МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ.
СЕБРЯКОВСКИЙ ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ОТДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Методические рекомендации

КУРСОВАЯ РАБОТ

на тему: **Монтаж и наладка асинхронного двигателя**

по дисциплине: МДК.02.02 Внутреннее электроснабжение промышленных и гражданских зданий
специальность: 08.02.09 Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования промышленных и гражданских зданий

Выполнил:
студент группы МЭ-41о-з-14
Фамилия И.О.

Руководитель проекта:
преподаватель отделения СПО
СФ ВолгГТУ
Сидорова Н.Ю.

Михайловка, 2017 г.

РАССМОТРЕНО:
Протокол заседания ПЦК
от «____» _____20___г.
№ _____

Председатель ПЦК
_____/Н.Ю. Сидорова/

Актуализирована:
на основании методических рекомендаций
Курсовая работа по МДК.02.02 Внутреннее
электроснабжение промышленных и гражданских зданий

Рассмотрена в 2014 г., протокол ПЦК
от «____» _____ 20___ г.
№_____

Организация-разработчик: СФ ВолгГТУ отделение СПО

Разработчики:
Маслыгин И.А., преподаватель СФ ВолгГТУ отделения СПО
Сидорова Н.Ю., преподаватель СФ ВолгГТУ отделения СПО

Себряковский филиал
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»
отделения среднего профессионального образования

Утверждаю
Заведующая учебной частью
_____ Е.А. Кизилова
«____» _____20___г.

Задание

на курсовую работу по: МДК.02.02 Внутреннее электроснабжение промышленных и гражданских зданий

*Студент группы:*_____

*Специальность:*08.02.09 Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования промышленных и гражданских зданий

Ф.И.О

Тема проекта:

Монтаж и наладка асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

(по сериям исполнения)

1 Пояснительная записка

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ
1 ОБЩАЯ ЧАСТЬ
1.1 Конструкция асинхронного двигателя
1.2 Монтаж асинхронного двигателя
2 РАСЧЕТ АСИНХРОНОГО ДВИГАТЕЛЯ.
2.1 Исходные данные
2.2 Выбор электромагнитных нагрузок
2.3 Расчет статора
2.4 Расчет ротора
3 ОХРАНА ТРУДА
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

2 Рекомендуемая литература

1. Епифанов, А.П. Электрические машины [Электронный ресурс] : учеб. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2006. — 272 с. — Эбс Лань Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/591

2. Кацман, М.М. Лабораторные работы по электрическим машинам и электрическому приводу : учеб. пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования / М. М. Кацман. - 7-е изд., стер. - М. : Издательский центр "Академия", 2011. - 256с. - ISBN 978-5-7695-8195-3 5

3. Киреева, Э. А. Электроснабжение и электрооборудование промышленных предприятий : учебное пособие / Э. А. Киреева ; Э. А. Киреева . - М : Кнорус, 2011. - 368с. - библиогр. с. 366. - ISBN 978-5-406-00858-4 5

4. Сивков, А. А. Основы электроснабжения : учебное пособие для СПО / А. А. Сивков, А. С. Сайгаш, Д. Ю. Герасимов. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 173 с. — (Серия : Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-01344-3. — Эбс Юрайт Режим доступа : www.biblio-online.ru/book/892D4BAB-999E-4B8F-B2C6-F391EE9DAA7C.

5. Фролов, Ю. М. Основы электроснабжения / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. - СПб : Лань, 2012. - 432 с. - ISBN 978-5-8114-1385-0 Эбс Лань https://e.lanbook.com/book/4544#authors

6. Электротехника и электроника в 3 т. Том 3. Основы электроники и электрические измерения : учебник и практикум для СПО / Э. В. Кузнецов, Е. А. Куликова, П. С. Культиасов, В. П. Лунин ; под общ. ред. В. П. Лунина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 234 с. — (Серия : Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-03756-2. — Эбс Юрайт Режим доступа : www.biblio-online.ru/book/768A0873-283C-41F2-B4D0-6E87767A3848.

Дата выдачи задания: «___» _____20__ г.
Дата сдачи задания: «___» _____20__ г.

Руководитель курсовой работы /_____/ _____
Ф.И.О. подпись
Председатель ПЦК /_____/ _____
Ф.И.О. подпись

СОДЕРЖАНИЕ

1. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ
1.1 Ведение
1.2 Общие положения
1.3 Порядок выполнения курсовой работы
1.4 Структура курсовой работы
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

- ВВЕДЕНИЕ
- 1 ОБЩАЯ ЧАСТЬ
  1.1 Конструкция асинхронного двигателя
  1.2 Монтаж асинхронного двигателя
- 2 РАСЧЕТ АСИНХРОНОГО ДВИГАТЕЛЯ.
- 2.1 Исходные данные
- 2.2 Выбор электромагнитных нагрузок
- 2.3 Расчет статора
- 2.4 Расчет ротора
- ОХРАНА ТРУДА
- СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ…….

1. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

1.1 Введение

В соответствии с Типовым положением Федерального государственного бюджетного учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный технический университет отделение среднего профессионального образования», Государственным образовательным стандартом для средних специальных образовательных учреждений № 282 от 06 апреля 2010 года, типового положения об образовательном учреждении среднего профессионального образования (среднем специальном учебном заведении), утвержденному постановлением Правительства РФ № 160 от 03 марта 2001года, в период обучения СФ ВолгГТУ, студент должны выполнить курсовую работу (проект), являющуюся одним из основных видов учебных занятий, формой контроля учебной работы студентов и неотъемлемой частью учебного плана.

Выполнение студентом курсовой работы (проекта) осуществляется на заключительном этапе изучения дисциплины. Количество курсовых работ (проектов), наименование дисциплин, по которым они предусматриваются, и количество часов обязательной учебной нагрузки студента, отведенное на их выполнение определяется СФ ВолгГТУ отделение СПО в соответствии с Государственным образовательным стандартом среднего профессионального образования.

Значение курсовой работы состоит в том, что в процессе ее выполнения студент не только закрепляет, но и расширяет полученные знания по специальным дисциплинам, а так, же обобщает практический материал квалификационной производственной практики.

1.2 Общие положения

Курсовая работа по МДК.02.02 Внутреннее электроснабжение промышленных и гражданских зданий представляет собой самостоятельное теоретическое и практическое исследование студентом одной из актуальных тем повышение качества монтажных и ремонтных работ асинхронного электродвигателя (по видам исполнения), в которой демонстрируются, уровень овладения необходимыми теоретическими знаниями, практическими умениями и навыками, полученными студентов в течение всего срока обучения междисциплинарного курса МДК.02.02 Внутреннее электроснабжение промышленных и гражданских зданий, позволяющими ему самостоятельно решать профессиональные задачи.

Каждый студент выполняет индивидуальное задание, пользуясь рекомендованной литературой. При этом студент должен с возможными вариантами расчетных и конструктивных решений, оценить их достоинства и недостатки, обосновать принятое им решение.

Успешное выполнение курсовой работы, во многом зависит от правильной организации ее подготовки и написания, соблюдения требований, которые предъявляются цикловой комиссией, по данным дисциплинам, к ее форме и содержанию.

1.3 Порядок выполнения курсовой работы

После уяснения содержания темы курсовой работы целесообразно составить предварительный план работы, который в дальнейшем согласовывается с преподавателем – руководителем, уточняется, дополняется.

Под планом курсовой работы подразумевается перечень вопросов, которые должны быть рассмотрены в работе. Пункты плана формулируется в виде заголовков, и располагаются в логической последовательности, соответствующей развитию и изложению темы работы.

План – это основа, костяк работы, от его правильного составления во многом зависит структура, содержание, логическая связь частей курсовой работы. Поэтому качество плана оказывает существенное влияние на оценку работы.

План курсовой работы не следует перегружать большим количеством вопросов. Это приведет к поверхностному изложению материала.

1.4 Структура курсовой работы

По структуре курсовая работа состоит из:

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

1 ОБЩАЯ ЧАСТЬ

1.3 Конструкция асинхронного двигателя

1.4 Монтаж асинхронного двигателя

2 РАСЧЕТ АСИНХРОНОГО ДВИГАТЕЛЯ.

2.1 Исходные данные

2.2 Выбор электромагнитных нагрузок

2.3 Расчет статора

2.4 Расчет ротора

3 ОХРАНА ТРУДА

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- списка используемой литературы, отражает используемую литературу, методические указания и все интернет ресурсы.

Курсовая работа должна иметь установленную структуру:

- титульный лист должна содержать: полное наименование учебного учреждения, указания на курсовую работу, ее тему, утверждаться заведующей отделение СПО, зав. по учебной части, председателем цикловой комиссии, указываются все консультанты и год написания работы;

- лист задания, содержит: полное наименование учебного учреждения, утверждается зав. отделением СПО, зав. учебной частью, председателем ПЦК,

указывается фамилия имя и отчество студента, задание на курсовую работу с номером приказа о ее утверждении, дается ссылка на консультанта и оговариваются сроки сдачи работы, перечисляются все исходные и дополнительные данные для выполнения курсовой работы, а так же перечень вопросов подлежащих разработке, перечень иллюстрируемого материала который должна содержать курсовая работа, указываются все консультанты привлеченные к контролю разработки курсовой работы с количеством часов, дается заключение о допуске к защите курсовой работы с датой и подписью председателя ПУК, указываются рецензенты.

Собранный материал группируют, обрабатывают и систематизируют в соответствии с окончательным вариантом плана. На этом этапе уточняется структура работы и подбирается иллюстрированный материал. После этого пишется черновой вариант работы, который подвергается последующей литературной обработке и редактированию

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

▪ ВВЕДЕНИЕ

Ведение должно раскрывает актуальность и значение темы, формулирует цель работы; это обоснование и доказательство важности рассматриваемой темы для науки, технологии или выбранной специализации. Введение - это и краткий экскурс.

▪ 1 ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Конструкция асинхронного двигателя - необходимо показать теоретические и методические основы изучаемой проблемы. Дать краткую техническую характеристику объекту исследования. Требования к электроприводу. Провести обзор блок - схемы монтажа асинхронного двигателя. Дать подробное описание схеме электромонтажных работ. Построить электрическую схему монтажа асинхронного электродвигателя.

▪ 2 РАСЧЁТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

▪ 2.1 Исходные данные

Тип двигателя	4А280S10У3
Номинальная мощность $P_{2ном}$, кВт	45
Частота сети, f_1, Гц	50
Число фаз, m	3
Номинальная синхронная частота вращения n_1, м$^{-1}$	750
Ротор	короткозамкнутый
Способ защиты от окружающей среды	IP44

Режим работы	продолжительный
Соединение обмотки статора, по схеме	звезда

Выбор главных размеров активных частей двигателя:

1 Число полюсов $2p=6$

2 Выбор высоты оси вращения $h=270$ *мм*.

