

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
“ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА  
I”

---

Кафедра «Электромеханические комплексы и системы»

**Е.Г. Серeda**

**Б1.Б.50 «ТЯГОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»**

**Методические материалы для выполнения практических занятий**

по специальности  
23.05.03 «Подвижной состав железных дорог»

по специализации  
«Электрический транспорт железных дорог»

Форма обучения – очная, очно-заочная, заочная

Санкт-Петербург  
2016

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	
1. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ.....	
1.1 Основные серии асинхронных двигателей. Особенности конструктивного исполнения.....	
1.2 Задание на проектирование.....	
1.3 Требования к оформлению.....	
1.4 Основное уравнение проектирования.....	
2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ.....	
2.1 Выбор главных размеров.....	
2.2 Расчет размеров зубцовой зоны статора для обмоток из круглого провода.....	
2.3 Расчет размеров зубцовой зоны статора для обмоток из прямоугольного провода.....	
2.4 Выбор воздушного зазора.....	
2.5 Расчет ротора.....	
2.6 Расчет зубцовой зоны ротора.....	
2.7 Расчет сердечника ротора.....	
2.8 Расчет магнитной цепи.....	
2.9 Расчет параметров схемы замещения.....	
2.10 Потери и КПД.....	
2.11 Расчет рабочих характеристик.....	
2.12 Расчет пусковых характеристик.....	
2.12.1 Параметры с учетом вытеснения тока.....	
2.12.2 Учет влияния насыщения на параметры.....	
3. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	
4. МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВАЛА.....	
4.1 Расчет вала на жесткость.....	
4.2 Расчет вала на прочность.....	
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ ОБМОТОК.....	
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. СТАНДАРТНЫЕ МОЩНОСТИ АСИНХРОННЫХ МАШИН, СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ, ГАБАРИТНЫЕ И УСТАНОВОЧНО-ПРИСОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ.....	
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА.....	
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. КРИВЫЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ.....	
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. СТАНДАРТНЫЕ ИЗДЕЛИЯ (МУФТЫ, ШПОНКИ)...	

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Процесс создания электромеханического преобразователя энергии (ЭМПЭ), или электрической машины включает в себя ее проектирование, изготовление и испытания. При проектировании электромеханического преобразователя энергии решаются задачи выбора и расчета главных размеров, параметров обмоток, рабочих и других характеристик, узлов и деталей, делается технико-экономическое обоснование выбора материалов для их изготовления. Отдельным этапом проектирования являются тепловые и вентиляционные расчеты. В задачи проектирования могут входить механические расчеты основных и наиболее ответственных деталей и узлов.

Выполнение этих задач базируется на опыте создания существующих электромеханических преобразователей и опыте, используемом в мировой практике. В общем случае расчет электрической машины представляет собой задачу, которая может иметь несколько практически равноценных решений. Окончательный выбор конструкции и значений параметров производится путем сравнения различных вариантов по некоторым критериям, в основе которых лежат технико-экономические показатели, например КПД,  $\cos \varphi$ , удельный расход материалов, кратности пускового тока и пускового момента.

Вновь проектируемая машина по технико-экономическим показателям должна *превосходить* аналоги с близкими номинальными данными.

Современные асинхронные двигатели общего назначения проектируются сериями, представляющими собой ряд со стройно нарастающими основными параметрами - мощностью и геометрическими размерами.

В пособии рассматриваются двигатели серии 4А (АИ) мощностью от 0,18 кВт до 400 кВт и высотой оси вращения  $h = (56 \div 355)$  мм напряжением до 660 В включительно.

Курсовое проектирование для студентов является одним из важнейших этапов в изучении теории электрических машин. Поэтому материал в пособии изложен применительно к расчету единичной машины, так как при такой постановке задачи глубже усваиваются особенности самого проектирования, связь с физическими процессами, требованиями к характеристикам, всевозможными ограничениями и др. Проектирование серий электрических машин имеет свои особенности, которые в пособии не рассматриваются.

Для удобства пользования формулы, по которым непосредственно производится расчет, в данном пособии имеют сквозную нумерацию. Расчетные формулы приводятся без вывода, но по возможности дается их физическое обоснование. При расчетах следует особое внимание обращать на

размерности величин, входящих в формулы, так как значения некоторых параметров иногда приводятся в общепринятых в электромашиностроении единицах: размеры - в миллиметрах, плотность тока - в амперах на миллиметр в квадрате. Следовательно, при подстановке таких значений в формулы их необходимо перевести в основные единицы (м, А/м<sup>2</sup>, и т. д.).

Необходимые справочные материалы представлены в виде таблиц, графиков и приложений. Материал и обозначения соответствуют в основном книге И.П. Копылова «Проектирование электрических машин».

## СТАНДАРТИЗАЦИЯ В ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИИ

Технические требования к конструктивному исполнению, размерам, параметрам, методам и средствам испытаний электрических машин определяются стандартами. Основными регламентирующими документами в области стандартизации в электротехнике являются стандарты Международной организации по стандартизации (ИСО) и Международной электротехнической комиссии (МЭК). Все российские стандарты составлены с учетом требований ИСО и МЭК.

### Исполнение электромеханических преобразователей энергии

**1. Режимы работы.** Номинальные данные электрических машин должны соответствовать определенному режиму работы. ГОСТ 183-74 предусматривает восемь режимов работы, которые обозначаются S1 – S8.

S1 – продолжительный режим работы при постоянной нагрузке.

S2 – кратковременный режим работы при постоянной нагрузке, причем за время отключения машина успевает охладиться до температуры окружающей среды.

S3 – повторно – кратковременный режим работы. Характеризуется последовательностью идентичных циклов, каждый из которых состоит из периодов работы при постоянной нагрузке и периодов отключения, причем длительность периодов отключения недостаточна для снижения температуры машины до значения, соответствующего тепловому равновесию за время одного цикла.

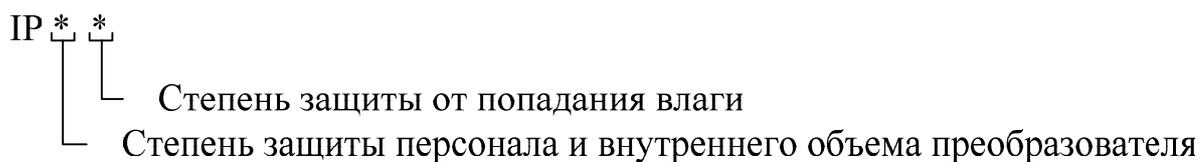
S4 – S8 – повторно – перемежающиеся режимы.

**2. Номинальные мощности.** Шкала номинальных мощностей электрических машин установлена ГОСТ 12139-74 и приведена в табл. П.1.

**3. Номинальные напряжения.** Для асинхронных двигателей ГОСТ 21128-75 и ГОСТ 721-77 устанавливают следующие номинальные напряжения: 127, 220, 380, 660, 6000, 10000 В при трехфазном напряжении питания.

**Номинальные частоты вращения поля статора (индуктора).** Регламентированы ГОСТ 10683-73. Для синхронных генераторов и асинхронных двигателей при частоте 50 Гц частоты вращения магнитного поля ста-

тора (индуктора) имеют следующие значения: 125; 150; 187,5; 214,3; 250;



300; 375; 428,6; 500; 600; 750; 1000; 1500; 3000 об/мин.

**4. Установочные и присоединительные размеры.** Регламентируются ГОСТ 13267-73. Основным размером является высота оси вращения  $h$ . К каждому значению  $h$  привязаны определенные установочно-присоединительные размеры, некоторые из которых приведены в табл. П.2. Характерные особенности электрической машины указываются в паспорте.

**5. Степень защиты от воздействия окружающей среды** обозначается латинскими буквами IP (ГОСТ 14254-80).

Первая цифра (от 0 до 6), стоящая после обозначения степени защиты характеризует защиту обслуживающего персонала от вращающихся и токоведущих частей, а также от попадания посторонних предметов внутрь преобразователя:

- 0 – специальная защита отсутствует
- 1 – защита обслуживающего персонала и внутреннего объема от предметов с максимальным размером не более 50 мм;
- 2 – защита обслуживающего персонала и внутреннего объема от предметов с максимальным размером не более 12,5 мм;
- .....
- ...
- 4 – защита обслуживающего персонала и внутреннего объема от предметов с максимальным размером не более 1 мм;
- 5 – Неполная защита от пыли, однако проникновение пыли не нарушает работы машины;
- 6 – машина герметичного исполнения.

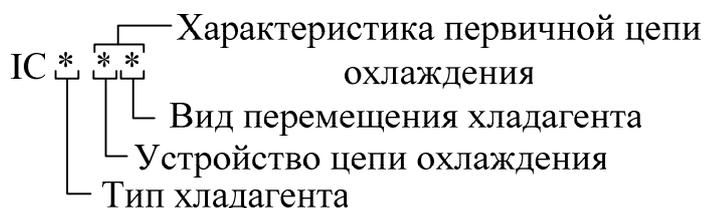
Вторая цифра (от 0 до 8), соответствует степени защиты от попадания влаги внутрь машины:

- 0 – специальная защита отсутствует;
- 1 – защита от капель воды, падающих вертикально;
- 2 – защита от капель воды, падающих под углом не более  $15^\circ$  к вертикали;
- 3 – защита от дождя, падающего под углом до  $60^\circ$  к вертикали;
- 4 – защита от водяных брызг;
- .....
- .....
- 8 – защита от влаги при длительном погружении в жидкую среду.

Например, степень защиты IP23 обеспечивает защиту машины от попадания внутрь предметов с максимальным размером до 12,5 мм и защи-

щает внутренний объем от дождя, падающего под углом не более 60° к вертикали.

**6. Способ охлаждения** (ГОСТ 20495-75) обозначается латинскими буквами IC.



После обозначения IC указывается тип хладагента (вещества - охладителя). Основные типы хладагентов представлены в табл. 1. После буквенного обозначения типа хладагента указывается характеристика цепи охлаждения, состоящая из двух цифр. Преобразователь может содержать несколько цепей охлаждения, в этом случае на первом месте стоит характеристика вторичного хладагента, температура которого ниже.

Таблица 1.

Основные типы хладагентов

Условное обозначение	Наименование
(A)	Воздух
H	Водород
N	Азот
C	Углекислый газ (CO <sub>2</sub> )
F	Фреон
W	Вода
U	Масло
Kr	Керосин

Первая цифра (от 0 до 9) характеризует устройство цепи охлаждения, например:

0 – свободная циркуляция хладагента;

1 – имеется входной канал или входная труба;

2 – имеется выходной канал или труба.

4 – в качестве цепи охлаждения используется наружная поверхность преобразователя;

5 – в качестве цепи охлаждения используются трубы на наружной поверхности машины;

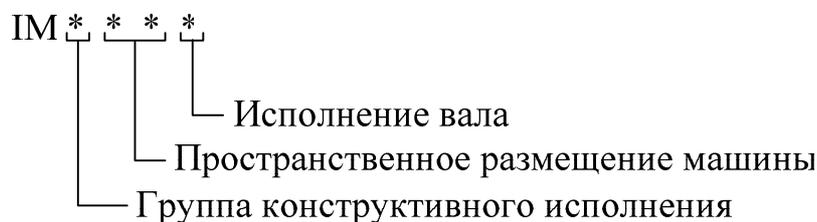
Вторая цифра (от 0 до 9) характеризует вид перемещения хладагента, например:

0 – естественное прохождение воздуха;

1 – свободная конвекция;

Например, у асинхронных машин чаще всего используются один из двух способов охлаждения: ICA 01 – машина с одной цепью охлаждения и самовентилярованием (рис.1,а); ICA 0141 – машина с двумя цепями охлаждения (рис.1,б).

**7. Способ монтажа.** (ГОСТ 2479-79). Условное обозначение способа конструктивного исполнения – ИМ.



После символа конструктивного исполнения указываются четыре цифры, характеризующие это исполнение:

Например, асинхронные двигатели имеют в основном следующие конструктивные исполнения: ИМ1001 – машина с двумя подшипниковыми щитами, на лапах и одним выходным концом вала; ИМ2001 – то же самое, только с фланцем на одном подшипниковом щите; ИМ3001 – машина с подшипниковыми щитами с фланцем на одном подшипниковом щите, без лап, и одним выходным концом вала.

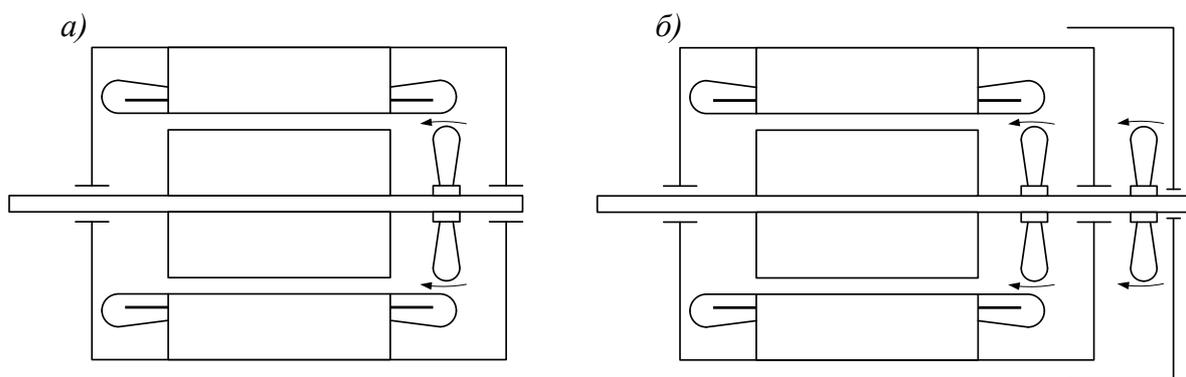


Рис.1. Основные способы охлаждения асинхронных машин

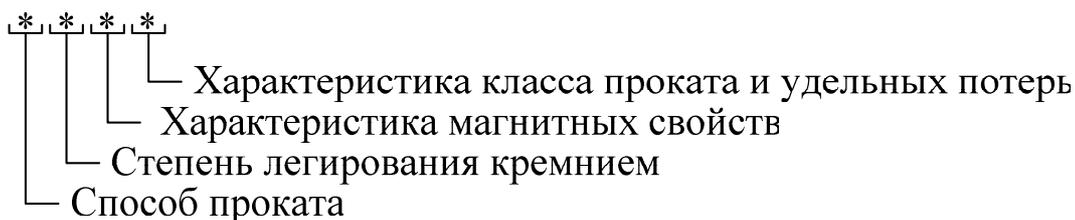
## МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ АСИНХРОННЫХ МАШИН

К основным материалам для изготовления асинхронных машин относятся магнитные, проводниковые, изоляционные, обмоточные провода, конструкционные материалы.

### Магнитные материалы

К магнитным материалам, применяемым в производстве асинхронных электрических машин, относятся магнитомягкие листовые электротехнические стали, толстолистовая сталь 3 и ковкая сталь 5.

Электротехнические стали (ГОСТ 214270 – 75) выпускаются трех основных классов и маркируются четырехзначными числами.



По способу проката электротехнические стали бывают горячекатаными изотропными – (ГКИ первая цифра – 1), холоднокатаными изотропными – (ХКИ первая цифра – 2), холоднокатаными анизотропными – (ХКА первая цифра – 3).

По степени легирования в зависимости от процентного содержания кремния стали маркируют следующим образом:

- до 0,4 % кремния – вторая цифра – 0;
- от 0,4 % до 0,8 % – вторая цифра – 1;
- от 0,8 % до 1,8 % – вторая цифра – 2;
- .....
- от 3,8 % до 4,8 % – вторая цифра – 5.

Свойства электротехнической стали зависят от содержания кремния. Сталь с низким его содержанием имеет меньшую магнитную проницаемость и большие потери, а также большую индукцию насыщения. Стали с высоким содержанием кремния имеют меньшие потери на гистерезис и вихревые токи, высокую магнитную проницаемость в слабых полях и повышенное удельное электрическое сопротивление. Кроме того, легирование стали кремнием, увеличивает ее хрупкость.

Третья цифра в обозначении марки электротехнической стали характеризует её магнитные свойства, т.е. условия при которой была получена основная нормируемая характеристика (ОНХ), по которой определяются удельные потери:

- 0 – ОНХ рассчитывалась при индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц;
- 1 – ОНХ рассчитывалась при индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц;
- 2 – ОНХ рассчитывалась при индукции 1 Тл и частоте 400 Гц, и т.д.

Четвертая цифра показывает класс проката, по которому вычисляется величина удельных потерь.

Холоднокатаные изотропные стали используются для изготовления сердечников статоров и роторов асинхронных электрических машин мощностью до 100 кВт. Для изготовления магнитопроводов крупных электрических машин, кроме сердечников полюсов, используются горячекатаные стали. Стали ГКИ имеют меньшую индукцию насыщения, по сравнению с ХКИ, т.е. для проведения одного и того же магнитного потока требуется больше горячекатаной стали, чем холоднокатаной.

Для производства сердечников асинхронных машин используется в основном сталь 2013.

Электротехнические стали поставляются на заводы – производители электрических машин в виде рулонов. Толщина рулонной стали 0,28; 0,3; 0,35; 0,5; 1,0 мм. Все стали поставляются в термически обработанном виде с электроизоляционным покрытием (лаковое или оксидная пленка).

### **Проводниковые материалы**

К проводниковым материалам относятся медь, сплавы на ее основе, алюминий и его сплавы.

Из медных проводов (содержание меди 99,9 %) изготавливаются обмотки машин переменного и постоянного тока, из алюминия - литые роторные обмотки асинхронных машин с короткозамкнутым ротором. Из алюминиевых проводов изготавливают обмотки специальных асинхронных машин и обмотки трансформаторов мощностью до 16 МВА. Из бронзы и латуни изготавливаются пусковые обмотки синхронных машин и роторные обмотки крупных асинхронных машин с короткозамкнутым ротором.

В последние годы исследуется возможность использования ферромагнитных проводов для изготовления обмоток электрических машин. Однако это сопряжено с определенными трудностями; удельное сопротивление таких проводов в два раза больше, чем у медных.

### **Изоляционные материалы**

Стоимость электроизоляционных материалов составляет 20 – 30 % от стоимости преобразователя. Выбор изоляции зависит в основном от мощности, питающего (снимаемого) напряжения, климатических условий. Все электроизоляционные материалы делятся на классы (табл. 2). В основу такого деления положена нагревостойкость – способность материала сохранять свои свойства при установленной для конкретного класса температуре. При эксплуатации преобразователей следует учитывать и другие свойства электроизоляционных материалов: электрическую и механическую прочность, влагостойкость и т.п.

Таблица 2

Классы нагревостойкости

Класс нагревостойкости	Y	A	E	B	F	H	R,C
Допустимая температура, °C	90	105	120	130	155	180	более 180

В электротехнической промышленности наиболее распространенными материалами для нормальных климатических условий являются изоляционные материалы классов B и F. Изоляция класса H используется в преобразователях эксплуатируемых в тяжелых условиях. Изоляция и обмоточные провода класса A используются в трансформаторах.

Для указанных классов изоляции применяются следующие материалы:

1. Неорганические волокнистые материалы – стекловолокно и материалы на его основе. Они обладают высокой механической и электрической прочностью, малогигроскопичны, но неустойчивы к перегибам и изломам. Используются в высоковольтных электрических машинах ( $U_{\text{номин}} > 660 \text{ В}$ ). Стеклонить, стеклотента применяются для бандажа вращающихся обмоток в пазовых и лобовых частях. К проводам с изоляцией на основе неорганических волокнистых материалов относятся ПСД – классы нагревостойкости В, F, ПСДК – класс Н.

2. Материалы на основе слюды: слюдопласты, миканиты, слюдиниты. Эти материалы на различных подложках образуют большую композицию материалов.

3. Синтетические бумаги и лаки. Наиболее удобны в производстве электрических машин, так как обеспечивают необходимую механическую и электрическую прочность при меньшей толщине по сравнению со стекловолокном. Используются как пазовая изоляция и изоляция обмоточных проводов (витковая изоляция).

Провода с изоляцией на основе синтетических лаков, применяемые для изготовления обмоток асинхронных машин:

Класс В ( $U_{\text{ном}} \leq 660 \text{ В}$ )

ПЭТВ-2 – провод, с изоляцией, пропитанной эмаль-лаком (ПЭ-939),

ПЭТВМ – провод для механизированной укладки (диаметр до 1,4 мм).

Класс F ( $U_{\text{ном}} \leq 660 \text{ В}$ )

ПЭТ-155 – провод с эмалевой изоляцией на полиэфиримидной основе,

ПЭТМ – то же самое, для механизированной укладки.

Класс Н

ПЭТ-имид ( $U_{\text{ном}} \leq 660 \text{ В}$ ),

ПЭТВСД ( $U_{\text{ном}} > 660 \text{ В}$ ).

### **Конструкционные материалы**

К конструкционным материалам относятся материалы, идущие на производство элементов конструкции, несущих механические нагрузки, обеспечивающих соединение преобразователя в единое целое. Их делят на три группы: черные металлы, цветные металлы, пластмассы.

К черным металлам относятся стали и чугуны. Из стального литья и проката изготавливаются станины. Из стальных поковок – валы электрических машин, роторы синхронных неявнополюсных генераторов. Стальное литье идет также на производство подшипниковых щитов, втулок, крышек, работающих с высокими механическими нагрузками.

Серые чугуны СЧ12-28, СЧ15-32 применяются для изготовления станин асинхронных и синхронных машин и подшипниковых щитов.

Из стали 25Л и 35Л изготавливаются ответственные детали: втулки, шестерни, а также болты, гайки, пальцы щеткодержателей. Из листовой стали изготавливаются диффузоры, фундаментные плиты и многие другие детали. Луженая сталь, устойчивая к коррозии, идет на производство бандажей, крепок, табличек.

Алюминиевые сплавы АЛ2 и АЛ9 применяются для изготовления подшипниковых щитов, станин, втулок, вентиляторов. Детали из алюминиевых сплавов легче стальных и чугунных, но ненадежность резьбы в них вызывает необходимость армирования стальными втулками.

Сплавы с содержанием меди – латуни идут на производство щеткодержателей, щеточных пальцев и других токоведущих деталей.

## **1. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

### **1.1 Основные серии асинхронных двигателей.**

#### **Особенности конструктивного исполнения**

Асинхронные двигатели являются основными двигателями в электроприводах практически на всех промышленных предприятиях и на транспорте. Асинхронные машины изготавливаются сериями. В серию входят машины разных мощностей, скоростей вращения, исполнений.

Наиболее массовой серией таких двигателей, выпускавшихся в СССР в 80-е годы XX в. была серия 4А. Двигатели этой серии до сих пор эксплуатируются почти на всех промышленных предприятиях России. Серия охватывает диапазон мощностей от 0,18 до 400 кВт, и построена на 17 стандартных высотах оси вращения  $h$ . У двигателей мощностью до 15 кВт включительно обмотка статора имеет три вывода:  $U1$ ,  $V1$ ,  $W1$ , у более мощных – шесть выводов:  $U1$ ,  $U2$  – фаза А;  $V1$ ,  $V2$  – фаза В;  $W1$ ,  $W2$  – фаза С. Наличие шести выводных клемм дает возможность осуществить пуск двигателя переключением обмоток со схемы «звезда» на схему «треугольник».

Большинство двигателей серии 4А имеет степень защиты IP44, способ их монтажа IM1001. Корпус этих двигателей выполнен с наружными продольными радиальными ребрами, которые увеличивают поверхность охлаждения и улучшают отвод тепла в окружающее пространство. При высоте оси вращения  $h \leq 63$  мм корпус изготавливается из алюминиевого сплава в виде оболочки, подшипниковые щиты также из алюминиевого сплава. Если  $h = 71 - 100$  мм, то корпуса двигателей выполняются из алюминия, подшипниковые щиты - из чугуна. При большей высоте оси вращения станина изготавливается в виде фигурного наружного профиля. При высоте оси вращения  $h \geq 280$  мм станина и подшипниковые щиты изготавливаются из стального проката или литья. При высоте оси вращения  $h < 315$  мм внутренняя поверхность станины гладкая. При высоте оси вращения  $h \geq 315$  мм внутренняя поверхность станины выполняется с продольными ребрами для улучшения охлаждения. Корпуса и подшипниковые щиты асинхронных двигателей со степенью защиты IP23 стальные.

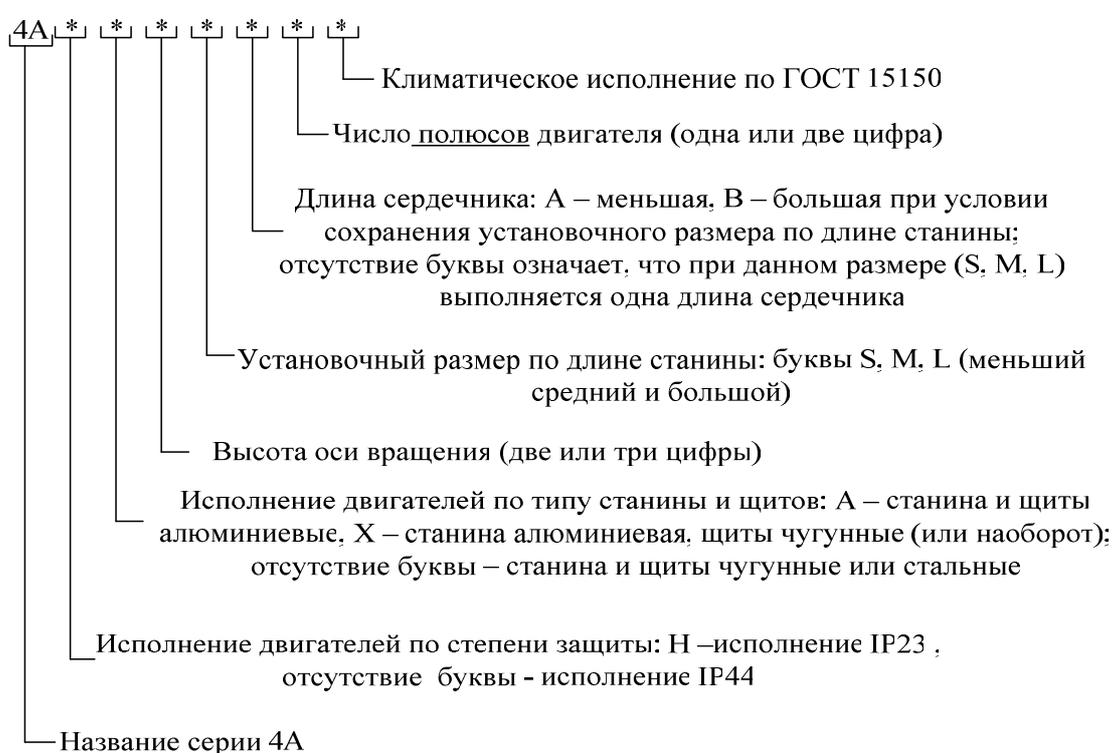
На противоположном от рабочего конце вала укрепляется вентилятор, прогоняющий охлаждающий воздух вдоль ребер корпуса. Вентилятор закрыт кожухом с отверстиями для прохода воздуха. У двигателей с высотой оси вращения менее 71 мм включительно вентилятор и кожух пластмассовые, у более крупных вентилятор литой из алюминиевого сплава, а кожух штампованный из тонкой листовой стали. У двигателей со степенью защиты IP23 обычного исполнения вентилятор не устанавливается.

