напряжения обмотки ВН $U_{per} = \pm 5\%$

номинальное напряжение обмотки НН $U_{нн} = 0,4$ кВ;

охлаждение трансформаторов – естественное, масляное.

9. РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ВИТКОВ ОБМОТОК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ КОНСТРУКТИВНЫХ РАЗМЕРОВ ДЛЯ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С ЕСТЕСТВЕННЫМ МАСЛЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Цель работы: выполнить расчет числа витков в обмотках трехфазного трансформатора с естественным масляным охлаждением.

Порядок выполнения работы:

1. Определить число витков в обмотках трансформатора.
2. Выбрать тип конструкции обмоток и изоляцию трансформатора.
3. Выбрать марку и стандартное сечение обмоточного провода трансформатора.

Методика выполнения задания

Принцип работы трансформатора такой же, как и принцип работы асинхронного двигателя. Отличие только в том, что благодаря смещению обмоток в пространстве расточки статора на 120 эл. в трехфазной асинхронной машине появляется вращающееся магнитное поле.

Определение числа витков в обмотках

Из сказанного выше следует, что методика расчета числа витков W_{Φ} в обмотке одной фазы трансформатора ничем не отличается от таковой асинхронного двигателя, так как векторные диаграммы их отличаются друг от друга лишь в мелких деталях. А поэтому W_{Φ} находится по той же формуле – делением фазной ЭДС E_{Φ} на ЭДС одного витка $E_{1В}$:

$$W_{\Phi} = \frac{E_{\Phi}}{E_{1В}}. \quad (9.1)$$

А так как падение напряжения ΔU на активном и реактивном сопротивлениях в трансформаторе величина весьма незначительная (доли процента), то без ущерба для точности расчета можно приложенное к обмотке фазы напряжение принять равным фазной ЭДС (то есть $U_{\Phi} \approx E_{\Phi}$). Вместе с тем, как известно из основ электротехники, ЭДС одного витка равна, B :

$$E_{1B} = 4,44 \cdot f \cdot B \cdot \Pi.$$

В отличие от расчетов для асинхронного двигателя, в формуле нет обмоточного коэффициента $K_{об}$ (он равен единице), так как магнитный поток в трансформаторе используется практически полностью.

Следовательно, число витков в обмотке одной фазы, шт.:

$$W_{\Phi(BH)(HH)} = \frac{U_{\Phi(BH)(HH)}}{4,44 \cdot f \cdot B_C \cdot \Pi_C}. \quad (9.2)$$

Полученные величины числа витков в обмотках высшего напряжения (ВН) и в обмотках низшего напряжения (НН) округляются до целого значения.

Примечание. При схеме соединения обмоток Y/Z_n найденное число витков обмотки НН увеличивается в 1,15 раза, так как они разделены на две равные части и размещены на двух соседних стержнях магнитопровода, вот почему и число $W_{НН}$ у этой схемы должно быть не только целым, но и четным.

После округления уточняются величины магнитных индукций B_C и B_Δ , так как они изменяются с изменением $W_{(ВН)}$, и тогда потери P_{XX} и ток холостого хода I_{XX} могут выйти за пределы допустимого для рассчитываемого трансформатора.

После этого определяется число витков для регулировки напряжения W_p , так как согласно ГОСТ 11677–85 силовые трансформаторы должны иметь регулирование напряжения в пределах $\pm 5\%$ ступенями по $\pm 2,5\%$, следовательно, $\pm(2 \times 2,5\%)$, то есть обмотка ВН трансформатора должна иметь на своем конце пять выводов от витков:

- 1) $W_{ВН1} = W_{ВН} + 2 \cdot W_p$, 2) $W_{ВН2} = W_{ВН} + W_p$, 3) $W_{ВН3} = W_{ВН}$,
- 4) $W_{ВН4} = W_{ВН} - W_p$, 5) $W_{ВН5} = W_{ВН} - 2 \cdot W_p$.

Регулировочное число витков при 2,5 % от $W_{ВН}$:

$$W_p = 0,025 \cdot W_{ВН}. \quad (9.3)$$

Правильность расчетов соотношения числа витков в обмотках ВН и НН проверяется сравнением коэффициентов трансформации, найденных по напряжению K_U и по числу витков K_W на каждой ступени. Ошибка для первой ступени вычисляется по формуле

$$\delta_1 = \frac{K_{U1} - K_{W1}}{K_{U1}} 100\%, \quad (9.4)$$

где $K_{U1} = \frac{U_{(ВН)1}}{U_{(НН)}}$, $K_{W1} = \frac{W_{(ВН)1}}{W_{(НН)}}$ – коэффициенты трансформации по U и W .

$$U_{ВН1} = 1,05U_{ВН}.$$

Для других ступеней трансформации: $U_{ВН2} = 1,025U_{ВН}$;

$$U_{ВН3} = U_{ВН};$$

$$U_{ВН4} = 1,025U_{ВН};$$

$$U_{ВН5} = 1,05U_{ВН}.$$

Аналогично определяется ошибка $\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5$ по всем другим ступеням трансформации. Если ошибка δ_n на любой ступени окажется больше допустимой $\pm 0,5\%$, следует соответственно увеличить или уменьшить число витков в обмотке высшего напряжения и повторить расчет.

Примечание. При определении коэффициентов трансформации следует учитывать схему соединения обмоток трансформатора. Отношение числа витков равно отношению напряжений только при схемах соединения $Y/Y_n, \Delta/\Delta, \Delta/Y_n$ и Y/Y_n СУ. При схеме Y/Z_n отношение числа витков обмоток будет в 1,15 раза меньше отношения напряжений.

Выбор главной изоляции трансформатора

Главной (поперечной) изоляцией масляного трансформатора является трансформаторное масло, у сухих трансформаторов – воздух. Поэтому для получения требуемой электрической прочности изоляции делаются необходимые изоляционные расстояния, которые после опускания магнитопровода трансформатора с его обмотками в бак заполняются маслом. Расстояния обеспечиваются нужной толщиной прокладок (их еще часто на производстве называют клиньями). Для изготовления клиньев обычно используют дерево, картон, гетинакс, текстолит и тому подобные материалы.

Главная изоляция выполняется между обмотками разных напряжений на одном стержне, обмотками и магнитопроводом, обмотками и баком, обмотками одного напряжения, но разных фаз, расположенных на соседних стержнях.

Минимальные изоляционные расстояния (рис. 9.1) зависят: от рода изоляции (трансформаторное масло, воздух, битум и пр.), от класса напряжения обмотки (0,4; 3; 6; 10; 35 кВ и т. д.), от мощности трансформатора (10–630 кВ·А и пр.) и конструкций обмоток трансформаторов. По приведенным показателям они находятся в таблицах справочников.

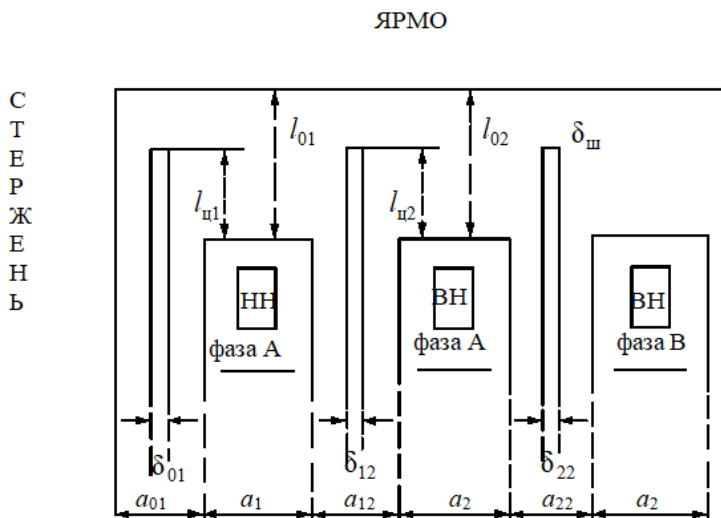


Рис. 9.1. Главная изоляция обмоток ВН и НН масляных трансформаторов

Для масляных трансформаторов с номинальным напряжением высшей стороны до 35 кВ включительно и учетом конструкции обмоток изоляционные расстояния можно взять по табл. 9.1 и 9.2.

На рис. 9.1 изоляции: между обмоткой НН и стержнем δ_{01} , а также между обмотками ВН и НН δ_{12} . Как правило, они должны выполняться из бумажно-бакелитовых цилиндров, но в ремонтной практике чаще делаются из электрокартона.

Для трансформаторов с номинальным напряжением обмотки ВН 35 кВ для изоляции обмоток от ярм ставятся дополнительные изоляционные шайбы из толстого электрокартона.

Вместе с главной (поперечной) изоляцией в трансформаторе имеется продольная изоляция обмоток, под которой понимается изоляция между витками обмоточных проводов, между слоями витков и между катушками в катушечных обмотках. Выбор этой изоляции определяется электрической прочностью при частоте 50 Гц. Она выбирается по справочным таблицам.

Таблица 9.1

Главная изоляция обмотки низшего напряжения

Мощность трансформатора S_H , кВ·А	Напряжение обмотки U_H , кВ	Изоляционные расстояния, мм			
		от ярм l_{01}	от стержня		
			δ_{01}	a_{01}	l_{11}
5–250	0,4	15	Электрокартон 2×0,5	4	–
400–630	0,4	Как обмотки ВН	Электрокартон 2×0,5	5	–
	0,4	Как обмотки ВН	4	15	18

Таблица 9.2

Главная изоляция обмотки высшего напряжения

Мощность трансформатора S_H , кВ·А	Напряжение обмотки U_H , кВ	Изоляционные расстояния, мм						
		от ярма		между ВН-НН одной фазы		выступ l_{U2}	между ВН-ВН разных фаз	
		l_{02}	δ_{11}	a_{12}	δ_{12}		a_{22}	δ_{22}
25–100	6 и 10	20	–	9	2,5	10	8	–
160–630	6 и 10	30	–	9	3,0	15	10	–
160–630	35	75	2	27	5,0	50	20	3
1000	6 и 10	50	–	20	4,0	20	18	–
1000	35	75	2	27	5,0	50	30	3

Выбор типа конструкции обмоток трансформатора

Выбор типа конструкции обмоток трехфазных трансформаторов с естественным масляным охлаждением (ТМ и ТМГ) зависит в основном: от их достоинств и недостатков; материала жилы обмоточного

провода (медь, алюминий); номинальной мощности, кВ·А; тока на один стержень, А; номинального напряжения, кВ; формы сечения жилы провода витка (круглый, прямоугольный).