3 Предварительное значение внутреннего диаметра статора

$$D=D_a \cdot k_D, мм \qquad (1)$$

с определением $D_a=0{,}52$ $k_D=0{,}7$

4 Полюсное давление

$$T=\pi \cdot D/2p, \qquad (2)$$

5 Расчет мощности

$$P'=\frac{P_2 \cdot k_e}{\eta \cdot \cos\varphi} \ кВт \qquad (3)$$

▪ 2.2 Выбор электромагнитных нагрузок

Предварительный выбор электромагнитных нагрузок A, А/м, и B_δ, Тл, должен быть проведен особо тщательно, так как они определяют не только расчетную длину сердечника, но и в значительной степени характеристики машины. При этом, если главные размеры машины зависят от произведения AB_δ, то на характеристики двигателя оказывает существенное влияние также и соотношение между этими величинами. Рекомендации по выбору A и B_δ, представленные в виде кривых для машин различных мощности и исполнения, основаны на данных изготовленных двигателей, характеристики которых удовлетворяют требованиям ГОСТ.

Коэффициент полюсного перекрытия a_δ и коэффициент формы поля k_Bв асинхронных машинах определяются степенью уплощения кривой поля в зазоре, возникающей при насыщении зубцов статора и ротора, и могут быть достаточно достоверно определены только после расчета магнитной цепи. Поэтому для расчета магнитной цепи удобнее рассматривать синусоидальное поле, а влияние уплощения учесть при расчете магнитного напряжения отдельных участков магнитной цепи. Основываясь на этом, значения коэффициентов предварительно принимают равными%

$$a_\delta = 2 / \pi \approx 0{,}64; \ k_B = \pi / (2\sqrt{2}) = 1{,}11 \qquad (4)$$

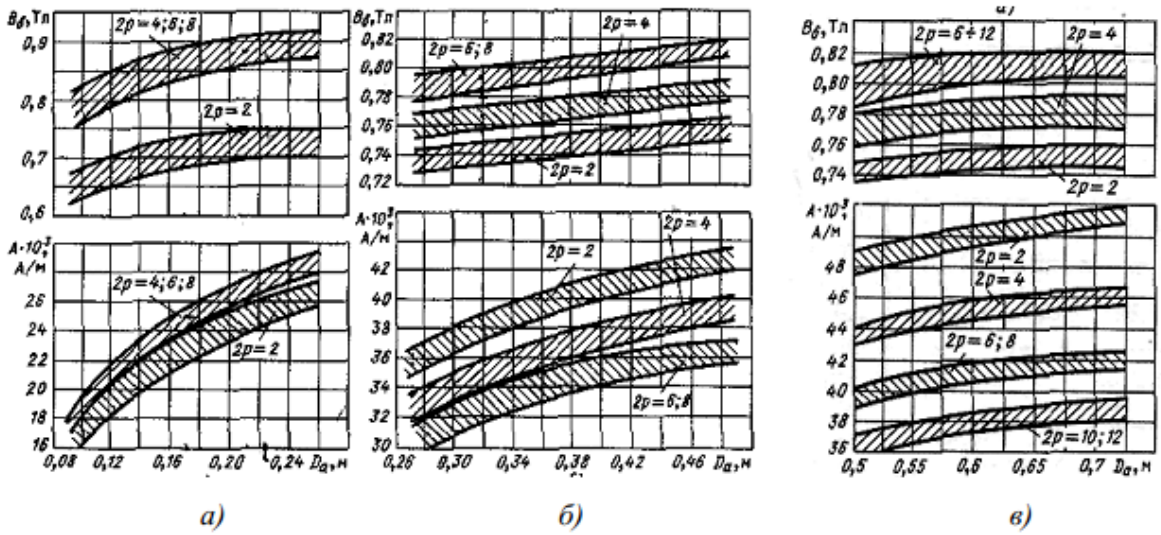


Рис. 2.1 - Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей со степенью защиты IP44 при высоте оси вращения: *а* – *h* 132 мм; *б* – *h*=150 250 мм; *в* – *h* 280 мм (с продуваемым ротором).

Предварительное значение обмоточного коэффициента $k_{ОБ1}$ выбирают в зависимости от типа обмотки статора (для однослойных обмоток $k_{ОБ1}$ = 0,95 ÷ 0,96; для двухслойных и одно–двухслойных обмоток при $2p$ = 2 следует принимать $k_{ОБ1}$ = 0,90 ÷ 0,91 и при большей полюсности$k_{ОБ1}$=0,91 ÷ 0,92).

Синхронная угловая скорость двигателя, рассчитывается по формуле:

$$\Omega = 2\pi\frac{f_1}{p}\ \text{рас/с} \qquad (5)$$

где n_1– синхронная частота вращения, об/мин;

f_1–частота напряжения сети, Гц;

p – число пар полюсов.

Расчетная длина магнитопровода:

$$l_\delta = \frac{P'}{K_B D^2 \Omega K_{ОБ1} A B_\delta}\ \text{м} \qquad (6)$$

Критерием правильности выбора главных размеров D и l_δслужит отношение

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} \qquad (7)$$

которое обычно находится в пределах, показанных на рис. 2.2 для принятого исполнения машины. Если λ оказывается чрезмерно большим, то следует повторить расчет для ближайшей из стандартного ряда большей высоты оси вращения h. Если λ слишком мало, то расчет повторяют для следующей в стандартном ряду меньшей высоты h.

В результате проделанных вычислений получены значения высоты оси вращения h, внутреннего диаметра статора D, внешнего диаметра статора D_a, расчетной длины магнитопроводаl_δи полюсного деления τ.

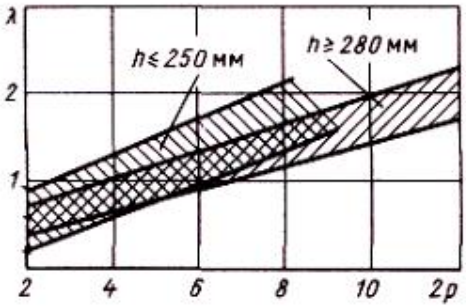


Рис. 2.2- Отношение l / λ двигателей

Для расчета магнитной цепи помимо l_δнеобходимо определить полностью конструктивную длину и длину стали сердечников статора (l_1и l_{CT1}) и ротора (l_2 и l_{CT2}) . В асинхронных двигателях, длина сердечников которых не превышает 250–300 мм, радиальные вентиляционные каналы не делают. Сердечники шихтуются в один пакет. Для такой конструкции

$$l_1 = l_{CT1} = l_\delta \qquad (8)$$

В более длинных машинах сердечники подразделяют на отдельные пакеты, разделенные между собой радиальными вентиляционными каналами. В двигателях с фазными роторами или со сварной короткозамкнутой обмоткой пакеты выполняют длиной 40–60 мм. Крайние пакеты могут быть более длинными. В двигателях с литой короткозамкнутой обмоткой ротора число пакетов по технологическим соображениям из-за сложности заливки уменьшают и пакеты выполняют более длинными.

Стандартная ширина радиального воздушного канала между пакетами $b_К$= *10 мм*. Число пакетов $n_{ПАК}$ и их длина $l_{ПАК}$ связаны с расчетной длиной следующим соотношением:

$$N_{ПАК} l_{CT} / l_{ПАК} \approx l_\delta / l_{ПАК} \qquad (9)$$

при этом число радиальных каналов

$$n_К = n_{ПАК} - 1 \qquad (10)$$

Длина стали сердечника статора в таких машинах

$$l_{CT1} = l_{ПАК} \cdot n_{ПАК} \qquad (11)$$

или при пакетах разной длины

$$l_{CT1} = \sum l_{ПАК} \qquad (12)$$

Конструктивная длина сердечника статора

$$l_1 = l_{CT1} + b_к \cdot n_к \qquad (13)$$

Окончательное значение l_δдля машин с $\delta < 1{,}5$ *мм*

$$l_\delta \approx l_{CT1} \qquad (14)$$

В машинах с δ > 1,5 мм при расчете l_δучитывают искривление магнитных силовых линий потока в воздушном зазоре над радиальными вентиляционными каналами:

$$l_\delta \approx l_1 - b'_к \cdot n_к \qquad (15)$$

где $b'_К$– расчетная ширина радиальных каналов, зависящая от соотношения δ и $b_К$. Значение $b'_К$ при $b_К$= 10 мм определяется по табл. 2.1 либо из выражения:

$$b'_к = \gamma \cdot \delta, \ м \qquad (16)$$

$$\gamma' = \frac{2\left(b_к/\delta\right)^2}{5+2\left(b_к/\delta\right)},\ м \qquad (17)$$

Таблица 2.1 - Расчетная ширина радиальных каналов $b_К'$ при $b_К$= 10 мм

δ, мм	1,5	1,6	1,7	1,8	1.9	2,0	2,5	3,0
$b'_К$, мм	7,3	7,1	7,0	6,9	6,8	6,7	6,2	5,7

Конструктивную длину сердечника ротора в машинах с h < 250 мм берут равной длине сердечника статора, т.е. $l_2 = l_1$. В двигателях больших габаритов ротор выполняют длиннее статора за счет увеличения длины его крайних пакетов на 5 мм и в крупных машинах высокого напряжения — на 10 мм.

Длина стали сердечника ротора:

$$l_{СТ2} = \sum l_{ПАК2} = l_2 - n_к \cdot b_к\ ,\ м \qquad (18)$$

▪ 2.3 РАСЧЕТ СТАТОРА

Расчет включает определение числа пазов статора Z_1, числа витков в фазе обмотки статора w_1 и размеров зубцовой зоны. При этом число витков фазы обмотки статора должно быть таким, чтобы линейная нагрузка двигателя и индукция в воздушном зазоре как можно более близко совпадали с их значениями, принятыми предварительно при выборе главных размеров, а число пазов статора обеспечивало достаточно равномерное распределение катушек обмотки.

Чтобы выполнить эти условия, вначале выбирают предварительно зубцовое деление t_{Z1}в зависимости от типа обмотки, номинального напряжения и полюсного деления машины. Для более равномерного распределения катушек обмотки по длине окружности зазора необходимо большое число пазов, следовательно, маленькие зубцовые деления. В то же время ширина паза, составляющая примерно половину зубцового деления, не должна быть слишком малой, так как в этом случае ухудшается заполнение паза медью обмотки, а в машинах небольшой мощности может также недопустимо уменьшиться механическая прочность зубцов. Кроме того, надо иметь в виду, что стоимость машины с увеличением числа пазов возрастает, так как увеличиваются сложность штампа и трудоемкость изготовления и укладки обмоток.