Магнитопроводы двигателей – шихтованные из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, у двигателей с  $h = 50 - 250$  мм из стали 2013, у двигателей с  $h = 280 - 355$  мм – из стали 2312.

Во всех двигателях серии с  $h < 280$  мм и  $2p = 10, 12$  при любой высоте вращения обмотка статора выполняется из круглого провода и укладывается в трапециевидные полузакрытые пазы. В остальных случаях она наматывается проводом прямоугольного сечения и укладывается в прямоугольные полуоткрытые или открытые пазы.

Сердечник ротора при  $h \leq 250$  мм напрессовывается на гладкий вал без промежуточной втулки, при  $h > 250$  мм он крепится с помощью втулки. Обмотка короткозамкнутого ротора, лопатки и кольца – литые из алюминия.

В серии 4А принята следующая система обозначений двигателей, состоящая из восьми символов:



Модифицированные двигатели и двигатели специального исполнения построены на основной базе и имеют те же принципиальные конструктивные решения основных элементов. Основные модификации двигателей серии 4А:

4АР – двигатели с повышенным пусковым моментом. Имеют специальную форму паза ротора или "двойную беличью клетку";

4АС – двигатели с повышенным скольжением. Имеют уменьшенные размеры паза ротора или для обмотки ротора используется специальный сплав с повышенным удельным сопротивлением;

4АНК, 4АК – двигатели с фазным ротором. В пазы ротора укладывается трехфазная симметричная обмотка, которая обычно соединяется по схеме «звезда», концы фаз выводятся на контактные кольца. Такая конст-

рукция ротора позволяет получать большие пусковые моменты и регулировать скорость вращения двигателя.

Существуют модификации двигателей для работы в сети с частотой напряжения 60 Гц, со встроенными электромагнитным тормозом, температурной защитой, многоскоростные двигатели с несколькими обмотками на статоре, частотно-управляемые и т. д., которые имеют свои особенности расчета.

При разработке новой отечественной серии асинхронных машин, которая получила обозначение АИ, были приняты общие для большинства зарубежных стран шкалы мощностей и высот оси вращения, рекомендованные международной электротехнической комиссией (МЭК). Однако вопрос об унификации и взаимной увязке мощностей двигателей и их установочно-присоединительных размеров пока не решен. В настоящее время в мире существует три стандарта увязки: стандарт NEMA, принятый в США, стандарт CENELEC, применяемый в Евросоюзе и стандарт «Интерэлектро» (документ РС-3031), который действует в России. Поэтому двигатели серии АИ выпускаются двух систем увязки: АИР – двигатели для внутрироссийских поставок (увязка по РС-3031) и АИС – экспортный вариант АИ с увязкой по CENELEC.

Двигатели серии АИР предназначены для приводов вновь создаваемого оборудования и замены двигателей серии 4А. Структура обозначения двигателей серии АИ аналогична принятой для серии 4А с некоторыми отличиями в индексации.

## 1.2 Задание на проектирование

Техническое задание на учебное проектирование асинхронного двигателя должно содержать **номинальные** данные проектируемой машины:

- номинальную мощность  $P_{2\text{ном}}$ ,
- номинальное фазное (для обмоток, соединенных по схеме «треугольник») или линейное (для обмоток, соединенных по схеме «звезда») напряжение  $U_{1\text{ном}}$ ,
- номинальную частоту вращения ротора  $n_{2\text{ном}}$  (скольжение  $s_{\text{ном}}$ ) или синхронную частоту вращения ротора (частоту вращения поля)  $n_1$ ,
- частоту питающей сети  $f$ ,
- количество фаз статора  $m$  и способ их соединения;
- сведения о конструкции, режиме работы, исполнении по способу монтажа, степени защиты от воздействия окружающей среды и системе охлаждения. Кроме того, могут быть заданы дополнительные требования к проектируемому двигателю, например кратности максимального и минимального моментов, предельные значения пускового тока и т.п.

Проектирование новой машины начинают с выбора аналога – модели, на которую ориентируются при проведении всех расчетов, начиная с вы-

бора главных размеров, и при разработке конструкции отдельных узлов. За базовую обычно выбирается конструкция двигателя одной из новых серий, выпускаемых в настоящее время. **При учебном проектировании асинхронных двигателей общего назначения малой и средней мощности (до 400 кВт) в качестве базовых моделей следует выбирать двигатели серии 4А или АИ, технические данные которых представлены в табл. П.2.2, в исполнении, предусмотренном в техническом задании.**

В начальной стадии проектирования при выборе главных размеров и электромагнитных нагрузок необходимо учесть дополнительные требования технического задания. Например, если проектируемая машина должна иметь большой максимальный момент, то индуктивное сопротивление ее обмоток не должно быть большим, поэтому в такой машине нецелесообразно выбирать малое значение индукций, большую линейную нагрузку и т. п.

Требования к пусковым характеристикам следует обязательно учитывать при выборе конфигурации пазов короткозамкнутого ротора. Так, узкие и глубокие пазы с сужающейся верхней частью обеспечивают большее увеличение расчетного активного сопротивления ротора при пуске и большие пусковые моменты, но при таких пазах возрастает индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора и уменьшаются перегрузочная способность двигателя и коэффициент мощности при номинальном режиме.

Полностью учесть все требования технического задания к характеристикам двигателя при выборе размеров магнитопровода и обмотки машины, не ориентируясь на данные выпущенных машин, невозможно. Поэтому перед началом расчета следует детально изучить конструкцию аналога, критически оценить принятые в нем соотношения размеров, уровни электромагнитных нагрузок и другие данные и лишь после этого приступить к расчету.

Рассмотренное техническое задание соответствует проектированию новой машины с привязкой мощности к высоте оси вращения. Подход к ее решению может осуществляться несколькими путями. При учебном проектировании основным является следующий.

Выбираются ближайшее рекомендованное стандартное значение  $h$ , максимально допустимый наружный диаметр сердечника статора  $D_{a\max}$ , а затем определяются остальные параметры исходя из требований технического задания. Спроектированная таким образом машина не будет оптимальной по технико-экономическим показателям, но будет иметь предельную мощность при заданном значении  $h$ .

### **1.3 Требования к оформлению курсового проекта (работы)**

Курсовой проект (работа) состоит из пояснительной записки и комплекта чертежей. Пояснительная записка оформляется на листах формата А4 в соответствии с требованиями ЕСКД.

Весь материал, представленный в пояснительной записке, должен быть подчинен единой логике линии и разбит на главы. Главы в свою очередь разбиваются на разделы и т. д.

Расчетные формулы сначала приводятся в общем виде, далее в них подставляются численные значения (в единицах системы СИ) и записывается конечный результат (см. пример расчета). Таблицы и рисунки, представляемые в пояснительной записке, должны иметь название, сквозную нумерацию (или нумерацию по главам). На каждый рисунок или таблицу в тексте должна быть ссылка, причем рисунок или таблица должны располагаться **после** первой ссылки на текущей или следующей странице. Расчетные данные и формулы, взятые из **разных** источников информации должны иметь ссылку на эти источники.

Выбор тех или иных инженерных решений по ходу расчета должен быть **обязательно** обоснован. Все глаголы в пояснительной записке употребляются в неопределенной форме (ни в коем случае не от первого лица).

Пояснительная записка должна содержать следующий графический материал:

- схема обмотки статора (допускается схема одной фазы с изображением всех пазов)
- эскиз паза статора со спецификацией;
- эскиз паза ротора;
- рабочие и пусковые характеристики;
- эскиз вала для механического расчета.

Структура пояснительной записки должна состоять из следующих разделов:

- титульного листа;
- задания на проектирование;
- Содержания;
- Реферата;
- Введения;
- основной части (расчетов);
- Заключения;
- спецификации;
- библиографического списка использованных источников информации.

Комплект чертежей включает в себя сборочный чертеж (один лист формата А1), сборочный чертеж узла и чертеж детали (один лист формата А1 или А2). Сборочные чертежи узла и детали задаются преподавателем.

Вся техническая документация, прилагаемая к проекту, должна быть подписана автором.

#### 1.4 Основное уравнение проектирования

Расчет асинхронных машин начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра статора  $D$  и расчетной длины магнитопровода  $l_\delta$ . Размеры  $D$  и  $l_\delta$  связаны с мощностью, угловой скоростью и электромагнитными нагрузками выражением машинной постоянной.

Выбор главных размеров асинхронного двигателя осуществляется с помощью основного уравнения проектирования. Основное уравнение объединяет номинальные данные машины с основными размерами.

Полная расчетная мощность машины, ВА,

$$P' = mEI,$$

где  $m$  – число фаз электрической машины,

$E$  – действующая ЭДС фазы обмотки, В,

$I$  – действующий ток фазы обмотки, А.

Электродвижущая сила фазы  $E$  определяется выражением:

$$E = 4 \cdot k_b \cdot k_{об} \cdot w \cdot f \cdot \Phi,$$

где  $k_b$  – отношение максимального значения индукции в воздушном зазоре к среднему. Иногда  $k_b$  называют коэффициентом формы поля. На практике  $k_b = 1,11 - 1,16$ ;

$k_{об}$  – обмоточный коэффициент по первой гармонике ЭДС;

$k_{об} = k_y k_p$ ,  $k_y$  – коэффициент укорочения обмотки,  $k_p$  – коэффициент распределения обмотки;

$w$  – число последовательных витков фазы обмотки;

$f$  – частота питающей сети, Гц;

$$f = \frac{pn}{60} \tag{1},$$

$p$  – число пар полюсов,

$n_1$  – синхронная частота вращения ротора (частота вращения поля статора),  $\text{мин}^{-1}$ , выбирается ближайшее большее к заданной  $n_{2ном}$  значение из ряда стандартных частот вращения.

$\Phi$  – основной магнитный поток машины, Вб;

$$\Phi = B_\delta \cdot \alpha_\delta \cdot \tau \cdot l_\delta,$$

$B_\delta$  – индукция в воздушном зазоре, Тл;

$\alpha_\delta$  – коэффициент полюсной дуги, характеризующий отношение расчетной полюсной дуги к полюсному делению;

$\tau$  – полюсное деление, м,

$$\tau = \frac{\pi D}{2p};$$

$D$  – внутренний диаметр статора, м;

$l_{\delta}$  – расчетная длина воздушного зазора в аксиальном направлении, м.

Ток фазы можно записать как

$$I = \frac{A\pi D}{2m\omega},$$

где  $A$  – линейная нагрузка, А/м.

Можно ввести постоянную  $C_A$ , равную отношению объема машины к единице момента:

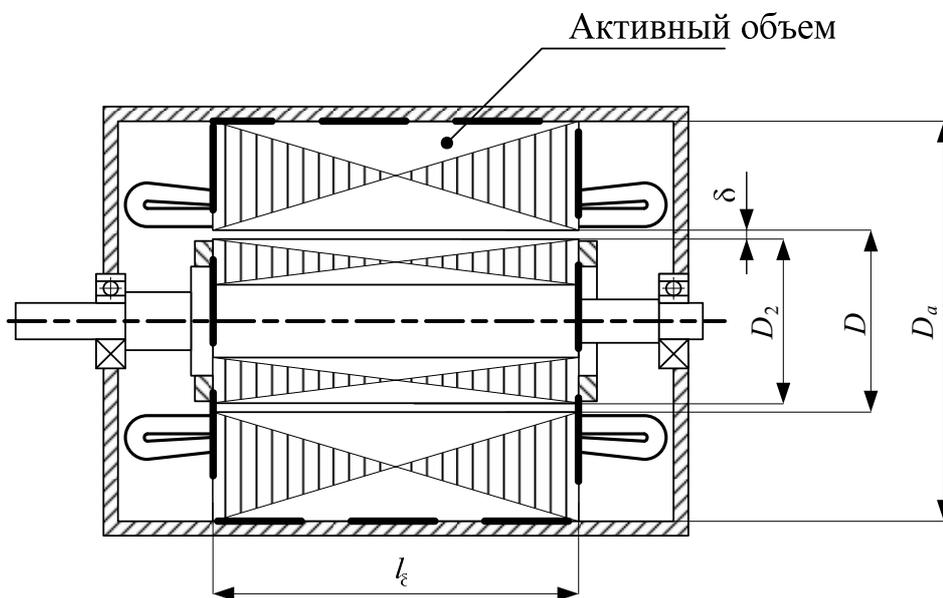


Рис.2. Структура асинхронного электромеханического преобразователя

$$C_A = \frac{D^2 l_{\delta} n}{P'} = \frac{6,1}{\alpha_{\delta} k_{об} k_B A B_{\delta}}. \quad (*)$$

Постоянная  $C_A$  (постоянная Арнольда) показывает использование активного объема преобразователя на единицу мощности. Чем меньше  $C_A$ , тем лучше используется внутренний активный объем машины (рис. 2). Поэтому быстроходные двигатели одной и той же мощности имеют меньший объем, чем тихоходные. Уравнение (\*) представляет собой основное уравнение проектирования.

Входящие в формулу (\*) величины  $A$  и  $B_{\delta}$  отвечают за использование активных материалов машины. Линейная нагрузка  $A$  характеризует использование обмотанной части статора (ротора), т. е. «электрическую» часть. От  $A$  зависят число витков обмотки, плотность тока в обмотке, ее активное сопротивление, коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , КПД, вращающий

момент, тепловой режим. Магнитная индукция в воздушном зазоре  $B_\delta$  характеризует использование магнитной системы машины. От нее зависят МДС воздушного зазора, МДС зубцов, суммарная МДС, коэффициент насыщения магнитной цепи, размеры обмоток, потери в стали, электрические потери в обмотках. Величина  $B_\delta$  также влияет на коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , КПД, вращающий момент, тепловой режим.

Исходно известна только номинальная частота вращения, остальные величины, входящие в уравнение (\*) требуется определить. Поэтому расчет производится на основании опыта проектирования и имеющихся рекомендаций по выбору электромагнитных нагрузок ( $A$  и  $B_\delta$ ), коэффициентов  $\alpha_\delta$ ,  $k_b$ ,  $k_{об}$ . Предварительно также определяется расчетная мощность машины. В уравнении (\*) остается две неизвестные величины:  $D$  и  $l_\delta$ .

Внутренний диаметр статора  $D$  связан определенными размерными соотношениями с внешним диаметром статора  $D_a$ , который в свою очередь определяет высоту оси вращения  $h$ , значение которой при проектировании новых машин может быть выбрано только из ряда стандартных высот, установленных ГОСТ. Кроме того, внешний диаметр статора должен соответствовать заданным технологическим условиям, основным из которых является минимальное количество отходов, при раскрое электротехнической стали, что учтено в табл. 3.

## 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ

### 2.1 Выбор главных размеров

Сначала определяется ближайшая большая к  $n_{2\text{ном}}$  стандартная частота вращения поля статора  $n_1$  (если она не задана), затем число пар полюсов  $2p$  из формулы (1) по известным  $n_1$  и  $f$ . Высота оси вращения предварительно выбирается по графикам рис.3. для заданных  $P_{2\text{ном}}$  и  $2p$  в зависимости от исполнения двигателя. Из ряда стандартных высот осей вращения (таблица П.2.3) принимается ближайшее меньшее значение  $h$ . Внешние диаметры статоров  $D_a$  выбираются по табл.3

Таблица 3

Внешние размеры статоров асинхронных машин

$h$ , мм	56	63	71	80	90	100	112	132
$D_a$ , м	0,08 – 0,096	0,1 – 0,108	0,116 – 0,122	0,131 – 0,139	0,149 – 0,157	0,168 – 0,175	0,191 – 0,197	0,225 – 0,233
$h$ , мм	160	180	200	225	250	280	315	355
$D_a$ , м	0,272 – 0,285	0,313 – 0,322	0,349 – 0,359	0,392 – 0,406	0,437 – 0,452	0,52 – 0,53	0,59	0,66

На данном этапе проектирования геометрические размеры магнитопровода неизвестны. Поэтому для определения внутреннего диаметра статора следует использовать приближенную эмпирическую зависимость,

$$D = K_D \cdot D_a, \quad (2)$$

где  $K_D$  – коэффициент, определяемый по табл.4.

Таблица 4

Значение коэффициента  $K_D$  в асинхронных машинах

$2p$	2	4	6	8	10, 12
$K_D$	0,52 – 0,6	0,62 – 0,68	0,7 – 0,72	0,72 – 0,75	0,75 – 0,77

Далее рассчитываются полюсное деление  $\tau$ , м,

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (3)$$

и расчетная мощность, ВА,

$$P' = mE_1 I = P_{2\text{ном}} \frac{k_e}{\eta \cos \varphi}, \quad (4)$$

где  $k_e$  – отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, см. рис.4,

$\eta$  – КПД двигателя, о.е.,

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности, о.е.

Предварительные значения  $\eta$  и  $\cos \varphi$ , если они не заданы, могут быть определены по рис.5 – 7.

Предварительный выбор электромагнитных нагрузок  $A$  и  $B_\delta$  следует проводить тщательно, с учетом требований технического задания на проектирование. Так, при увеличенной линейной нагрузке  $A$  и неизменной геометрии паза статора возрастает число эффективных проводников в пазу  $u_n$  и число витков обмотки статора  $w_1$ , сечение проводников при этом уменьшается. Уменьшение сечения проводников приводит к увеличению активного сопротивления обмотки статора  $r_1$ , плотности тока  $j$  в проводниках и уменьшению КПД. Кроме того, увеличение  $w_1$  вызывает увеличение индуктивного сопротивления статора  $x_1 (x_1 \sim w_1^2)$ ,  $\cos \varphi$  вследствие роста  $x_1$  уменьшается. Уменьшаются также момент на валу  $M_2$  при неизменной скорости и кратность максимального и пускового моментов, при этом машина становится короче.

С увеличением  $B_\delta$  и неизменной геометрии паза, увеличиваются требуемая МДС на всех участках магнитной цепи, возрастает намагничивающий ток  $I_\mu$  и потери в стали, пульсационные и поверхностные потери. Магнитная система становится более насыщенной. Из-за этого  $\cos \varphi$  и КПД уменьшаются, но машина становится меньше в радиальном направлении.

Второй главный размер – длину воздушного зазора, или расчетную длину магнитопровода  $l_\delta$ , можно определить по выражению, м,

$$l_\delta = \frac{6,1P'}{\alpha_\delta k_e k_{об} AB_\delta D^2 n}, \quad (5)$$

где  $\alpha_\delta = 0,64$  – расчетный коэффициент полюсной дуги;

$k_{об} = 0,95 - 0,96$  – обмоточный коэффициент для однослойных обмоток,

$k_{об} = 0,91 - 0,92$  – обмоточный коэффициент для двухслойных обмоток.

Если величина  $l_\delta > 300$  мм, то для улучшения охлаждения сердечников статора и ротора в них выполняются радиальные вентиляционные каналы, рис.10. Ширина одного канала  $l_k = 10$  мм. Число каналов  $n_k$  обычно равно числу полюсов. Сердечник статора набирается из отдельных пакетов, которые соединяются друг с другом шпильками с нажимными шайбами.

Ширина одного пакета обычно  $l_n = 50-75$  мм. Суммарная длина пакетов может быть определена из следующего соотношения, м,

$$l_1 = l_\delta - n_k \cdot l_k, \quad (6)$$

где  $l_1$  - суммарная длина всех пакетов статора, м.

Если радиальные каналы отсутствуют, то  $l_1 = l_\delta$ .

Крайние листы пакета статора часто выполняют меньшего внутреннего диаметра. Это необходимо для уменьшения выпучивания магнитных силовых линий на краях магнитопровода.

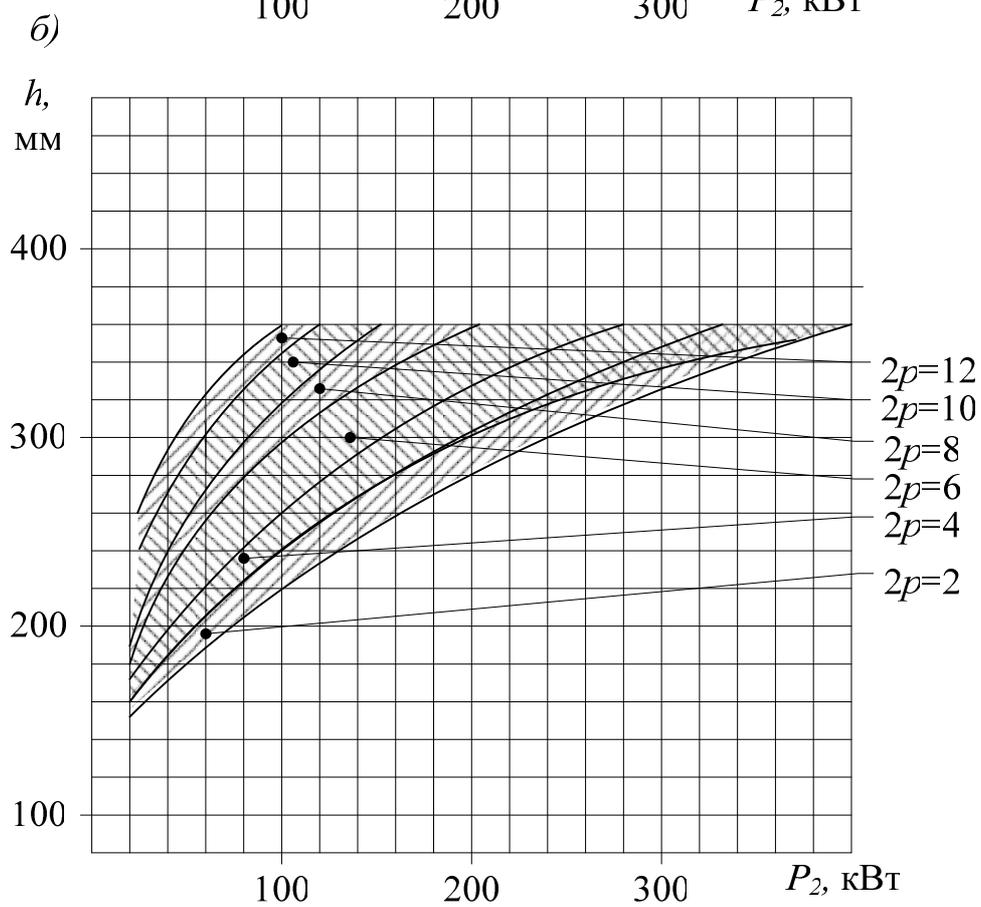
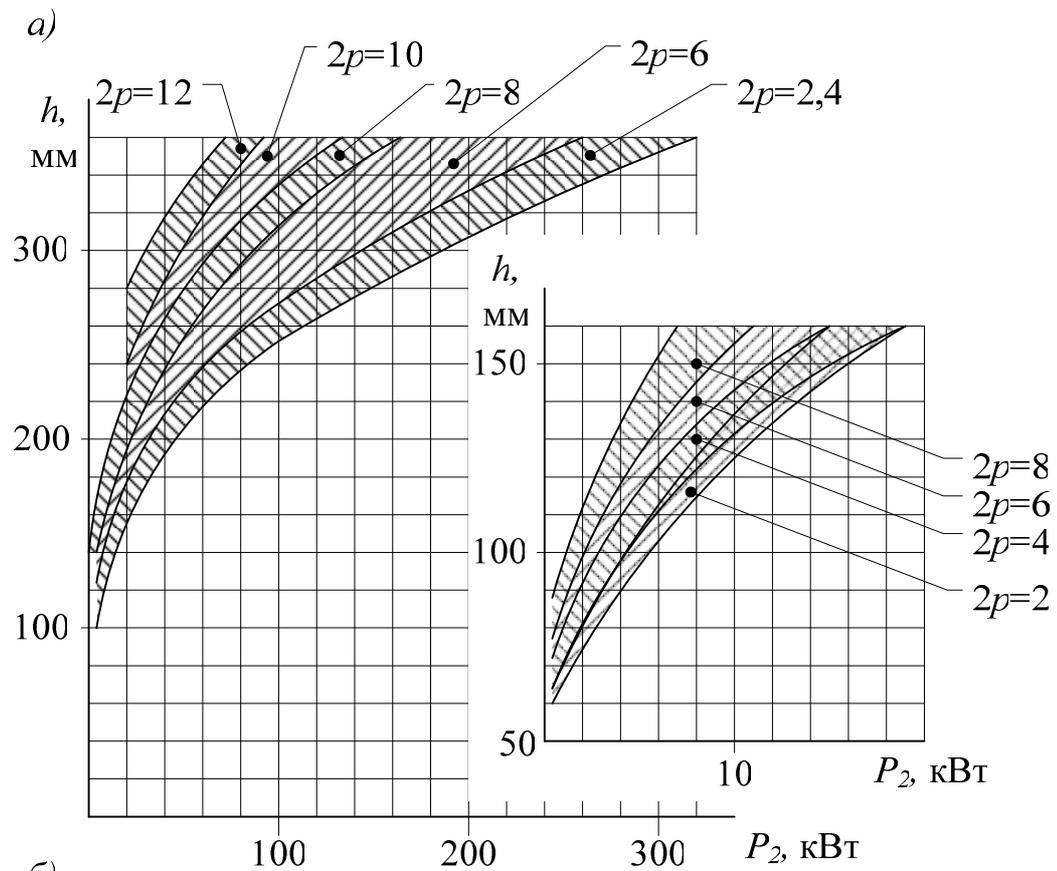


Рис. 3. Высота оси вращения асинхронных двигателей: со степенью защиты IP44 (IP54) (a), со степенью защиты IP23 (б).