На практике для трансформаторов мощностью от 25 до 630 кВ·А, напряжением до 35 кВ, при токе на один стержень 15 до 800 А и материале жилы обмоточного провода медь и при токе на один стержень от 10 до 650 А, материале жилы алюминий рекомендуются цилиндрические типы обмоток: для НН – одно- или двух-слойные из прямоугольного провода, для ВН – многослойные из круглого или прямоугольного провода.

Достоинства: простая технология изготовления, хорошее охлаждение и высокая экономичность (дешевы).

Недостатки: малая механическая прочность, уменьшенная охлаждающая поверхность по сравнению с обмотками, имеющими радиальные каналы охлаждения.

Конструирование обмоток трансформатора

Под конструированием понимается: выбор материалов изоляции обмоток, выбор марок и форм сечения обмоточных проводов, расчет этих сечений, определение размеров обмоток низшего и высшего напряжения (высоты, внутренних и наружных диаметров, радиальных каналов охлаждения). Методики конструирования и расчетов для каждого типа обмоток индивидуальны, поэтому рассмотрим их на примерах конкретных обмоток.

У силовых трансформаторов мощностью до 1000 кВ·А, напряжением высшей стороны до 35 кВ с естественным масляным охлаждением при изготовлении на стержень магнитопровода первой укладывается обмотка НН.

Конструирование обмотки низшего напряжения. При меньшем напряжении величина тока будет большей, это следует из формулы $S = U \downarrow I \uparrow = \text{const}$. Поэтому для обеспечения большего заполнения и сокращения размеров обмотки сечение провода, как правило, берется прямоугольным. Тип обмотки НН, из изложенного выше, для ТМ и ТМГ при 0,4 кВ берется цилиндрической.

Определение размеров обмоток НН (высоты, диаметров и пр.) начинается с выбора изоляционного цилиндра толщиной δ_{01} (см. рис. 9.1), на который наматываются витки обмотки. Он служит также и для изоляции их от стержня.

В ремонтной практике изоляционный цилиндр, как уже упоминалось, чаще всего делается мягким, то есть намотанным из листов

электроизоляционного картона (для трансформаторов с масляным заполнением – марки Г, толщиной 0,5 мм). Количество слоев берется по табл. 9.1.

Выбор числа слоев обмотки. Число слоев обмотки $n_{\text{НН}}$ может быть 1, 2, иногда и 3 (а вот для схемы соединения обмоток Y/Z_H – только 2).

Выбор $n_{\text{НН}}$ в первую очередь определяет соотношение размеров прямоугольного провода витка в осевом $h_{\text{В}}$ и радиальном направлениях $a_{\text{В}}$. Желательно, чтобы это соотношение было $h_{\text{В}} \geq a_{\text{В}}$.

Расчет числа витков в одном слое, шт.:

$$W_{\text{1CC(НН)}} = \frac{W_{\text{НН}}}{n_{\text{НН}}}. \quad (9.5)$$

Определение ориентировочного размера витка по оси обмотки, мм:

$$h_{\text{В}}^* = \frac{l_{\text{С}} - 2l_{01}}{(W_{\text{1C(НН)}} + 1)K_{\text{H}}}, \quad (9.6)$$

где K_{H} – коэффициент неплотности укладки, обычно принимается равным от 1,015 до 1,030.

Определение ориентировочного сечения провода обмотки НН, мм². Расчет выполняется по выражению:

$$F_{\text{НН}}^* = \frac{I_{\text{H(НН)}}}{j_{\text{С}}^*}, \quad (9.7)$$

где $j_{\text{С}}^*$ – ориентировочная средняя плотность тока обмотки НН и ВН, А/мм²:

$$j_{\text{С}}^* = K_{\text{М}}K_{\text{С}} \frac{P_{\text{КЗ}}E_{1\text{В}}}{1,33S_{\text{H}}D}, \quad (9.8)$$

где $K_{\text{М}}$ – коэффициент материала обмоточного провода; для алюминия $K_{\text{М}} = 0,463$, для меди $K_{\text{М}} = 0,746$;

$K_{\text{С}}$ – коэффициент, учитывающий мощность трансформатора, для $S_{\text{H}} = 25...630$ кВ·А, $K_{\text{С}} = 0,95...0,99$;

$P_{\text{КЗ}}$ – потери короткого замыкания, Вт (см. табл. 8.3);

$E_{1\text{В}}$ – ЭДС одного витка, В;

S_{H} – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

D – диаметр окружности, описанной вокруг стержня, м.

Окончательно допустимая ГОСТом плотность тока в обмотках низшего и высшего напряжения определяется только после расчета потерь короткого замыкания.

Выбор марки и стандартного сечения обмоточного провода. Выбор марки провода производится по электрической прочности изоляции (то есть по классу номинального напряжения U_H), форме его сечения, экономическим соображениям.

Для обмоток масляных трансформаторов напряжением $U_H = 0,4$ кВ, с прямоугольной формой сечения провода рекомендуются марки ПБ, АПБ, ПББО, АПББО.

Выбор сечения выполняется по F_{HH}^* и h_B^* в таблицах справочников, ГОСТах, можно взять из табл. 9.7, 9.8. Стандартное сечение $F_{HH(ГОСТ)}$ берется ближайшее к F_{HH}^* с учетом, чтобы размер витка прямоугольного провода с изоляцией по оси обмотки не превышал h_B^* и отношение размеров в витке обмоточного провода по оси радиальному по возможности было не более чем 1,1.

Лучше, если радиальный размер a_B будет меньше, чем осевой размер h_B , то есть провод будет располагаться плашмя, а не на ребро (рис. 9.2).

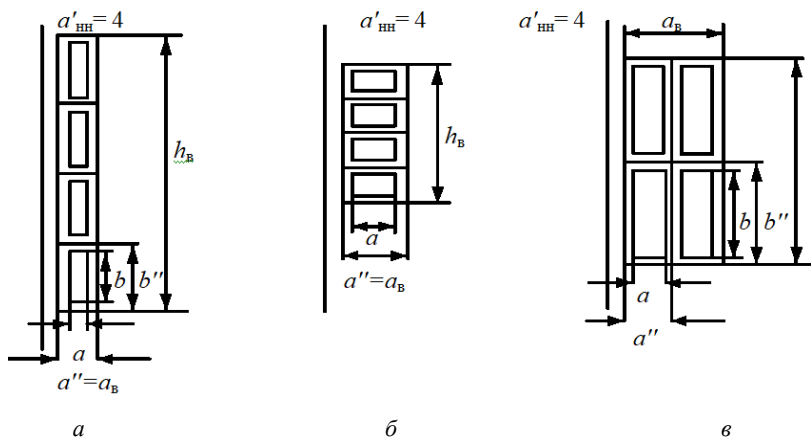


Рис. 9.2. Эскизы сечения витка с параллельными сечениями:
 а – намотка витка плашмя; б – намотка витка проводом на ребро;
 в – намотка витка плашмя с параллельными сечениями в два ряда

В том случае, если указанное выше выполнить нельзя или сечение обмоточного провода $F_{\text{НН}}$ слишком большое (будет трудно гнуть при намотке), целесообразно поделить его на параллельные сечения $a'_{\text{НН}}$. Например, сечение равно 20 мм^2 (большое), тогда вместо одного провода берут обмоточные провода от двух или даже четырех катушек соответственно диаметрами 10 или 5 мм² и проводят ими намотку как одним проводом, тогда суммарное сечение в любом случае равно 20 мм^2 . Вместе с тем, следует строго соблюдать следующие правила:

- число параллельных проводов (сечений – $a'_{\text{НН}}$) при намотке на ребро (см. рис. 9.2, б) не должно быть более 6, в самом крайнем случае 8. При намотке плашмя – не более четырех, в крайнем случае 6 (см. рис. 9.2 а, в);

- все провода должны иметь одинаковое сечение $F_{\text{НН(ГОСТ)}}$, в противном случае провода с меньшим сечением будут иметь повышенную плотность тока, а следовательно, будут перегреваться (закон Джоуля–Ленца);

- когда положить витки обмотки плашмя не удастся, при намотке на ребро отношение размеров радиального a к осевому b для трансформаторов до 630 кВ·А включительно должно быть не более двух.

Для удобства на производстве в документах выбранный обмоточный провод записывается по следующей форме:

$$\text{Марка, сечение } F_{\text{НН(ГОСТ)}} \times \text{число } a'_{\text{НН}} \times \frac{a \times b (\text{размеры без изол.})}{a'' \times b'' (\text{размеры с изол.})}.$$

Пример:

$$\text{АПББО } 55 \times 4 \times \frac{5,0 \times 11,0}{5,5 \times 11,5}.$$

Расчет высоты цилиндра (осевого размера) обмотки НН, мм:

$$l_{\text{НН}} = h_{\text{В}} (W_{\text{1С(НН)}} + 1) K_{\text{Н}}, \quad (9.9)$$

где $h_{\text{В}}$ – фактический осевой размер витка, мм. Находится по эскизу рис. 9.2.

Проверка размещимости обмотки НН по оси стержня (в окне магнитопровода), мм:

$$l_{\text{НН}} \leq l_{\text{C}} + 2l_{01}, \quad (9.10)$$

то есть если полученная высота цилиндра обмотки $l_{\text{НН}}$ меньше высоты стержня l_{C} с вычетом изоляционных расстояний l_{01} от ярм с двух сторон, обмотка низшего напряжения размещается на стержне.

Расчет радиального размера обмотки НН. При $n_{\text{НН}} > 1$ он начинается с расчета толщины изоляции между слоями $\delta_{\text{из(НН)}}$. Для ее изготовления обычно используется электрокартон марки Г толщиной 0,5 мм в два слоя (если, конечно, $U_{\text{Н}} = 0,4$ кВ). Нередко изоляция между слоями обмотки НН выполняется в виде масляного канала, но целесообразность последнего должна быть обоснована и в заключение подтверждена расчетом удельной теплоотдачи поверхности обмотки. При $n_{\text{НН}} > 2$ нередко межслойная изоляция выполняется и электрокартоном между первым и вторым слоем, и в виде масляного канала между вторым и третьим слоем.