Меньшие значения в каждой из показанных на рисунке областей возможных значенийt_{Z1}характерны для машин меньшей мощности для каждого из диапазонов высот осей вращения.

Следует отметить, что двигатели с h 280 мм обычно выполняют с обмоткой из прямоугольного провода, но в многополюсном исполнении при $2p$ 10 (в двигателях с H = 280 и 315 мм) из-за малой высоты спинки статора размещение лобовых частей катушек из прямоугольного провода затруднено,

поэтому такие машины выполняют с обмоткой из круглого провода, имеющей мягкие, легко поддающиеся формовке лобовые части.

Для машин с обмоткой из прямоугольного провода при $U_{НОМ}$ 660 В и в высоковольтных машинах t_{Z1} зависит от мощности и номинального напряжения.

В процессе расчета целесообразно рассмотреть диапазон возможных значений t_{Z1}в пределах указанных значений зубцовых делений t_{Z1min} t_{Z1max}. Тогда возможное число пазов статора, соответствующих выбранному диапазону t_{Z1}, равно:

$$Z_{1min} = \frac{\pi D}{t_{Z1max}} \qquad (19)$$

$$Z_{1max} = \frac{\pi D}{t_{Z1min}} \qquad (20)$$

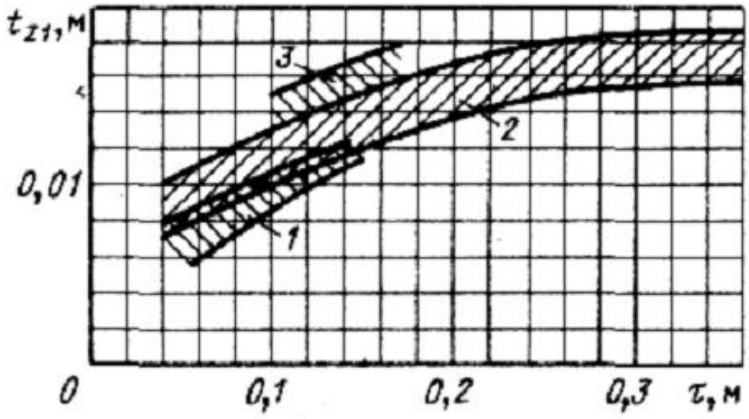


Рис. 2.3 –Зубцовые деления статоров асинхронных двигателей с обмоткой из круглого провода с высотами оси вращения: 1 – *h* 90 мм; 2 – 90 <*h* 250 мм; 3 – *h* 280мм

Таблица 2.2–Зубцовое деление статора t_{Z1}, м, при прямоугольных пазах

Полюсное деление τ,м	Напряжение, В		
	до 660	3000	6000
<0,15	0,016–0,02	0,022–0,025	0,024–0,03
0,15–0,4	0,017–0,022	0,024–0,027	0,026–0,024
>0,4	0,02–0,028	0,026–0,032	0,028–0,038

Окончательное число пазов статора Z_1 следует выбирать в полученных пределах с учетом условий, налагаемых требованиями симметрии обмотки, и желательного для проектируемой машины значения числа пазов на полюс и фазу q_1. Число пазов статора в любой обмотке асинхронных машин должно быть кратно числу фаз, а число

$$Q_1 = Z_1/(2pm) \qquad (21)$$

в большинстве асинхронных машин должно быть целым. Лишь в многополюсных асинхронных двигателях иногда выполняют такое число пазов, при котором q_1является дробным, причем большей частью со знаменателем дробности, равным двум, например:

$$q_1 = 2^1/_2 \text{или } 3^1/_2.$$

В отдельных случаях это правило может быть нарушено, однако необходимо иметь в виду, что обмотки с дробным q_1при сравнительно небольших числах пазов и полюсов, характерных для большинства асинхронных двигателей, приводят к некоторой асимметрии МДС. Поэтому выбор окончательного числа пазов следует проводить с четкой увязкой и контролем получаемого при этом числа q_1.

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm} \qquad (22)$$

Окончательное значениене должно выходить за указанные выше пределы более чем на 10% и в любом случае для двигателей с $h \geq 56$мм не должно быть менее 6 - 7 мм.

$$t_{Z1} = \frac{\pi D}{2pmq_1} \text{ мм} \qquad (23)$$

При определении числа эффективных проводников в пазу$u_П$ руководствуются следующим: $u_П$ должно быть целым, а в двухслойной обмотке желательно, чтобы оно было кратным двум. Применение двухслойных обмоток с нечетным $u_П$ допускается лишь в исключительных случаях, так как это приводит к необходимости выполнять разновитковые катушки, что усложняет технологию изготовления и укладки обмотки. Поэтому полученные в расчете числа $u_П$ приходится округлять до ближайшего целого или четного числа. Чтобы это округление не было слишком грубым (что особенно заметно при малых $u_П$), вначале определяют предварительное число эффективных проводников в пазу$u_П'$ при условии, что параллельные ветви в обмотке отсутствуют (a = 1):

$$u'_П = \frac{\pi DA}{I_{1ном} Z_1} \qquad (24)$$

где A — принятое ранее значение линейной нагрузки, А/м:

$I_{1НОМ}$ – номинальный ток обмотки статора, А,

$$I_{1ном} = \frac{P_2}{mU_{1ном} n cos\varphi} A/м \qquad (25)$$

(η и cos выбраны в начале расчета).

Полученное значение $u'_П$ не округляют до целого, а находят такое число параллельных ветвей обмоткиa,при котором число эффективных проводников в пазу либо будет полностью удовлетворять отмеченным условиям, либо потребует лишь незначительного изменения:

$$u_П = a u'_П \qquad (26)$$

Числоa при этом, естественно, может быть взято только из ряда возможных чисел параллельных ветвей для обмотки данного типа и заданного числа полюсов ($2p$= 2, a= 1,2; $2p$= 4, a= 1,2,4; $2p$= 6, a=1,2,3,6; $2p$= 8, a= 1,2,4,8).

Полученное число $u_П$ округляют до ближайшего целого или четного, если обмотка двухслойная.

Принятое на данном этапе расчета число параллельных ветвейa в дальнейшем, при выборе размеров и числа элементарных проводников, может быть изменено. В этом случае пропорционально изменяется также и $u_П$.

Окончательное число витков в фазе обмотки

$$w_1 = \frac{U_П Z_1}{2am} \qquad (27)$$

Окончательное значение линейной нагрузки, А/м,

$$A = 2 \cdot \frac{I_{1ном} w_1 m}{\pi D} A/м \qquad (28)$$

Оно, как правило, незначительно отличается от принятого ранее, так как его изменение определяется только отношением рассчитанного и принятого числа эффективных проводников в пазу$u_П$. Полученное значение A нужно сопоставить с рекомендуемым.

Расчет обмотки статора

Схему обмотки статора выбирают в зависимости от мощности машины, ориентируясь на конструкцию и предполагаемую технологию укладки обмотки в пазы. Машины мощностью до 12—15 кВт в большинстве случаев имеют однослойную концентрическую обмотку из круглого провода. В машинах большей мощности обмотки выполняют двухслойными, а при механизированной укладке применяют одно–двухслойные или двухслойные концентрические обмотки, которые могут быть уложены в пазы без подъема шага.

Все обмотки из прямоугольного провода выполняют только двухслойными, равнокатушечными.

Обмоточный коэффициент $k_{ОБ} = k_Р k_У$ рассчитывают в зависимости от числа пазов на полюс и фазу q и укорочения шага обмотки

$$\beta = y_{РАСЧ}/\tau, \qquad (29)$$

где $y_{РАСЧ}$– расчетный шаг, определяемый по формулам в зависимости от типа обмотки.

В двухслойных обмотках асинхронных двигателей шаг выполняют в большинстве случаев с укорочением, близким к β = 0,8:

$$k_p = \frac{0,5}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6 \cdot q_1}\right)} \qquad (30)$$

$$k_у = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta\right) \qquad (31)$$

$$k_{ОБ1} = K_p \cdot K_у$$

После расчета $k_{ОБ1}$ уточняют значение потока Ф, $В_\delta$:

$$Ф = \frac{K_E U_1}{4 \cdot K_B W_1 K_{ОБ1} f_1} Вб \qquad (32)$$

и определяют индукцию в воздушном зазоре $В_\delta$, Тл,

$$B_\delta = \frac{\Phi}{a_\delta \tau l_\delta} = \frac{p\phi}{Dl_\delta} Тл \qquad (33)$$

Если полученное значение B_δ выходит за пределы рекомендуемой области более чем на ±5%, следует принять другое значение числа $u_П$ и повторить расчет.

Сечение эффективных проводников, м^2, определяют, исходя из тока одной параллельной ветви и допустимой плотности тока в обмотке:

$$q_{эф} = \frac{I_{1ном}}{aJ_1} м^2 \qquad (34)$$

С точки зрения повышения использования активных материалов плотность тока *J1* должна быть выбрана как можно большей, но при этом возрастают потери в меди обмотки. Увеличение потерь сказывается, во–первых, на повышении температуры обмотки и, во–вторых, на КПД двигателя. В асинхронных двигателях общего назначения при принятой в них системе косвенного охлаждения влияние плотности тока на нагрев обмотки более существенно, чем на КПД. На этом основании определены качественные зависимости допустимой плотности тока в обмотках различных машин. Она повышается с уменьшением габаритов машины, с увеличением допустимого нагрева обмотки при переходе на другой, более высокий класс нагревостойкости изоляции и с повышением интенсивности охлаждения (например, в машинах защищенного исполнения по сравнению с закрытыми обдуваемыми двигателями).

Нагрев пазовой части обмотки зависит от произведения линейной нагрузки на плотность тока *(AJ)*. Поэтому выбор допустимой плотности тока *J*, А/м2 , производят с учетом линейной нагрузки двигателя:

$$J_1 = \frac{AJ_1}{A} А/м^2 \qquad (35)$$

Значения *(AJ)* для асинхронных двигателей различных исполнения и мощности приведены на рис. 2.4 Для всыпных обмоток могут быть использованы обмоточные провода диаметром не более 1,8 мм, однако в современных двигателях для по-вышения надежности обмотки и упрощения ее укладки в пазы используют провода меньшего диаметра. В обмотках, предназначенных да механизированной укладки, диаметр изолированного провода обычно берут не более 1,4 мм, а при ручной укладке (двигатели с $h > 160$ мм) – не более 1,7 мм. Если расчетное сечение эффективного проводника в машинах со всыпной обмоткой выше значений, соответствующих указанным диаметрам, то эффективный проводник делят на несколько элементарных.