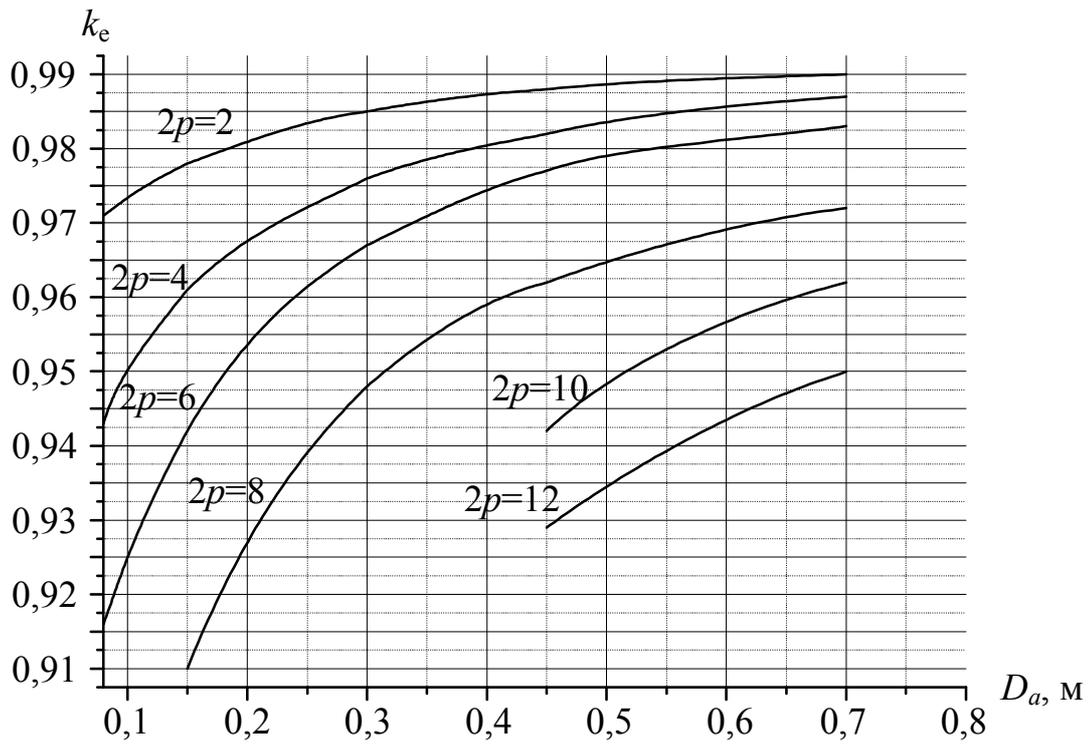


Рис. 4. Значения коэффициента  $k_e$

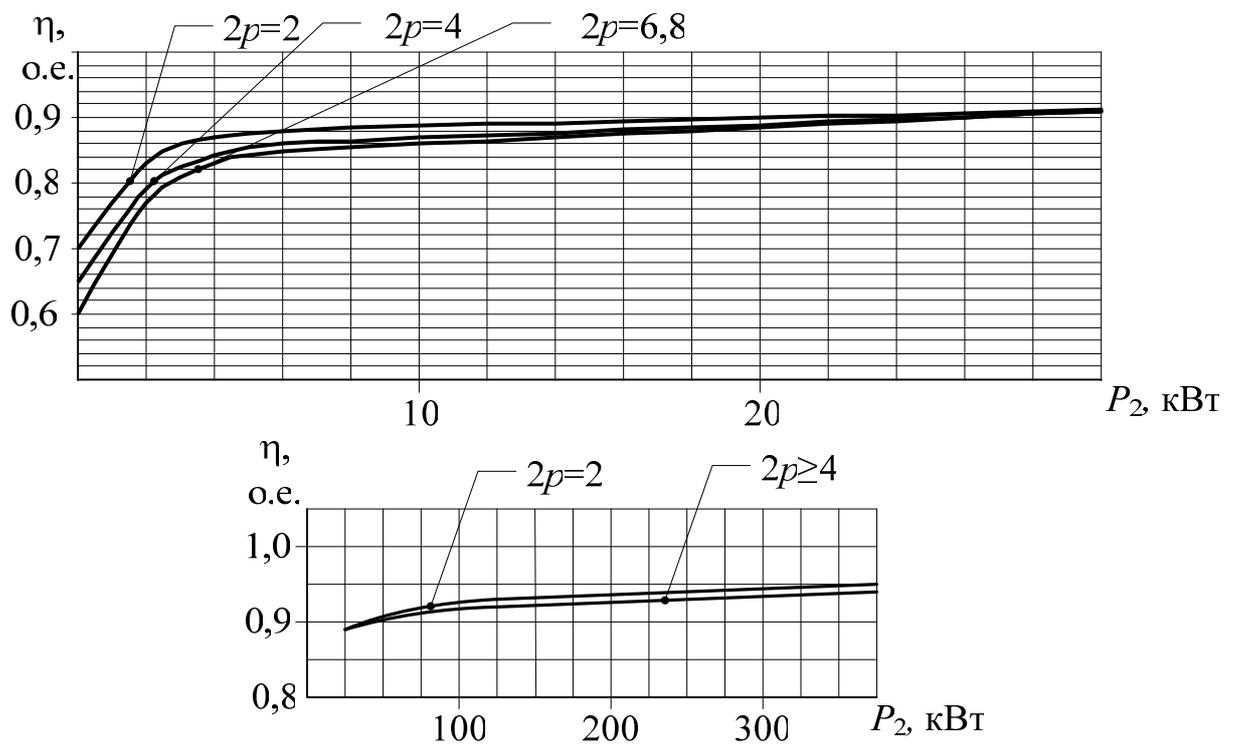


Рис. 5. Примерные значения  $\eta$  двигателей со степенью защиты IP44(54)

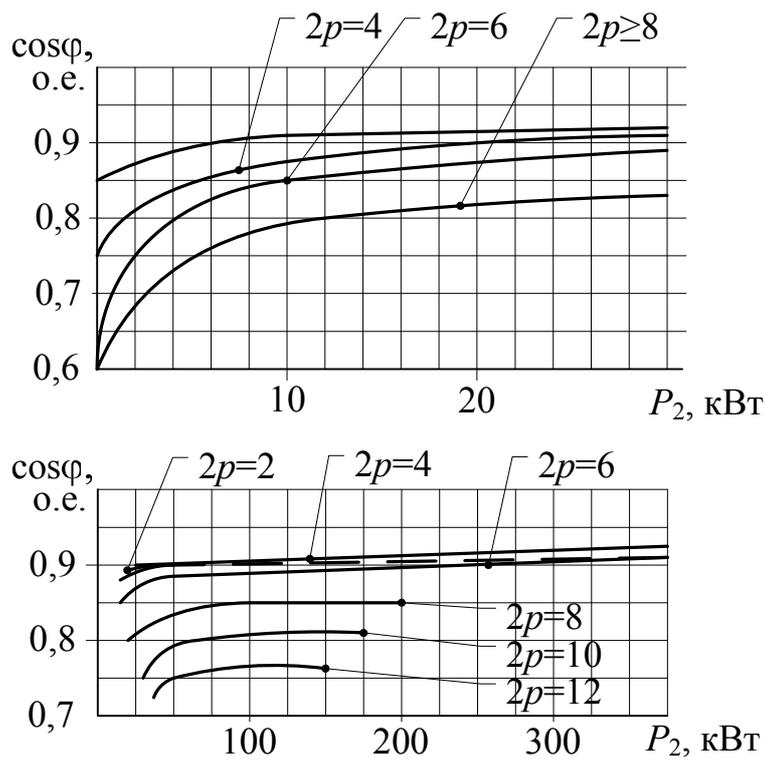


Рис. 6. Примерные значения  $\cos\varphi$  двигателей со степенью защиты IP44

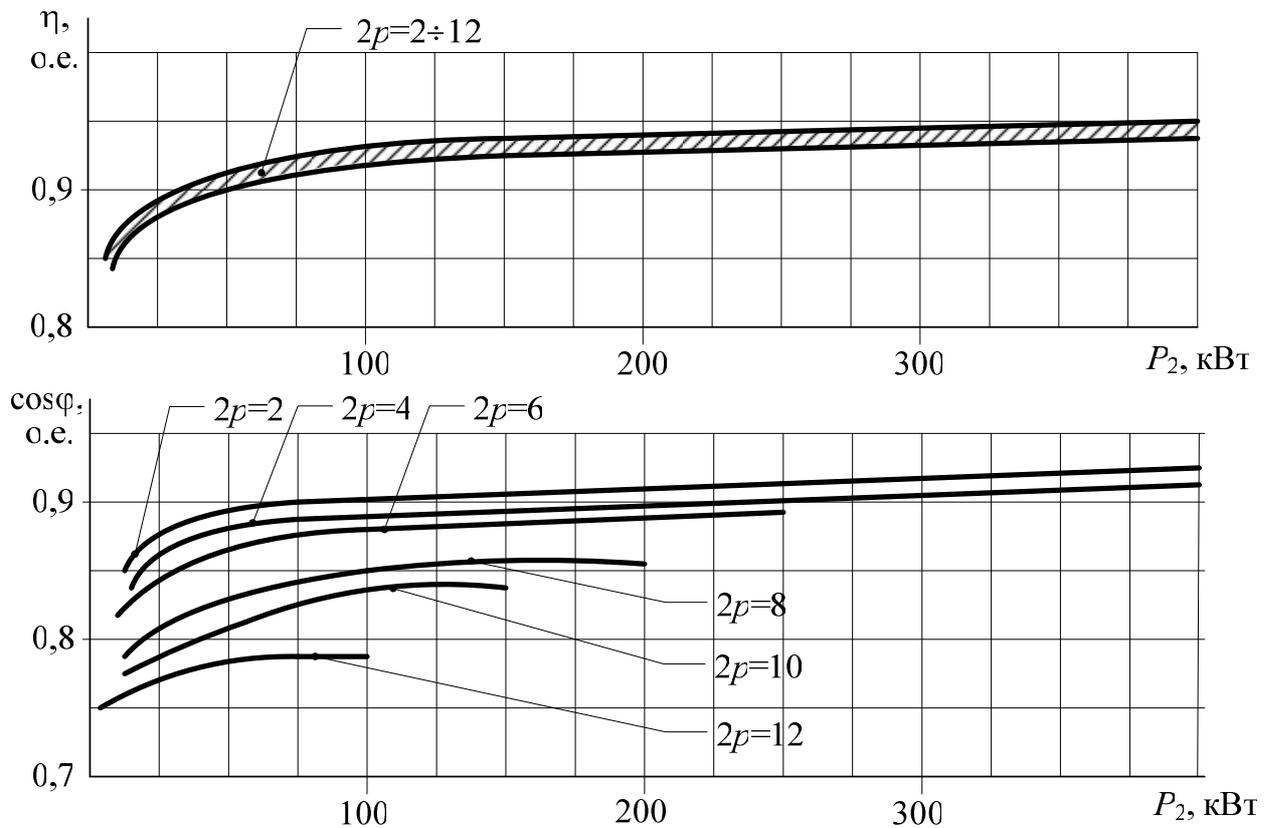


Рис. 7. Примерные значения  $\eta$  и  $\cos\varphi$  двигателей со степенью защиты IP23

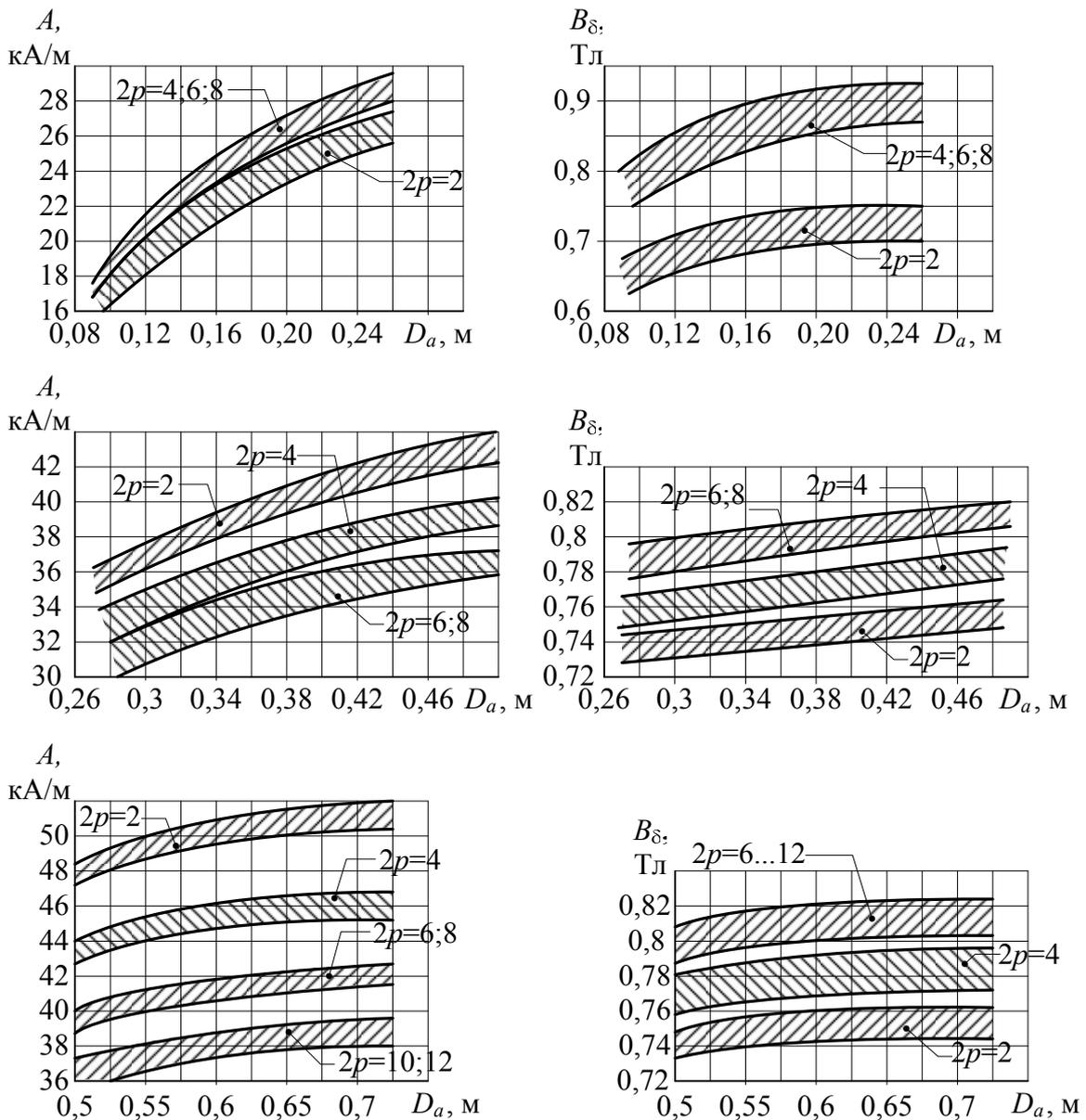


Рис.8. Примерные значения  $A$  и  $B_{\delta}$  асинхронных двигателей со степенью защиты IP44(54).

После расчета  $D_a$ ,  $D$  и  $l_{\delta}$  следует проверить отношение

$$\lambda = \frac{l_1}{\tau}, \quad (7)$$

Если полученное значение  $\lambda$  слишком велико по сравнению с рекомендованными значениями (рис. 11), то расчет следует повторить с ближайшим большим значением высоты оси вращения  $h$ , выбранным из стандартного ряда. Если  $\lambda$  слишком мало, то расчет повторяется с ближайшим меньшим значением  $h$ .

После расчета длины пакета статора определяется длина пакета ротора  $l_2$ . В двигателях с  $h \leq 250$  мм  $l_2 = l_1 = l_{\delta}$ . Для более крупных машин ротор

изготавливается длиннее статора на 5 мм или 10 мм (высоковольтные двигатели).

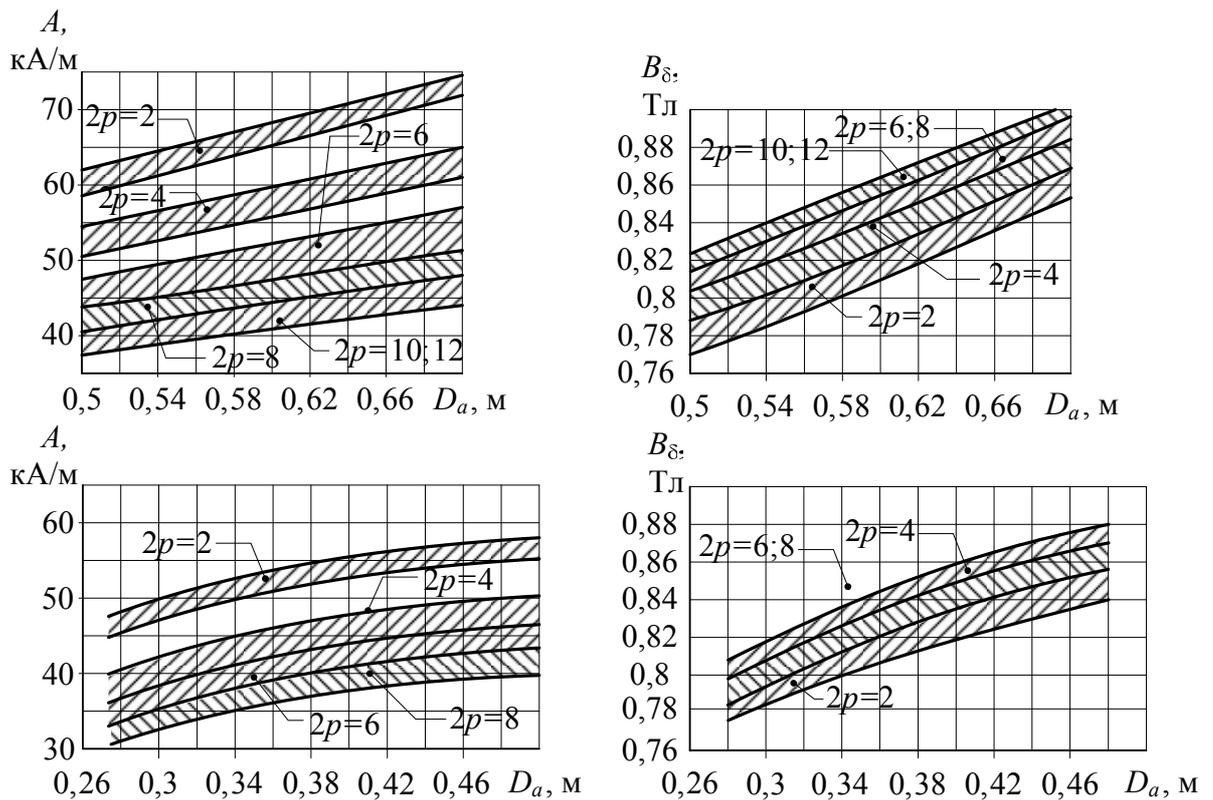


Рис.9. Примерные значения  $A$  и  $B_\delta$  асинхронных двигателей со степенью защиты IP23

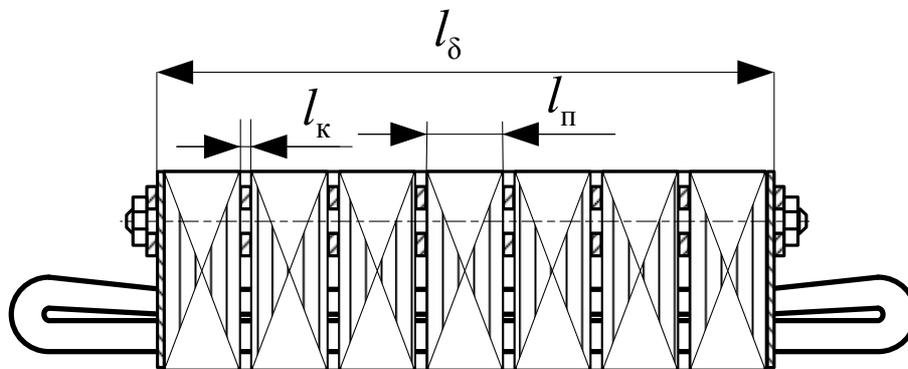


Рис.10. Фрагмент статора с радиальными вентиляционными каналами

Следующий этап расчета включает в себя определение числа пазов статора  $Z_1$ , числа витков в фазе обмотки  $w_1$ , обмоточных данных статора, после чего строится схема обмотки статора.

Тип обмотки статора зависит от номинальной мощности двигателя. Двигатели мощностью до 10 кВт ( $h \leq 160$  мм) изготавливаются в основном с однослойными обмотками статора из круглого провода. Двигатели с большими мощностями выпускаются с двухслойными обмотками статора

также из круглого провода. Следует отметить, что у двигателей с  $h \geq 280$  мм обмотка статора обычно выполняется из прямоугольного про-

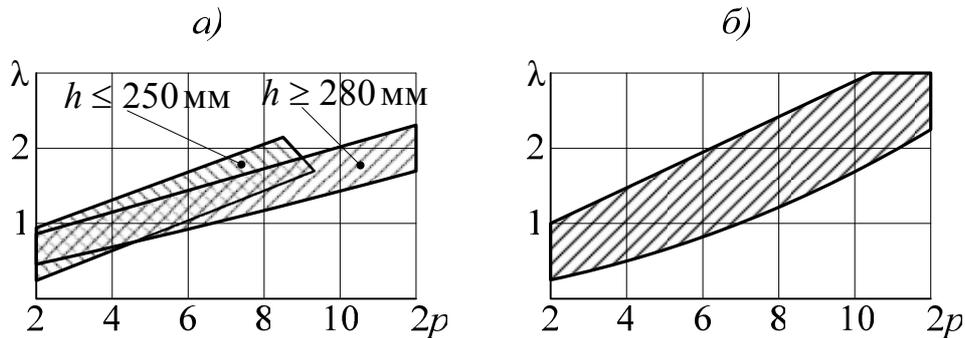


Рис. 11. Отношение  $\lambda$  для двигателей со степенями защиты IP44(54) (а), IP23 (б).

вода, но в многополюсном исполнении ( $2p \geq 10$ ) для двигателей с  $h = 280, 315$  мм обмотка статора может изготавливаться и из круглого про-

вода. При расчете обмоточных данных статора следует стремиться, чтобы линейная нагрузка и индукция в воздушном зазоре были как можно ближе к тем значениям, которые были выбраны ранее, а число пазов статора обеспечивало равномерное распределение катушек обмотки с целым числом катушек на полюс и фазу. Для выполнения этого условия предварительно выбирается зубцовое деление статора  $t_{z1}$ . Величина  $t_{z1}$ , с одной стороны, должна обеспечивать как можно более равномерное распределение катушек обмотки статора по полюсным делениям, следовательно, для этого необходимо большое число пазов. С другой стороны, ширина зубца статора  $b_{z1}$  должна обеспечивать необходимую механическую прочность, чтобы под действием электромагнитных сил, действующих на обмотку, она не перемещалась ( $b_{z1} \geq 5$  мм). Кроме того, малая ширина паза статора приводит к уменьшению коэффициента заполнения паза медью обмотки, усложняет штамповку и повышает трудоемкость укладки обмотки.

Значения зубцовых делений статора для двигателей с обмоткой из круглого провода, необходимые для предварительного выбора  $t_{z1}$  представлены на рис.12. Меньшие значения в каждой из показанных областей характерны для машин меньшей мощности каждого диапазона высот оси вращения.

Для машин с обмоткой из провода прямоугольного сечения с номинальным напряжением до 660 В диапазон зубцовых делений составляет:

$$t_{z1} = 0,016 \dots 0,02 \text{ м при } \tau < 0,15 \text{ м};$$

$$t_{z1} = 0,017 \dots 0,022 \text{ м при } \tau = 0,15 \dots 0,4 \text{ м};$$

$$t_{z1} = 0,01 \dots 0,028 \text{ м при } \tau > 0,4 \text{ м};$$

В процессе расчета целесообразно не ограничиваться выбором одного конкретного зубцового деления, руководствуясь приведенными выше соображениями, рассчитать диапазон возможных значений  $t_{z1}$  в пределах указанных зубцовых делений  $t_{z1\max} \dots t_{z1\min}$ . Тогда возможные числа зубцов

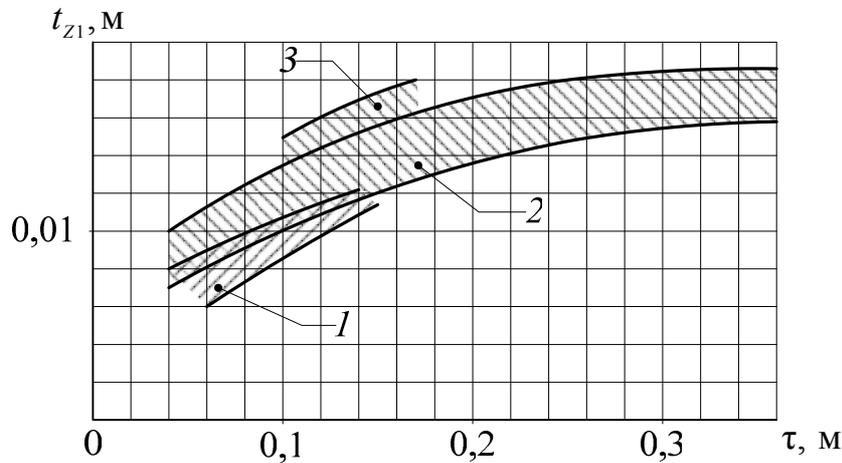


Рис. 12. Зубцовые деления статоров асинхронных двигателей с обмоткой из круглого провода и высотами оси вращения:  
1 -  $h \leq 90$  мм, 2 -  $90 < h < 250$  мм, 3 -  $h \leq 280$  мм.

статора находятся в пределах:

$$Z_{1\min} \dots Z_{1\max} = \frac{\pi D}{t_{z1\max}} \dots \frac{\pi D}{t_{z1\min}}. \quad (8)$$

Окончательное значение  $Z_1$  определяется после расчета обмоточных данных по ПРИЛОЖЕНИЮ 1.

Число пазов на полюс и фазу,

$$q = \frac{Z_1}{2pt}. \quad (9)$$

Число  $q$  должно по возможности быть целым и находиться в пределах:  $q = 2 \dots 5$ . Обмотки с дробным  $q$  обычно применяются в многополюсных машинах (при  $2p \geq 10$ ).

Число проводников в пазу при условии, что параллельные ветви в обмотке отсутствуют, (число параллельных ветвей  $a = 1$ ),

$$u'_n = \frac{\pi D A}{I_{1\text{ном}} Z_1}, \quad (10)$$

где  $I_{1\text{ном}}$  - номинальный ток обмотки статора, А,

$$I_{1\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{m U_{1\text{ном}} \eta \cos \varphi}, \quad (11)$$

где  $U_{1\text{ном}}$  - номинальное фазное напряжение, В.

Полученное значение  $u'_n$  не округляется до ближайшего целого, а подбирается такое значение  $a$ , при котором число эффективных проводников в пазу

$$u_n = u'_n a \quad (12)$$

будет удовлетворять следующим условиям:

- $u_n$  должно быть целым числом при любом типе обмоток;
- в двухслойных обмотках  $u_n$  должно быть кратным двум.

Возможное число параллельных ветвей  $a$  обязательно должно быть кратно числу полюсов проектируемого двигателя. Как правило,  $a \leq 4$ .

Принятое на данном этапе число параллельных ветвей далее может быть скорректировано, при этом пропорционально изменится и  $u_n$ .

Окончательное число витков в фазе обмотки,

$$w_1 = \frac{u_n Z_1}{2am}, \quad (13)$$

округляется до ближайшего целого числа.

Окончательное значение линейной нагрузки, А/м,

$$A = \frac{2I_{\text{ном}} w_1 m}{\pi D}. \quad (14)$$

Если значение  $A$  отличается более, чем на 10% от принятого ранее, следует пересчитать обмотку с другим  $u_n$ .

Схему обмотки статора, как уже отмечалось ранее, следует выбирать по номинальной мощности проектируемого двигателя. Расчет обмоточных данных, обмоточных коэффициентов и построение схемы обмотки следует проводить по ПРИЛОЖЕНИЮ 1.

После построения схемы обмотки и уточнения обмоточных коэффициентов  $k_{\text{об1}}$  следует уточнить значение магнитного потока, Вб,

$$\Phi = \frac{k_e U_{\text{ном}}}{4k_b w_1 k_{\text{об1}} f_1}, \quad (15)$$

где  $k_b = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$  - коэффициент формы поля.

Окончательное значение индукции в воздушном зазоре, Тл,

$$B_\delta = \frac{p\Phi}{Dl_\delta}. \quad (16)$$

Если полученное значение  $B_\delta$  выходит за рекомендуемые пределы более чем на  $\pm 5\%$ , расчет следует повторить, изменив  $u_n$ .

После уточнения электромагнитных нагрузок определяется сечение эффективных проводников обмотки статора. Предварительно выбирается плотность тока в обмотке, исходя из класса нагревостойкости изоляции. Диапазон рекомендуемых плотностей тока для наиболее распространенных классов нагревостойкости представлен в табл. 5.