Толщина межслойной изоляции из электрокартона (при указанной конструкции), мм:

$$\delta_{\text{из(НН)}} = 2\delta_{\text{Г-0,5}}. \quad (9.11)$$

Радиальный размер (толщина) обмотки НН, мм:

$$a_1 = a_{\text{В}} \cdot n_{\text{НН}} + \delta_{\text{из(НН)}} (n_{\text{НН}} - 1) + a_{\text{К}} \cdot n'_{\text{К(НН)}}, \quad (9.12)$$

где $a_{\text{В}} \cdot n_{\text{НН}}$ – фактический радиальный размер витка, мм. Находится по эскизу рис. 9.2;

$a_{\text{К}} \cdot n'_{\text{К(НН)}}$ – произведение радиального размера масляного канала охлаждения ($\approx 4-5$ мм) и их количества.

Масляные каналы выполняются с помощью реек нужной толщины (например, 4–5 мм), которые раскладываются по окружности обмотки как НН так и ВН. Для трансформаторов до 630–1000 кВ·А число их выбирают исходя их удобства выполнения намотки (при указанных мощностях число реек рекомендуется брать около 6–8).

Внутренний диаметр цилиндра обмотки НН, мм:

$$D'_{\text{НН}} = D + 2a_{01}, \quad (9.13)$$

где a_{01} – главная изоляция от стержня (см. рис. 9.1, табл. 9.1).

Наружный диаметр цилиндра обмотки НН, мм:

$$D''_{\text{НН}} = D'_{\text{НН}} + 2a_{01}. \quad (9.14)$$

Конструирование обмотки высшего напряжения. При большем напряжении величина тока будет меньшей, это следует из формулы: $S = U \uparrow I \downarrow = \text{const}$. А поскольку ток мал, сечение провода тоже будет малым, поэтому оно, как правило, берется круглым. Тип обмотки ВН для трансформаторов типа ТМ и ТМГ при мощности до 630 кВ·А и напряжении до 35 кВ берется цилиндрической, с размещением поверх обмотки НН.

Определение размеров обмотки (высоты, диаметров и пр.) начинается с выбора изоляционного цилиндра толщиной δ_{12} (см. рис. 9.1), на который наматываются витки обмотки ВН. Иногда изоляционный цилиндр размещается между наружным диаметром обмотки НН и внутренним диаметром обмотки ВН.

В ремонтной практике этот изоляционный цилиндр, так же как и для обмотки НН, чаще всего делается мягким, то есть составленным из листов электроизоляционного картона для аппаратов с масляным заполнением, толщиной 0,5 мм. Количество слоев берется по расчету исходя из требуемой толщины цилиндра δ_{12} (см. табл. 9.2).

Выбор марки и стандартного сечения обмоточного провода

Выбор марки провода производится так же, как и при конструировании обмоток НН, по электрической прочности изоляции (то есть классу номинального напряжения обмотки ВН $U_{\text{Н}}$), форме его сечения, экономическим соображениям.

Для обмоток масляных трансформаторов напряжением $U_{\text{Н}} = 10$ и 35 кВ, мощностью от 25 до 1000 кВ·А для сельских электрических сетей рекомендуется круглая форма сечения провода марок ПБ и АПБ.

Расчет ориентировочного сечения провода обмотки ВН, мм²:

$$F_{\text{ВН}}^* = \frac{I_{\text{Н(ВН)}}}{j_{\text{ВН}}^*}, \quad (9.15)$$

где $j_{\text{ВН}}^*$ – ориентировочная плотность тока обмоток ВН, А/мм², определяется из выражения:

$$j_{\text{ВН}}^* = 2j_{\text{С}}^* - j_{\text{НН}},$$

где $j_{\text{С}}^*$ – ориентировочная средняя плотность тока обмоток ВН и НН, А/мм². Рассчитывается (см. выше), но может быть выбрана по табл. 9.4;

$j_{\text{НН}}$ – фактическая плотность тока обмотки НН, А/мм²:

$$j_{\text{НН}} = \frac{I_{\text{Н(НН)}}}{F_{\text{НН(ГОСТ)}} a'_{\text{НН}}}. \quad (9.16)$$

Стандартное сечение $F_{\text{НН(ГОСТ)}}$ берется по справочникам (или по табл. 9.7, 9.8) ближайшее к $F_{\text{ВН}}^*$. Допустимо в случае необходимости сечение провода $F_{\text{ВН}}$ делить на параллельные сечения $a'_{\text{НН}}$.

Таблица 9.3

Рекомендуемые средние плотности тока $j_{\text{С}}^*$ в обмотках НН и ВН трансформаторов с потерями КЗ по ГОСТ, А/мм²

Мощность трансформатора $S_{\text{Н}}$, кВ·А	25–40	63–630	до 1000	Примечания
Медь	1,8–2,2	2,2–3,5	2,2–3,5	Плотность тока в обмотках из алюминиевой ленты берется как для провода
Алюминий	1,1–1,8	1,2–2,5	1,5–2,6	

Выбранный обмоточный провод записывается по форме:

$$\text{Марка, сечение } F_{\text{ВН(ГОСТ)}} \times \text{число } a'_{\text{ВН}} \times \frac{d_{\text{ВН}} - \text{диаметр без изол.}}{d''_{\text{ВН}} - \text{диаметр с изол.}}$$

Пример:

$$\text{АПБ } 4,91 \times 1 \times \frac{2,5}{2,8}.$$

Фактическая плотность тока в обмотке ВН, А/мм²:

$$j_{\text{ВН}} = \frac{I_{\text{H(ВН)}}}{F_{\text{ВН(ГОСТ)}} a'_{\text{ВН}}}. \quad (9.17)$$

Определение ориентировочного числа витков в одном слое обмотки, шт.:

$$W_{1\text{C(ВН)}}^* = \frac{l_{\text{C}} - 2l_{02}}{d'_{\text{ВН}} K_{\text{H}}}. \quad (9.18)$$

Таким образом по $W_{1\text{C(ВН)}}^*$ после округления находится $W_{1\text{C(ВН)}}^*$.

Расчет числа слоев в обмотке ВН, шт.:

$$n_{\text{ВН}} = \frac{W_{\text{ВН}} + 2W_{\text{P}}}{W_{1\text{C(ВН)}}}, \quad (9.19)$$

где $n_{\text{ВН}}$ тоже округляется до большего целого значения. Обычно это делается в том случае, если число витков в одном слое занимает более половины высоты обмотки ($l_{\text{C}} - 2l_{02}$).

Фактическое число витков в одном слое обмотки ВН (округляется до целого значения), шт.:

$$W_{1\text{C(ВН)}} = \frac{W_{\text{ВН}} + 2W_{\text{P}}}{n_{\text{(ВН)}}}. \quad (9.20)$$

Расчет высоты (осевого размера) обмотки ВН, мм:

$$l_{\text{ВН}} = d'_{\text{ВН}} a'_{\text{ВН}} \cdot (W_{1\text{C(ВН)}} + 1) K_{\text{H}}. \quad (9.21)$$

Проверка размещимости обмотки ВН по оси (в окне магнитопровода), мм:

$$l_{\text{ВН}} \leq l_{\text{C}} + 2l_{02}, \quad (9.22)$$

то есть если полученная высота цилиндра обмотки $l_{\text{ВН}}$ меньше высоты стержня $l_{\text{С}}$ с вычетом изоляционных расстояний l_{02} от ярм с двух сторон, то обмотка низшего напряжения размещается на стержне.

Расчет радиального размера обмотки ВН

Начинается с выбора и расчета толщины продольной изоляции $\delta_{\text{из(ВН)}}$ между слоями. Как правило, при круглом проводе, из которого делается обмотка ВН, она выполняется кабельной бумагой марки К-120 (толщиной $\delta_{\text{К-120}} = 0,12$ мм). Число слоев изоляции, а следовательно, и толщина изоляции между слоями $\delta_{\text{из(ВН)}}$ определяется по максимальному (суммарному) рабочему напряжению (U_m) между витками в двух соседних слоях, которые берутся в табл. 9.4. Максимальное напряжение, В, рассчитывается по формуле

$$U_m = E_{1В} \cdot 2W_{1С(ВН)}, \quad (9.23)$$

где $E_{1В}$ – ЭДС одного витка.

Таблица 9.4

Межслойная изоляция в многослойных цилиндрических обмотках

U_m в двух слоях, В	До 1000	1001–2000	2001–3000	3001–4000	4001–5000
Число слоев К-120, шт.	2×0,12	3×0,12	4×0,12	5(6)×0,12	7(8)×0,12

В дальнейшем, если при расчете удельной теплоотдачи обмоток ВН она окажется завышенной, для улучшения охлаждения в обмотке ВН делаются масляные каналы, число которых определяют по допустимой удельной теплоотдаче.

Радиальный размер обмотки ВН, мм:

$$a_2 = d'_{\text{ВН}} \cdot n_{\text{ВН}} + \delta_{\text{из(ВН)}} (n_{\text{ВН}} - 1 - n'_{\text{К(ВН)}}) + a_{\text{К}} \cdot n'_{\text{К(ВН)}}, \quad (9.24)$$

где $d'_{\text{ВН}}$ – диаметр провода, из которого выполняется обмотка ВН, с изоляцией, мм;

$a_k \cdot n'_{k(\text{ВН})}$ – произведение радиального размера масляного канала охлаждения и их количества.

Внутренний диаметр цилиндра обмотки ВН, мм:

$$D'_{\text{ВН}} = D''_{\text{ВН}} + 2a_{12},$$

где a_{12} – главная изоляция между обмотками НН и ВН (см. рис. 9.1, табл. 9.2).

Наружный диаметр цилиндра обмотки ВН, мм:

$$D''_{\text{ВН}} = D'_{\text{ВН}} + 2a_{12}. \quad (9.26)$$

Проверка размещимости обмоток в окне магнитопровода трансформатора:

$$D''_{\text{ВН}} \leq C - a_{22}, \quad (9.27)$$

где a_{22} – главная изоляция между обмотками ВН двух соседних фаз.