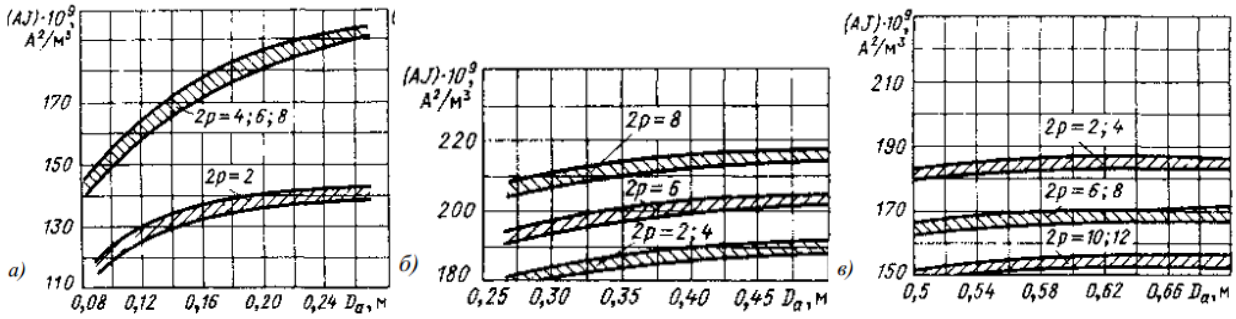


Рис. 2.4 - Средние значения произведения *AJ* асинхронных двигателей со степенью зашиты:*а* – IP44, h < 132 мм; *б* – IP44, A = 160 250 мм; *в* – IP44, h=280355мм;

Для этого подбираются сечение $q_{ЭЛ}$ и число элементарных проводников $n_{ЭЛ}$, составляющих один эффективный, таким образом, чтобы диаметр $d_{ЭЛ}$ элементарных проводников не выходил за указанные пределы, а их суммарная площадь сечения была близка к расчетному сечению эффективного проводника:

$$q_{эл} = \frac{q_{эф}}{n_{эл}} \text{ мм}^2 \qquad (36)$$

Таблица 2.3 - Диаметр и площади поперечного сечения круглых медных эмалированныхпроводов марок ПЭТВ и ПЭТ–155

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм d	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм $d_{из}$	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2 $q_{эл}$	Номинальный диаметр неизолированного провода, мм d	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм $d_{из}$	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2 $q_{эл}$
0,08	0,1	0,00502	(0,53)	0,585	0,221
0,09	0,11	0,00636	0,56	0,615	0,246
0,1	0,122	0,00785	0,6	0,655	0,283
0,112	0,134	0,00985	0,63	0,69	0,312
0,125	0,147	0,01227	(0,67)	0,73	0,353
(0,132)	0,154	0,01368	0,71	0,77	0,396
0,14	0,162	0,01539	0,75	0,815	0,442
0,15	0,18	0,01767	0,8	0,865	0,503
0,16	0,19	0,0201	0,85	0,915	0,467
0,17	0,2	0,0227	0,9	0,965	0,636
0,18	0,21	0,0255	0,95	1,015	0,709
(0,19)	0,22	0,0284	1	1,08	0,785
0,2	0,23	0,0314	1,06	1,14	0,883
(0,212)	0,242	0,0353	1,12	1,2	0,985
0,224	0,259	0,0394	1,18	1,26	1,094
(0,236)	0,271	0,0437	1,25	1,33	1,227
0,25	0,285	0,0491	1,32	1,405	1,368
(0,265)	0,3	0,0552	1,40	1,485	1,539
0,28	0,315	0,0616	1,5	1,585	1,767
(0,3)	0,335	0,0707	1,6	1,685	2,011
0,315	0,35	0,0779	1,7	1,785	2,27
0,335	0,37	0,0881	1,8	1,895	2,54
0,355	0,395	0,099	1,9	1,995	2,83
0,375	0,415	0,1104	2	2,095	3,14
0,4	0,44	0,1257	2,12	2,22	3,53
0,425	0,565	0,1419	2,24	2,34	3,94
0,45	0,49	0,159	2,36	2,46	4,36
(0,475)	0,515	0,1772	2,5	2,6	4,91
0,5	0,545	0,1963			

Следует уточнить плотность тока в обмотке, которая может несколько измениться по сравнению с предварительно принятой при подборе сечений элементарных проводников:

$$J_1 = \frac{I_{1\text{ном}}}{a q_{\text{эл}} n_{\text{эл}}} \text{ А/мм}^2 \qquad (37)$$

Изоляция обмоток статора

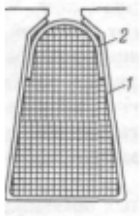
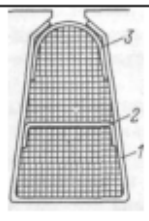
Обмотки электрической машины в зависимости от ее мощности, номинального напряжения и условий, для работы в которых она предназначена, могут быть выполнены из круглого или прямоугольного обмоточного провода. Это определяет также форму пазов магнитопровода машины и конструкцию самих обмоток и изоляции.

Обмотки из круглого провода.В машинах с номинальным напряжением до 660 В и мощностью до 100 кВт обмотки выполняют из круглого обмоточного провода и укладывают в трапецеидальные полузакрытые пазы. При ручной укладке обмотки проводники предварительно намотанных заготовок катушек укладывают в полузакрытые пазы магнитопровода, поочередно пропуская их через шлиц паза, — "всыпают". Поэтому обмотку такого типа часто называют всыпной. При машинной укладке в зависимости от типа обмоточных станков каждый из витков обмотки либо укладывают непосредственно в паз без предварительной намотки заготовок, либо наматывают заготовки нескольких катушек, а затем втягивают их с торца магнитопровода в нужные пазы. Эти операции осуществляют на автоматических или полуавтоматических обмоточных станках. Наибольший диаметр провода, применяемый для всыпных обмоток, не превышает 1,8 мм, так как провода большего диаметра имеют слишком большую жесткость и плохо уплотняются в пазах во время укладки. Нужное сечение эффективного проводника обеспечивается выполнением обмотки из нескольких элементарных проводников. При проектировании машин для уменьшения необходимого числа элементарных проводников выбирают обмотку с несколькими параллельными ветвями. Пазовая часть обмотки изолирована коробами из плен-кослюдопласта или из двух слоев различных материалов, например плен-косинтокартона и электронита. В двухслойных обмотках между верхним и нижним слоями устанавливают изоляционную прокладку, имеющую несколько большую ширину, чем паз. Отогнутые вниз края прокладки предохраняют от возможного проскальзывания проводников одного слоя в другой. На дно пазов большинства машин с двухслойной обмоткой устанавливают прокладки с целью предохранить материал пазовых коробов от возможных повреждений при уплотнении проводников во время укладки о неровности дна паза, которые возникают из-за технологических допусков при штамповке и шихтовке сердечников. Проводники обмотки закрепляют в пазах клиньями из текстолита. Под клин устанавливают прокладки из механически прочного изоляционного материала, препятствующие повреждению краев пазового короба при заклинивании пазов. Вместо клиньев обмотка может быть закреплена пазовыми крышками, которые изготавливают также из механически прочного изоляционного материала. Пазовые крышки устанавливают на обмоточных станках одновременно с втягиванием катушек при механической раздельной намотке или на станках для заклиновки после намотки совмещенным методом. После пропитки обмотки лаком пазовые крышки приобретают достаточную

прочность и жесткость для надежного закрепления проводников и в то же время занимают меньший объем паза по сравнению с клиньями, что способствует лучшему заполнению его проводниками обмотки. При укладке всыпной обмотки круглые проводники не имеют заранее определенного места в пазу и размещаются в нем произвольно. Поэтому в обмотке специальная витковая изоляция отсутствует. Ее функцию выполняет изоляция обмоточного провода, т.е. проводниковая изоляция. Обмотку из круглого провода применяют в машинах небольшой мощности, имеющих малые габариты и большое число витков, напряжение между витками обмотки которых, как правило, не превышает нескольких вольт. Электрической прочности проводниковой изоляции в таких обмотках оказывается достаточно для обеспечения надежной работы машины. Междуфазовой изоляцией в пазовой части двухслойных обмоток являются прокладки между слоями. Лобовые части обмотки не имеют корпусной изоляции, а междуфазовая изоляция устанавливается между катушечными группами в виде фигурных прокладок, вырезанных из листового материала по форме лобовых частей уложенной и отформованной обмотки.

Конструкция изоляции обмоток из круглого провода не обеспечивает необходимой электрической прочности при номинальных напряжениях выше 660 В, а малая механическая прочность катушек, особенно их лобовых частей, не позволяет применять круглый провод для обмоток машин мощностью более 100 кВт, так как в переходных процессах (при пуске, реверсе и т.п.) броски тока в машинах вызывают большие ударные нагрузки на обмотку. Поэтому обмотку из круглого провода и применяют в машинах мощностью менее 100 кВт при номинальном напряжении не выше 660 В.

Таблица 2.4 - Изоляция обмоток статоров асинхронных двигателей с высотой оси вращения до 250 мм на напряжение до 660 В

Рисунок	Тип обмотки	Высота оси вращения, мм *h*	Позиция на рис.	Наименование материала изоляции Класс нагревостойкости		Толщина материала, мм	Число слоев	Односторонняя толщина, мм
				B	F			
	Однослойная	50–80	1 2	Изофлекс	Имидофлекс	0,2 0,3	1	0,2 0,3
		90–132	1 2	Изофлекс	Имидофлекс	0,25 0,35	1	0,25 0,35
		160	1 2	Изофлекс	Имидофлекс	0,4 0,5	1	0,4 0,5
	Двухслойная	180–250	1 2 3	Изофлекс	Имидофлекс	0,4 0,4 0,5	1	0,4 0,4 0,5

Построение схем статорных обмоток

Для асинхронных двигателей общепромышленного назначения используются петлевые обмотки. По конструкции катушек обмотки подразделяются на всыпные обмотки с мягкими катушками и обмотки с жесткими катушками. Асинхронные двигатели мощностью до 100 кВт, и напряжением до 1000В изготавливаются с всыпными обмотками.

По расположению катушек в пазах и размещению их лобовых частей различают двухслойные, однослойные и одно– двухслойные обмотки.

При выполнении развернутой схемы обмотки для наглядного изображения поверхность статора вместе с пазами и обмоткой развертывают в плоскость, и все соединения изображают линиями на плоскости чертежа.