Рекомендуемая плотность тока в проводниках обмотки статора

Класс нагревостойкости изоляции	В	F	H
Рекомендуемая плотность тока $J_1$ , А/мм <sup>2</sup>	4 – 6	6 – 8	8 – 10

Сечение эффективного проводника обмотки статора, мм<sup>2</sup>,

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{1\text{ном}}}{aJ_1}. \quad (17)$$

После расчета сечения эффективного проводника оценивается возможность укладки провода в паз.

Если обмотка насыпная из круглого провода, то укладка обмотки может быть механизированной ( $h \leq 160$  мм) или вручную.

В обмотках, предназначенных для механизированной укладки проводников должно выполняться условие  $q_{\text{эф}} \leq 2,5$  мм<sup>2</sup>. Если это условие выполняется по табл. П.3.1 выбирается стандартный провод с сечением, наиболее близким к рассчитанному  $q_{\text{эф}}$ . Если в результате расчета  $q_{\text{эф}} > 2,5$  мм<sup>2</sup>, то эффективный проводник разбивается на элементарные.

Сечение элементарного проводника, мм<sup>2</sup>,

$$q_{\text{эл}} = \frac{q_{\text{эф}}}{n_{\text{эл}}}, \quad (18)$$

где  $n_{\text{эл}}$  - число элементарных проводников.

По табл. П.3.1 выбирается стандартный провод с сечением, наиболее близким к  $q_{\text{эл}}$ , а также диаметр провода без изоляции  $d_{\text{гол}}$  и диаметр провода в изоляции  $d_{\text{из}}$ .

Обычно число элементарных проводников составляет не более шести – восьми. На выбор  $n_{\text{эл}}$  влияют два ограничения: с одной стороны число элементарных проводников должно быть таким, чтобы значение  $q_{\text{эл}}$  находилось как можно ближе к стандартному; с другой - значение  $q_{\text{эл}} n_{\text{эл}}$  для стандартизированного провода должно быть как можно ближе к рассчитанному ранее  $q_{\text{эф}}$ . Кроме того, катушки из провода диаметром менее 0,1 мм сложно наматывать из-за низкой механической прочности тонкого провода.

Если обмотка выполняется из провода прямоугольного сечения, то его сечение не должно быть более 17...20 мм<sup>2</sup>, так как с увеличением размеров проводника увеличиваются потери на вихревые токи. Если расчетное  $q_{\text{эф}} > 20$  мм<sup>2</sup>, то эффективный проводник разбивается на элементарные (обычно  $n_{\text{эл}}=2$ ). Элементарные проводники при этом располагаются на одном уровне по высоте паза. Такая обмотка укладывается в прямоугольные полуоткрытые пазы. Если  $n_{\text{эл}}=1$  ( $q_{\text{эф}} = q_{\text{эл}}$ ), то такая обмотка может быть

уложена в прямоугольные открытые пазы. В машинах напряжением до 660 В предпочтение следует отдавать полуоткрытым пазам в которые укладываются подразделенные полукатушки.

При прямоугольных обмоточных проводах сечение эффективного проводника не должно превышать  $40 \text{ мм}^2$ , поэтому при больших токах статора следует выбирать максимально возможное число параллельных ветвей.

После расчета  $q_{\text{эл}}$  по табл. П.3.2 сначала выбирается провод с сечением наиболее близким к  $q_{\text{эл}}$ , высота и ширина провода без изоляции  $a_{\text{гол}} \times b_{\text{гол}}$ , высота и ширина провода в изоляции  $a_{\text{из}} \times b_{\text{из}}$ . Обычно провод выбирается так, чтобы его меньшая сторона находилась в диапазоне:  $1,0 < a_{\text{из}} \leq 2,5 \dots 3$

мм, а отношение составляло  $\frac{b_{\text{из}}}{a_{\text{из}}} \approx 2$

После выбора  $q_{\text{эл}}$ ,  $n_{\text{эл}}$ ,  $a$  уточняется плотность тока в обмотке по формуле (17), которая не должна отличаться более чем на 5% от **рекомендуемой для выбранного класса нагревостойкости** для любого типа обмоток, с учетом того, что  $q_{\text{эф}} = q_{\text{эл}} n_{\text{эл}}$ .

## 2.2 Расчет размеров зубцовой зоны статора для обмоток из круглого провода

Обмотки статоров из круглого провода обычно укладываются в трапециевидные полузакрытые пазы рис. 13 с параллельными стенками зубцов. Такая конструкционная особенность позволяет поддерживать постоянной магнитную индукцию по всему сечению зубца (при отсутствии вытеснения потока в паз) и меньшее магнитное напряжение. В соответствии с рис.13 выбирается конфигурация зубцовой зоны. Предпочтение следует отдавать трапециевидному пазу (рис.13,а), хотя для увеличения коэффициента заполнения паза обмоткой следует отдавать предпочтение овальному пазу (рис.13,б).

После выбора конфигурации зубцов производится расчет геометрических размеров паза в штампе по допустимым значениям индукции в зубцах  $B_{z1}$  и ярме  $B_a$ . Среднее значение индукции в зубцах и ярме статора определяется в зависимости от исполнения двигателя по табл. 6. Рассматриваемые далее формулы для вычисления размеров зубцовой зоны приводятся применительно к рис.13,а.

Высота ярма статора, м,

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_a l k_{\text{ст}}}, \quad (19)$$

где  $k_{\text{ст}}$  - коэффициент заполнения пакета сердечника сталью. В асинхронных машинах при  $h \leq 250 \text{ мм}$  листы электротехнической стали изолируются оксидированием и  $k_{\text{ст}} = 0,97$ .

Ширина зубца статора, м,

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} t_{z1} l_{\delta}}{B_{z1} l_1 k_{cr}}, \quad (20)$$

где  $B_{z1}$  выбирается по табл. 6 в соответствии со степенью защиты и числом полюсов двигателя

Полная высота паза, м,

$$h_{\text{п}} = 0,5(D_a - D) - h_a. \quad (21)$$

Ширина паза в широкой части, м,

$$b_2 = \frac{D + 2h_{\text{п}}}{Z_1} - b_{z1}. \quad (22)$$

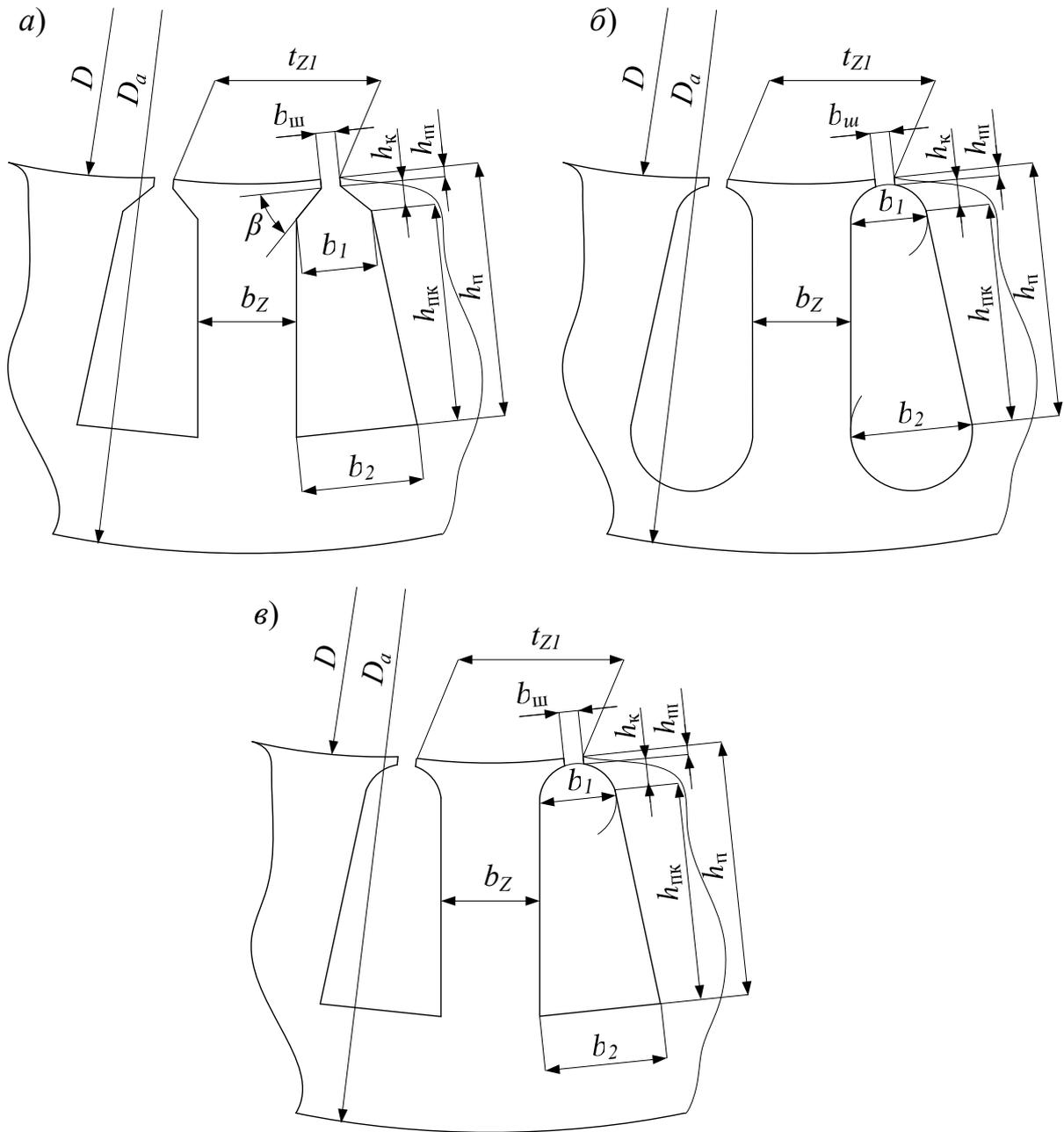


Рис. 13. Зубцовые зоны статоров асинхронных двигателей с всыпными обмотками из круглого провода.

Ширина паза в узкой части определяется в зависимости от угла  $\beta$ , см. рис. 13,а; при  $\beta = 45^\circ$  ( $h \leq 250$  мм) ширина паза в узкой части, м,

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_w - b_w) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi}, \quad (23)$$

при  $\beta = 30^\circ$  ( $h > 250$  мм) ширина паза в узкой части, м,

$$b_1 = \frac{\pi \left( D + 2h_{\text{ш}} - \frac{b_{\text{ш}}}{\sqrt{3}} \right) - Z_1 b_{Z1}}{Z_1 - \frac{\pi}{\sqrt{3}}} \quad (24)$$

где  $h_{\text{ш}}$  - высота шлица паза, этот размер определяется стандартом, в двигателях с высотой оси вращения  $h \leq 132$  мм  $h_{\text{ш}} = 0,5$  мм, в двигателях  $h \geq 160$  мм  $h_{\text{ш}} = 1,0$  мм;

$b_{\text{ш}}$  - ширина шлица паза, определяется исходя из возможности свободного пропуска через шлиц проводников обмотки, мм,

$b_{\text{ш}} = d_{\text{ш}} + (1,5...2,5)$ . Размер  $b_{\text{ш}}$  обычно нормализуется, нормализованные значения  $b_{\text{ш}}$  представлены в табл. 7.

В верхней части паза располагается пазовая крышка или клин, с помощью которых обмотка удерживается в пазу.

Таблица 6

Допустимые значения индукции в участках магнитной цепи, Тл

Участок магнитной цепи	обозначение	Исполнение IP44, число полюсов $2p$					Исполнение IP23, число полюсов $2p$					
		2	4	6	8	10	2	4	6	8	10	12
Ярмо статора	$B_a$	1,4...1,6			1,15... 1,35	1,1... 1,2	1,45...1,6		1,2...1,4			1,1... 1,3
Зубцы статора при постоянном сечении	$B_{Z1}$	1,6...1,9				1,6... 1,8	1,8... 2,05	1,7...1,95			1,6...1,9	
Зубцы статора в наиболее сечении при полуоткрытых пазах	$B_{Z1\text{max}}$	1,75...1,95					1,9...2,1			1,8...2,0		
Зубцы статора в наиболее сечении при открытых пазах	$B_{Z1\text{max}}$	1,6...1,9					1,7...2,0					
Ярмо короткозамкнутого ротора	$B_j$	$\leq 1,45$	$\leq 1,4$	$\leq 1,2$	$\leq 1,0$		$\leq 1,55$	$\leq 1,5$	$\leq 1,3$	$\leq 1,1$		
Зубцы ротора при постоянном сечении	$B_{Z2}$	1,7...1,95					1,75...2,0					
Зубцы короткозамкнутого ротора в наиболее узком сечении	$B_{Z2\text{max}}$	1,5... 1,75	1,75...1,95				1,9... 2,2	1,85...2,1				

Высота клиновой части паза, м,

$$h_k = \frac{(b_1 - b_{ш}) \operatorname{tg} \beta}{2}. \quad (25)$$

После определения размеров паза в штампе рассчитываются размеры паза «в свету» и площадь поперечного сечения паза занимаемого пазовой изоляцией.

Размеры паза «в свету» с учетом припусков на шихтовку, м,  
ширина в узкой части,

$$b'_1 = b_1 - \Delta b;$$

(26,а)

ширина в широкой части,

$$b'_2 = b_2 - \Delta b;$$

(26,б)

высота,

$$h'_n = h_n - \Delta h;$$

(26,в)

где припуски по ширине и высоте паза  $\Delta b$ ,  $\Delta h$  выбираются по табл. 8 в зависимости от высоты оси вращения.

Таблица 7

Нормализованные значения ширины шлица полузакрытых пазов, мм

Высота оси вращения, мм	Число полюсов $2p$					
	2	4	6	8	10	12
50 – 63	1,8	1,8	1,8	1,8	-	-
71	2	2	2	2	-	-
80 – 90	3	3	2,7	2,7	-	-
100 – 112	3,5	3,5	3	3	-	-
132	4	3,5	3,5	3,5	-	-
160 – 250	4	3,7	3,7	3,7	-	-
280 – 315	4	4	4	4	4	4

Таблица 8

Припуски по ширине и высоте паза, мм

Высота оси вращения, мм	50...132	160...250	280...355
$\Delta b$	0,1	0,2	0,3
$\Delta h$	0,1	0,2	0,3

Высота паза без клина и шлица, м,

$$h'_{пк} = h'_n - (h_{ш} + h_k). \quad (27)$$

Площадь поперечного сечения паза под обмотку, корпусную и меж-  
слойную изоляцию,  $\text{м}^2$ ,

$$S'_n = \frac{b'_1 + b'_2}{2} h'_{пк}. \quad (28)$$

Площадь поперечного сечения корпусной изоляцией, м<sup>2</sup>,

$$S_{из} = b_{из} (2h_{п} + b_1 + b_2), \quad (29)$$

где  $b_{из}$  - односторонняя толщина пазовой изоляции, м, выбирается по табл. 9, 10

Площадь прокладок на дне паза, под клином и между слоями (при двухслойных обмотках), м<sup>2</sup>,

для двигателей  $h = 180 \dots 250$  мм

$$S_{пр} = (0,9b_1 + 0,4b_2) \cdot 10^{-3}$$

(30,а)

для двигателей  $h \geq 280$  мм

$$S_{пр} = 0,6(b_1 + b_2) \cdot 10^{-3}.$$

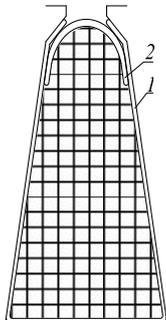
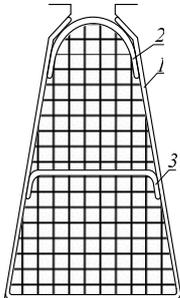
(30,б)

В однослойных обмотках  $S_{пр} = 0$ .

Площадь поперечного сечения паза для размещения обмотки, м<sup>2</sup>,

Таблица 9

Изоляция обмоток из круглого провода статоров асинхронных двигателей напряжением до 660 В и высотой оси вращения до 250 мм.

Эскиз паза	Тип обмотки	$h$ , мм	По- зи- ция	Наименование материала изоляции			Односто- ронняя толщина, мм
				Класс нагревостойкости			
				В	F	H	
	Одно- слойная	50...80	1	Изофлекс	Имидофлекс	Имидофлекс	0,2
			2				0,3
		90...132	1				0,25
			2				0,35
		160	1				0,4
			2				0,5
	Двух- слойная	180... 250	1			0,4	
			2			0,5	
			3			0,4	

$$S''_{п} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} h'_{пк} - (S_{из} + S_{п}). \quad (31)$$

Критерием правильности расчета геометрии зубцовой зоны является коэффициент заполнения паза обмоткой,

$$k_3 = \frac{d_{из}^2 u_{п.эл}}{S_{п}} \quad (32)$$

Значения коэффициента заполнения паза находятся в пределах  $k_3 = 0,68...0,71$  для двигателей с  $2p = 2$  и  $k_3 = 0,72...0,74$  для двигателей с  $2p \geq 4$ .

Чаще всего при первом расчете  $k_3$  получается несколько выше рекомендуемых пределов. Для его уменьшения следует:

- уменьшить  $d_{из}$ , так, чтобы плотность тока в проводнике обмотки не превышала предельное значение для заданного класса нагревостойкости;
- увеличить размеры паза, но так, чтобы значения  $B_{Zl}$  и  $B_a$  не выходили за пределы, рекомендованные табл. 6;
- уменьшить число эффективных проводников обмотки.

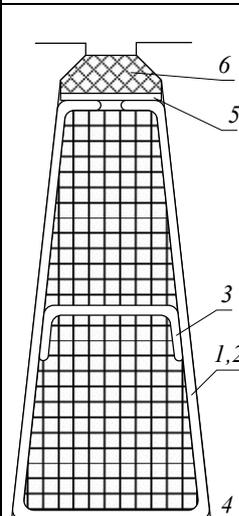
В случае, если указанные выше меры не помогли, следует увеличить длину сердечника статора или выбрать большую высоту оси вращения.

Если  $k_3$  оказался ниже рекомендуемых пределов, необходимо:

- уменьшить размеры паза, так, чтобы значения  $B_{Zl}$  и  $B_a$  не выходили за пределы, рекомендованные табл. 6;
- уменьшить длину сердечника статора или перейти на меньшую высоту оси вращения.

Таблица 10

Изоляция обмоток из круглого провода статоров асинхронных двигателей напряжением до 660 В и высотой оси вращения свыше 250 мм.

Эскиз паза	Тип обмотки	Позиция	Наименование материала изоляции			Односторонняя толщина, мм,		
			Класс нагревостойкости			Класс нагревостойкости		
			В	F	H	В	F	H
	двухслойная	1	Пленкосинтокартон (к обмотке)			0,25	0,28	0,28
			ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н			
		2	Электронит (к стенкам паза)			0,3	0,3	0,28
			Лакотканеслюдопласт					
		3	ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ	0,55	0,55	0,55
			Пленкосинтокартон					
4	ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н	0,25	0,28	0,28		
	Пленкосинтокартон							
5	Пленкосинтокартон			0,25	0,28	0,28		

			ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н			
		6	Стеклотекстолит СТК			Ближайшее к $h_k$ из ряда: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5		

После расчета размеров паза уточняются ширина и высота зубца по формулам табл. 11. Обычно размеры  $b'_z$  и  $b''_z$  получаются близкими, и для дальнейших расчетов берется средняя расчетная ширина зубца.

После уточнения размеров паза составляется его эскиз со спецификацией (таблицей заполнения паза). На эскизе наносятся размеры паза «в свету», в спецификации отмечаются тип и размер провода, тип, размеры и число слоев изоляционных материалов, прокладок и клиньев.

Таблица 11

Уточненные размеры зубцов при трапецеидальных или грушевидных пазух статоров, м,

Размер зубца	По рис.13, а	По рис.13, б	По рис.13, в
$b'_z$	$\pi \frac{D + 2(h_{ш} + h_k)}{Z_1} - b_1$	$\pi \frac{D + 2h_{ш} + b_1}{Z_1} - b_1$	$\pi \frac{D + 2h_{ш} + b_1}{Z_1} - b_1$
$b''_z$	$\pi \frac{D + 2h_{ш}}{Z_1} - b_2$	$\pi \frac{D + 2h_{ш} - b_2}{Z_1} - b_2$	$\pi \frac{D + 2h_{ш}}{Z_1} - b_2$
$h_z$	$h_{ш}$	$h_{ш} - 0,1 \cdot b_2$	$h_{ш}$

### 2.3 Расчет размеров зубцовой зоны статора для обмоток из прямоугольного провода

Процедура расчета зубцовой зоны для обмоток из прямоугольного провода в основном схожа с расчетом зубцовой зоны для обмоток из круглого провода, но имеет ряд отличий.

Так как зубец статора при прямоугольных пазух (рис.14) имеет трапецевидную форму, магнитная индукция в нем даже без учета вытеснения потока в паз не одинакова.

Высота ярма статора  $h_a$  определяется по формуле (19), значение индукции в ярме  $B_a$  берется из табл. 6. Листы электротехнической стали пакета статора у двигателей с  $h > 250$  мм изолируются лакировкой, и коэффициент заполнения пакета сталью  $k_{ст} = 0,95$ .

Минимальная ширина зубца статора, м,

$$b_{z1min} = \frac{B_{\delta} t_{z1} l_{\delta}}{B_{z1max} l k_{ст}}, \quad (33)$$

где  $B_{z1max}$  выбирается по табл. 6 в соответствии со степенью защиты, числом полюсов двигателя и выбранным пазом (открытым или полуоткрытым).

Высота паза (предварительно), м,

$$h_{\text{п}} = \frac{D_a - D}{2} - h_a. \quad (34)$$

Ширина паза, м,

$$b_{\text{п}} = t_{Z1} - b_{Z1\text{min}}. \quad (35)$$

Обычно  $b_{\text{п}} \approx (0,4 \dots 0,5)t_{Z1}$ .

Величина  $b_{\text{п}}$  является предварительной и используется для уточнения размеров проводника.

После определения размеров паза определяются окончательно размеры проводника. Ширина проводника  $b_{\text{эл}}$  должна быть меньше ширины паза на толщину пазовой изоляции (корпусной и витковой) с учетом допусков и припусков на сборку, мм,

$$b_{\text{эл}} = b_{\text{п}} - \Delta'_{\text{из}}, \quad (36)$$

где  $\Delta'_{\text{из}}$  - двухсторонняя толщина изоляции, определяется по табл.12.

Если эффективный проводник состоит из двух элементарных, то

$$b_{\text{эл}} = 0,5(b_{\text{п}} - \Delta'_{\text{из}}). \quad (37)$$

Окончательная ширина проводника  $b_{\text{эл}}$  и высота  $a_{\text{эл}}$  определяется по таблице ПЗ.2 с учетом необходимого сечения проводника  $q_{\text{эл}}$  и требований п.2.1.

После уточнения размеров проводников составляется эскиз паза статора со спецификацией (таблицей заполнения паза). На эскизе наносятся размеры паза «в свету», в спецификации отмечаются тип и размер провода, тип, размеры и число слоев изоляционных материалов, прокладок и клиньев.

В верхней части паза выполняются выемки под клин (см. рис.14, а). Обычно размеры клиновой части паза удовлетворяют следующим условиям:

$$b' - b_{\text{п}} = 2 \dots 5 \text{ мм}, \quad h_{\text{ш}} = 0,5 \dots 1 \text{ мм}, \quad h_{\text{к}} = 3 \dots 3,5 \text{ мм}.$$

Рассчитанные размеры паза являются размерами в штампе, размеры паза «в свету» будут меньше, на величину шихтовочного припуска.

Размеры паза «в свету» с учетом припусков на шихтовку, м:

ширина,

$$b'_{\text{п}} = b_{\text{п}} - \Delta b;$$

(38,а)

ширина под клин,

$$b'_{\text{к}} = b' - \Delta b;$$

(38,б)

высота,

$$h'_{\text{п}} = h_{\text{п}} - \Delta h;$$

(38,в)

где припуски по ширине и высоте паза  $\Delta b$ ,  $\Delta h$  выбираются по табл. 7 в зависимости от высоты оси вращения.

При выборе полуоткрытых пазов ширина шлица  $b_{ш}$  (см. рис.14,б) должна обеспечивать свободную укладку полукатушек в паз, поэтому ширина шлица, мм,

$$b_{ш} = 0,5b_{п} + (0,5...1,0) \quad (39)$$

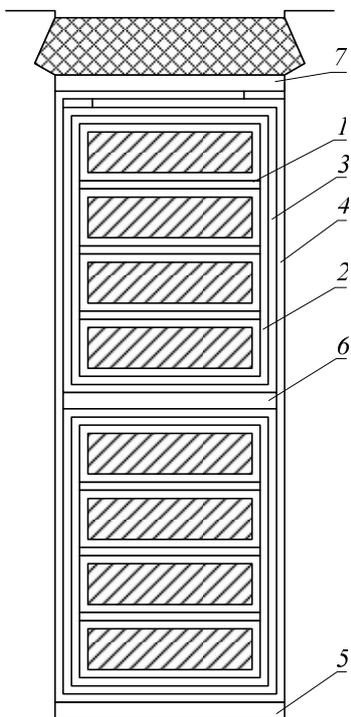
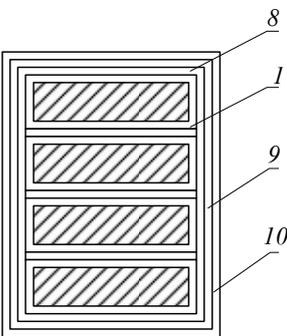
Размеры клиновой части паза при полуоткрытых пазах:

$$h_{ш} = 0,6...0,8 \text{ мм}, h_{к} = 2,5...3,5 \text{ мм}, b' - b_{п} = 1...2 \text{ мм}.$$

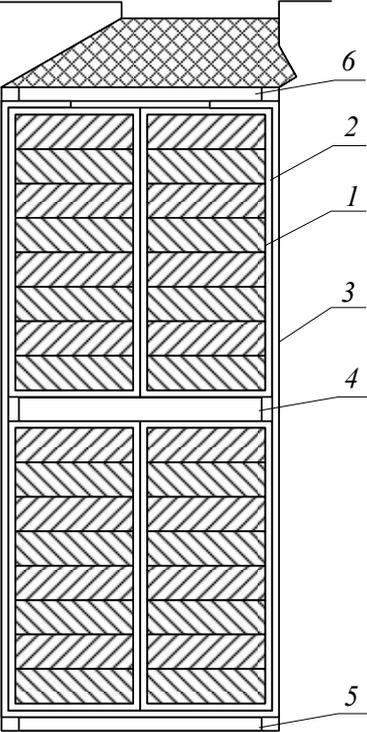
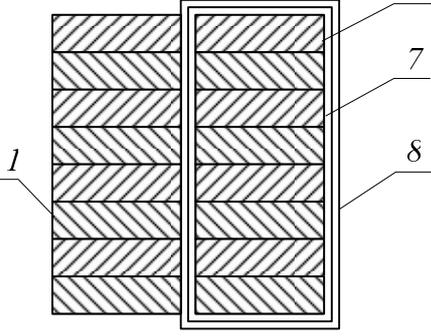
Размеры паза в штампе определяются по формулам (38а)-(38в). Окончательные размеры зубца статора определяются по формулам табл. 13.

Таблица 12

Изоляция обмоток статоров асинхронных машин  
напряжением до 660 В с открытыми и полукрытыми пазами.