Если условие не выполняется, проводят арифметическую проверку расчета, устанавливается возможность увеличения высоты обмоток, замены алюминиевого обмоточного провода на медный, проверяется возможность увеличения магнитной индукции в стержнях и ярмах по потерям $P_{\text{ХХ}}$ и току $I_{\text{ХХ}}$ холостого хода. Если после всего указанного условие (9.27) не выполняется, следует снизить номинальную мощность трансформатора $S_{\text{Н}}$.

Задание для самостоятельного расчета

Задание. Рассчитать оптимальное число витков и определить размеры обмоток трехфазного трансформатора с естественным масляным охлаждением ТМ для магнитопровода с параметрами, указанными в табл. 8.10 (см. рис. 8.1, 8.2).

Рассмотрим пример расчета со следующими данными: $C = 250$ мм; $l_C = 360$ мм; $C_{\text{ОК}} = 155$ мм.

Как уже установлено, $\Pi_C = 0,0065 \text{ м}^2$; $\Pi_{\text{Я}} = 0,0071 \text{ м}^2$; $D_C = 0,1$ м; $B_C = 1,64$ Тл; $B_{\text{С}} = 1,5$ Тл; $S_C = 40$ кВ·А. Принят для расчета и изготовления трансформатор ТМ 40/10–0,4 со схемой соединения обмоток $Y/Y_{\text{Н}}$.

Решение. Определение числа витков в обмотках:

1. Определяем число витков в обмотке одной фазы НН, шт.:

$$W_{\Phi(\text{НН})} = \frac{U_{\Phi(\text{НН})}}{4,44 \cdot f \cdot B_C \cdot \Pi_C} = \frac{230}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,64 \cdot 0,0065} = 97,2.$$

После округления принимаем $W_{\Phi(\text{НН})} = 98$ витков.

2. Определяем число витков в обмотке одной фазы ВН, шт.:

$$W_{\Phi(\text{ВН})} = \frac{U_{\Phi(\text{ВН})}}{4,44 \cdot f \cdot B_C \cdot \Pi_C} = \frac{5780}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,64 \cdot 0,0065} = 2442,4.$$

После округления принимаем $W_{\Phi(\text{ВН})} = 2442$ витка.

В соответствии с принятой схемой соединения обмоток Y/Y_H , корректировки числа витков обмоток не требуется.

Проверка. Так как в обмотке ВН было проведено округление числа витков, проверим принятое $W_{\text{ВН}}$ по допустимым потерям и току холостого хода. Для этого находим магнитную нагрузку в стержнях:

$$B_C = \frac{U_{\Phi(\text{НН})}}{4,44 \cdot f \cdot \Pi_C \cdot W_{\Phi(\text{ВН})}} = \frac{5780}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,0065 \cdot 2442} = 1,64 \text{ Тл.}$$

Как следует из расчета, округление числа витков в обмотке ВН на магнитную индукцию не повлияло, значит, потери и ток холостого хода останутся неизменными (см. табл. 8.3, 8.4).

3. Найдем регулировочное число витков. При 2,5 % от $W_{\text{ВН}}$.

$$W_p = 0,025 \cdot W_{\text{ВН}} = 0,025 \cdot 2442 = 61 \text{ виток.}$$

4. Рассчитаем число витков, приходящихся на каждый из выводов обмотки ВН фазы А, шт. (рис. 9.3). Данные расчетов сведем в табл. 9.5.

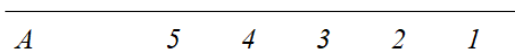


Рис. 9.3. Выводы обмотки высшего напряжения фазы А

Число витков между выводами обмотки ВН

$A-1 = W_{\text{ВН}} + 2W_{\text{Р}}$	$A-2 = W_{\text{ВН}} + W_{\text{Р}}$	$A-3 = W_{\text{ВН}}$	$A-4 = W_{\text{ВН}} - W_{\text{Р}}$	$A-5 = W_{\text{ВН}} - 2W_{\text{Р}}$
$2442 + 2 \cdot 61 = 2564$	$2442 + 61 = 2503$	2442	$2442 - 61 = 2381$	$2442 - 2 \cdot 61 = 2320$

5. Проверим правильность расчетов соотношения числа витков в обмотках ВН и НН, которое не должно превышать, согласно ГОСТ 11920–85, $\pm 0,5\%$:

1) ошибка для первой ступени, %:

– коэффициенты трансформации по напряжению и числу витков

$$K_{U1} = \frac{U_{(\text{ВН})1}}{U_{(\text{НН})}} = \frac{1,05 \cdot 5780}{230} = 26,38, \quad K_{W1} = \frac{W_{(\text{ВН})1}}{W_{(\text{НН})}} = \frac{2564}{98} = 26,16.$$

– несоответствие

$$\delta_1 = \frac{K_{U1} - K_{W1}}{K_{U1}} 100 = \frac{26,38 - 26,16}{26,38} 100 = 0,83\%.$$

Следовательно, соотношение витков обмоток НН и ВН выходит за пределы допустимого ($\pm 0,5\%$). Проводим по коэффициенту трансформации K_{U1} коррекцию числа витков обмотки ВН одной стороны:

$$W_{(\text{ВН})1} = x = K_{U1} W_{(\text{НН})1} = 26,38 \cdot 98 = 2585 \text{ шт.},$$

с другой стороны $W_{\text{ВН}} = 1,05 \cdot W_{\text{ВН}}$, тогда

$$W_{(\text{ВН})} = \frac{W_{(\text{ВН})1}}{1,05} = \frac{2585}{1,05} = 2461,9 \text{ витка.}$$

Число витков регулировочных

$$W_{\text{Р}} = 0,025 \cdot W_{\text{ВН}} = 0,025 \cdot 2462 = 61,55 \text{ шт.}$$

принимаем $W_{\text{Р}} = 62$ витка. Число витков на других ступенях обмотки ВН – см. табл. 9.6;

Число витков между выводами обмотки ВН (после коррекции)

A-1 = = $W_{ВН} + 2W_P$	A-2 = = $W_{ВН} + W_P$	A-3 = = $W_{ВН}$	A-4 = = $W_{ВН} - W_P$	A-5 = = $W_{ВН} - 2W_P$
2462 + 2 · 62 = = 2586	2462 + 62 = = 2524	2462	2462 - 62 = = 2400	2462 - 2 · 62 = = 2338

– коэффициенты трансформации по напряжению и числу витков

$$K_{U1} = \frac{U_{(ВН)1}}{U_{(НН)}} = \frac{1,05 \cdot 5780}{230} = 26,38, \quad K_{W1} = \frac{W_{(ВН)1}}{W_{(НН)}} = \frac{2586}{98} = 26,388.$$

– несоответствие

$$\delta_1 = \frac{K_{U1} - K_{W1}}{K_{U1}} 100 = \frac{26,38 - 26,388}{26,38} \cdot 100 = -0,03\%.$$

Соотношение витков обмоток НН и ВН не выходит за пределы допустимого ($\pm 0,5\%$). Проводим проверку по другим ступеням:

2) ошибка для второй ступени, %:

– коэффициенты трансформации по напряжению и числу витков

$$K_{U1} = \frac{U_{(ВН)2}}{U_{(НН)}} = \frac{1,025 \cdot 5780}{230} = 25,76, \quad K_{W1} = \frac{W_{(ВН)2}}{W_{(НН)}} = \frac{2524}{98} = 25,76,$$

– несоответствие

$$\delta_1 = \frac{K_{U1} - K_{W1}}{K_{U1}} 100 = \frac{25,76 - 25,76}{25,76} \cdot 100 = 0\%,$$

3) ошибка для третьей ступени, %:

– коэффициенты трансформации по напряжению и числу витков

$$K_{U1} = \frac{U_{(ВН)3}}{U_{(НН)}} = \frac{5780}{230} = 25,13; \quad K_{W1} = \frac{W_{(ВН)3}}{W_{(НН)}} = \frac{2462}{98} = 25,12;$$

– несоответствие

$$\delta_1 = \frac{K_{U1} - K_{W1}}{K_{U1}} 100 = \frac{25,13 - 25,12}{25,13} \cdot 100 = 0,04\%,$$

4) ошибка для четвертой ступени, %:

– коэффициенты трансформации по напряжению и числу витков

$$K_{U1} = \frac{U_{(ВН)4}}{U_{(НН)}} = \frac{0,975 \cdot 5780}{230} = 24,5; \quad K_{W1} = \frac{W_{(ВН)4}}{W_{(НН)}} = \frac{2400}{98} = 24,49;$$

– несоответствие

$$\delta_1 = \frac{K_{U1} - K_{W1}}{K_{U1}} 100 = \frac{24,5 - 24,49}{24,5} \cdot 100 = 0,04 \%;$$

5) ошибка для пятой ступени, %:

– коэффициенты трансформации по напряжению и числу витков

$$K_{U1} = \frac{U_{(ВН)5}}{U_{(НН)}} = \frac{0,95 \cdot 5780}{230} = 23,87; \quad K_{W1} = \frac{W_{(ВН)5}}{W_{(НН)}} = \frac{2338}{98} = 23,86;$$

– несоответствие

$$\delta_1 = \frac{K_{U1} - K_{W1}}{K_{U1}} 100 = \frac{23,87 - 23,86}{23,87} \cdot 100 = 0,04 \%.$$

Соотношение витков обмоток НН и ВН по всем проверенным ступеням – от 2-го до 5-го не выходит за пределы допустимого ($\pm 0,5 \%$).

6. Так как в обмотке ВН была проведена коррекция числа витков, проверим принятое $W_{ВН}$ по допустимым потерям и току холостого хода. Для этого находим магнитную нагрузку в стержнях

$$B_c = \frac{U_{\Phi(НН)}}{4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot W_{\Phi(ВН)}} = \frac{5780}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,0065 \cdot 2462} = 1,63 \text{ Тл.}$$

Как следует из расчета, коррекция числа витков в обмотке ВН повлияла на магнитную индукцию настолько незначительно, что потери и ток холостого хода не выйдут за пределы допустимого (см. табл. 8.3, 8.4). Исходя из изложенного, можно приступить к определению конструктивных размеров обмоток НН и ВН трансформатора.