При выполнении схемы однослойной обмотки стороны катушек, уложенные в пазы, изображаются сплошными прямыми линиями, а при двухслойных – двумя рядом расположенными линиями: сплошной – для стороны катушки, уложенной в верхней части паза, пунктирной – на дно паза. Соответственно изображают лобовые части. Начала и концы фазных обмоток обозначают соответственно U_1, W_1, V_1; U_2, W_2, V_2.

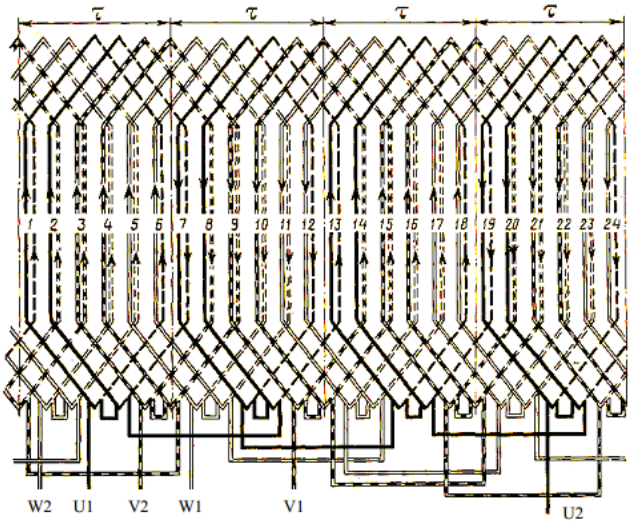


Рис. 2.5 - Схема двухслойной обмотки при *2p=4, z=24, q=2*

Двухслойные обмотки можно применять в двигателях независимо от мощности и напряжения сети. Эти обмотки позволяют выполнять укорочение шага на любое количество зубцовых делений. Для двигателей *2p=2* рекомендуется шаг по пазам $y=(0,6\div0,7)\cdot\tau$ ($\tau=Z1/2p$– полюсное деление в зубцовых делениях), для $2p>2$ $y\approx(0,8\div0,86)\cdot\tau$.

Рекомендуемые значения шага обмотки позволяют ослабить 5–ю и 7–ю гармоники магнитного поля. В двигателях мощностью до 15 кВт рекомендуется по технологическим соображениям использовать однослойные обмотки: шаблонные или концентрические.

Для построения схемы обмотки необходимо подготовить данные:

m – число фазных обмоток,

2*p* – число полюсов,

Z_1– число пазов статора,

q – число пазов на полюс и фазу,

y – шаг по пазам в зубцовых делениях,

a – число параллельных ветвей в фазной обмотке.

Шаг с укорочением:

$$У = 0,8 \cdot (Z_1/2p) = 0,8 \cdot 6 = 4,8 \approx 5 \quad (38)$$

Каждая фазная обмотка состоит из $2p=4$ катушечных групп, симметрично размещенных на каждом полюсном делении, каждая катушка состоит из q=2 катушек, всегда расположенных в соседних пазах и соединенных последовательно. В пазах (1–6) и (2–7) размещается 1–я катушечная группа, в пазах (7–12) и (8–13) – 2–я катушечная группа, в пазах (13–18) и (14–19) – 3–я группа, в пазах (19–24) и (20–1) – 4–я группа. Начало фазной обмотки (U_1) начинается с первой катушки (паз 1). Катушечные группы соединяются последовательно, но так, чтобы протекающий фазный ток создавал знакопеременное магнитное поле. Вывод 1–й катушечной группы (паз 7) соединяется с выводом 2–й катушечной группы, ввод 2–й катушечной группы соединяется с вводом 3–ей катушечной группы и т.д.

Начало 2–й фазной обмотки (W1) находится в пазу, отстоящем от 1–го паза на 120 эл. град. Номер этого паза определяется по формуле

$$N_2=N_1+2q \quad (39)$$

где N_1 – номер паза, в который входит начало 1–й фазной обмотки (U1).

Таким образом,

$$N_2=1+4=5$$

т.к. $N_1=1$.

Номер паза, в который входит начало 3–й фазной обмотки,

$$N_3=N_2+2q=5+4=9.$$

$$B=y/\tau=0,845 \quad (40)$$

Расчет размеров зубцовой зоны статора

Размеры пазов в электрических машинах должны быть выбраны таким образом, чтобы, во-первых, площадь поперечного сечения паза соответствовала количеству и размерам размещаемых в нем проводников обмотки с учетом всей изоляции, и во-вторых, чтобы значения индукций в зубцах и ярме статора находились в определенных пределах, зависящих от типа, мощности, исполнения машины и от марки электротехнической стали сердечника. Конфигурация пазов и зубцов определяется типом обмотки, который в свою очередь зависит от мощности, номинального напряжения и исполнения машины. Расчет размеров зубцовой зоны проводят по допустимым индукциям в ярме и в зубцах статора.

Обмотка из прямоугольного провода укладывается в прямоугольные пазы. Боковые стенки таких пазов параллельны, поэтому зубцы статора имеют трапецеидальное сечение, и индукция в них неравномерна.

Обычно задаются значениями допустимой индукции в ярме статора B_aи индукцией B_{Zmax}в наиболее узком сечении зубца b_{Zmin}, либо индукцией $B_{Z1/3}$в сечении зубца с шириной b_z1/3, взятом на расстоянии, равном 1/3 его высоты от наиболее узкой части зубца (рис. 4.6).

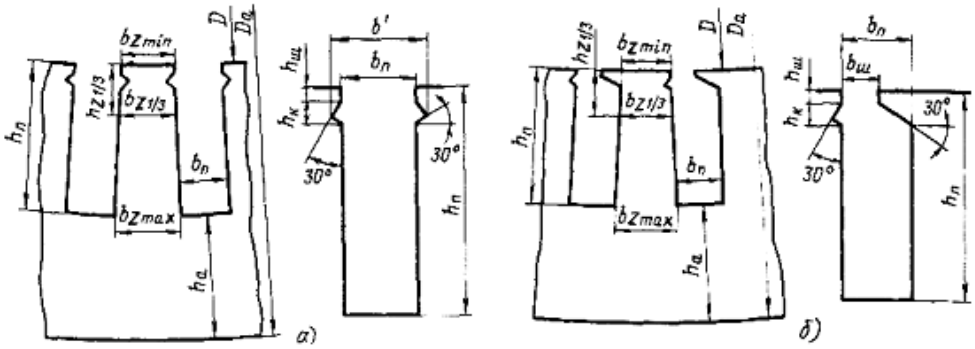


Рисунок2.6 - К расчету размеров прямоугольных пазов статора:
а –открытых; *б* – полуоткрытых

По выбранным значениям индукций определяются:

высота ярма статора, м,

$$h_a = \Phi / (2B_a \cdot l_{CT1} \cdot k_c) \qquad (41)$$

минимальная ширина зубца, м,

$$b_{Z1/3} = \frac{B_\delta t_{Z1} l_\delta}{B_{Z1max} l_{CT} k_c}, м \qquad (42)$$

или ширина зубца на расстоянии 1/3 его высоты от наиболее узкой части,

$$b_{Z1/3} = \frac{B_\delta t_{Z1} l_\delta}{B_{Z1/3} l_{CT} k_c}, м \qquad (43)$$

Значение коэффициента k_C заполнения сердечника сталью следует брать из табл. 2.5.

Таблица 2.5 - Допустимые значения индукции на участках магнитной цепи асинхронных двигателей, Тл

Участок магнитной цепи	Обозна–чение	Исполнение IP44 при числе полюсов 2*p*					Исполнение IP23 при числе полюсов 2*p*				
		2	4	6	8	10 и 12	2	4	6	8	10 и 12
Ярмо статора	B_a	1,4–1,6	1,4–1,6	1,4–1,6	1,15–1,35	1,1–1,2	1,4–1,6	1,45–1,6	1,45–1,6	1,2–1,4	1,1–1,3
Зубцы статора при постоянном сечении (обмотка из круглого провода)	B_{Z1}	1,6–1,9	1,6–1,9	1,6–1,9	1,6–1,9	1,6–1,8	1,8–2,05	1,8–2,05	1,7–1,95	1,7–1,9	1,6–1,9
Зубцы статора в наиболее узком сечении:											
при полуоткрытых пазах	B_{Z1max}	1,7–1,95	1,7–1,95	1,75–1,95	1,75–1,95	1,75–1,95	1,9–2,1	1,9–2,1	1,9–2,1	1,8–2	1,8–2
при открытых пазах	B_{Z1max}	1,6–1,9	1,6–1,9	1,6 –1,9	1,6–1,9	1,6–1,8	1,7–2	1,7–2	1,7–2	1,7–2	1,7–2
Ярмо ротора: короткозамкнутого	B_j	≤1,45	≤1,4	≤1,2	≤1	≤1	≤1,55	≤1,5	≤1,3	≤1,1	≤1,1
фазного	B_j	≤1,4	≤1,3	≤1,15	≤0,9	≤0,9	≤1,4	≤1,4	≤1,2	≤1	≤1
Зубцы ротора при постоянном сечении (трапецеидальные пазы)	B_{Z2}	1,7–1,95	1,7–1,95	1,7–1, 95	1,7–1, 95	1,7–1, 9	1,75–2	1,75–2	1,75–2	1,75–2	1,75–2
Зубцы ротора в наиболее узком сечении:											
короткозамкнутого	B_{Z2max}	1,5–1,7	1,5–1,7	1,6–1, 9	1,6–1, 9	1,6–1, 9	1,75–2	1,75–2	1,7–1,95	1,7–1,9	1,7–1,9
фазного	B_{Z2max}	1,75–2,1	1,75–2	1,7–1, 95	1,7–1, 95	1,7–1, 95	1,9–2,1	1,9–2,1	1,85–2,1	1,8–2,1	1,8–2

Таблица 2.6 - Способы изолирования листов электротехнической стали и коэффициентызаполнения сталью магнитопроводов статора и ротора асинхронныхдвигателей с номинальным напряжением до 660 В

Высота оси вращения, мм h	Статор		Короткозамкнутый ротор		Фазный ротор	
	Способ изолирования листов	k_C	Способ изолирования листов	k_C	Способ изолирования листов	k_C
50–250	Оксидирование	0,97	Оксидирование	0,97	Лакировка	0,95
280–355	Лакировка	0,95	Оксидирование	0,97		

Размеры паза вначале определяют без учета размеров и числа проводников обмотки, исходя только из допустимых значений индукций в зубцах и ярме статора:

высота паза, м,

$$h_n = \frac{D_a - D}{2} - h_a, \text{ м} \qquad (44)$$

ширина паза, м,

$$b_П = t_{Z1} - b_{Z1min} \qquad (45)$$

или:

$$b_П = \frac{\pi(D + \frac{2h_П}{3})}{Z_1} - b_{Z1/3} \qquad (46)$$

$$b_П \approx (0,4 \div 0,5)\, t_{Z1} \qquad (47)$$

Предварительно определенная ширина паза $b_П$ используется для выбора размеров обмоточного провода. Ширина проводника b должна быть меньше ширины паза на толщину всей изоляции с учетом допусков, т.е. корпусной, витковой (если она устанавливается в данной конструкции) и проводниковой ($2b_{ИЗ}$), а также припусков на сборку сердечников:

$$b = b_П - \Delta'_{из} \qquad (48)$$

где

$$\Delta'_{из} = 2b_{из} + \Delta b_П \qquad (49)$$

Если эффективный проводник обмотки состоит из двух элементарных проводников, то ширина каждого из них будет равна:

$$b = 0,5(b_П - \Delta'_{из}) \qquad (50)$$

Полученные при расчете заполнения паза его размеры являются размерами паза «в свету», т.е. размерами реального паза в собранном шихтованном сердечнике с учетом неизбежной при этом «гребенки», образующейся за счет допусков при штамповке листов и шихтовке магнитопроводов.