Эскиз части обмотки	Позиция	Материал			Двухсторонняя толщина изоляции, мм		
		Наименование	Марка для класса нагревостойкости			по ширине	по высоте
			В	F	Н		
<p>Пазовая</p> 	1	Витковая изоляция (миканит)	ФГФЧО	Г <sub>2</sub> ФЭ1	Г <sub>2</sub> ФК-11	0,2 – 0,25	0,2 – 0,25
	2	Стеклолента	ЛЭС			0,2	0,2
	3	Стекломикафолей	СМФГ	МФП-Т	СМФК	1,4	1,4
	4	Стеклолакоткань	ЛСБ	ЛСБ	ЛСК	0,3	0,45
	5	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК-41	-	0,5
	6	Лакостекломиканит	ГФГС-ЛСБ	ГФПС-ЛСП	ГФКС-ЛСК	-	0,5
	7	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК-41	-	0,5
	Допуск на усадку					0,3	0,5
	Всего на паз (без клина и витковой изоляции)					<b>2,2</b>	<b>5,7</b>
	<p>Лобовая</p> 	8	Стекломикалента	С2ЛФГ	С2ЛФГ	ЛС2ФК	1,4
9		Стеклолента	ЛЭС			0,2	0,2
10		Стеклолента	ЛЭС			0,5	0,5
Разбухание изоляции от пропитки					0,5	0,5	
Двухсторонняя толщина лобовой изоляции					<b>2,5</b>	<b>2,5</b>	

Окончание таблицы 12

Эскиз части обмотки	позиция	Наименование, марка материала			Двухсторонняя толщина изоляции, мм		
		Класс нагревостойкости			по ширине	по высоте	
		В	F	Н			
<p>Пазовая</p> 	1	Обволакивающее покрытие			0,2	0,2	
	2	Бумага телефонная. Бумага фенилоновая бакелитезированная			0,6	0,6	
	3	Лакотканеслюдопласт			1,1	1,1	
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ			
		Стеклотекстолит					
	4	СТ			-	1,0	
		СТЭФ					
	5	СТК			-	0,5	
		Стеклотекстолит					
	6	СТ			-	0,5	
СТЭФ							
Допуск на укладку обмотки					0,3	0,6	
Общий размер изоляции в пазу (без витковой и клина)					<b>2,2</b>	<b>4,5</b>	
<p>Лобовая</p> 	Крайние полукатушки группы						
	1	Обволакивающее покрытие			0,1	0,1	
	7	Стеклолакоткань			0,6	0,6	
		ЛСБ-105/120	ЛСП-130/155	ЛСК-155/180			
		Стеклолента ЛЭС					
	8	Скрепляющий бандаж стеклолентой ЛЭС в двух местах			0,5	0,5	
	Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой)					<b>1,6</b>	<b>1,6</b>
	Средние полукатушки группы						
	1	Обволакивающее покрытие			0,1	0,1	
	Скрепляющий бандаж стеклолентой ЛЭС в двух местах					0,5	0,5
Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой)					<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	

Расчетные размеры трапецеидальных зубцов статора

Размер	Паз	
	По рис.14,а	По рис.14,б
$b_{Z1min}$	$\frac{\pi D}{Z_1} - b_{\pi}$	$\pi \frac{D + 2(h_{ш} + h_{к})}{Z_1} - b_{\pi}$
$b_{Z1max}$	$\frac{\pi(D + 2h_{\pi})}{Z_1} - b_{\pi}$	$\frac{\pi(D + 2h_{\pi})}{Z_1} - b_{\pi}$
$h_{Z1}$	$h_{\pi}$	$h_{\pi}$

## 2.4 Выбор воздушного зазора

Воздушный зазор  $\delta$  определяет энергетические и виброакустические показатели машины.

При малых воздушных зазорах уменьшаются магнитное напряжение воздушного зазора, уменьшается суммарное падение магнитного напряжения, уменьшается намагничивающий ток, возрастает коэффициент мощности. При малых зазорах виброакустические показатели ухудшаются, увеличиваются пульсационные и поверхностные потери, обусловленные зубчатостью статора и ротора, КПД может уменьшиться.

При больших воздушных зазорах улучшаются виброакустические показатели, но увеличенное падение магнитного напряжения в зазоре вызывает рост намагничивающего тока, увеличение потерь холостого хода, снижение КПД и  $\cos\varphi$ .

С ростом мощности машины происходит увеличение воздушного зазора вследствие увеличения массы ротора и увеличения амплитуды его радиальных биений. Так в микромашинах воздушный зазор составляет 0,1...0,2 мм, а в машинах большой мощности он может достигать 1,5...2,0 мм. Выбор оптимального воздушного зазора – трудоемкая задача, решаемая с помощью ЭВМ. В учебных расчетах следует пользоваться эмпирическими формулами и рекомендациями, основанными на опыте уже созданных машин.

Так как пазы статора имеют открытие, для уменьшения пульсационных и поверхностных потерь значение воздушного зазора после расчета следует округлять в большую сторону. А пазы ротора по возможности следует стремиться сделать закрытыми.

В машинах с номинальной мощностью  $P_{ном} \leq 20$  кВт и  $2p = 2$  воздушный зазор составляет, м,

$$\delta = (0,3 + 1,5D) \cdot 10^{-3}. \quad (40,$$

а)

В машинах с  $P_{ном} \leq 20$  кВт и  $2p > 2$  воздушный зазор равен, м,

$$\delta = (0,25 + D) \cdot 10^{-3}. \quad (40,$$

б)

В двигателях средней и большой мощности воздушный зазор, м,

$$\delta = \frac{D}{1,2} \left(1 + \frac{9}{2p}\right) \cdot 10^{-3}. \quad (40,$$

в)

Рассчитанное значение  $\delta$  следует округлить до второго знака после запятой, кратного 5; в асинхронных машинах величины воздушных зазоров образуют ряд: 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8 – окончательную величину воздушного зазора следует выбирать из значений этого ряда.

Выбранный по приведенным рекомендациям воздушный зазор обычно превышает минимально допустимый по механическим условиям. Но после завершения электромагнитного расчета двигателя обязательно следует произвести механический расчет вала на прочность и жесткость, максимальный расчетный прогиб вала не должен превышать 10% от принятой величины  $\delta$ .

## 2.5 Расчет ротора

Роторы асинхронных двигателей бывают короткозамкнутыми и фазными. Расчет фазных роторов здесь не рассматривается. Короткозамкнутые роторы по конструкции и технологии изготовления делятся на два типа: литые и сварные.

В сварных конструкциях в пазы ротора укладываются стержни, после чего с торцов их замыкают, приваривая или припаивая короткозамыкающие кольца. В литых конструкциях и стержни и кольца заливают одновременно как единое целое. На короткозамыкающих кольцах отливают также вентиляционные лопасти, выполняющие роль вентилятора. На кольцах кроме того, предусматриваются места для балансировочных шайб, необходимых при балансировке ротора.

Сварные конструкции чаще всего применяются в крупных машинах, мощностью 500 кВт и выше. В остальных случаях, если особые требования не предусматриваются, используются литые конструкции.

Короткозамкнутые роторы не имеют строго определенного числа фаз и числа полюсов, один и тот же ротор может работать в машинах, статоры которых рассчитаны на разное число полюсов.

Особое место в расчете отводится правильному выбору числа зубцов (пазов) ротора  $Z_2$ . Это объясняется тем, что в воздушном зазоре помимо основной гармоники магнитного поля присутствуют высшие гармоники (вследствие зубчатости статора и ротора, пульсаций источника питания, насыщения стали зубцов и сердечников и т.п.). Эти гармоники наводят в стержнях ротора ЭДС соответствующих частот, и соответствующие им то-

ки. В результате взаимодействия полей и токов от высших гармоник могут появляться паразитные электромагнитные моменты, ухудшающие механические характеристики двигателя. При особо неблагоприятных соотношениях  $Z_2$  и  $Z_1$  в кривой момента могут возникнуть провалы, и двигатель не сможет разогнаться до номинальной скорости. Если  $Z_2 = Z_1$ , то двигатель вообще не запустится.

Влияние высших гармоник особенно заметно в двигателях малой мощности с малыми воздушными зазорами. Рекомендуемые значения чисел пазов (зубцов) короткозамкнутого ротора представлены в табл. 14.

Внешний диаметр ротора, м,

$$D_2 = D - 2\delta. \quad (41)$$

Предварительное значение тока в роторе, А,

$$I_2 = k_i I_{1\text{ном}} v_i; \quad (42)$$

где  $k_i$  - коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания,

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cos \varphi, \quad (43)$$

$v_i$  - коэффициент приведения токов,

$$v_i = \frac{2m\omega_1 k_{\text{обл}}}{Z_2 k_{\text{ск}}}, \quad (44)$$

где коэффициенты  $k_{\text{обл}}$ ,  $k_{\text{ск}}$  определяются по ПРИЛОЖЕНИЮ 1, причем  $k_{\text{ск}}$  рассчитывается для пазов ротора, имеющих скос, если пазы нескошены, то  $k_{\text{ск}} = 1$ .

Сечение стержней ротора, м<sup>2</sup>,

$$q_c = \frac{I_{2\text{ном}}}{J_2}; \quad (45)$$

где  $J_2$  - плотность тока в стержнях ротора. В литых и стержневых алюминиевых обмотках ротора:

$$J_2 = (2,5 \dots 3,5) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \text{ для двигателей со степенью защиты IP44(54),}$$

$$J_2 = (2,8 \dots 4,0) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \text{ для двигателей со степенью защиты IP23;}$$

Для стержневых медных обмоток  $J_2 = (4,0 \dots 8,0) \cdot 10^6 \text{ А/мм}^2$ , меньшие значения соответствуют машинам большей мощности.

Конструкции пазов ротора весьма разнообразны, наиболее используемые из них представлены на рис.15.

В асинхронных машинах мощностью до 50 – 60 кВт пазы ротора грушевидные полузакрытые ( $h < 160$  мм) или закрытые ( $160 \leq h \leq 250$  мм), см. рис.15,а. В более крупных машинах при  $h = 280 \dots 355$  мм для повышения пусковых моментов используются глубокие пазы, пазы специальной формы (рис 15,б,е) или прямоугольные (рис.15,д): открытые (под алюминиевые стержни) и полузакрытые (под медные стержни) со сварными обмотками.



Таблица 14

Рекомендуемые числа пазов (зубцов) короткозамкнутого ротора

$2p$	$Z_1$	Число пазов (зубцов) короткозамкнутого ротора $Z_2$	
		без скоса пазов	со скосом пазов
2	12	9, 15	-
	18	11, 12, 15, 21, 22	14, (18), 19, 22, 26, 28, (30), 31, 33, 34, 35
	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
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	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
10	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
	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 136, 138, 140, 142, 146	99, 101, 103, 117, 123, 137, 139
12	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)
	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

## 2.6 Расчет зубцовой зоны ротора

Размеры паза рассчитываются исходя из требуемого сечения стержня  $q_c$  и допустимой индукции в зубце ротора  $B_{z2}$ .

При трапецевидальных пазах ротора (рис. 16) его зубец имеет параллельные стенки, размеры паза определяются в следующей заданной последовательности.

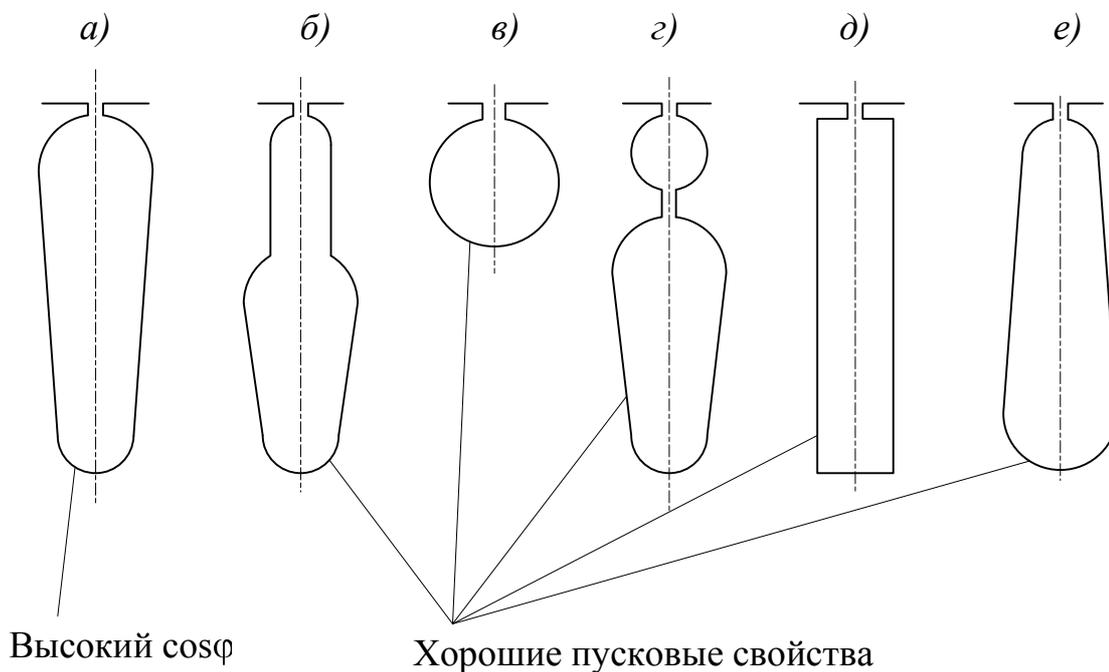


Рис.15. Конфигурации пазов короткозамкнутых роторов

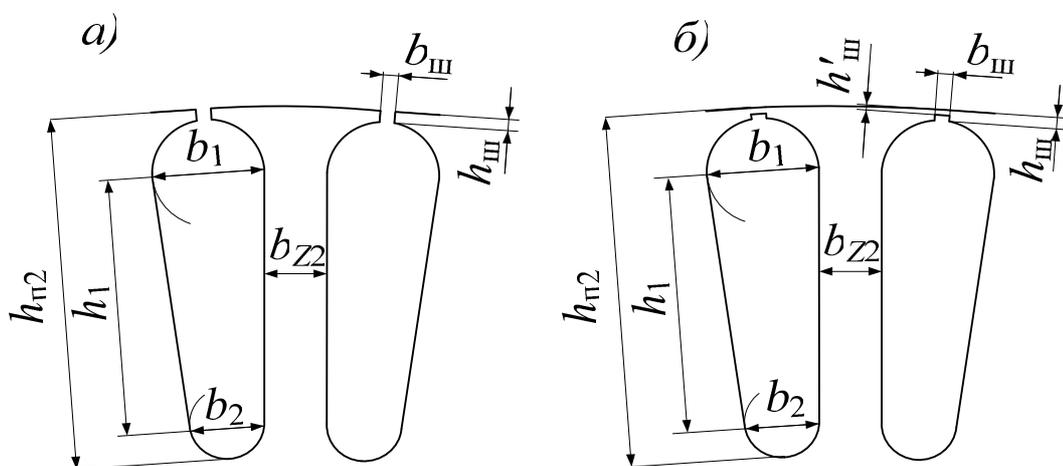


Рис.16. Трапецевидальные пазы ротора:  
а – полузакрытые, б – закрытые

Ширина зубца ротора, м,

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} t_{z2} l_{\delta}}{B_{z2} l_{cr2} k_{cr}}; \quad (46)$$

где  $t_{z2}$  - зубцовое деление ротора, м,

$$t_{z2} = \frac{\pi D_2}{Z_2}, \quad (47)$$

$B_{z2}$  - индукция в зубце ротора, Тл, по табл. 6.

$l_{ст2}$  - длина пакета ротора, м, при  $h \leq 250$  мм  $l_{ст2} = l_{\delta}$ .

В двигателях с  $h < 100$  мм размеры шлица (см. рис.16,а)  $b_{ш} = 1,0$  мм,  $h_{ш} = 0,5$  мм; при  $h = 112...132$  мм:  $b_{ш} = 1,5$  мм,  $h_{ш} = 0,75$  мм.

В двигателях с  $h = 160...250$  мм (см. рис.16,б) размеры шлица  $b_{ш} = 1,5$  мм,  $h_{ш} = 0,7$  мм, высота перемычки  $h'_{ш} = 0,3$  у двигателей с  $2p \geq 4$ , в двух-полюсных двигателях  $h'_{ш} = 1,0...1,5$  мм

Размеры паза (см. рис.16), м,

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2(h'_{ш} + h_{ш})) - Z_2 b_{z2}}{\pi + Z_2}, \quad (48)$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left( \frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4q_c}{\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}}}, \quad (49)$$

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Z_2}{2\pi}. \quad (50)$$

Значения размеров паза округляются до десятых долей миллиметра, и уточняется сечение стержня ротора, м<sup>2</sup>,

$$q_c = \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + \frac{b_1 + b_2}{2} h_1. \quad (51)$$

Для высококачественной заливки ротора алюминием меньший диаметр закругления нижней части паза составляет  $b_2 > 1,5...2$  мм у двигателей с  $h \leq 132$  мм и  $b_2 > 2,5...3$  мм у двигателей с  $h \geq 160$  мм.

Высота паза ротора, мм,

$$h_{п2} = h_1 + 0,5(b_1 + b_2) + h_{ш} + h'_{ш}. \quad (52)$$

Расчетная высота зубца ротора, мм,

$$h_{z2} = h_{п2} - 0,1b_2. \quad (53)$$

При выборе конструкции ротора с прямоугольными пазами, по экономическим соображениям, предпочтение отдается обмотке с алюминиевыми стержнями (рис. 17).

Минимальная ширина зубца ротора  $b_{z2min}$  определяется по формуле (46), с учетом (47), в которую вместо величины  $B_{z2}$  следует подставлять  $B_{z2max}$  взятое по табл. 6.

Ширина паза в штампе, м,

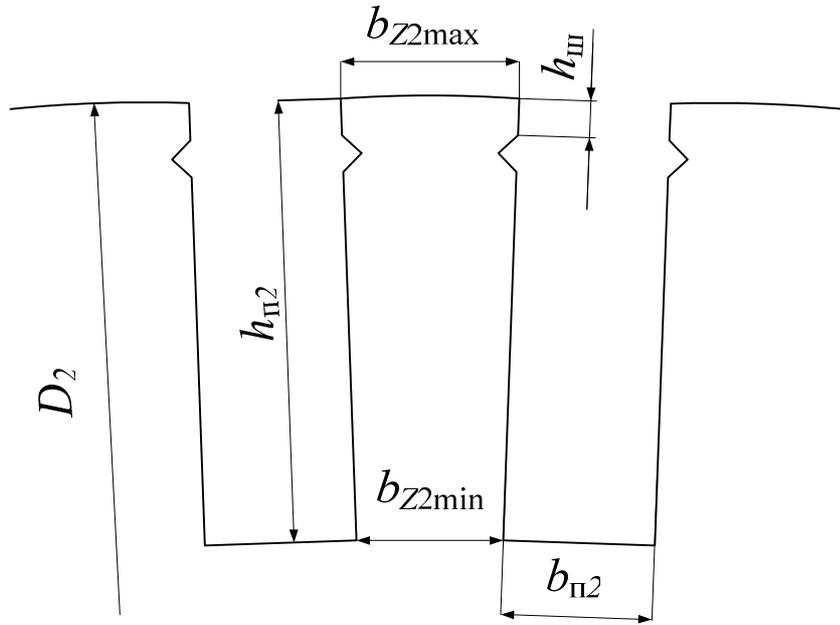


Рис.17. Зубцовая зона ротора с прямоугольными пазами

$$b_{п2} = \frac{t_{Z2} - b_{Z2min} \pm (t_{Z2} - b_{Z2min})^2 - S_{п2} \frac{8\pi}{Z_2}}{2}, \quad (54)$$

где  $S_{п2}$  - полная площадь поперечного сечения паза,  $m^2$ ,

$$S_{п2} \approx 1,1q_c.$$

Из двух значений  $b_{п}$  выбирается значение, удовлетворяющее требованиям конструкции. Ширина алюминиевой шины  $b_c$  должна быть меньше значения  $b_{п2}$  на величину припуска на сборку сердечника (см. табл. 8).

Высота паза ротора в штампе, м,

$$h_{п2} = h_c + \Delta h_{п} + h_{ш}; \quad (55)$$

где  $h_c$  - высота стержня, м,

$$h_c = \frac{q_c}{b_c}, \quad (56)$$

$\Delta h_{п}$  - припуск на сборку, м, (см. табл. 8),

$h_{ш}$  - высота шлицевой части паза,  $h_{ш} = 4 \cdot 10^{-3}$  м.

Высота зубца ротора, м,

$$h_{Z2} = h_{п2}.$$

Минимальная ширина зубца ротора с открытыми пазами, м,

$$b_{Z2min} = \frac{\pi(D_2 - 2h_{п2})}{Z_2} - b_{п2}. \quad (57)$$

Максимальная ширина зубца ротора с открытыми пазами, м,

$$b_{Z2max} = \frac{\pi D_2}{Z_2} - b_{п2}. \quad (58)$$

После расчета размеров зуба следует проверить максимальную индукцию в нем, которая не должна превышать рекомендуемые значения, Тл,

$$B_{Z2\max} = \frac{B_{\delta} t_{Z2} l_{\delta}}{b_{Z2\min} l_{\text{ст}2} k_{\text{ст}}} \quad (59)$$

Расчет размеров паза заканчивается построением эскиза паза ротора на миллиметровой бумаге с указанием его размеров.

После расчета размеров паза рассчитываются размеры короткозамыкающих колец.

Ток короткозамыкающего кольца, А,

$$I_{\text{кл}} = \frac{I_2}{\Delta}, \quad (60)$$

$$\text{где } \Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}. \quad (61)$$

Площадь поперечного сечения короткозамыкающего кольца, м<sup>2</sup>,

$$q_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{кл}}}{J_{\text{кл}}}, \quad (62)$$

где  $J_{\text{кл}}$  - плотность тока в короткозамыкающем кольце, А/м<sup>2</sup>, принимается на 15...20% меньше, чем плотность тока в стержне обмотки  $J_2$ .

В роторах со вставными стержнями из-за необходимости сварки или пайки короткозамыкающие кольца устанавливаются на некотором расстоянии от пакета ротора. Короткозамыкающие кольца представляют собой в сечении прямоугольник (рис.18, а), размеры которого  $h_{\text{кл}} \times b_{\text{кл}}$  выбираются с учетом следующих требований:

Высота кольца должна быть, м,

$$h_{\text{кл}} = 1,1 \dots 1,25 h_{\text{п}2}; \quad (63)$$

ширина кольца, м,

$$b_{\text{кл}} = \frac{q_{\text{кл}}}{h_{\text{кл}}}. \quad (64)$$

В роторах с литой обмоткой (рис.18, б) короткозамыкающие кольца отливают вместе с обмоткой, поэтому они всегда плотно прилегают к торцам сердечника ротора. Помимо своей основной функции - обеспечения электрического соединения стержней обмотки, кольца удерживают сердечник в спрессованном состоянии, и к ним крепятся балансировочные грузы. Кольца в поперечном сечении имеют вид неправильной трапеции.

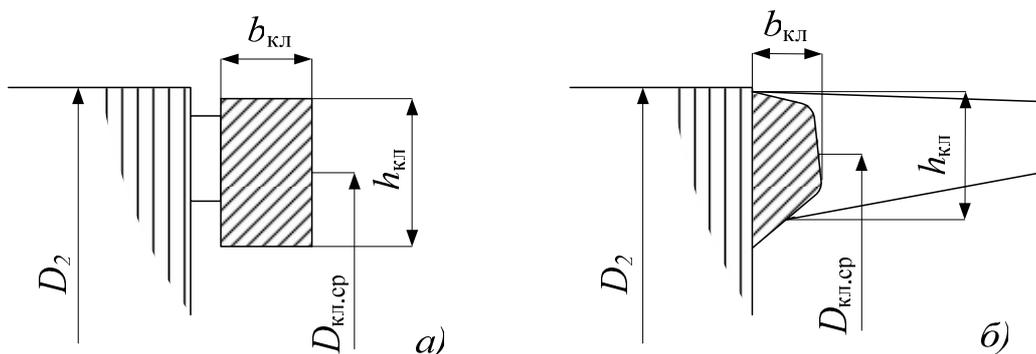


Рис.18. Размеры замыкающих колец: а- со сварной обмоткой, б – с литой обмоткой

Высота кольца составляет, м,

$$h_{\text{кл}} \geq 1,25h_{\text{п2}}; \quad (65)$$

ширина кольца, м,

$$b_{\text{кл}} = \frac{q_{\text{кл}}}{h_{\text{кл}}}. \quad (66)$$

Средний диаметр короткозамыкающих колец для литых и сварных конструкций равен, м,

$$D_{\text{кл.ср}} = D_2 - h_{\text{кл}} \quad (67)$$

Одновременно с заливкой стержней и колец отливаются вентиляционные лопатки (см. рис.18, б). Количество лопаток выбирается равным простому числу, в два - три раза меньшему, чем число пазов. Длина вентиляционных лопаток на 5...10 мм меньше, чем длина вылета лобовых частей (см. п.2.9).

## 2.7 Расчет сердечника ротора

Сердечники роторов асинхронных машин с  $D_2 < 990$  мм насаживаются непосредственно на вал без промежуточной втулки. В двигателях с  $h \leq 250$  мм применяется горячая посадка ротора на вал без шпонки. В двигателях больших размеров сердечник ротора крепится с помощью шпонки.

В двигателях с  $h \geq 225$  мм в сердечниках роторов выполняются аксиальные вентиляционные каналы (рис. 19) в один или несколько рядов. Число аксиальных каналов в роторе обычно от 9 до 12, диаметр каналов  $d_{\text{к2}} = 15...30$  мм. Большие диаметры соответствуют многополюсным машинам. При многорядном исполнении каналов их диаметр уменьшается до 10...15 мм. Кроме своей основной задачи, вентиляционные каналы существенно уменьшают массу и инерционность ротора.

Радиальные вентиляционные каналы в роторе выполняются в том случае, если длина сердечника ротора превышает 0,25...0,3 м. Принцип расчета и размеры радиальных каналов в роторе аналогичны расчету ради-

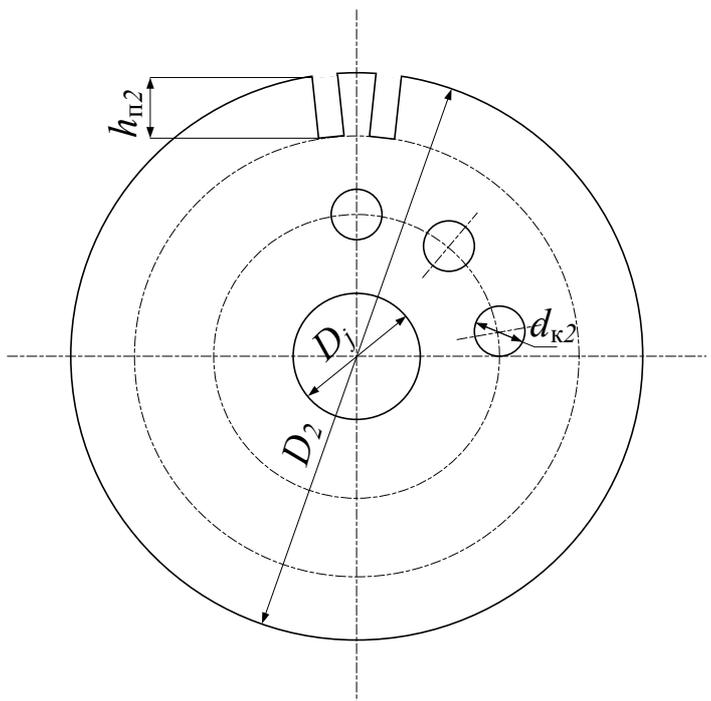


Рис. 19. Аксиальные вентиляционные каналы на роторе

альных каналов в статоре. С учетом приведенных ранее рекомендаций определяют длину пакета ротора  $l_{ст2}$  и длину стержня ротора  $l_c$ .