7. Проведем выбор главной изоляции трансформатора.

Выбираем изоляционные расстояния обмотки НН для трансформатора ТМ–40/10 при напряжении низшей стороны 0,4 кВ по табл. 9.1. Значения сводим в табл. 9.7.

Выбор главной изоляции трансформатора

Мощность трансформатора S_H , кВ·А	Напряжение обмотки U_H , кВ	Изоляционные расстояния, мм			
		от ярм l_{01}	от стержня		
			δ_{01}	a_{01}	$l_{ц}$
40	0,4	15	Эл. картон 2·0,5	4	–

8. Выберем тип конструкции обмоток трансформатора.

Исходя из практических рекомендаций, для трансформатора с естественным масляным охлаждением (тип ТМ) мощностью 40 кВ·А, напряжением высшей стороны 10 кВ, напряжением низшей стороны 0,4 кВ при токе на один стержень для НН – 57,8 А и для ВН – 2,3 А, при материале жилы обмоточного провода алюминии принимаем цилиндрические типы обмоток:

- для НН – двухслойную из прямоугольного провода;
- для ВН – многослойную из круглого провода.

Достоинства обмоток: простая технология изготовления, хорошее охлаждение и высокая экономичность (дешевы).

Недостатки обмоток: малая механическая прочность, уменьшение охлаждающей поверхности по сравнению с обмотками, имеющими радиальные каналы охлаждения.

9. Конструирование обмотки низшего напряжения (НН):

1) для изоляции обмотки НН от стержня принимаем мягкий цилиндр из электроизоляционного картона для работы в масле, марки Г, толщиной $\delta = 0,5$ мм, в соответствии с табл. 8.1, в два слоя (n_{01}), тогда

$$\delta_{01} = \delta \cdot n_{01} = 0,5 \cdot 2 = 1,0 \text{ мм};$$

2) определим номинальный ток обмотки НН трансформатора:

$$I_{H(НН)} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{H(НН)}} = \frac{40}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 57,8 \text{ А};$$

3) найдем ориентировочное сечение провода:

$$F_{\text{HH}}^* = \frac{I_{\text{H(HH)}}}{j_{\text{C}}^*} = \frac{57,8}{1,3} = 44,46 \text{ мм}^2;$$

где j_{C}^* – ориентировочная средняя плотность тока обмотки НН и ВН, А/мм², определяется из выражения:

$$j_{\text{C}}^* = K_{\text{M}} K_{\text{S}} \frac{P_{\text{КЗ}} \cdot E_{1\text{В}}}{1,33 \cdot S_{\text{H}} \cdot D} = 0,463 \cdot 0,95 \cdot \frac{680 \cdot 230 / 98}{135 \cdot 40 \cdot 0,1} = 1,3,$$

где K_{M} – коэффициент материала обмоточного провода, для алюминия $K_{\text{M}} = 0,463$;

K_{S} – коэффициент, учитывающий мощность трансформатора, для $S_{\text{H}} = 40 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $K_{\text{S}} = 0,95$;

$P_{\text{КЗ}}$ – потери короткого замыкания, $P_{\text{КЗ}} = 680 \text{ Вт}$ (см. табл. 8.3.);

$E_{1\text{В}}$ – ЭДС одного витка, при 0,4 кВ фазная величина 230/98 В;

S_{H} – номинальная мощность трансформатора, 40 кВ·А;

D – диаметр окружности, описанной вокруг стержня, $D = 0,1 \text{ м}$.

4) рассчитаем число витков в одном слое обмотки:

$$W_{1\text{C(HH)}} = \frac{W_{\text{HH}}}{n_{\text{HH}}} = \frac{98}{2} = 46 \text{ шт.};$$

5) найдем ориентировочный осевой размер витка обмоточного провода:

$$h_{\text{В}}^* = \frac{l_{\text{C}} - 2l_{01}}{(W_{1\text{C(HH)}} + 1) \cdot K_{\text{H}}} = \frac{360 - 2 \cdot 15}{(49 + 1) \cdot 1,03} = 6,6 \text{ мм}^2;$$

6) выберем стандартный обмоточный провод и его марку. Устанавливаем по таблице ГОСТ, что при $h_{\text{В}}^* = 6,6 \text{ мм}$ нужного сечения обмоточного провода ($F_{\text{HH}}^* = 44,46 \text{ мм}^2$) нет. Поэтому принимаем два параллельных сечения ($a' = 2$) с сечением одного провода $F_1^* = 44,46 / 2 = 22,23 \text{ мм}^2$. Тогда по таблице ГОСТ на обмоточные провода прямоугольного сечения берем стандартное сечение провода

$F_{1(\text{ГОСТ})}^* = 23,1 \text{ мм}^2$ с осевым размером $b = 6,0 \text{ мм}$ и радиальным размером $a = 4,0 \text{ мм}$ и двумя такими проводами $a' = 2$ наматываем обмотку НН, как одним проводом (см. рис. 9.4).

Следовательно, стандартное сечение витка $F_{\text{НН}(\text{ГОСТ})} = F_{1(\text{ГОСТ})} a' = 23,1 \cdot 2 = 46,2 \text{ мм}^2$ будет иметь осевой размер витка (без изоляции) $h_{\text{в}} = b = 6,0 \text{ мм}$ и радиальный (без изоляции) $a_{\text{в}} = a \cdot a' = 4,0 \cdot 2 = 8,0 \text{ мм}$.

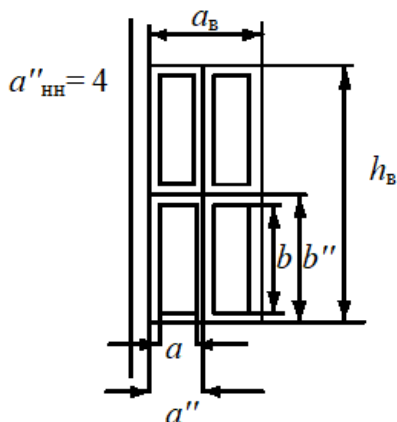


Рис. 9.4. Эскиз размещения обмоточных проводов при двух параллельных сечениях ($a' = 2$) в радиальном направлении

Выбор марки обмоточного провода выполняем по рекомендациям проектирования и производства трансформаторов. Для номинального напряжения $U_{\text{Н}} = 0,4 \text{ кВ}$, прямоугольного сечения наиболее рационален дешевый алюминиевый обмоточный провод марки АПББО (провод с алюминиевой жилой, бумажной изоляцией и хлопчатобумажной нитью, уложенной сверху по винту).

По справочнику находим, что толщина изоляции на две стороны марки провода АПББО при сечении $23,1 \text{ мм}^2$ равна $0,5 \text{ мм}$.

Запись выбранного обмоточного провода выполним по форме

$$\text{АПББО } 23,1 \times 2 \times \frac{4,0 \times 6,0}{4,5 \times 6,5};$$

7) расчет высоты (осевого размера) обмотки НН:

$$l_{\text{НН}} = h_{\text{В}} \cdot (W_{\text{IC(НН)}} + 1) \cdot K_{\text{Н}} = 6,5 \cdot (49 + 1) \cdot 1,015 = 329,8 \text{ мм};$$

8) проверка размещимости обмотки НН по оси стержня (в окне магнитопровода):

$$l_{\text{НН}} \leq l_{\text{С}} - 2l_{01} = 360 - 2 \cdot 15 = 330 \text{ мм.}$$

Так как $329,8 \text{ мм} < 330 \text{ мм}$, то по высоте стержня обмотка в окне магнитопровода размещима;

9) рассчитаем радиальный размер обмотки НН. Каждый слой обмотки НН выполняется (пункт 9.6) из двух проводов марки АПББО, которые укладываются друг на друга и плашмя на изоляционный цилиндр (следовательно, толщина одного слоя, или, иначе, радиальный размер одного витка $a_{\text{В}} = 2 \cdot 4,5 = 9 \text{ мм}$ (рис. 9.4.)). Количество слоев (пункт 8) принято равным 2.

Для обеспечения изоляции и достаточного охлаждения (учитываем, что каждый слой состоит из двух проводов, между слоями делаем масляный канал). Его выполним с помощью 6 реек длиной 360,0 мм и толщиной 4,0 мм, которые разложим по окружности первого слоя обмотки НН и закрепим хлопчатобумажной лентой, уложенной по спирали.

Найдем радиальный размер (толщину) обмотки НН:

$$a_1 = a_{\text{В}} \cdot n_{\text{НН}} + \delta_{\text{из(НН)}} \cdot (n_{\text{НН}} - 1) + a_{\text{К}} \cdot n'_{\text{К(НН)}} = 9 \cdot 2 + 4 \cdot 1 = 22 \text{ мм};$$

10) внутренний диаметр цилиндра обмотки НН:

$$D'_{\text{НН}} = D + 2a_{01} = 100 + 2 \cdot 4 = 108 \text{ мм},$$

где a_{01} – главная изоляция от стержня (рис. 9.1, табл. 9.1);

11) наружный диаметр цилиндра обмотки НН:

$$D''_{\text{НН}} = D'_{\text{НН}} + 2a_{01} = 108 + 2 \cdot 22 = 152 \text{ мм.}$$

10. Конструирование цилиндрической многослойной обмотки высшего напряжения (тип выбран согласно пункту 8):

1) для твердой изоляции обмотки НН от обмотки ВН принимаем мягкий цилиндр из электроизоляционного картона для работы

в масле, марки Г, толщиной $\delta = 0,5$ мм. В соответствии с табл. 9.2, толщина цилиндра δ_{12} должна быть равна 2,5 мм;

2) найдем число слоев n_{12} электрокартона для цилиндра:

$$n_{12} = \frac{\delta_{12}}{\delta} = \frac{2,5}{0,5} = 5 \text{ шт.};$$

3) определим номинальный ток обмотки ВН трансформатора:

$$I_{\text{H(ВН)}} = \frac{S_{\text{H}}}{\sqrt{3}U_{\text{H(ВН)}}} = \frac{40}{\sqrt{3} \cdot 10} = 2,3 \text{ А};$$

4) выбираем марку и стандартное сечение обмоточного провода.