Размеры паза "в свету" будут меньше, чем в штампе, т.е. чем размеры паза в каждом отдельном листе после штамповки, на величину припусков, указанных в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Высота оси вращения h, мм	Припуски, мм	
	по ширине паза $\Delta b_П$	по высоте паза $\Delta h_П$
50–132	0,1	0,1
160–250	0,2	0,2
280–355	0,3	0,3
400–500	0,4	0,3

После того, как размеры паза установлены, определяют расчетные размеры зубцов b_{Zmin}, b_{Zmax}илиb и h_Z.

Обмотку из подразделенных катушек в машинах общего назначения с номинальным напряжением $U_Н$ 660В укладывают в полуоткрытые пазы. Ширина шлица паза $b_Ш$ выбирается из условия обеспечения свободной укладки полукатушек в паз, поэтому

$$b_Ш = 0{,}5b_П + (1{,}0 \div 1{,}5)\ мм \qquad (51)$$

Высоту шлица и высоту клиновой части паза выполняют в пределах

$h_Ш = 0{,}6–0{,}8$ *мм и* $h_К = 2{,}5 \div 3{,}5$ *мм*

- большие значения берутся при широких пазах и большей мощности двигателей.

Выбор размеров проводников, расчет заполнения паза и определение его размеров "в свету" и в штампе производят так же, как и для открытых пазов.

Выбор воздушного зазора

Правильный выбор воздушного зазора δ во многом определяет энергетические показатели асинхронного двигателя. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше его магнитное сопротивление и магнитное напряжение, составляющее основную часть МДС магнитной цепи всей машины.

Поэтому уменьшение зазора приводит к соответственному уменьшению МДС магнитной цепи и намагничивающего тока двигателя, благодаря чему возрастает его $cos\varphi$ и уменьшаются потери в меди обмотки статора. Но чрезмерное уменьшение δ приводит к возрастанию амплитуды пульсаций индукции в воздушном зазоре и, как следствие этого, к увеличению поверхностных и пульсационных потерь. Поэтому КПД двигателей с очень малыми зазорами не улучшается, а часто даже становится меньше.

В современных асинхронных двигателях зазор выбирают, исходя из минимума суммарных потерь. Так как при увеличении зазора потери в меди возрастают, а поверхностные и пульсационные уменьшаются, то существует оптимальное соотношение между параметрами, при котором сумма потерь будет наименьшей. При проектировании воздушный зазор следует выбирать, руководствуясь данными выпускаемых двигателей

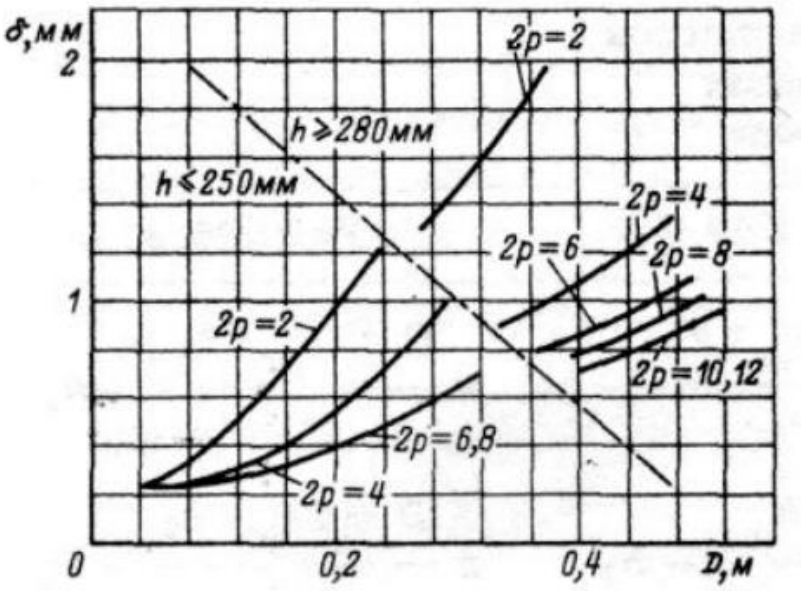


Рисунок2.7 - Выбор воздушного зазора асинхронных двигателей

Поверхностные и пульсационные потери в двигателях зависят не только от амплитуд, но и от частоты пульсаций индукции в воздушном зазоре. В быстроходных двигателях частота пульсаций больше, чем в тихоходных, так как она пропорциональна частоте вращения. Для уменьшения этого вида потерь δ в быстроходных двигателях выполняют большим, что уменьшает амплитуду пульсаций. В статорах высоковольтных машин применяют только открытые пазы, и при малых зазорах это может привести к большим пульсациям индукции, поэтому воздушный зазор в них выполняют большим, обычно равным 1,5—2мм. Воздушный зазор, полученный из графиков, следует округлять до *0,05 мм* при $\delta < 0,5$ *мм* и до *0,1 мм* при $\delta > 0,5$*мм*.

▪ 2.4 РАСЧЕТ РОТОРА

Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей делятся по конструкции и технологии изготовления на два типа: сварные и литые.

В сварных конструкциях стержни обмотки устанавливают в пазы, после чего с торцов ротора их замыкают, приваривая или припаивая замыкающие кольца. При литых конструкциях одновременно заливают как одно целое и стержни, и замыкающие кольца. На замыкающих кольцах отливают также вентиляционные лопатки, выполняющие роль вентилятора при работе машины.

Короткозамкнутые обмотки роторов в отличие от всех других существующих обмоток не имеют определенного числа фаз и числа полюсов.

В некоторых специальных машинах встречаются короткозамкнутые роторы с фазной, изолированной от корпуса обмоткой, начала и концы которой замкнуты между собой. Расчет такой обмотки аналогичен расчету обмотки фазного ротора.

Один и тот же ротор может работать в машинах, статоры которых выполнены на различные числа полюсов. Это, в частности, определило

возможность использования короткозамкнутых роторов в двигателях с регулированием частоты вращения путем переключения числа полюсов обмотки статора.

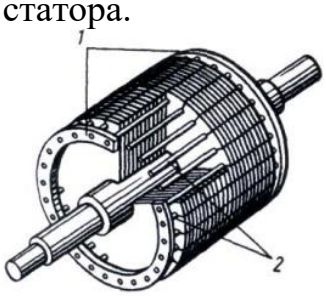


Рис 2.7 - Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя со сварной обмоткой: 1 — замыкающие кольца; 2 — стержни обмотки

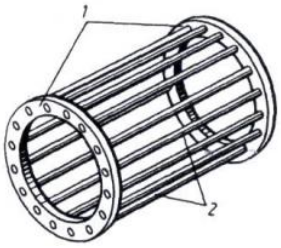


Рис. 2.8 - Короткозамкнутая обмотка асинхронного двигателя: 1 — замыкающие кольца; 2 — стержни обмотки

Обычно принято считать, что каждый стержень обмотки образует одну фазу короткозамкнутой обмотки. Тогда число ее фаз равно числу пазов ($m_2 = Z_2$) и обмотка каждой из фаз имеет 1/2 витка, т.е. $w_2 = 1/2$, так как при $m_2 = Z_2$ к каждой фазе относится один стержень с двумя участками замыкающих колец, расположенных с разных торцов ротора. Обмоточный коэффициент такой обмотки равен единице, а условное число пазов на полюс и фазу:

$$q_2 = \frac{Z_2}{2p_2 m_2} = \frac{1}{2p_2} \qquad (52)$$

При проектировании зубцовой зоны короткозамкнутых роторов особое внимание следует уделять выбору числа пазов ротора. Это объясняется тем, что в поле воздушного зазора машины кроме основной присутствует целый спектр гармоник более высокого порядка, каждая из которых наводит ЭДС в обмотке ротора, поэтому ток в стержнях обмотки имеет сложный гармонический состав.

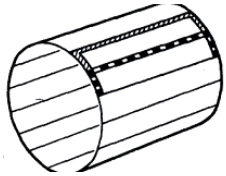


Рис. 2.9 - Фазы обмотки короткозамкнутого ротора

В результате взаимодействия токов и полей высших гармоник возникают электромагнитные моменты, которые при неблагоприятном соотношении Z_1и Z_2могут существенно ухудшать механическую характеристику двигателя, так как момент на валу машины является суммой моментов, обусловленных всеми взаимодействующими гармониками.

Исследования, проведенные для изучения влияния соотношений чисел зубцов на статоре и роторе на кривую момента, а также на шумы и вибрации, позволили определить наилучшие сочетания Z_1 и Z_2 для короткозамкнутых двигателей с различными числами $2p$.