Внутренний диаметр ротора равен внешнему диаметру вала, м,  

$$D_j = D_b = k_b D_a, \quad (68)$$

где  $k_b$  - коэффициент, определяемый по табл. 15.

Таблица 15

Значения коэффициента $k_b$				
$h, \text{ мм}$	50...63	71...250	280...355	
$2p$	2...6	2...8	2	4...12
$k_b$	0,19	0,23	0,22	0,23

### 2.8 Расчет магнитной цепи

Основной задачей расчета магнитной цепи является определение степени насыщения машины, намагничивающего тока, который определяет ее коэффициент мощности. Расчет магнитной цепи производится для режима холостого хода, при котором насыщение магнитной цепи машины, особенно зубцовых зон, максимальные. Явление насыщения зубцовых зон приводит к уплощению кривой магнитной индукции в воздушном зазоре (рис. 20).

Пересечение реальной кривой 2 с синусоидой основной гармонической происходит в точках, отстоящих от оси симметрии одного полупериода на угол  $\approx 35^\circ$ . Поэтому за расчетное значение индукции принимается не амплитудное значение, а величина, Тл,

$$B_{\text{расч}} = B_{\text{max}} \cos 35^\circ \approx 0,82 B_{\text{max}}.$$

При определении магнитных напряжений участков магнитной цепи следует руководствоваться следующими соображениями. Для воздушного зазора в силу линейности его магнитных характеристик допустимо проводить прямой расчет намагничивающей силы по величине  $B_\delta$ . При расчете магнитных напряжений на ненасыщенных участках (ядро, станина, полюсы, зубцы и т.п.), если индукция в них не превышает 1,8 Тл, для определения напряженности магнитного поля следует пользоваться основной кривой намагничивания (табл. П.4.1, П.4.4). Если в зубцах статора или ротора магнитная индукция превышает 1,8 Тл, следует рассчитать коэффициент

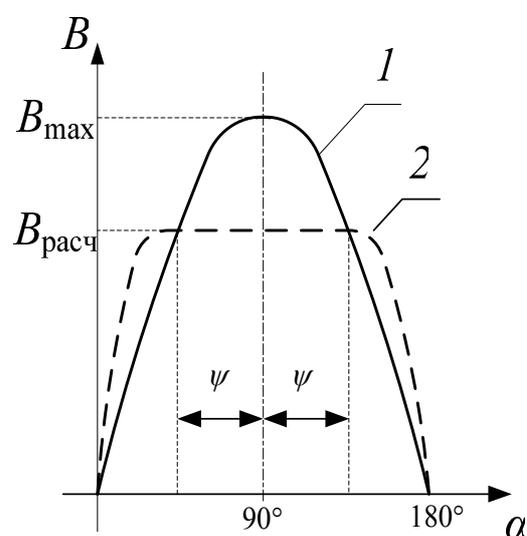


Рис. 20. Распределение индукции в воздушном зазоре асинхронной машины: 1 – в ненасыщенном состоянии; 2 – в насыщенном состоянии.

вытеснения магнитного потока в паз в соответствующем сечении зубца. Определение напряженности магнитного поля следует вести по зависимостям, представленным на рис. П.4.1, П.4.2.

Коэффициент вытеснения потока в паз на произвольной высоте  $x$  зубца или паза,

$$k_{\text{пв}} = \frac{b_{\text{пв}} l_{\delta}}{b_{Zx} l_{\text{ст}} k_{\text{ст}}}, \quad (69)$$

где  $b_{\text{пв}}$  - расчетная ширина паза на высоте  $x$ ,

$b_{Zx}$  - расчетная ширина зубца на высоте  $x$ ,

В асинхронных машинах для магнитопроводов статора и ротора, как правило, используется одна и та же марка электротехнической стали: для высот оси вращения  $h \leq 250$  мм применяется сталь 2013, для высот оси вращения  $280 \leq h \leq 355$  мм применяется сталь 2312.

Толщина листа обычно составляет 0,5 мм.

Расчет магнитного напряжения всех участков следует проводить на пару полюсов машины, вдоль **замкнутой** линии магнитного поля.

Падение магнитного напряжения в воздушном зазоре, А,

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} B_{\delta} \delta k_{\delta}; \quad (70)$$

где  $k_{\delta}$  – коэффициент воздушного зазора:

для зубчатого статора и гладкого ротора (закрытые пазы),

$$k_{\delta} = \frac{t_{z1} + 10\delta}{t_{z1} - b_{\text{ш}} + 10\delta}; \quad (71)$$

для зубчатого статора и зубчатого ротора,

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} k_{\delta 2}, \quad (72)$$

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \delta},$$

(73,а)

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{\text{ш1}}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{\text{ш1}}}{\delta}\right)},$$

(73,б)

$$k_{\delta 2} = \frac{t_{z2}}{t_{z2} - \gamma_2 \delta},$$

(74,а)

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{m2}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{m2}}{\delta}\right)},$$

(74,б)

Величины с индексами «1» относятся к статору, величины с индексами «2» - к ротору.

Падение магнитного напряжения в зубцах статора с трапецеидальными или грушевидными пазами (зубцы с параллельными гранями), А,

$$F_{z1} = 2h_{z1} \cdot H_{z1}, \quad (75)$$

где  $H_{z1}$  - напряженность магнитного поля, А/м, определяется с помощью таблицы П.4.1, П.4.4 или рис. П.4.1, П.4.2 по рассчитанному, при необходимости, коэффициенту  $k_{\Pi}$  и уточненной индукции в зубце  $B_{z1}$ , Тл,

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} t_{z1} l_{\delta}}{b_{z1} l_{cr1} k_{cr}}, \quad (76)$$

$h_{z1}$  определяется по табл.13.

Падение магнитного напряжения в зубцах статора с прямоугольными пазами, А,

$$F_{z1} = 2h_{z1} \cdot H'_{z1}; \quad (77)$$

где  $H'_{z1}$  - расчетная напряженность поля в зубцах статора, А/м,

$$H'_{z1} = (H_{z1max} + 4H_{z1cp} + H_{z1min}) / 6, \quad (78)$$

$H_{z1max}$ ,  $H_{z1cp}$ ,  $H_{z1min}$  - напряженность магнитного поля в наименьшем, среднем и наибольшем сечениях зубца, А/м, определяемая с помощью таблицы П.4.1, П.4.4 или рис. П.4.1, П.4.2 по значениям  $B_{z1max}$ ,  $B_{z1cp}$  и  $B_{z1min}$ , которая рассчитываются по формуле (76), при этом вместо  $b_{z1}$  подставляются значения наименьшей, средней и наибольшей ширины зубца по рис.14. Коэффициент вытеснения потока в паз, если это необходимо, рассчитывается для тех же сечений зубца, в которых определялась индукция  $B_{z1max}$ ,  $B_{z1cp}$  и  $B_{z1min}$ .

Падение магнитного напряжения в зубцах ротора с грушевидными пазами (зубцы с параллельными гранями), А,

$$F_{z2} = 2h_{z2} \cdot H_{z2}, \quad (79)$$

где  $H_{z2}$  - напряженность магнитного поля, А/м, определяется с помощью таблицы П.4.1, П.4.4 или рис. П.4.1, П.4.2 по рассчитанному при необходимости, коэффициенту  $k_{\Pi}$  и уточненной индукции в зубце  $B_{z2}$ , Тл,

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} t_{z2} l_{\delta}}{b_{z2} l_{cr2} k_{cr}}. \quad (80)$$

Падение магнитного напряжения в зубцах ротора с прямоугольными пазами, А,

$$F_{Z2} = 2h_{Z2} \cdot H'_{Z2}; \quad (81)$$

где  $H'_{Z2}$  - расчетная напряженность поля в зубцах ротора, А/м,

$$H'_{Z2} = (H_{Z2\max} + 4H_{Z2\text{cp}} + H_{Z2\min})/6, \quad (82)$$

$H_{Z2\max}$ ,  $H_{Z2\text{cp}}$ ,  $H_{Z2\min}$  - напряженности магнитного поля в наименьшем, среднем и наибольшем сечении зубца, А/м, с помощью таблицы П.4.1, П.4.4 или рис. П.4.1, П.4.2 по значениям  $B_{Z2\max}$ ,  $B_{Z2\text{cp}}$  и  $B_{Z1\min}$ , которые рассчитываются по формуле (80), при этом вместо  $b_{Z2}$  подставляются наименьшая, средняя и наибольшая ширина зубца по рис.17. Коэффициент вытеснения потока в паз, если это необходимо, рассчитывается для тех же сечений зубца, в которых определялась индукция  $B_{Z1\max}$ ,  $B_{Z1\text{cp}}$  и  $B_{Z1\min}$ .

Падение магнитного напряжения в ярме статора, А,

$$F_a = L_a H_a; \quad (83)$$

где  $L_a$  - длина средней магнитной силовой линии в ярме статора, м,

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{2p}, \quad (84)$$

$h_a$  - высота ярма статора, м,

$$h_a = 0,5(D_a - D) - h_n, \quad (85)$$

$H_a$  - напряженность магнитного поля в ярме статора, А/м, найденная по таблицам П.4.2, П.4.5 при индукции в ярме, Тл,

$$B_a = \frac{\Phi}{2h'_a l_{\text{ст1}} k_{\text{ст}}}, \quad (86)$$

$h'_a$  - расчетная высота ярма статора, м,

$$h'_a = \frac{(D_a - D)}{2} - h_n - \frac{2}{3}d_{\text{к1}}m_{\text{к1}}, \quad (87)$$

$d_{\text{к1}}$ ,  $m_{\text{к1}}$  - диаметр и число **рядов** аксиальных вентиляционных каналов в статоре, если аксиальные каналы отсутствуют,  $m_{\text{к1}} = 0$  и  $h_a = h'_a$ .

Падение магнитного напряжения в ярме ротора, А,

$$F_j = L_j H_j; \quad (88)$$

где  $L_j$  - длина средней магнитной силовой линии в ярме ротора, м,

для двигателей с  $2p \geq 4$

$$L_j = \frac{\pi(D_j + h_j)}{2p},$$

(89,а)

для двигателей с  $2p = 2$ , из-за замыкания части силовых линий через вал,

$$L_j = 2h_j$$

$$(89,б)$$

$h_j$  - высота ярма ротора, м,

$$h_j = 0,5(D_2 - D_j) - h_{н2}, \quad (90)$$

$H_j$  - напряженность магнитного поля в ярме статора, А/м, найденная по таблицам П.4.2, П.4.5 при индукции в ярме, Тл,

$$B_j = \frac{\Phi}{2h'_j l_{cr1} k_{cr}}, \quad (91)$$

$h'_j$  - расчетная высота ярма статора, м,

$$h'_j = \frac{2+p}{3,2p} \left( \frac{D_2}{2} - h_{н2} \right) - \frac{2}{3} d_{к2} m_{к2}, \quad (92)$$

$d_{к2}, m_{к2}$  - диаметр и число **рядов** аксиальных вентиляционных каналов в роторе, если аксиальные каналы отсутствуют,  $m_{к2} = 0$  и  $h_j = h'_j$ .

Суммарное падение магнитного напряжения, А,

$$F_{\mu} = F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j. \quad (93)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи, о.е.,

$$k_{\mu} = \frac{F_{\mu}}{F_{\delta}}. \quad (94)$$

Коэффициент насыщения зубцов, о.е.,

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}}, \quad (95)$$

Намагничивающий ток, А,

$$I_{\mu} = \frac{pF_{\mu}}{0,9m\omega_1 k_{об1}};$$

$$(96,а)$$

относительное значение намагничивающего тока, о.е.,

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1ном}}.$$

$$(96,б)$$

Значение  $I_{\mu}^*$  у рационально спроектированного двигателя средней мощности должно находиться в пределах 0,2 – 0,35. Если полученное значение  $I_{\mu}^*$  меньше рекомендуемых пределов, то у такого двигателя размеры выбраны завышенными, даже при высоких КПД и  $\cos \varphi$  будут плохие экономические показатели, в частности слишком большой расход материалов на единицу мощности. Если  $I_{\mu}^* > 0,35$ , то двигатель будет иметь низкие КПД и  $\cos \varphi$ , вследствие заниженных размеров. Лишь в двигателях мощ-

ностью до 2...3 кВт  $I_{\mu}^*$  может достигать значений 0,5...0,6 вследствие большого падения магнитного напряжения в воздушном зазоре.

## 2.9 Расчет параметров схемы замещения

Параметры T – образной схемы замещения (рис.21) зависят от режима работы, поэтому для ненормальных режимов, например для расчета пусковых характеристик, приходится учитывать изменение параметров вследствие насыщения и явления вытеснения тока.

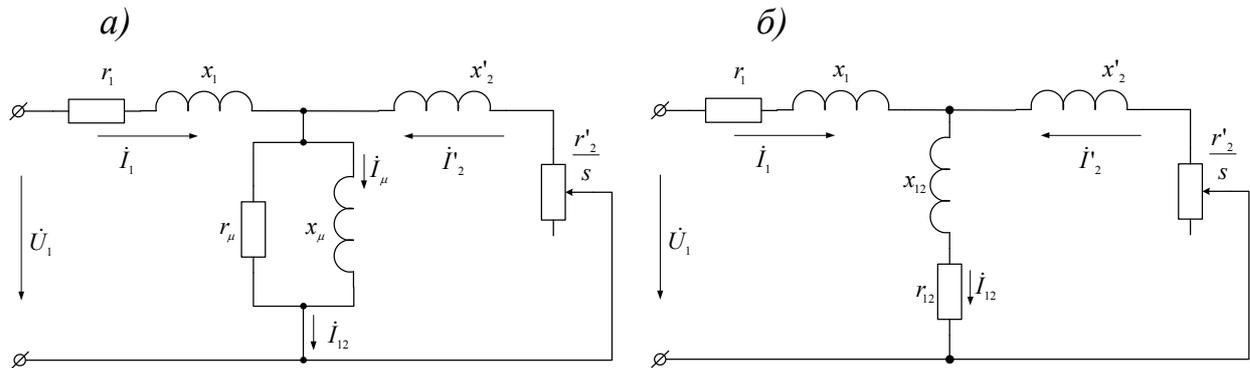


Рис.21. Схемы замещения фазы приведенной асинхронной машины

Для расчета сопротивлений обмотки статора сначала следует определить длину проводников обмотки.

Лобовая часть обмотки как из круглого, так и из прямоугольного провода имеет достаточно сложную конфигурацию (рис. 22), и точный расчет длины лобовой части как правило в инженерных расчетах не требуется. Достаточно достоверные результаты дают эмпирические формулы.

Длина лобовой части *всыпной обмотки из круглого провода*, м,

$$l_{л} = K_{л} b_{кт} + 2B, \quad (97)$$

где  $K_{л}$  - коэффициент удлинения лобовой части, по табл. 16,

$b_{кт}$  - средняя ширина катушки, м,

$$b_{кт} = \frac{\pi(D + h_{п})}{2p} \beta, \quad (98)$$

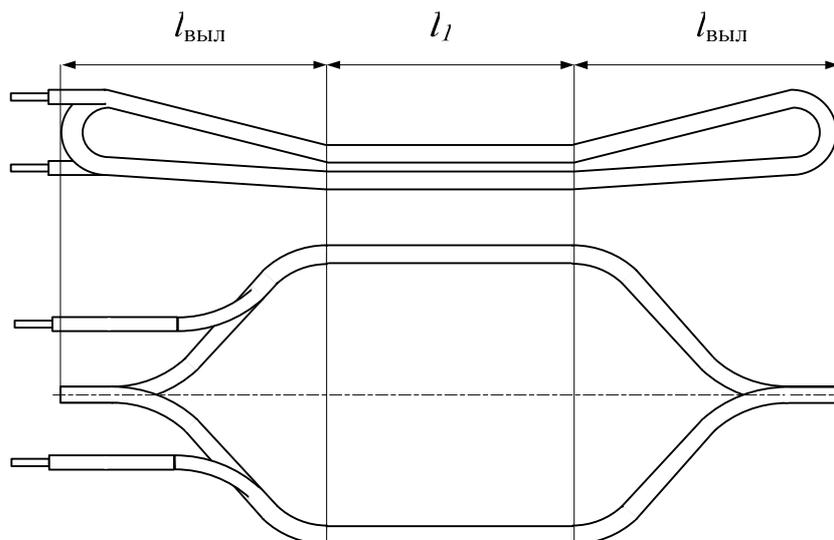


Рис.22. Катушка двухслойной обмотки статора

$\beta$  - укорочение шага обмотки (см. ПРИЛОЖЕНИЕ 1),

$B$  - вылет прямолинейной части катушек, для обмотки, укладываемой в пазы до запрессовки сердечника в корпус  $B = 0,01$  м, для обмотки, укладываемой в пазы после запрессовки сердечника в корпус  $B = 0,015$  м.

Вылет лобовой части *всыпной обмотки из круглого провода*, м,

$$l_{\text{ВЫЛ}} = K_{\text{ВЫЛ}} b_{\text{КТ}} + B, \quad (99)$$

где  $K_{\text{ВЫЛ}}$  - коэффициент вылета лобовой части по табл. 16.

Таблица 16

Значения коэффициента  $K_l$

Число полюсов	Катушки обмотки статора			
	Лобовые части неизолированы		Лобовые части изолированы лентой	
	$K_l$	$K_{\text{ВЫЛ}}$	$K_l$	$K_{\text{ВЫЛ}}$
$2p=2$	1,2	0,26	1,45	0,44
$2p=4$	1,3	0,4	1,55	0,5
$2p=6$	1,4	0,5	1,75	0,62
$2p \geq 8$	1,5	0,5	1,9	0,72

Длина лобовой части *обмотки из прямоугольного провода*, м,

$$l_l = K_l b_{\text{КТ}} + 2B + h_{\text{П}};$$

$$(100)$$

где  $K_l$  - коэффициент удлинения лобовой части,

$$K_l = \frac{1}{\sqrt{1 - m_l^2}},$$

$$(101)$$

$$m_{\text{л}} = \frac{b + 3,5 \cdot 10^{-3}}{t_{\text{Z1}}},$$

(102)

$b$  - ширина меди катушки, м,

$$b = b_{\text{п}} - \Delta'_{\text{из}},$$

(103)

$B$  - вылет прямолинейной части катушек, для обмотки из прямоугольного провода  $B = 0,025$  м,

$b_{\text{кт}}$  - средняя ширина катушки, м, рассчитывается по (98).

Вылет лобовой части обмотки из прямоугольного провода, м,

$$l_{\text{выл}} = K_{\text{выл}} b_{\text{кт}} + B + 0,5h_{\text{п}};$$

(104)

где  $K_{\text{выл}}$  - коэффициент вылета лобовой части,

$$K_{\text{выл}} = 0,5K_{\text{л}}m_{\text{л}}.$$

(105)

Средняя длина витка обмотки, м,

$$l_{\text{ср}} = 2(l_{\delta} + l_{\text{л}}).$$

(106)

Общая длина проводников фазы обмотки статора, м,

$$L = l_{\text{ср}} w_1.$$

(107)

Активное сопротивление обмотки статора, Ом,

$$r_1 = k_R \rho_g \frac{L}{q_{\text{эф}} a};$$

(108)

где  $k_R$  - коэффициент, учитывающий увеличение потерь вследствие вытеснения тока, для номинального режима  $k_R = 1$ ,

$\rho_g$  - удельное сопротивление обмоточного провода при расчетной температуре, Ом·м, по табл. 17.

Таблица 17

Удельные электрические сопротивления материала проводников

Тип обмотки	Материал	Удельное сопротивление, Ом·м, при разных температурах		
		20 °С	75 °С	115 °С
Из медных проводов	Медь	$\frac{1}{57} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{47} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{41} \cdot 10^{-6}$
Короткозамкнутые асинхронных машин	Алюминиевые шины	$\frac{1}{35} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{28} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{26} \cdot 10^{-6}$

	Алюминий ли- той	$\frac{1}{30} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{23} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{21} \cdot 10^{-6}$
--	---------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, Ом,

$$x_1 = 15,8 \frac{f}{100} \left( \frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l'_\delta}{pq} (\lambda_{\text{н1}} + \lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{д1}});$$

(109)

где  $l'_\delta$  - расчетная длина пакета статора, м,

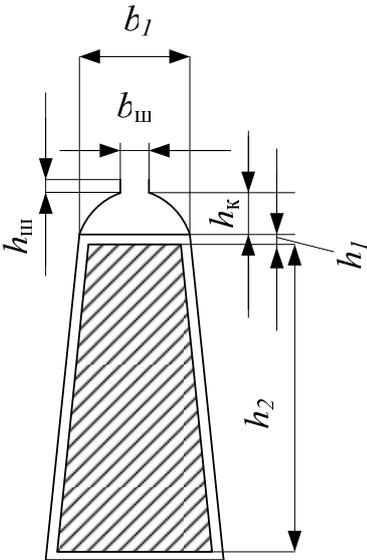
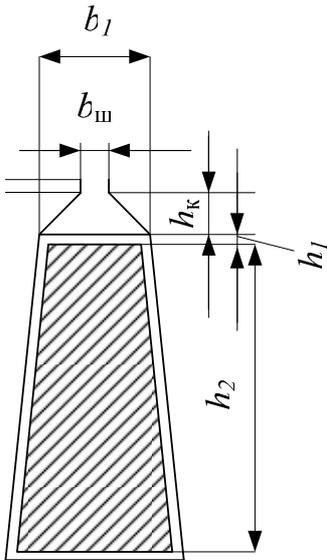
$$l'_\delta = l_1 - 0,5n_k l_k,$$

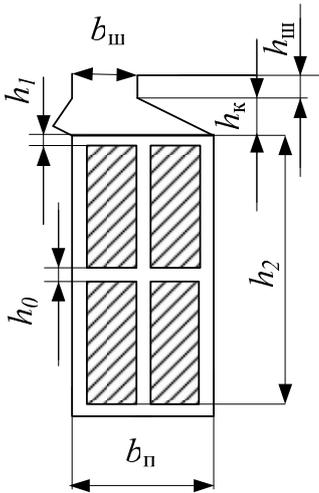
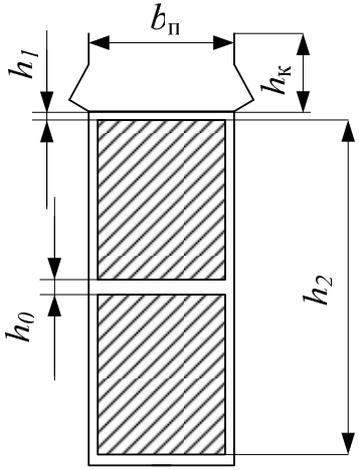
(110)

$\lambda_{\text{н1}}$  - коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора, учитывает потоки рассеяния вокруг проводников в пазовой части обмотки и по коронкам зубцов, определяется по формулам из табл. 18,

Таблица 18

Расчетные формулы для определения коэффициента пазового рассеяния статора

	
$\lambda_{\text{н1}} = \frac{h_2}{3b_1} k_\beta + \left( 0,785 - \frac{b_{\text{ш}}}{2b_1} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) k'_\beta$	$\lambda_{\text{н1}} = \frac{h_2}{3b_1} k_\beta + \left( \frac{h_1}{b_1} + \frac{3h_k}{b_1 + 2b_{\text{ш}}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) k'_\beta$

 $\lambda_{\text{ш1}} = \frac{h_2 - h_0}{3b_{\text{п}}} k_{\beta} + \left( \frac{h_1}{b_{\text{п}}} + \frac{3h_{\text{к}}}{b_{\text{п}} + 2b_{\text{ш}}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) k'_{\beta} + \frac{h_0}{4b_{\text{п}}}$	 $\lambda_{\text{ш1}} = \frac{h_2 - h_0}{3b_{\text{п}}} k_{\beta} + \frac{h_{\text{к}}}{b_{\text{п}}} k'_{\beta} + \frac{h_0}{4b_{\text{п}}}$
$k'_{\beta} = k_{\beta} = 1$ при $\beta = 1$	
$k'_{\beta} = 0,25(1 + 3\beta)$ при укорочении $\frac{2}{3} \leq \beta \leq 1$ , $k_{\beta} = 0,25(1 + 3k_{\beta})$	
$k'_{\beta} = 0,25(6\beta - 1)$ при укорочении $\frac{1}{3} \leq \beta \leq \frac{2}{3}$ , $k_{\beta} = 0,25(1 + 3k_{\beta})$	

$\lambda_{\text{ш1}}$  - коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния, учитывает потоки рассеяния вокруг проводников в лобовой части обмотки статора,

$$\lambda_{\text{ш1}} = 0,34 \frac{q}{l'_{\delta}} (l_{\text{ш}} - 0,84\beta\tau),$$

(111)

$\lambda_{\text{д1}}$  - коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора, учитывает потоки рассеяния от высших гармоник,

$$\lambda_{\text{д1}} = \frac{t_{z1}}{12\delta k_{\delta}} \xi_1,$$

(112)

$\xi_1$  - коэффициент, зависящий от обмоточных данных и геометрии зубцовой зоны.

Для обмоток с прямоугольными открытыми пазами статора без скоса пазов на статоре или роторе,

$$\xi_1 = \left( 2 \frac{t_{z2}}{t_{z1}} - \frac{t_{z1}}{t_{z2}} \Delta_z \right) k_{\beta} - k_{\text{об1}}^2 \left( \frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right)^2,$$

(113,а)

для обмоток с полузакрытыми или полуоткрытыми пазами на статоре с учетом скоса пазов,

$$\xi_{z1} = 2k'_{\text{ск}} k_{\beta} - k_{\text{об1}}^2 \left( \frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right)^2 (1 + \beta_{\text{ск}}^2),$$

(113,б)

коэффициенты, входящие в (113), определяются по рис.23.

Расчет активного сопротивления ротора производится с учетом того, что обмотка ротора состоит из двух участков: стержней и короткозамыкающих колец.

Активное сопротивление стержня обмотки, Ом,

$$r_c = K_r \rho_c \frac{l_c}{q_c};$$

(114)

где  $K_r$  - коэффициент, учитывающий увеличение потерь вследствие вытеснения тока, для номинального режима  $K_r = 1$ ;

$\rho_c$  - удельное сопротивление материала стержня обмотки при расчетной температуре, Ом·м, по табл. 17,

$l_c$  - полная длина стержня ротора (от кольца до кольца), м.

Активное сопротивление короткозамыкающего кольца, Ом,

$$r_{\text{кл}} = \rho_{\text{кл}} \frac{\pi D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 q_{\text{кл}}},$$

(115)

где  $\rho_{\text{кл}}$  - удельное сопротивление материала колец при расчетной температуре, Ом·м, по табл. 17.