Номинальное напряжение обмотки ВН – 10 кВ, номинальный ток – 2,3 А, трансформатор с естественным масляным охлаждением, мощность – 40 кВ·А, предназначен для сельских электрических сетей. Исходя из изложенного, воспользуемся рекомендациями производства и выберем марку алюминиевого обмоточного провода АПБ с круглым сечением жилы;

5) найдем ориентировочное сечение провода обмотки ВН:

$$F_{\text{ВН}}^* = \frac{I_{\text{H(ВН)}}}{j_{\text{ВН}}^*} = \frac{2,3}{1,35} = 1,70 \text{ мм}^2,$$

где $j_{\text{ВН}}^*$ – ориентировочная плотность тока обмоток ВН, определяется из выражения:

$$j_{\text{ВН}}^* = 2j_{\text{С}}^* - j_{\text{НН}} = 2 \cdot 1,3 - 1,25 = 1,35 \text{ А/мм}^2,$$

где $j_{\text{С}}^*$ – ориентировочная средняя плотность тока обмоток ВН и НН, А/мм², рассчитана в пункте 9: 3 и равна 1,3 А/мм²;

$j_{\text{НН}}$ – фактическая плотность тока обмотки НН:

$$j_{\text{НН}} = \frac{I_{\text{H(НН)}}}{F_{\text{НН(ГОСТ)}} \cdot a'_{\text{НН}}} = \frac{57,8}{23,1 \cdot 2} = 1,25 \text{ А/мм}^2.$$

По значению $F_{\text{ВН}}^* = 1,70 \text{ мм}^2$ в таблицах ГОСТ берем ближайшее стандартное сечение обмоточного провода (см. справочную литературу).

$F_{\text{ВН(ГОСТ)}}^* = 1,77 \text{ мм}^2$ с диаметром голого провода $d_{\text{АПБ(ГОСТ)}} = 1,5 \text{ мм}$. Для марки провода АПБ с толщиной изоляции на две стороны $2\delta_{\text{АПБ}} = 0,4 \text{ мм}$, то есть диаметр этого провода с изоляцией $d'_{\text{АПБ(ГОСТ)}} = 1,9 \text{ мм}$.

Выбранный обмоточный провод записываем по форме:

$$\text{АПБ } 1,77 \times 1 \times \frac{1,5}{1,9};$$

б) определим фактическую плотность тока в обмотке ВН:

$$j_{\text{ВН}} = \frac{I_{\text{Н(ВН)}}}{F_{\text{ВН(ГОСТ)}} \cdot a'_{\text{ВН}}} = \frac{2,3}{1,77 \cdot 1} = 1,3 \text{ А/мм}^2;$$

7) рассчитаем ориентировочное число витков в одном слое обмотки:

$$W_{\text{1С(ВН)}}^* = \frac{l_{\text{С}} - 2l_{02}}{d'_{\text{ВН}} \cdot K_{\text{Н}}} = \frac{360 - 2 \cdot 20}{1,9 \cdot 1,03} = 163,5 \text{ витка.}$$

После округления принимаем $W_{\text{1С(ВН)}} - 162$ витка;

8) найдем число слоев в обмотке ВН:

$$n_{\text{ВН}} = \frac{W_{\text{ВН}} + 2W_{\text{Р}}}{W_{\text{1С(ВН)}}} = \frac{2564}{162} = 15,83 \text{ слоя.}$$

После округления до большего целого значения $n_{\text{ВН}} = 16$ слоям;

9) определим фактическое число витков в одном слое обмотки ВН:

$$W_{\text{1С(ВН)}} = \frac{W_{\text{ВН}} + 2W_{\text{Р}}}{n_{\text{ВН}}} = \frac{2564}{16} = 160,25 \text{ витка.}$$

Принимаем при укладке витков по 160 в 12 слоях и 161 в четырех;

10) проведем расчет высоты (осевого размера) обмотки ВН:

$$l_{\text{ВН}} = d'_{\text{ВН}} a'_{\text{ВН}} \cdot (W_{\text{1С(ВН)}} + 1) K_{\text{Н}} = 1,9 \cdot 1 \cdot (161 + 1) \cdot 1,03 = 317 \text{ мм;}$$

11) проверим размещимость обмотки ВН по оси (в окне магнитопровода):

$$l_{\text{ВН}} \leq l_{\text{С}} - 2l_{02} = 360 - 2 \cdot 20 = 320 \text{ мм.}$$

Так как $317 \text{ мм} < 320 \text{ мм}$, по высоте стержня обмотка в окне магнитопровода разместима;

12) определим максимальное напряжение между витками в двух соседних слоях обмотки ВН:

$$\begin{aligned} U_m &= E_{\text{IV}} \cdot 2W_{\text{IC(ВН)}} = 4,44 \cdot f \cdot B_{\text{С}} \cdot \Pi_{\text{С}} \cdot 2W_{\text{IC(ВН)}} = \\ &= 4,44 \cdot 50 \cdot 1,63 \cdot 0,0065 \cdot 2 \cdot 161 = 757,4 \text{ В;} \end{aligned}$$

13) найдем число слоев кабельной бумаги К-120 для межслойной (продольной) изоляции обмотки ВН и ее толщину.

По табл. 8.5 при U_m до 1000 В число слоев n_{δ} кабельной бумаги К-120 (с толщиной каждого листа $\delta_{\text{К-120}} = 0,12 \text{ мм}$) должно быть два, отсюда толщина межслойной изоляции

$$\delta_{\text{ИЗ(ВН)}} = n_{\delta} \delta_{\text{К-120}} = 2 \cdot 0,12 = 0,24 \text{ мм};$$

14) определим радиальный размер обмотки ВН. Каждый слой обмотки ВН выполняем проводом марки АПБ диаметром $d'_{\text{ВН}} = 1,9 \text{ мм}$, витки которой укладываем по высоте рядом друг с другом. После намотки слоя в 160 (161) витков на него накладывается изоляция из двух листов кабельной бумаги. Так выполняем все 16 слоев, при этом, учитывая, что число слоев обмотки ВН большое (равно 16), для улучшения охлаждения предусмотрим дополнительный охлаждающий канал $n'_{\text{К(ВН)}} = 1$, толщиной $a_{\text{К}} = 4 \text{ мм}$. Его выполним с помощью 6 реек длиной 360,0 мм и толщиной 4,0 мм, которые разложим по окружности 6-го слоя обмотки ВН.

$$\begin{aligned} a_2 &= d'_{\text{ВН}} \cdot n_{\text{ВН}} + \delta_{\text{ИЗ(ВН)}} \cdot (n_{\text{ВН}} - 1 - n'_{\text{К(ВН)}}) + a_{\text{К}} \cdot n'_{\text{К(ВН)}} = \\ &= 1,8 \cdot 16 + 0,24 \cdot (16 - 1 - 1) + 4 \cdot 1 = 36,16 \text{ мм;} \end{aligned}$$

15) рассчитаем внутренний диаметр цилиндра обмотки ВН. По табл. 9.2 находится главное изоляционное расстояние между обмотками НН и ВН a_{12} . Для трансформатора ТМ 40/10–0,4 $a_{12} = 9 \text{ мм}$, тогда

$$D'_{\text{ВН}} = D''_{\text{НН}} + 2a_{12} = 152 + 2 \cdot 9 = 170 \text{ мм};$$

16) рассчитаем наружный диаметр цилиндра обмотки ВН:

$$D''_{\text{ВН}} = D'_{\text{ВН}} + 2a_2 = 170 + 2 \cdot 36,16 = 242,3 \text{ мм};$$

17) проверка размещимости обмоток в окне магнитопровода трансформатора. По табл. 9.2 изоляционное расстояние между обмотками ВН–ВН двух соседних фаз $a_{22} = 8$ мм. Тогда

$$D''_{\text{ВН}} \leq C - a_{22} = 250 - 8 = 242 \text{ мм}.$$

Так как 242,3 мм практически равны 242 мм, обмотки разместимы в окне магнитопровода трансформатора с достаточной электрической прочностью.

При необходимости, для повышения электрической прочности в ремонтной практике между обмотками ВН–ВН соседних фаз устанавливаются дополнительные экраны из материалов с повышенным пробивным напряжением.

Контрольные вопросы

1. Как определить число витков в обмотках трансформатора?
2. Как выбрать тип конструкции обмоток и изоляцию трансформатора?
3. Как выбрать марку и стандартное сечение обмоточного провода трансформатора?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селицкая, О. Ю. Ремонт электрооборудования. Курсовое проектирование : учебно-методическое пособие / О. Ю. Селицкая. – Минск : БГАТУ, 2018 – 148 с.

2. Сердешнов, А. П. Ремонт электрооборудования : учебное пособие : в 2 ч. / А. П. Сердешнов. – Минск : ИВЦ Минфина, 2006. – Ч. 1 : Ремонт электрических машин. – 296 с.

3. Павлович, С. Н. Ремонт и обслуживание электрооборудования : учебное пособие / С. Н. Павлович, Б. И. Фираго. – 4-е изд. – Минск : Вышэйшая школа, 2009. – 245 с.

4. Алиев, И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию / И. И. Алиев. – 5-е изд., испр. – Ростов н/Д: Феникс, 2004. – 480 с., ил. – (Справочники).

5. Кисаримов, Р. А. Справочник электрика / Р. А. Кисаримов. – 6-е изд., доп. – М. : РадиоСофт, 2015. – 512 с.

6. Акимова, Н. А. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования : учебник / Н. А. Акимова, Н. Ф. Котеленец, Н. И. Сентюрихин ; под общ. ред. Н. Ф. Котеленца. – 15 изд., испр. – М. : Академия, 2019. – 304 с.

7. Кисаримов, Р. А. Ремонт электрооборудования : справочник : в 3 т. / Р. А. Кисаримов. – М. : Радиософт, 2005. – Т. 1. – 540 с.

8. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов : учебное пособие. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Ленанд, 2014. – 528 с.

Технические нормативные правовые акты

9. ТКП 339–2011 (02230) «Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемосдаточных испытаний» – Введ. 01.12.2011 ; введен впервые. – Минск : Минскэнерго, 2011. – 594 с.