Таблица 2.8 - Рекомендуемые числа пазов роторов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

2p	Число пазов статора	Число пазов ротора	
		без скоса пазов	со скосом пазов
	12	9* , 15*	—
	18	11* , 12*, 15* , 21*, 22	14*, (18), 19*, 22*, 26, 28*, (30), 31, 33, 34, 35
22	24	15* ,(16)*, 17*, 19, 32	18,20,26,31,33,34,35
	30	22, 38	(18), 20, 21, 23, 24, 37, 39, 40
	36	26, 28, 44, 46	25,27,29,43,45,47
	42	32, 33, 34, 50, 52	—
	48	38, 40, 56, 58	37,39,41,55,57, 59
4	12	9*	15*
	18	10* , 14*	18* , 22*
	24	15* , 16*, 17, (32)	16, 18, (20), 30, 33, 34, 35,36
	36	26, 44, 46	(24), 27, 28, 30, (32), 34, 45, 48
	42	(34), (50), 52, 54	(33), 34, (38), (51), 53
	48	34,38,56,58,62,64	(36) , (38) , (39) , 40, (44) , 57, 59
	60	50,52,68,70,74	48,49,51,56,64,69,71
	72	62,64,80,82,86	61,63,68,76,81,83
6	36	26,46, (48)	28*, 33,47,49,50
	54	44, 50, 64, 66, 68	42,43,51,65,67
	72	56,58,62,82,84,86,88	57,59,60,61,83,85,87,90
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	75, 77, 79, 101, 103, 105
8	48	(34), 36, 44, 62, 64	35,44,61,63,65
	72	56,58,86,88,90	56,57,59,85,87,89
	84	66, (68) , 70, 98, 100, 102, 104	(68), (69), (71), (97), (99),(101)
	96	78,82,110, 112, 114	79,80,81,83,109,111, 113
	60	44,46,74,76	57,69,77,78,79
	90	68,72,74,76, 104,106, 108,110,112,114	70,71,73,87,93,107,109
10	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104,106, 134, 136, 138,140,142,146	99,101, 103,117, 123,137,139
	72	56,64,80,88	69,75,80,89,91, 92
	90	68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110	(71), (73), 86, 87, 93, 94,(107),(109)
12	108	86,88,92,100,116,124,128,130,132	84,89,91,104, 105, 111,112,125,127
	144	124, 128, 136, 152, 160, 164,166, 168, 170, 172	125,127,141, 147, 161, 163

В двигателях малой мощности обычно выполняют $Z_2<Z_1$. Это объясняется рядом причин технологического характера, а также тем, что с увеличением Z_2 ток в стержнях ротора уменьшается и в двигателях небольшой мощности их сечения становятся очень малыми. В более крупных двигателях иногда выполняют $Z_2>Z_1$ с тем, чтобы ограничить чрезмерно большой ток в стержнях ротора и увеличить равномерность распределения проводников обмотки по длине расточки.

Ток в стержне определяется с учетом принятых для короткозамкнутой обмотки чисел фаз и витков в фазе, а также влияния скоса пазов, коэффициент приведения токов:

$$\nu_1 = \frac{m_1 w_1 k_{\text{ОБ}1}}{m_2 w_2 k_{\text{ОБ}2} k_{\text{СК}}} = \frac{2 m_1 w_1 k_{\text{ОБ}1}}{Z_2 k_{\text{СК}}} \qquad (53)$$

где $k_{СК}$ – коэффициент скоса, учитывающий уменьшение ЭДС обмотки при скошенных пазах ротора,

$$k_{СК} = \frac{2\sin(\frac{\gamma_{СК}}{2})}{\gamma_{СК}} \qquad (54)$$

где

$$\gamma_{СК} = \beta_{СК}\frac{2p}{z}; \quad \beta_{СК} = \frac{b_{СК}}{t_{Z2}} \qquad (55)$$

$b_{СК}$– скос пазов, мм.

Рекомендуется $b_{СК} = (0,5 \div 0,8)t_{Z1}$.

Сечение стержней, м,

$$q_c = \frac{I_2}{J_2}\ мм^2 \qquad (56)$$

Плотность тока в стержнях ротора машин закрытого обдуваемого исполнения при заливке пазов алюминием выбирается в пределах J_2 = (2,5 — 3,5) 10^6А/м^2, а при защищенном исполнении на 10—15 % выше, причем для машин больших мощностей следует принимать меньшие значения плотности тока.

В обмотке ротора, выполненной из медных стержней, плотность тока принимают несколько большей: $J_2 = (4,0 \div 8,0)\cdot 10^6$ А/м^2 (большие значения соответствуют машинам меньшей мощности).

Ток в короткозамыкающих кольцах находят, принемая направления токов в стержнях ротора I_{C1}, I_{C2}, I_{C3} ... и на участках замыкающих колец, соединяющих этих стержни, I_{12}, I_{23}, .I_{34}, как показано на рис. 5.5,*а*.

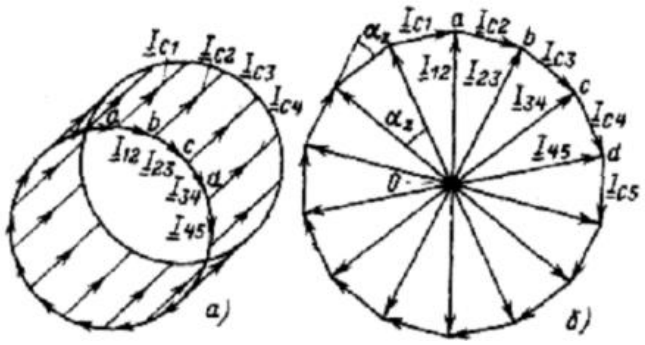


Рисунок2.9 - К расчету токов в замыкающих кольцах короткозамкнутой обмотки ротора: *а* — направления токов; *б* — векторная диаграмма токов обмотки:

$$\left.\begin{aligned} I_{C2} &= I_{12} - I_{23} \\ I_{C3} &= I_{23} - I_{34} \\ I_{C4} &= I_{34} - I_{45} \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \end{aligned}\right\}$$

Токи в стержнях сдвинуты относительно друг друга на угол

$$a_Z = 2p\pi / Z_2 \qquad (57)$$

Начертив многоугольник токов в стержнях, стороны которого являются векторами токов стержней, сдвинутых по фазе на угол a_Z, убеждаемся, что системе уравнений будут соответствовать направления токов на участках колец. Угол между их векторами тоже равен a_Z. Найдем соотношение между токами в стержнях и в участках колец, для чего рассмотрим один из

треугольников векторной диаграммы, образованный, например, векторами I_{12}, I_{23}, I_{C2}. Из этого треугольника имеем:

$$I_{c2} = 2I_{23}sina_Z/2 \qquad (58)$$

Так как это соотношение справедливо для любого из элементов диаграммы токов, то, обозначив токи в кольце $I_{КЛ}$, а токи в стержнях I_2, можем записать:

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta} \qquad (59)$$

где

$$\Delta = 2sin\frac{\pi p}{z_2} \qquad (60)$$

Выражение является расчетной формулой для определения тока в замыкающих кольцах короткозамкнутых роторов.

Плотность тока в замыкающих кольцах $J_{КЛ}$ выбирают в среднем на 15—20% меньше, чем в стержнях. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, замыкающие кольца, имеющие лучшие условия охлаждения по сравнению со стержнями, являются своего рода радиаторами, которые отводят тепло стержней, усиливая их охлаждение. Во-вторых, в машинах, в которых для улучшения пусковых характеристик используют эффект вытеснения тока, большое сопротивление замыкающих колец снижает кратность увеличения общего сопротивления обмотки ротора при пуске.

Площадь поперечного сечения замыкающих колец, м^2, определяется по формуле

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} \text{мм}^2 \qquad (61)$$

Замыкающие кольца в роторах со вставными стержнями из-за необходимости пайки или сварки их со стержнями устанавливают на некотором расстоянии от торцов ротора. Поперечное сечение колец представляет собой прямоугольник, размеры которого ($h_{КЛ}$и $b_{КЛ}$) выбирают таким образом, что

$$h_{КЛ} = (1,1 \div 1,25)\ h_{П2}.$$

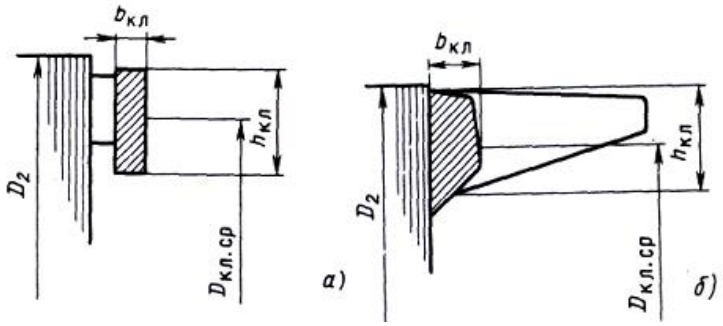


Рис. 2.10 - Размеры замыкающих колец короткозамкнутого ротора:
а — со сварной обмоткой; *б* — с литой обмоткой

В роторах с литой обмоткой замыкающие кольца, которые отливают одновременно с заливкой пазов, всегда плотно прилегают к торцам сердечника ротора. При этом они помимо своей основной функции выполняют и другую задачу: удерживают в спрессованном состоянии листы сердечника ротора. Замыкающие кольца литой обмотки обычно выполняют с поперечным

сечением в виде неправильной трапеции, прилегающей своим большим основанием к торцу ротора.

Ширину замыкающих колец обоих типов рассчитывают исходя из $q_{КЛ}$, полученной и выбранной $h_{КЛ}$, м:

$$b_{кл} = \frac{q_{кл}}{h_{кл}} мм \qquad (62)$$

Средний диаметр замыкающих колец, м, определяют по выражению

$$D_{к.ср} = D_2 - h_{кл} мм \qquad (63)$$

Одновременно с заливкой стержней и колец на замыкающих кольцах отливают вентиляционные лопатки длиной, несколько меньшей, чем длина вылета лобовых частей обмотки статора. Количество вентиляционных лопаток выбирают равным простому числу, приблизительно в 2—3 раза меньшему, чем число пазов ротора.

Форма паза и конструкция обмотки короткозамкнутого ротора определяются требованиями к пусковым характеристикам двигателя и его мощностью. В асинхронных двигателях мощностью до 50—60 кВт обычно выполняют грушевидные пазы и литую обмотку из алюминия. Размеры паза выбирают такими, чтобы зубцы ротора имели параллельные грани. Круглые пазы, применявшиеся ранее в машинах малой мощности, в настоящее время почти не применяют из-за получающейся большой неравномерности сечений зубцов.

Роторы более крупных машин с прямоугольными пазами выполняют с вставными медными стержнями или с литой алюминиевой обмоткой. Прямоугольные открытые пазы встречаются в короткозамкнутых роторах многополюсных асинхронных двигателей. Стержни обмотки, выполненные из алюминиевых шин прямоугольного сечения, устанавливают в открытые пазы ротора и закрепляют, расчеканивая их верхнюю часть.