Активное сопротивление ротора, Ом,

$$r_2 = r_c + 2 \frac{r_{\text{кл}}}{\Delta^2}.$$

(116)

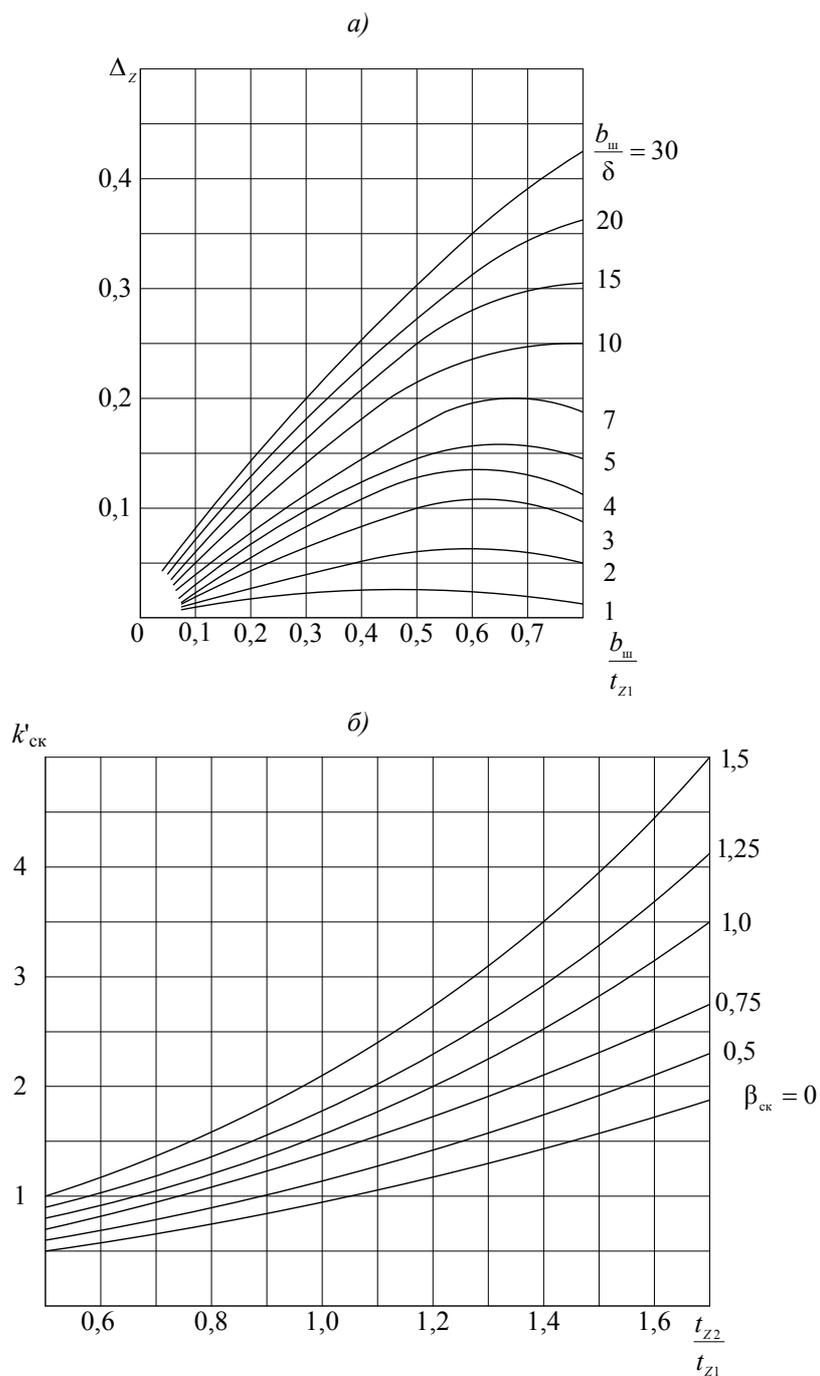


Рис. 23. Коэффициенты к расчету проводимости дифференциального рассеяния: а) – зависимость коэффициента  $\Delta_z$  от размерных соотношений  $b_{\text{ш}}/t_{z1}$  и  $b_{\text{ш}}/\delta$ ; б) – зависимость коэффициента  $k'_{\text{ск}}$  от отношения  $t_{z2}/t_{z1}$  и относительного скоса пазов  $\beta_{\text{ск}}$

Для дальнейших расчетов активное сопротивление ротора следует привести к числу витков обмотки статора, коэффициент приведения,

$$v_{12} = 4m \frac{(w_1 k_{\text{об1}})^2}{Z_2 k_{\text{ск}}^2}.$$

(117)

Приведенное сопротивление ротора, Ом,

$$r'_2 = v_{12} \cdot r_2 \cdot \quad (118)$$

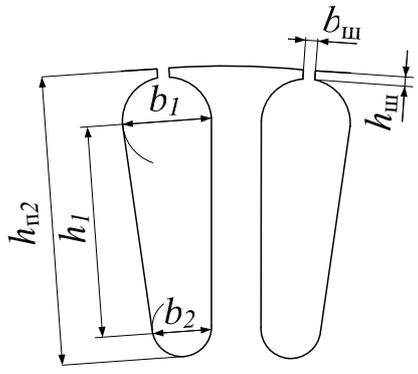
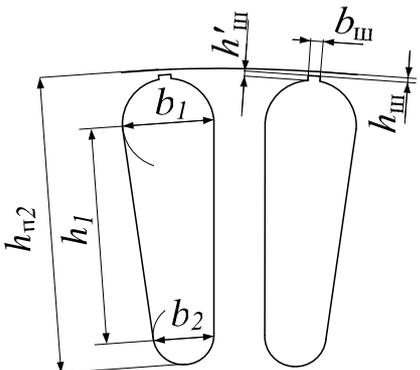
Индуктивное сопротивление короткозамкнутого ротора, Ом,

$$x_2 = 7,9 \frac{l'_\delta f}{10^6} (\lambda_{n2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2} + \lambda_{ск2}), \quad (119)$$

где  $\lambda_{n2}$  - коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора, учитывает потоки рассеяния вокруг проводников в пазовой части обмотки и по коронкам зубцов, определяется по формулам из табл. 19,

Таблица 19

Расчетные формулы для определения коэффициента пазового рассеяния короткозамкнутых роторов

Вид паза	Расчетные формулы
	$\lambda_{n2} = \left[ \frac{h_1}{3b_1} \left( 1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2b_1} \right] k_{\pi} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$ $\lambda'_{n2} = \left[ \frac{h_1}{3b_1} \left( 1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2b_1} \right]$
	$\lambda_{n2} = \left[ \frac{h_1}{3b_1} \left( 1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2b_1} \right] k_{\pi} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} + 1,12 \cdot 10^6 \frac{h'_{ш}}{I_2}$ $\lambda'_{n2} = \frac{h_1}{3b_1} \left( 1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2b_1}$

	$\lambda_{п2} = \frac{h_2}{3b_{п}} k_{л} + \frac{h_{к}}{b_{п}}$ $\lambda'_{п2} = \frac{h_2}{3b_{п}}$
<p>В номинальном режиме коэффициент демпфирования <math>k_{д} = 1</math></p>	

$\lambda_{л2}$  - коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния, учитывает потоки рассеяния вокруг проводников в короткозамыкающих кольцах,

для литых обмоток

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3D_{кл.ср}}{Z_2 l'_{\delta} \Delta^2} \lg \left( \frac{4,7D_{кл.ср}}{h_{кл} + 2b_{кл}} \right),$$

(120,а)

для стержневых обмоток

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3D_{кл.ср}}{Z_2 l'_{\delta} \Delta^2} \lg \left( \frac{4,7D_{кл.ср}}{2(h_{кл} + b_{кл})} \right),$$

(120,б)

$\lambda_{д2}$  - коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора, учитывает потоки рассеяния от высших гармоник,

$$\lambda_{д2} = \frac{t_{z2}}{12\delta k_{\delta}} \xi_2,$$

(121)

$\xi_2$  - коэффициент, зависящий от обмоточных данных и геометрии зубцовой зоны,

$$\xi_2 = 1 + \frac{1}{5} \left( \frac{\pi p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left( \frac{p}{Z_2} \right)^2},$$

(122)

$\Delta_z$  определяется по рис.23, а, но соотношения берутся для зубцовой зоны ротора,

$\lambda_{ск}$  - коэффициент скоса, учитывающий влияние скоса пазов на ЭДС обмотки ротора,

$$\lambda_{\text{ск}} = \frac{t_{z2} \beta_{\text{ск}}^2}{12k_{\delta} k_{\mu}}.$$

(123)

Наличие скоса пазов дополнительно следует учитывать умножением индуктивных сопротивлений статора и ротора на эмпирический коэффициент

$$\sigma_{\text{ск}} = 1 + 0,41 \left( \frac{b_{\text{ск}}}{\tau} \right)^2 \frac{U_{1\text{НОМ}}}{I_{\mu} x_1}.$$

Приведенное к числу витков обмотки статора индуктивное сопротивление ротора, Ом,

$$x'_2 = x_2 v_{12}.$$

(124)

Для аналитического расчета рабочих характеристик следует произвести эквивалентную замену параллельно соединенных сопротивлений  $r_{\mu}$   $x_{\mu}$  (см. рис.21,а), последовательно соединенными сопротивлениями  $r_{12}$ ,  $x_{12}$  (см. рис.21,б). Индуктивное сопротивление взаимоиндукции (главное индуктивное сопротивление), Ом,

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{I_{\mu}} - x_1.$$

(125)

Сопротивление, характеризующее потери в стали -  $r_{12}$  определяется после нахождения потерь в стали.

Относительные значения параметров,

$$r_1^* = r_1 \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}}, x_1^* = x_1 \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}}, r'_2 = r'_2 \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}}, x'^*_2 = x'_2 \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}}, x_{12}^* = x_{12} \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}},$$

$$r_{12}^* = r_{12} \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}}$$

(126)

По относительным значениям удобнее проводить сопоставление параметров, так как у асинхронных машин нормального исполнения относительные значения параметров различаются несущественно.

Сопротивление  $x_1^*$  должно находиться в пределах 0,08...0,14, сопротивление  $x'^*_2$  - в пределах 0,1...0,16, сопротивление  $x_{12}^*$  - в пределах 2...4. Активные сопротивления обмоток  $r'_2 \approx r_1^* = 0,02...0,03$ ;  $r_{12}^* = 0,05...0,2$

## 2.10 Потери и КПД

Потери в асинхронных машинах подразделяются на основные и добавочные. К основным относятся потери в стали и обмотках, а также механические и вентиляционные потери. К добавочным относятся в основном пульсационные и поверхностные потери в стали на коронках зубцов.

Основные потери в стали рассчитываются только для сердечника статора, так как частота перемагничивания ротора в номинальном режиме очень мала, следовательно потери в стали ротора незначительны.

Основные потери в стали статора, Вт,

$$P_{\text{ст.осн}} = p_{1,0/50} \left( \frac{f}{50} \right)^\beta (k_{\text{ДА}} B_a^2 m_a + k_{\text{ДЗ}} B_{\text{З1.сп}}^2 m_{\text{З1}});$$

(127)

где  $p_{1,0/50}$  - удельные потери в стали, Вт/кг,

для стали 2013  $p_{1,0/50} = 2,5$ ,

для стали 2312  $p_{1,0/50} = 1,75$ ,

$\beta$  - показатель степени, показывающий зависимость потерь от частоты перемагничивания, для большинства электротехнических сталей  $\beta = 1,3 \dots 1,5$ ,

$k_{\text{ДА}}$ ,  $k_{\text{ДЗ}}$  - коэффициенты, учитывающие технологические факторы, в машинах мощностью до 250 кВт  $k_{\text{ДА}} = 1,6$ ,  $k_{\text{ДЗ}} = 1,8$ , в машинах большей мощности  $k_{\text{ДА}} = 1,4$ ,  $k_{\text{ДЗ}} = 1,7$ .

$m_a$  - масса ярма статора, кг,

$$m_a = \pi(D_a - h_a)h_a l_{\text{ст1}} k_{\text{ст}} \gamma_{\text{ст}},$$

(128)

$m_{\text{З1}}$  - масса зубцов статора, кг,

$$m_{\text{З1}} = Z_1 b_{\text{З1.сп}} h_{\text{З1}} l_{\text{ст1}} k_{\text{ст}} \gamma_{\text{ст}},$$

(129)

$b_{\text{З1.сп}}$  - средняя ширина зубца, м, определяется по эскизу паза статора;

$\gamma_{\text{ст}}$  - плотность электротехнической стали,  $\gamma_{\text{ст}} = 7800 \text{ кг/м}^3$ .

Сопротивление  $r_{12}$  при допущении  $r_{12} \ll x_{12}$ , что справедливо для большинства асинхронных машин, Ом,

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст.осн}}}{m I_\mu^2}.$$

(130)

После расчета параметров намагничивающего контура следует проверить модуль ЭДС  $\text{mod}(\dot{E}_1) = k_e U_{1\text{ном}}$ , по уравнению,

$$k_e U_{1\text{ном}} = I_\mu \frac{r_{12}^2 + x_{12}^2}{x_{12}},$$

(131)

расхождение между правой и левой частями не должно превышать  $\pm 5$  %.

Добавочные потери в стали подразделяются на поверхностные и пульсационные. Причем в асинхронных машинах со стержневыми обмотками

на роторе обычно производится расчет добавочных потерь только на роторе, так как на статоре эти потери незначительны.

Полные поверхностные потери на роторе, Вт,

$$P_{\text{пов}2} = p_{\text{пов}2} (t_{Z2} - b_{\text{ш}2}) Z_2 l_{\text{ст}2}, \quad (132)$$

где  $p_{\text{пов}2}$  - удельные потери на поверхности головок зубцов ротора от зубчатости статора, Вт/м<sup>2</sup>,

$$p_{\text{пов}2} = 0,5 k_{02} \left( \frac{Z_1 n_{\text{ном}}}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{Z1} \cdot 1000)^2, \quad (133)$$

$k_{02}$  - коэффициент, учитывающий способ обработки поверхности ротора, при шлифованных поверхностях ротора  $k_{02} = 1,7 \dots 2,0$ ,

$n_{\text{ном}}$  - номинальная частота вращения двигателя, об/мин,

$B_{02}$  - пульсации индукции над коронками зубцов, Тл,

$$B_{02} = \beta_{02} k_{\delta} B_{\delta},$$

$$(134)$$

$\beta_{02}$  - коэффициент пульсаций, зависящий от отношения  $\frac{b_{\text{ш}}}{\delta}$  для зубцов

**статора** (рис. 24,а).

Пульсационные потери в зубцах ротора, Вт,

$$P_{\text{пул}2} \approx 0,11 \left( \frac{Z_1 n_{\text{ном}}}{1000} B_{\text{пул}2} \right)^2 m_{Z2}, \quad (135)$$

где  $B_{\text{пул}2}$  - пульсации индукции в среднем сечении зубцов ротора, Тл,

$$B_{\text{пул}2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{Z2}} B_{Z2\text{сп}},$$

$$(136)$$

здесь коэффициент  $\gamma_1$  определяется по (73, б), причем при открытых пазах **статора** вместо  $b_{\text{ш}}$  подставляется значение расчетной ширины раскрытия паза, м,

$$b'_{\text{ш}} = \frac{b_{\text{ш}}}{3} \left( 1 + \frac{0,5 t_{Z1}}{t_{Z1} b_{\text{ш}} + k_{\delta}} \right), \quad (137)$$

коэффициент  $k_{\delta}$  определяется по рис.24,б,

$m_{Z2}$  - масса зубцов ротора, кг,

$$m_{Z2} = Z_2 h_{Z2} b_{Z2\text{сп}} l_{\text{ст}2} k_{\text{ст}} \gamma_{\text{ст}}.$$

$$(138)$$

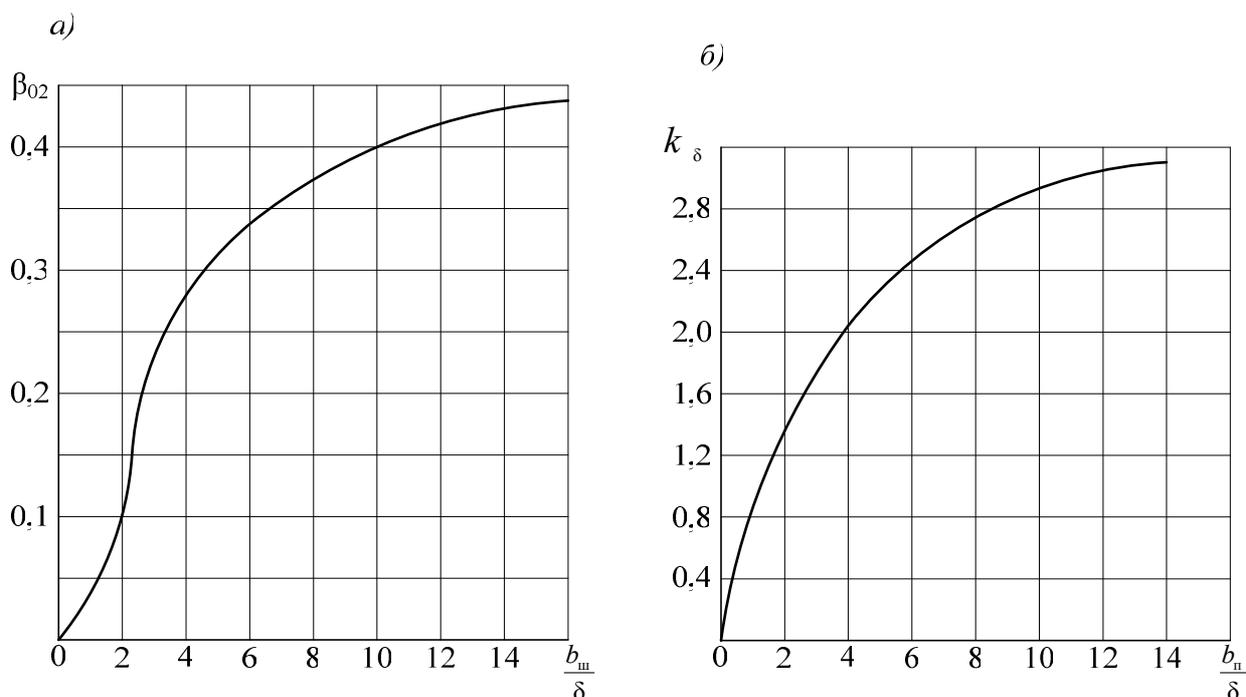


Рис. 24. К расчету пульсационных и поверхностных потерь

Добавочные потери в стали, Вт,

$$P_{\text{доб.ст}} = P_{\text{пов2}} + P_{\text{пул2}} \quad (139)$$

Полные потери в стали, Вт,

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{осн.ст}} + P_{\text{доб.ст}} \quad (140)$$

Обычно добавочные потери в стали в пять – восемь раз меньше основных потерь.

К электрическим потерям в асинхронных машинах относятся потери в обмотках статора и ротора.

Электрические потери в обмотке статора, Вт,

$$P_{\text{э1}} = m I_{\text{ном1}}^2 r_1 \quad (141)$$

Электрические потери в обмотке ротора, Вт,

$$P_{\text{э2}} = Z_2 I_2^2 r_2 \quad (142)$$

Механические потери, включающие в себя потери на трение в подшипниках и вентиляционные потери, в асинхронных машинах определяются по приближенным эмпирическим формулам, полученным из опыта эксплуатации.

Механические потери в двигателях с радиальной системой вентиляции без радиальных вентиляционных каналов, с вентиляционными лопатками на короткозамыкающих кольцах (система охлаждения по IC01), Вт,

$$P_{\text{мех}} = K_{\Gamma} \left( \frac{n_1}{1000} \right)^2 (10D)^3, \quad (143)$$

где  $K_{\Gamma}$  - приведенный коэффициент трения,

$K_{\Gamma} = 5$  при  $2p = 2$ ,  $D_a \leq 0,25$  м;  $K_{\Gamma} = 6$  при  $2p \geq 4$ ,  $D_a \leq 0,25$  м;

$K_{\Gamma} = 6$  при  $2p = 2$ ,  $D_a \geq 0,25$  м;  $K_{\Gamma} = 7$  при  $2p \geq 4$ ,  $D_a \geq 0,25$  м.

В двигателях с радиальными вентиляционными каналами (система охлаждения по IC01) механические потери, Вт,

$$P_{\text{мех}} = 1,2 \cdot 2p\tau^3 (n_k + 11) \cdot 1000, \quad (144)$$

где  $n_k$  - число радиальных вентиляционных каналов.

В двигателях с аксиальной системой вентиляции (система охлаждения по IC0141) механические потери, Вт,

$$P_{\text{мех}} = K_{\Gamma} \left( \frac{n_1}{1000} \right)^2 (10D_{\text{вент}})^3, \quad (145)$$

где  $D_{\text{вент}}$  - диаметр наружного вентилятора, м, в большинстве случаев

$$D_{\text{вент}} \approx D_a;$$

приведенный коэффициент трения  $K_{\Gamma} = 2,9$  для двигателей с  $D_a \leq 0,25$  м, для двигателей с  $D_a \geq 0,25$  м он составляет  $K_{\Gamma} = 3,6$ .

Добавочные магнитные потери при нагрузке, Вт, при нескошенных пазах

$$P_{\text{доб.ном}} = 0,005 \frac{P_{2\text{ном}}}{\eta}, \quad (146,а)$$

при скошенных пазах

$$P_{\text{доб.ном}} = 0,01 \frac{P_{2\text{ном}}}{\eta}. \quad (146,б)$$

Ток холостого хода двигателя, А,

$$I_{\text{xx}} = \sqrt{I_{\text{xx.a}}^2 + I_{\text{xx.p}}^2}, \quad (147)$$

где  $I_{\text{xx.a}}$  - активная составляющая тока холостого хода, А,

$I_{\text{xx.p}}$  - реактивная составляющая тока холостого хода, А,  $I_{\text{xx.p}} \approx I_{\mu}$ .

$$I_{\text{xx.a}} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{эл.хх}}}{mU_{1\text{ном}}}, \quad (148)$$

$P_{\text{эл.хх}}$  - электрические потери в статоре при холостом ходе, Вт,

$$P_{\text{э1.хх}} = mI_{\mu}^2 r_1, \quad (149)$$

Коэффициент мощности при холостом ходе, при условии  $I_{\text{хх.п}} \gg I_{\text{хх.а}}$

$$\cos \varphi_{\text{хх}} = \frac{I_{\text{хх.а}}}{I_{\text{хх.п}}}, \quad (150)$$

### 2.11 Расчет рабочих характеристик

Рабочими характеристиками асинхронных двигателей называются зависимости  $P_1, I_1, \eta, \cos \varphi, s = f(P_2)$ . Расчет рабочих характеристик производится аналитическим методом или по круговой диаграмме. Расчет по круговой диаграмме нагляден, но менее точен, аналитический расчет позволяет определить рабочие характеристики на ЭВМ с учетом изменения отдельных параметров, поэтому аналитический метод расчета получил наибольшее распространение.

Аналитический расчет производится по Г-образной схеме замещения, для которой рассчитывается комплексный коэффициент  $\dot{c}_1$ , равный отношению вектора напряжения фазы  $\dot{U}_1$  к вектору ЭДС  $\dot{E}_1$ , взятому с обратным знаком. В двигательном режиме величину  $\dot{E}_1$  можно считать неизменной, поэтому модуль  $\dot{c}_1$  также можно считать неизменным.

В асинхронных машинах мощностью более 2...3 кВт,

$$\text{mod}(\dot{c}_1) = c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}}. \quad (151)$$

В машинах малой мощности сначала определяется угол магнитного запаздывания, град.,

$$\gamma = \arctg \frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})}, \quad (152)$$

и если  $|\gamma| \leq 1^\circ$ , то  $c_1$  определяется по (136), иначе

$$c_1 = \sqrt{c_{1a} + c_{1p}}, \quad (153)$$

где  $c_{1a}, c_{1p}$  - активная и реактивная составляющие коэффициента  $c_1$ ,

$$c_{1a} = \frac{r_{12}(r_1 + r_2) + x_{12}(x_1 + x_{12})}{r_{12}^2 + x_{12}^2}, \quad (154)$$

$$c_{1p} = \frac{x_1 r_{12} + r_1 x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2}.$$

(155)

Данные расчета рабочих характеристик сводятся в формуляр, (табл. 20). Такой расчет характеристик производится при разных значениях скольжения, диапазон изменения скольжений  $s = (0,2 \dots 1,5) s_{\text{ном}}$ , номинальное значение предварительно принимается равным  $s_{\text{ном}} \approx r_2^*$ . Для расчета рабочих характеристик следует задаться не менее чем шестью значениями скольжений.

Перед заполнением таблицы рабочих характеристик следует выписать значения мощностей, не зависящих от скольжения ( $P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}}$ ), а также величин, обозначенных в формуляре как  $a, a', b, b'$ , Ом,

если  $|\gamma| \leq 1^\circ$ ,

$$a' = c_1^2, a = c_1 r_1, b' = 0, b = c_1 (x_1 + c_1 x_2');$$

(156)

если  $|\gamma| > 1^\circ$ ,

$$a' = c_{1a}^2 - c_{1p}^2, a = c_{1a} r_1 - c_{1p} x_1 - b' x_2',$$

$$b' = 2c_{1a} c_{1p}, b = c_{1a} x_1 - c_{1p} r_1 + a' x_2'$$

(157)

В пояснительной записке подробно приводится расчет одной точки - номинального режима, результаты остальных расчетов заносят в формуляр.

После заполнения таблицы рабочих характеристик, их необходимо построить. На графическом изображении рабочих характеристик проводится линия номинальной мощности  $P_{2\text{ном}}$ , и определяются окончательно номинальные значения тока, КПД, подводимой мощности, коэффициента мощности и скольжения.

Примерный вид рабочих характеристик представлен на рис.25.

Таблица 20

Формуляр расчета рабочих характеристик

№	Расчетная формула	Ед. изм.	$s = 0,005; 0,01 \dots 1,5 s_{\text{ном}}$
1	$a' r_2' / s$	Ом	
2	$b' r_2' / s$	Ом	
3	$R = a + a' r_2' / s$	Ом	
4	$X = b + b' r_2' / s$	Ом	
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	
6	$I''_2 = U_{1\text{ном}} / Z$	А	
7	$\cos \varphi'_2 = R / Z$	-	

8	$\sin \varphi'_2 = R/Z$	-	
9	$I_{1a} = I_{xxa} + I''_2 \cos \varphi'_2$	A	
10	$I_{1p} = I_{xyp} + I''_2 \sin \varphi'_2$	A	
11	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	A	
12	$I'_2 = c_1 I''_2$	A	
13	$P_1 = 3U_{\text{НОМ}} I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	
14	$P_{\text{э1}} = 3I_1^2 r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	
15	$P_{\text{э2}} = 3I_2^2 r'_2 \cdot 10^{-3}$	кВт	
16	$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.ном}} \left( \frac{I_1}{I_{\text{НОМ}}} \right)^2$	кВт	
17	$\sum P = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{доб}}$	кВт	
18	$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт	
19	$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_1}$	о.е.	
20	$\cos \varphi = \frac{I_{1a}}{I_1}$	о.е.	