10. ТКП 181–2009 (02230) «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей». – Введ. 01.09.2009 ; введен впервые с отменой Правил технической эксплуатации электрообору

дования потребителей, утвержденных приказом Министерство энергетики СССР от 15 июня 1989 г. № 347. – Минск : Минэнерго, 2009. – 326 с.

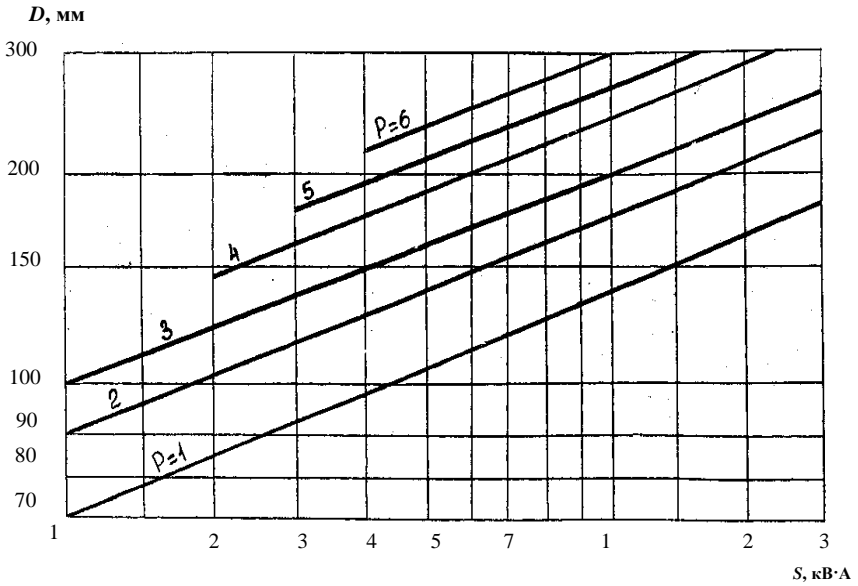
11. ГОСТ 11677–85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия : межгосударственный стандарт. – Введ. 07.01.1986. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 44 с.

12. ГОСТ 11920–85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения напряжением до 35 кВ включительно. Технические условия (с изменениями). – Введ. 24.09.1985 : Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1987. – 28 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Зависимость мощности асинхронного двигателя от внутреннего диаметра магнитопровода статора $S_{дв} = f(D)$ при различном числе пар полюсов P



ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Характеристики обмоточных проводов

Марка	Характеристика изоляции	Класс нагревостойкости	Диаметр, мм
ПЭЛ	Лак на масляной основе	<i>A</i>	0,02–2,50
ПЭВ – 1	Уменьшенная толщина, лак на поливинилацеталеновой основе	<i>A</i>	0,02–2,50
ПЭВ – 1	Номинальная толщина, лак на поливинилацеталеновой основе	<i>A</i>	0,05–2,50
ПЭМ – 1	Лак ВЛ-941	<i>A</i>	0,05–2,50
ПЭМ – 2	Повышенная толщина, лак ВЛ-941	<i>A</i>	0,05–2,50
ПЭТВ – 2	Эмаль на основе полиэфирных лаков	<i>B</i>	0,06–2,50
ПЭТ – 155	Теплостойкий лак на полиэфиримидной основе	<i>F</i>	0,06–2,50
ПЭШО	Лак и один слой шелковых нитей	<i>A</i>	0,05–1,56
ПЭЛО	Лак и один слой полиэфирных нитей	<i>A</i>	0,20–1,32
ПЭБО	Лак и один слой х/б пряжи	<i>A</i>	0,38–2,12
ПБД	Два слоя нитей из х/б пряжи	<i>A</i>	0,355–5,300
ПСД	Стекланые нити, наложенные двумя слоями с подклейкой и пропиткой нагревостойкими лаками	<i>F</i>	0,74–5,20
ПСД – Л	То же, но с поверхностным лаковым слоем	<i>F</i>	1,00–5,20
ПСД – Т	То же, но с уменьшенной толщиной	<i>F</i>	0,315–2,120
ПСДТ – Л	То же, но с поверхностным лаковым слоем	<i>F</i>	0,315–2,120

Марка	Характеристика изоляции	Класс нагре- во стой- кости	Диаметр, мм
ПСДК	Стеклянные нити, наложенные двумя слоями, с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком	<i>H</i>	0,74–5,20
ПСДК – Л	То же, но с поверхностным лаковым слоем	<i>H</i>	1,00–5,20
ПСДКТ	То же, но с уменьшенной толщиной	<i>H</i>	0,315– 2,120
ПСДКТ – Л	Бесщелочное стекловолокно, наложенное двумя слоями с подклейкой и пропиткой термореактивным лаком	<i>H</i>	0,315– 2,120

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Диаметр круглых медных проводов с эмалевой изоляцией

Обозначения: $d'_{\text{ГОСТ}}$ – диаметр проволоки без изоляции, мм;
 $d_{\text{ГОСТ}}$ – наружный диаметр провода с изоляцией, мм.

$d'_{\text{ГОСТ}}$	$d_{\text{ГОСТ}}$ – для марок				
	ПЭВ – 2	ПЭМ – 2	ПЭТ – 155	ПЭТВ – 2	ПЭТВМ
1	2	3	4	5	6
0,050	0,080	0,080	–	–	–
0,060	0,090	0,090*	0,090	0,084	–
0,063	0,090	0,093	0,090	0,084	–
0,070	–	0,100*	–	–	–
0,071	0,100	0,101	0,100	0,094	–
0,080	0,110	0,110	0,110	0,104	–
0,090	0,120	0,120	0,120	0,116	–
0,100	0,130	0,130	0,130	0,128	–
0,110	–	0,140*	0,140	–	–
0,112	0,140	0,142	–	0,140	–
0,120	0,150	0,150*	0,150	0,150	–
0,125	0,155	0,155	0,155	0,154	–
0,130	0,160	0,160*	0,160	0,160	–
0,140	0,170	0,170	0,170	0,170	–
0,150	0,190	0,190*	0,190	0,190	–
0,160	0,200	0,200	0,200	0,198	–
0,170	0,210	0,210	0,210	0,210	–
0,180	0,220	0,220	0,220	0,220	–
0,190	0,230	0,230*	0,230	0,230	–
0,200	0,240	0,240	0,240	0,240	–
0,210	0,250	0,260*	0,260	0,250	–
0,224	0,270	0,264	0,270	0,264	–
0,230	–	0,280*	–	–	–
0,236	0,285	–	0,285	0,286	–
0,250	0,300	0,300	0,300	0,300	0,310
0,265	0,315	–	0,315	0,314	0,325
0,270	–	0,320*	–	–	–

Продолжение приложения 3

1	2	3	4	5	6
0,280	0,330	0,330	0,330	0,330	0,340
0,290	–	0,340*	–	–	–
0,300	0,350	–	0,350	0,350	0,360
0,310	–	0,360*	–	–	–
0,315	0,365	0,365	0,365	0,364	0,375
0,330	–	0,380*	–	–	–
0,335	0,385	–	0,385	0,384	0,395
0,350	–	0,410*	–	–	–
0,355	0,415	0,415	0,405	0,414	0,425
0,380	0,440	0,440*	0,440	0,440	0,450
0,400	0,460	0,460	0,460	0,460	0,470
0,410	–	0,470*	–	–	–
0,425	0,485	–	0,490	0,484	0,495
0,440	–	0,500*	–	–	–
0,450	0,510	0,510	0,520	0,510	0,520
0,470	–	0,530*	–	–	–
0,475	0,545	–	0,545	0,534	0,545
0,490	–	0,550*	–	–	–
0,500	0,570	0,570	0,570	0,560	0,580
0,510	–	0,580*	–	–	–
0,530	0,600	0,600*	0,600	0,600	0,610
0,550	–	0,620*	–	–	–
0,560	0,630	0,630	0,630	0,630	0,640
0,570	–	0,640*	–	–	–
0,590	–	0,660*	–	–	–
0,600	0,670	–	0,670	0,670	0,680
0,620	–	0,690*	–	–	–
0,630	0,700	0,700	0,710	0,700	0,720
0,640	–	0,720*	–	–	–
0,670	0,750	0,750*	0,750	0,750	0,760
0,690	0,770*	0,770*	0,770	0,770*	0,780*
0,710	0,790	0,790	0,790*	0,790	0,800
0,720	–	0,800*	–	–	–
0,740	–	0,830*	–	–	–

1	2	3	4	5	6
0,750	0,840	0,840	0,830	0,830	0,840
0,770	0,860*	0,860*	0,850*	0,850*	0,860*
0,800	0,890	0,890	0,890	0,880	0,890
0,830	0,920*	0,920*	0,920*	0,910*	0,920*
0,850	0,940	0,940	0,940	0,930	0,940
0,860	–	0,950*	–	–	–
0,900	0,990	0,990	0,990	0,990	0,990
0,930	1,020	1,020*	1,020*	1,020*	1,020*
0,950	1,040*	1,040*	1,040	–	1,040
0,960	–	1,050*	–	1,040	–
1,000	1,100	1,110	1,090	1,090	1,110
1,040	–	1,150*	–	–	–
1,060	1,160	1,170	1,160	1,150	1,170
1,080	1,180*	1,190*	1,180*	1,170*	1,190*
1,120	1,220	1,230	1,220	1,210	1,230
1,160	–	1,270*	–	–	–
1,180	1,280	1,290	1,280	1,270	1,290
1,200	–	1,310*	–	–	–
1,25	1,35	1,36	1,35	1,35	1,36
1,30	–	1,41*	–	–	–
1,32	1,42	1,43	1,42	1,42	1,43
1,35	–	1,46	–	–	–
1,40	1,51	1,51	1,51	1,50	–
1,45	1,56*	1,56*	1,56*	1,55*	–
1,50	1,61	1,61	1,61	1,60	–
1,56	1,67*	1,67*	1,67*	1,67*	–
1,60	1,71	1,71	1,71	1,71	–
1,62	–	1,73*	–	–	–
1,68	–	1,79*	–	–	–
1,70	1,81	1,81	1,81	1,81	–
1,74	–	1,85*	–	–	–
1,80	1,92	1,92	1,92	1,91	–
1,81	–	1,93*	–	–	–
1,88	–	2,00*	–	–	–

Окончание приложения 3

1	2	3	4	5	6
1,90	2,02	2,02	2,02	2,01	–
1,95	–	2,07*	–	–	–
2,00	2,12	2,12	2,12	2,12	–
2,02	–	2,14*	–	–	–
2,10	–	2,23*	–	–	–
2,12	2,24	2,25	2,24	2,24	–
2,24	2,37	2,37	2,37	2,36	–
2,26	–	2,39*	–	–	–
2,36	2,49	2,49	2,49	2,48	–
2,44	2,57*	2,57*	2,57*	2,56*	–
2,50	2,63	2,63	2,63	2,63	–

* В новых изделиях применять запрещается.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Диаметр проводов со стекловолоконистой изоляцией

Обозначения: $d'_{\text{ГОСТ}}$ – диаметр проволоки без изоляции, мм;
 $d_{\text{ГОСТ}}$ – наружный диаметр провода с изоляцией, мм.