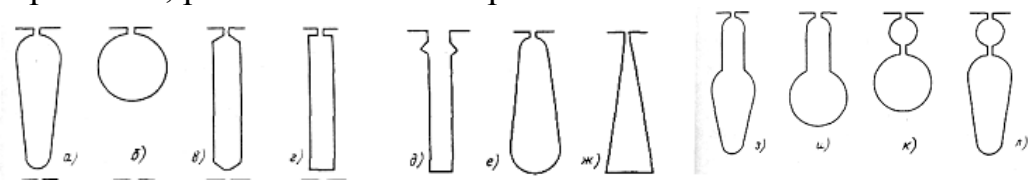


Рис. 2.11 - Конфигурации пазов короткозамкнутых асинхронных двигателей

Для увеличения пусковых моментов двигателей прямоугольные пазы делают узкими и глубокими, так как эффект вытеснения тока в них возрастает с увеличением высоты стержня. Роторы с такими пазами называют глубокопазными. В асинхронных двигателях при небольшом числе полюсов часто не удается получить требуемый пусковой момент даже при глубокопазных роторах, поэтому переходят к роторам с фигурными пазами.

Применяют различные конфигурации фигурных пазов. Все они имеют характерную особенность — уменьшенная ширина верхней части паза по сравнению с нижней, что позволяет в большей степени использовать эффект вытеснения тока при больших скольжениях. Короткозамкнутые обмотки роторов с пазами трапецеидальной формы выполняют как с заливкой пазов

алюминием, так и со сварной медной клеткой, для стержней которой используют шинную медь соответствующего профиля.

Обмотки со стержнями более сложной формы, например лопаточные стержни, выполняют заливкой алюминием или его сплавами. Колбообразные пазы с круглой нижней частью в настоящее время почти не применяют из-за менее удачного, чем при лопаточных пазах, использования стали зубцовой зоны.

Асинхронные двигатели, предназначенные для приводов механизмов с тяжелыми условиями пуска, часто выполняют с двухклеточными роторами, в которых на каждом зубцовом делении размещены один над другим два стержня. Каждая система стержней образует свою обмотку: верхние стержни, лежащие ближе к зазору - пусковую, а нижние - рабочую. Двойная клетка может быть выполнена в двух вариантах: с общими замыкающими кольцами, когда каждое кольцо замыкает одновременно стержни и пусковой, и рабочей клеток, либо с раздельными замыкающими кольцами. В последнем случае с каждого торца ротора располагают по два кольца, одно из которых замыкает только стержни пусковой, а другое – стержни рабочей клетки.

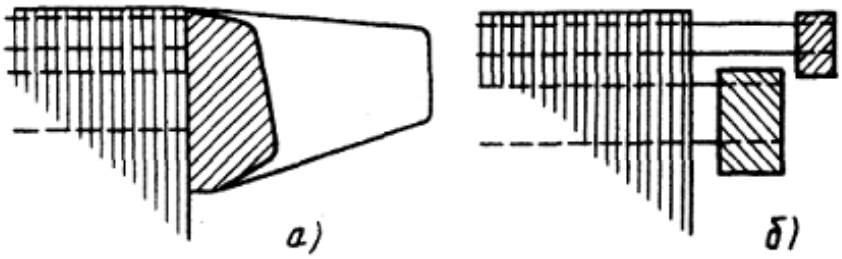


Рис. 2.12 - Замыкающие кольца двухклеточных короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей: *а* — общие; *б* — раздельные

Обычное исполнение двойной клетки — сварное с раздельными кольцами. Рабочая обмотка (стержни и короткозамыкающие кольца) в большинстве случаев изготовляется из меди, а пусковая — из латуни. Латунь для пусковой клетки применяют из-за больших удельного сопротивления и теплоемкости по сравнению с таковыми у меди.

Увеличение теплоемкости пусковой клетки особенно важно для машин с длительными тяжелыми пусками, за время которых выделенные в роторе потери могут нагреть пусковую обмотку до недопустимо высокой температуры. В современных машинах распространено также двухклеточное исполнение роторов с литыми обмотками. В таких конструкциях и пусковую, и рабочую клетки заливают одним металлом. Замыкающие кольца — общие, прилегающие к торцам ротора. Выбирая ту или иную конструкцию клетки, форму и размерные соотношения стержней, следует исходить из требований к пусковым характеристикам двигателей и возможности размещения паза на зубцовом делении ротора, при котором обеспечивается нормальный уровень индукции в зубцах и ярме. Кроме того, необходимо учитывать влияние размерных соотношений пазов на индуктивное сопротивление обмотки ротора.

При любой конфигурации паза уменьшение ширины верхней части стержней и увеличение их высоты приводят к увеличению пускового момента,

но одновременно увеличивается коэффициент магнитной проводимости паза и растет индуктивное сопротивление обмотки ротора. Это в некоторых случаях может играть положительную роль — как фактор, ограничивающий пусковые токи, но в то же время увеличение индуктивного сопротивления ротора приводит к ухудшению коэффициента мощности при номинальном режиме работы и к снижению M_{max}. То же характерно для двигателей с двухклеточными роторами, имеющими большие пусковые моменты, но низкие коэффициенты мощности при номинальном режиме, так как поток пазового рассеяния в перемычке между стержнями рабочей и пусковой клеток достигает больших значений. Поэтому для обеспечения высоких энергетических показателей номинального режима следует, прежде всего, ориентироваться на пазы ротора с широкой верхней частью — грушевидные.

Размеры паза ротора рассчитывают, исходя из требуемого сечения стержня q_C, полученного по допустимой индукции в зубце и из условия постоянства ширины зубца, т.е. параллельности его граней.

По допустимой индукции B_{Z2} определяют ширину зубца ротора:

$$b_{z2} = \frac{B_\delta t_{z2} l_\delta}{B_{z2} l_{\text{СТ}2} K_c} \quad мм \qquad (64)$$

Рассчитываем размеры паза:

$$b_{12} = \frac{\pi(D_2 - 2h_{\text{ш}} - 2h'_{\text{ш}}) - Z_2 b_{z2}}{\pi + Z_2} \quad мм \qquad (65)$$

$$b_{22} = \sqrt{\frac{b_{12}^2\left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4q_c}{\frac{Z_2}{\pi} - \pi/2}} = \quad мм \qquad (66)$$

$$h_{12} = (b_{12} - b_{22})\frac{Z_2}{2\pi} мм \qquad (67)$$

Размеры паза следует округлить до десятых долей миллиметра и уточнить площадь сечения стержня q_C:

$$q_c = \frac{\pi}{8}(b_{12}^2 + b_{22}^2) + \frac{1}{2}(b_{12} + b_{22})h_{12} \qquad (68)$$

Условия высококачественной заливки пазов алюминием требуют, чтобы диаметр закругления нижней части паза в двигателях с $h \leq 132$ мм был не менее 1,5 - 2 мм, в двигателях с $h \geq 160$ мм — не менее 2,5 - 3 мм.

В связи с округлениями результатов расчета необходимо просчитать ширину зубцов в сечениях b'_{Z2}и b''_{Z2}по окончательно принятым размерам паза:

$$b'_{z2} = \pi\frac{D_2 - 2(h_{\text{ш}} + h'_{\text{ш}}) - b_{12}}{Z_2} - b_{12} мм \qquad (69)$$

$$b''_{z2} = \frac{D_2 - 2h_{\text{п}2} + b_{22}}{Z_2} - b_{22} \qquad (70)$$

При небольшом расхождении размеров b'_{Z2}и b''_{Z2} в расчете магнитного напряжения зубцов ротора используется средняя ширина зубца:

$$b_{Z2} = (b'_{Z2} + b''_{Z2})/2. \qquad (71)$$

При заметных расхождениях расчет проводят так же, как для трапецеидальных зубцов ротора (см. ниже).

Расчетная высота зубца принимается равной

$$h_{Z2} = h_{П2} - 0{,}1b_{22} \qquad (72)$$

▪ 3 ОХРАНА ТРУДА

Часть, отражающая систему сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности.

▪ Список используемой литературы

Отражает используемую литературу, методические указания и все интернет ресурсы, с указанием фамилии, инициалов автора (или авторов), издательства, года издания. Список должен оформляться в алфавитном порядке с учетом хронологии, систематическим и т.д.

Рекомендуемая литература

1. Кацман, М.М. Лабораторные работы по электрическим машинам и электрическому приводу : учеб. пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования / М. М. Кацман. - 7-е изд., стер. - М. : Издательский центр "Академия", 2011. - 256с. - ISBN 978-5-7695-8195-3 5

3. Киреева, Э. А. Электроснабжение и электрооборудование промышленных предприятий : учебное пособие / Э. А. Киреева ; Э. А. Киреева . - М : Кнорус, 2011. - 368с. - библиогр. с. 366. - ISBN 978-5-406-00858-4 5

4. Сивков, А. А. Основы электроснабжения : учебное пособие для СПО / А. А. Сивков, А. С. Сайгаш, Д. Ю. Герасимов. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 173 с. — (Серия : Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-01344-3. — Эбс Юрайт Режим доступа : www.biblio-online.ru/book/892D4BAB-999E-4B8F-B2C6-F391EE9DAA7C.

5. Фролов, Ю. М. Основы электроснабжения / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. - СПб : Лань, 2012. - 432 с. - ISBN 978-5-8114-1385-0 Эбс Лань https://e.lanbook.com/book/4544#authors

6. Электротехника и электроника в 3 т. Том 3. Основы электроники и электрические измерения : учебник и практикум для СПО / Э. В. Кузнецов, Е. А. Куликова, П. С. Культиасов, В. П. Лунин ; под общ. ред. В. П. Лунина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 234 с. — (Серия : Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-03756-2. — Эбс Юрайт Режим доступа : www.biblio-online.ru/book/768A0873-283C-41F2-B4D0-6E87767A3848.

Перечень Интернет-ресурсов, необходимых для освоения дисциплины:

п/п	Наименованиеиздания	Доступ ресурса (ИБЦ (ВолгГТУ), ИБЦ (ИАиС))
1	БиблиотекаВолгГТУ	http://library.vstu.ru/
2	Библиотека ИАиС ВолгГТУ	http://lib.vgasu.ru
3	ЭБС «Лань»	http://e.lanbook.com/
4	ЭБС «Юрайт»	https://www.biblio-online.ru
5	Научная электронная библиотека «ELIBRARY.RU»	http://elibrary.ru

Периодические издания:

1. Arctic Environmental Research. Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова.
2. Электротехнические и информационные комплексы и системы. Уфимский государственный университет экономики и сервис.
3. Электротехнические и информационные комплексы и системы. Уфимский государственный университет экономики и сервис.
4. Автоматика на транспорте. Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I.
5. Электротехнические и информационные комплексы и системы. Уфимский государственный университет экономики и сервис.
6. Экология и безопасность жизнедеятельности. Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет.
7. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника.
8. Экономические и социально-гуманитарные исследования. Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».
9. Электротехнические и информационные комплексы и системы. Уфимский государственный университет экономики и сервис.
10. Journal of Economics and Social Sciences. Томский политехнический университет.
11. Актуальные проблемы в машиностроении. Новосибирский государственный технический университет.