$d'_{\text{ГОСТ}}$	$d_{\text{ГОСТ}}$ – для марок					
	ПСД, ПСДК	ПСДТ	ПСДКТ	ПСД – Л, ПСДК – Л	ПСДТ – Л	ПСДКТ – Л
1	2	3	4	5	6	7
0,315	–	0,500	0,460	–	0,480	0,480
0,335	–	0,520	0,480	–	0,500	0,500
0,355	–	0,540	0,500	–	0,520	0,520
0,380	–	0,570	0,530	–	0,550	0,550
0,400	–	0,590	0,550	–	0,570	0,570
0,425	–	0,620	0,580	–	0,600	0,600
0,450	–	0,640	0,600	–	0,620	0,620
0,475	–	0,670	0,620	–	0,650	0,650
0,500	0,740*	0,690	0,650	–	0,670	0,670
0,530	–	0,730	0,700	–	0,700	0,700
0,560	0,820*	0,760	0,730	–	0,730	0,730
0,600	–	0,800	0,770	–	0,770	0,770
0,630	0,890*	0,830	0,800	–	0,800	0,800
0,670	–	0,870	0,840	–	0,840	0,840
0,690*	–	0,890	0,860	–	0,860	0,860
0,710	0,980*	0,930	0,890	–	0,890	0,890
0,750	1,020*	0,970	0,930	–	0,930	0,930
0,770*	–	0,990	0,950	–	0,950	0,950
0,800	1,070*	1,020	0,980	–	0,980	0,980
0,830*	–	1,050	1,010	–	0,980	0,980
0,850	1,120*	1,070	1,030	–	1,030	1,030
0,900	1,170*	1,120	1,080	–	1,080	1,080
0,930*	–	1,150	1,110	–	1,110	1,110
0,950	1,220*	1,170	1,130	–	1,130	1,130
1,000	1,290	1,230	1,200	1,290	1,220	1,220
1,060	1,359	1,230	1,260	1,350	1,280	1,280
1,080*	1,370	1,310	1,280	1,370	1,300	1,300

Окончание приложения 4

1	2	3	4	5	6	7
1,120	1,410	1,350	1,320	1,410	1,340	1,340
1,180	1,470	1,410	1,380	1,470	1,400	1,400
1,250	1,540	1,480	1,450	1,540	1,470	1,470
1,320	1,610	1,550	1,520	1,610	1,540	1,540
1,400	1,690	1,630	1,600	1,690	1,620	1,620
1,450*	1,740	1,680	1,650	1,740	1,670	1,670
1,500	1,790	1,730	1,700	1,790	1,720	1,720
1,560*	1,850	1,790	1,760	1,850	1,780	1,780
1,600	1,890	1,850	1,840	1,890	1,850	1,850
1,700	1,990	1,950	1,940	1,990	1,950	1,920
1,800	2,090	2,050	2,040	2,090	2,050	2,020
1,900	2,190	2,150	2,140	2,190	2,150	2,120
2,000	2,290	2,250	2,240	2,290	2,250	2,220
2,120	2,410	2,370	2,360	2,410	2,370	2,340

* В новых изделиях применять запрещается.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

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.

Номинальные размеры и сечения медного
и алюминиевого обмоточного провода марок ПБ и АПБ, мм²

b , мм	a , мм								
	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12	2,24
3,75	5,04	–	5,79	–	6,39	–	7,14	–	8,04
4,00	5,39	5,79	6,19	6,44	6,84	7,24	7,64	8,12	8,60
4,25	5,74	–	6,59	–	7,29	–	8,14	–	9,16
4,50	6,09	6,54	6,99	7,29	7,74	8,19	8,64	9,18	9,72
4,75	6,44	–	7,39	–	8,19	–	9,14	–	10,3
5,00	6,79	7,29	7,79	8,14	8,64	9,14	9,64	10,2	10,8
5,30	7,21	–	8,27	–	9,18	–	10,2	–	11,5
5,60	7,63	8,19	8,75	9,16	9,72	10,3	10,8	11,5	12,2
6,00	8,19	–	9,39	–	10,4	–	11,6	–	13,1
6,30	8,61	9,24	9,87	10,4	11,0	11,6	12,2	13,0	13,8
6,70	9,17	–	10,5	–	11,7	–	13,0	–	14,7
7,10	9,73	10,4	11,2	11,7	12,4	13,1	13,8	14,7	15,5
7,50	10,3	–	11,8	–	13,1	–	14,6	–	16,4
8,00	11,0	11,8	12,6	13,2	14,0	14,8	15,6	16,6	17,6
8,50	11,7	–	13,4	–	14,9	–	16,6	–	18,7
9,00	12,4	13,3	14,2	14,9	15,8	16,7	17,6	18,7	19,8
9,50	13,1	–	15,0	–	16,7	–	18,6	–	20,9
10,00	13,8	14,8	15,8	16,6	17,6	18,6	19,6	20,8	22,0
10,60	14,6	–	16,8	–	18,7	–	20,8	–	23,4
11,20	15,5	16,6	17,7	18,7	19,8	20,9	22,0	23,4	24,7
11,80	–	–	18,7	–	20,9	–	23,2	–	26,1
12,50	–	18,5	19,8	20,9	22,1	23,4	24,6	26,1	27,6
	–	–	–	–					
13,20	–	–	–	–	23,4	–	26,0	–	29,2
14,00	–	–	–	–	24,8	26,2	27,6	29,3	31,0
15,00	–	–	–	–	–	–	29,6	–	33,2
16,00	–	–	–	–	–	–	31,6	33,6	35,5
17,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–
18,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Продолжение приложения 5

<i>b</i>	<i>a</i>								
	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75
3,75	–	8,83	–	–	–	–	–	–	–
4,00	8,89	9,45	10,1	10,7	–	–	–	–	–
4,25	–	10,1	–	11,4	–	–	–	–	–
4,50	10,1	10,7	11,4	12,1	13,0	13,6	–	–	–
4,75	–	11,3	–	12,8	–	14,4	–	–	–
5,00	11,3	12,0	12,7	13,5	11,5	15,2	16,2	17,2	–
5,30	–	12,7	–	14,3	–	16,2	–	18,3	–
5,60	12,7	13,5	14,3	15,1	16,3	17,1	18,2	19,3	20,1
6,00	–	14,5	–	16,3	–	18,4	–	20,8	–
6,30	14,3	15,2	16,2	17,1	18,4	19,3	20,6	21,8	22,8
6,70	–	16,2	–	18,2	–	20,6	–	23,2	–
7,10	16,2	17,2	18,3	19,3	20,8	21,8	23,2	24,7	25,8
7,50	–	18,2	–	20,5	–	23,1	–	26,1	–
8,00	18,3	19,5	20,7	21,9	23,5	24,7	26,3	27,9	29,1
8,50	–	20,7	–	23,3	–	26,2	–	29,6	–
9,00	20,7	22,0	23,3	24,7	26,5	27,8	29,6	31,4	32,9
9,50	–	23,2	–	26,1	–	29,4	–	33,2	–
10,00	23,1	24,5	26,0	27,5	29,5	31,0	33,0	35,0	36,6
10,60	–	26,0	–	29,1	–	32,8	–	37,1	–
11,20	25,9	27,5	29,1	30,8	33,1	34,7	37,0	39,2	41,4
11,80	–	29,0	–	32,5	–	36,6	–	41,3	–
12,50	29,0	30,7	32,6	34,5	37,0	38,8	41,3	43,8	46,0
13,20	–	32,5	–	36,4	–	41,0	–	46,3	–
14,00	32,5	34,5	36,6	38,7	41,5	43,6	46,4	49,2	52,0
	————								
15,00	–	37,0	–	41,5	–	46,7	–	52,7	–
		————							
16,00	37,2	39,5	41,9	44,3	47,5	49,9	53,1	56,3	59,1
			————						
17,00	–	–	–	47,2	–	53,2	–	59,4	–
				————					
18,00	–	–	–	–	53,1	55,8	59,4	63,0	66,6

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

Примечание:

1. Провод марок ПБ и АПБ выпускается с толщиной изоляции на две стороны $2\delta = 0,45 (0,50); 0,55(0,62); 0,72(0,82); 0,96(1,06); 1,20(1,35); 1,35(1,50); 1,68(1,83)$ и $1,92(2,07)$ мм.

2. Медный провод марки ПБУ выпускается с размерами проволоки по стороне *a* от 1,8 до 5,6 мм и по стороне *b* от 6,7 до 18,0 мм с изоляцией толщиной $2\delta = 1,35(1,45); 2,00(2,20); 2,48(2,63); 2,96(3,16); 3,60(3,80); 4,08(4,28)$ и $4,40(4,65)$ мм.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

**РЕМОНТ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.
ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие

Составители:

Селицкая Оксана Юрьевна,
Сакович Елена Анатольевна,
Трепашко Елена Владимировна

Ответственный за выпуск *В. М. Збродыга*

Редактор *Д. О. Бабакова*

Корректор *Д. О. Бабакова*

Компьютерная верстка *Д. А. Пекарского*

Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 27.07.2022. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 10,69. Уч.-изд. л. 8,36. Тираж 99 экз. Заказ 153.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/359 от 09.06.2014.

№ 2/151 от 11.06.2014.

Пр-т Независимости, 99–1, 220023, Минск.