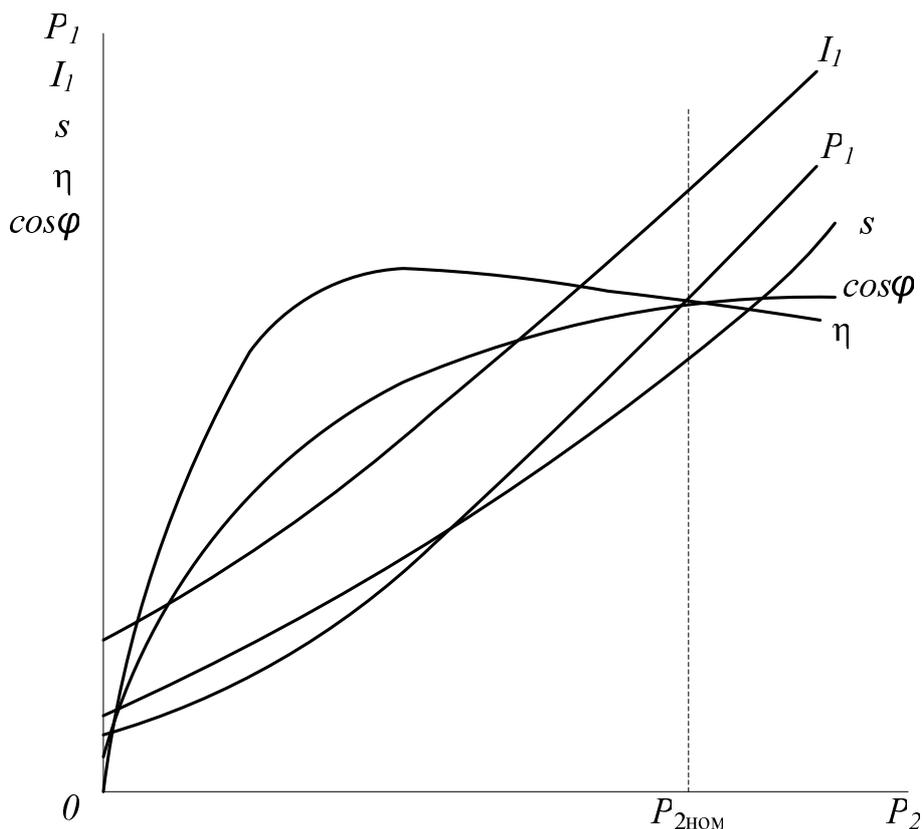


Рис. 25. Примерный вид рабочих характеристик асинхронного двигателя

## 2.12 Расчет пусковых характеристик

Расчет пусковых характеристик требует учета таких явлений как вытеснение тока в пазу ротора и насыщение коронок зубцов. Поэтому точный расчет пусковых характеристик связан с решением мультифизических полевых задач. При упрощенном расчете все указанные выше явления учитываются эмпирическими зависимостями.

Расчет пусковых характеристик производится для диапазона скольжений  $s = 1 \dots s_{\text{ном}}$ . Сначала вычисляются характеристики только с учетом вытеснения тока в пазах ротора, затем, если необходимо, проводится коррекция результатов с учетом насыщения стали магнитопровода.

### 2.12.1 Параметры с учетом вытеснения тока

Приведенная высота стержня определяется как,

$$\xi = 2\pi h_c \sqrt{\frac{b_c \cdot f_2}{b_{п2} \rho_c}} 10^{-7};$$

(158)

где  $h_c$  - высота стержня ротора, м,

$$h_c = h_{n2} - h_{ш} - h'_{ш},$$

(159)

$b_{n2}$ ,  $b_c$  - ширина паза ротора, и ширина его стержня, м; в роторах с литыми обмотками  $b_{n2} = b_c$ , в роторах со стержневыми обмотками  $b_c = 0,9b_{n2}$ ,

$f_2$  - частота тока в роторе, Гц,

$$f_2 = fs.$$

(160)

Глубина проникновения тока, м,

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi},$$

(161)

где  $\varphi$  - функция, определяющая вытеснение тока, по рис.26.

Коэффициент отношения площадей всего сечения стержня и сечения, ограниченного глубиной проникновения тока

$$k_r = \frac{q_c}{q_r},$$

(162)

где  $q_r$  - площадь сечения стержня ротора, ограниченная высотой  $h_r$ , м<sup>2</sup>:

при грушевидных пазах и  $\frac{b_1}{2} \leq h_r \leq h_1 + \frac{b_1}{2}$  (см. рис.16)

$$q_r = \frac{\pi \cdot b_1^2}{8} + \frac{b_2 + b_r}{2} \left( h_r - \frac{b_2}{2} \right),$$

(163)

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \left( h_r - \frac{b_2}{2} \right);$$

(164)

при грушевидных пазах и  $h_r \leq \frac{b_1}{2}$  (см. рис.16)

$$q_r = \frac{\pi b_1^2}{4(\varphi_{кр} + 1)},$$

(165)

значение  $\varphi_{кр}$  определяется по рис.27;

при грушевидных пазах и  $h_r \geq h_1 + \frac{b_1}{2}$  (см. рис.16)

$$q_r \approx q_c, k_r = \frac{q_c}{q_r} = 1;$$

при прямоугольных пазах ротора

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = 1 + \varphi.$$

(166)

Коэффициент увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока имеет вид:

для грушевидных пазов без радиальных вентиляционных каналов в роторе, с литой обмоткой

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2}(k_r - 1).$$

(167)

для прямоугольных пазов без радиальных вентиляционных каналов в роторе, и литой обмоткой

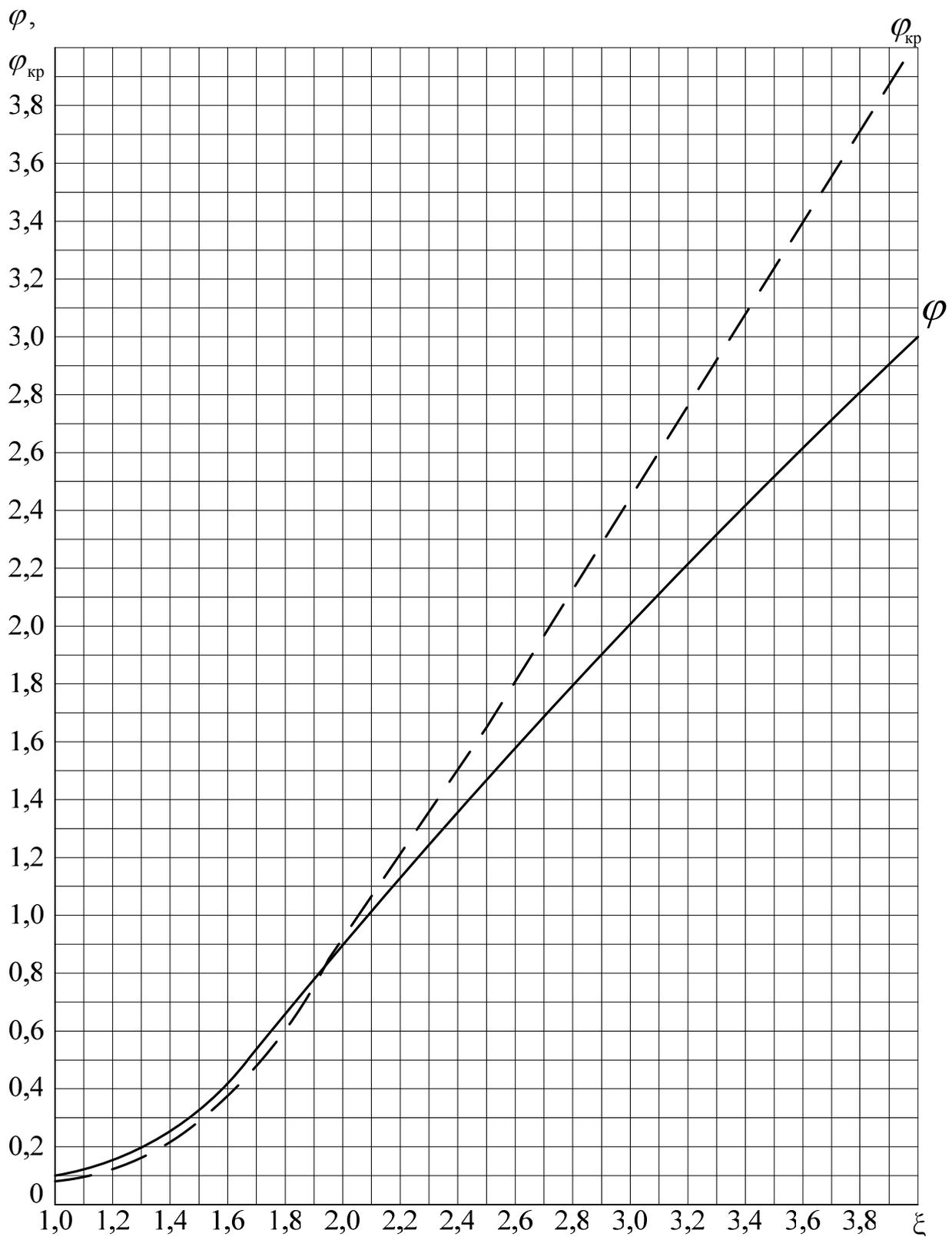


Рис.26. Кривые  $\varphi_{кр}$  для круглых пазов и  $\varphi$  для всех пазов ротора в зависимости от приведенной высоты  $\xi$ . (при  $\xi > 4$   $\varphi = \xi - 1$ ; при  $\xi < 1$   $\varphi = 0,89\xi^4$ )

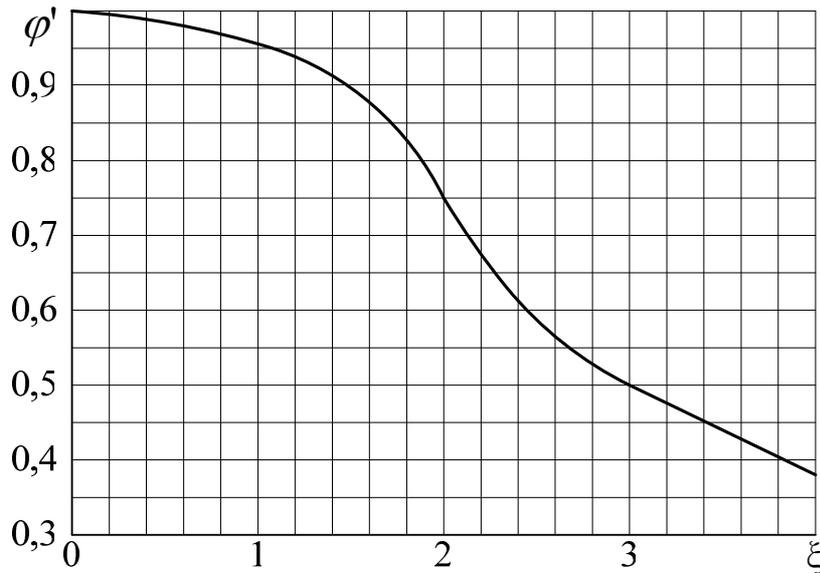


Рис. 27. Зависимость  $\varphi'$  от приведенной высоты  $\xi$ ; при  $\xi > 4 \varphi' = 1,5\xi$

$$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2} \varphi;$$

(168)

при сварных обмотках ротора и наличии радиальных вентиляционных каналов в эту формулу следует подставлять скорректированное сопротивление стержня, Ом,

$$r'_c = r_c \frac{l_c - n_k b_k}{l_2}$$

(169)

Приведенное активное сопротивление ротора с учетом действия эффекта вытеснения тока, Ом,

$$r'_{2\xi} = r'_2 K_R,$$

(170)

Индуктивное сопротивление ротора, Ом,

$$x'_{2\xi} = x'_2 K_x,$$

(171)

где  $K_x$  - коэффициент изменения индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия вытеснения тока

$$K_x = \frac{\lambda_{п2\xi} + \lambda_{п2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}},$$

(172,а)

здесь  $\lambda_{п2\xi}$  - коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при учете вытеснения тока,

$$\lambda_{n2\xi} = \lambda_{n2} - \lambda'_{n2} (1 - k_d)$$

(172,б)

коэффициент демпфирования  $k_d$  для пусковых режимов определяется по рис.27:  $k_d = \varphi'(\xi)$ ,  $\lambda'_{n2}$  - по табл.19.

Коэффициент увеличения пускового сопротивления,

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12п}},$$

(173)

где  $x_{12п}$  - индуктивное сопротивление взаимоиндукции в пусковых режимах, Ом,

$$x_{12п} \approx k_\mu x_{12}$$

(174)

Ток ротора в пусковом режиме приближенно без учета влияния насыщения, А,

$$I'_{2п} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{c_{1п} r'_{2\xi}}{s}\right)^2 + (x_1 + c_{1п} x'_{2\xi})^2}}.$$

(175)

Ток статора в пусковом режиме при тех же условиях, А,

$$I_{1п} = I'_2 \frac{\sqrt{\left(r_1 + \frac{c_{1п} r'_{2\xi}}{s}\right)^2 + (x_1 + c_{1п} x'_{2\xi} + x_{12п})^2}}{c_{1п} x_{12п}}.$$

(176)

Кратность пускового тока,

$$I_{1*} = \frac{I_{1п}}{I_{1ном}}.$$

(177)

Кратность пускового момента,

$$M_* = \frac{I'_{2п}}{I'_{2ном}} K_r \frac{s_{ном}}{s}.$$

(178)

Критическое скольжение, соответствующее максимальному моменту о.е.,

$$s_{кр} = \frac{r'_2}{\frac{x_1}{c_{1п}} + x'_2}$$

(179)

Расчет пусковых характеристик с учетом вытеснения тока удобно свести в формуляр (табл. 21)

Пусковой ток паза, А,

$$I_{1\text{паза}} = I_{1\text{пmax}} \frac{u_{\text{п}}}{a},$$

(180)

где  $I_{1\text{пmax}}$  - максимальное значение пускового тока статора, А, определяется по табл. 21. Если  $I_{1\text{паза}} > 400$  А, то следует учитывать влияние насыщения на пусковые характеристики.

### 2.12.2 Учет влияния насыщения на параметры

В пусковых режимах происходит насыщение верхних участков зубцов – коронок. Это явление, которое приводит к уменьшению потоков проводимостей потоков рассеяния, при расчетах учитывается введением эквивалентного раскрытия пазов статора и ротора.

Средняя МДС обмотки, отнесенная к одному пазу обмотки статора, А,

$$F_{\text{Пср}} = 0,7 \frac{k_{\text{нас}} I_1 u_{\text{п}}}{a} \left( k_{\beta}' + k_{\gamma} k_{\text{об}} \frac{Z_1}{Z_2} \right),$$

(181)

где  $k_{\text{нас}}$  - коэффициент насыщения, для пусковых режимов при  $I_{1\text{паза}} = 2000 \dots 2500$  А  $k_{\text{нас}} = 1,4 \dots 1,5$ , при  $I_{1\text{паза}}$  близком к 1000 А  $k_{\text{нас}} = 1,15 \dots 1,2$ , меньшие значения относятся к двигателям с открытыми и полуоткрытыми пазами.

Выбор значений коэффициента насыщения для всего диапазона изменения скольжения осуществляется следующим образом. При  $s = 1$  считается, что коэффициент насыщения максимальный (равен выбранному выше  $k_{\text{нас}}$ ) при скольжениях  $s = 0,1 \dots 0,15$  насыщение уже практически отсутствует ( $k_{\text{нас}} \approx 1$ ).

Таблица 21

Формуляр расчета пусковых характеристик с учетом эффекта вытеснения тока

Расчетная формула	единица измерения	Скольжение $s$
		$s = 1 \dots s_{\text{ном}}$
$\xi = 2\pi h_c \sqrt{\frac{b_c}{b_{\text{п2}}} \frac{f_2}{\rho_c} 10^{-7}}$	-	
$\varphi$	-	
$\varphi'$	-	
$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi}$	м	
$b_r$	м	

$k_r$	-	
$K_R$	-	
$K_x = \frac{\lambda_{п2\xi} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}$	-	
$r'_{2\xi} = r'_2 \cdot K_R$	Ом	
$x'_{2\xi} = x'_2 K_x$	Ом	
$I'_{2п} = \frac{U_{1НОМ}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{c_{1п} r'_{2\xi}}{s}\right)^2 + (x_1 + c_{1п} x'_{2\xi})^2}}$	А	
$I_{1п} = I'_{2п} \frac{\sqrt{\left(r_1 + \frac{c_{1п} r'_{2\xi}}{s}\right)^2 + (x_1 + c_{1п} x'_{2\xi} + x_{12п})^2}}{c_{1п} x_{12п}}$	А	
$I_{1*} = \frac{I_{1п}}{I_{1НОМ}}$		
$M_* = \frac{I'_{2п}}{I'_{2НОМ}} K_R \frac{s_{НОМ}}{s}$		

Значения коэффициента насыщения, соответствующие промежуточным точкам определяются исходя из линейного закона изменения  $k_{нас} = f(s)$  в диапазоне скольжений  $s = 1..0,1(0,15)$ .

Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре, Тл,

$$B_{ф\delta} = \frac{F_{Пср} \cdot 10^{-6}}{1,6\delta C_N},$$

(182)

где  $C_N$  - коэффициент,

$$C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}}.$$

(183)

Дополнительное раскрытие паза статора,

$$c_{\sigma 1} = (t_{z1} - b_{ш1})(1 - \chi_\delta),$$

(184)

где  $\chi_\delta$  определяется по рис.28.

Далее определяются уменьшения магнитной проводимости потоков рассеяния для обмоток статора и ротора под влиянием насыщения.

Уменьшение проводимости потока пазового рассеяния статора:

для прямоугольных открытых пазов (рис.14,а)

$$\Delta\lambda_{п1нас} = \frac{h_k}{b_{ш}} \cdot \frac{c_{\vartheta 1}}{b_{ш} + c_{\vartheta 1}};$$

(185)

для полуоткрытых пазов (рис.14,б)

$$\Delta\lambda_{п1нас} = \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \cdot \frac{c_{\vartheta 1}}{b_{ш} + c_{\vartheta 1}} + \frac{h_k}{b_{ш} + b_{п}} \cdot \frac{c_{\vartheta 1}}{b_{ш} + b_{п} + c_{\vartheta 1}};$$

(186)

для полужакрытых пазов (рис.13)

$$\Delta\lambda_{п1нас} = \frac{h_{ш} + 0,58h_k}{b_{ш}} \cdot \frac{c_{\vartheta 1}}{c_{\vartheta 1} + 1,5b_{ш}}.$$

(187)

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении,

$$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1нас}$$

(188)

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния при насыщении участков зубцов статора,

$$\lambda_{д1нас} = \lambda_{д1}\chi_{\delta}. \quad (189)$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора с учетом насыщения, Ом,

$$x_{1нас} = x_1 \frac{\lambda_{п1нас} + \lambda_{д1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1}}. \quad (190)$$

Дополнительное раскрытие пазов ротора,

$$c_{\vartheta 2} = (t_{z2} - b_{ш2})(1 - \chi_{\delta}). \quad (191)$$

Уменьшение коэффициента проводимости для пазов ротора,

$$\Delta\lambda_{п2нас} = \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \cdot \frac{c_{\vartheta 2}}{b_{ш} + c_{\vartheta 2}}.$$

(192)

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении,

$$\lambda_{п2\xi нас} = \lambda_{п2\xi} - \Delta\lambda_{п2нас}.$$

(193)

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния при насыщении участков зубцов ротора

$$\lambda_{д2нас} = \lambda_{д2}\chi_{\delta}.$$

(194)

Индуктивное сопротивление обмотки ротора, с учетом насыщения, Ом,

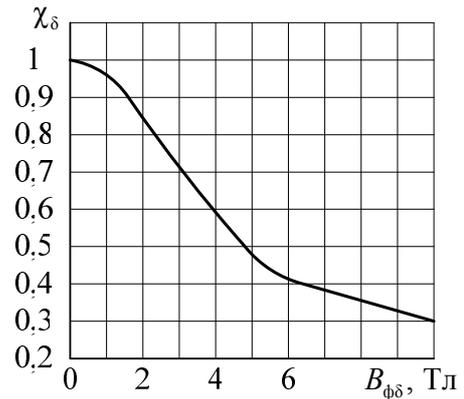


Рис.28. Функция  $\chi_{\delta} = f(B_{\phi\delta})$

$$x'_{2\xi_{\text{нас}}} = x'_{2} \frac{\lambda_{\text{п}2\xi_{\text{нас}}} + \lambda_{\text{д}2_{\text{нас}}} + \lambda_{\text{л}2}}{\lambda_{\text{п}2} + \lambda_{\text{л}2} + \lambda_{\text{д}2}}.$$

(195)

Коэффициент увеличения пускового сопротивления с учетом насыщения,

$$c_{1\text{пнас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас}}}{x_{12\text{п}}}.$$

(196)

Ток в обмотке ротора с учетом насыщения, А,

$$I'_{2\text{нас}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{c_{1\text{пнас}} r'_{2\xi}}{s}\right)^2 + (x_{1\text{нас}} + c_{1\text{пнас}} x'_{2\xi_{\text{нас}}})^2}}.$$

(197)

Ток в обмотке статора с учетом насыщения, А,

$$I_{1\text{нас}} = I'_{2\text{нас}} \frac{\sqrt{\left(r_1 + \frac{c_{1\text{пнас}} r'_{2\xi}}{s}\right)^2 + (x_{1\text{нас}} + c_{1\text{пнас}} x'_{2\xi_{\text{нас}}} + x_{12\text{п}})^2}}{c_{1\text{пнас}} x_{12\text{п}}}.$$

(198)

Кратность пускового тока,

$$I_{\text{п}^*} = \frac{I_{1\text{нас}}}{I_{1\text{ном}}}.$$

(199)

Кратность пускового момента,

$$M_{\text{п}^*} = \left(\frac{I'_{2\text{нас}}}{I'_{2\text{ном}}}\right)^2 K_R \frac{s_{\text{ном}}}{s}.$$

(200)

Уточненное значение коэффициента насыщения,

$$k'_{\text{нас}} = \frac{I_{1\text{нас}}}{I_{1\text{п}}}.$$

(201)

Если значения  $k'_{\text{нас}}$  и принятое ранее  $k_{\text{нас}}$  расходятся более, чем на 15%, следует скорректировать  $k_{\text{нас}}$  и пересчитать пусковые характеристики. Расчет пусковых характеристик с учетом насыщения удобно свести в формуляр, табл. 22.

В табл. 22 расчеты производятся для тех же значений скольжений  $s$ , что и в табл. 21

Таблица 22

Расчет пусковых характеристик с учетом вытеснения тока и насыщения

Условное Обозначение	Единица измерен	Скольжение
		$s = 1 \dots s_{\text{НОМ}}$
$k_{\text{нас}}$	-	
$F_{\text{Пер}} = 0,7 \frac{k_{\text{нас}} I_{1\text{п}}}{a} \left( k_{\beta}' + k_{y1} k_{\text{об1}} \frac{Z_1}{Z_2} \right)$	А	
$B_{\text{ф}\delta} = \frac{F_{\text{Пер}} \cdot 10^{-6}}{1,6\delta C_N}$	Тл	
$c_{\varepsilon 1} = (t_{Z1} - b_{\text{ш1}})(1 - \chi_{\delta})$	-	
$\Delta \lambda_{\text{п1нас}}$		
$\lambda_{\text{п1нас}} = \lambda_{\text{п1}} - \Delta \lambda_{\text{п1нас}}$		
$\lambda_{\text{д1нас}} = \lambda_{\text{д1}} \chi_{\delta}$		
$x_{1\text{нас}} = x_1 \frac{\lambda_{\text{п1нас}} + \lambda_{\text{д1нас}} + \lambda_{\text{л1}}}{\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{л1}} + \lambda_{\text{д1}}}$	Ом	
$c_{\varepsilon 2} = (t_{Z2} - b_{\text{ш2}})(1 - \chi_{\delta})$		
$\Delta \lambda_{\text{п2нас}}$		
$\lambda_{\text{п2}\xi\text{нас}} = \lambda_{\text{п2}\xi} - \Delta \lambda_{\text{п2нас}}$		
$\lambda_{\text{д2нас}} = \lambda_{\text{д2}} \chi_{\delta}$		
$x'_{2\xi\text{нна}} = x'_2 \frac{\lambda_{\text{п2}\xi\text{нна}} + \lambda_{\text{д2нас}} + \lambda_{\text{л2}}}{\lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{л2}} + \lambda_{\text{д2}}}$		
$c_{1\text{пнас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас}}}{x_{12\text{п}}}$		
$I'_{2\text{нас}} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{\sqrt{\left( r_1 + \frac{c_{1\text{пнас}} r'_{2\xi}}{s} \right)^2 + \left( x_{1\text{нас}} + c_{1\text{пнас}} x'_{2\xi\text{нас}} \right)^2}}$	А	
$I_{1\text{нас}} = I'_{2\text{нас}} \frac{\sqrt{\left( r_1 + \frac{c_{1\text{пнас}} r'_{2\xi}}{s} \right)^2 + \left( x_{1\text{нас}} + c_{1\text{пнас}} x'_{2\xi\text{нна}} + x_{12\text{п}} \right)^2}}{c_{1\text{пнас}} x_{12\text{п}}}$	А	
$I_{\text{п}^*} = \frac{I_{1\text{нас}}}{I_{1\text{НОМ}}}$	-	
$M_{\text{п}^*} = \left( \frac{I'_{2\text{нас}}}{I'_{2\text{НОМ}}} \right)^2 K_R \frac{s_{\text{НОМ}}}{s}$	-	
$k'_{\text{нас}} = \frac{I_{1\text{нас}}}{I_{1\text{п}}}$	-	

После расчета пусковых характеристик следует уточнить значение  $s_{кр}$  и соответствующее ему относительное значение максимального момента  $M_{п*max}$ .

По результатам расчета пусковых характеристик (табл. 21 или табл. 22 при  $I_{1наза} > 400$  А) следует произвести сравнение максимальных значений (кратностей) пускового тока и пускового момента со значениями, определяемыми стандартами (табл. 23). Если значения максимального пускового тока превышают рекомендованные значения не более чем на 5...10%, а значение максимального пускового момента не менее значения, рекомендованного стандартом, то расчет пусковых характеристик можно считать законченным, и следует строить пусковые характеристики.

Если имеются существенные расхождения со значениями, рекомендованными стандартом, то коэффициент насыщения следует скорректировать на 10...15%.

Примерный вид пусковых характеристик представлен на рис.29.

Расчетом пусковых характеристик завершается электромагнитный расчет проектируемого двигателя. По таблице П.2.2 можно предварительно выбрать установочные и габаритные размеры и приступить к компоновке сборочного чертежа и листа детализовки.

Таблица 23

Кратности начальных пусковых токов и пусковых моментов

Исполнение	2p	Высота оси вращения, мм					
		$h \leq 132$		$160 \leq h \leq 250$		$h \geq 280$	
		$M_{п*}$	$I_{п*}$	$M_{п*}$	$I_{п*}$	$M_{п*}$	$I_{п*}$
IP44(54)	2	1,7...2	6,5...7,5	1,2...1,4	7...7,5	1...1,2	6,5...7
	4	2...2,2	5...7,5	1,2...1,4	6,5...7,5	1,2...1,3	5,5...7
	6	2...2,2	4...6,5	1,2...1,3	5...6,5	1,4	5,5...6,5
	8	1,6...1,9	4...5,5	1,2...1,4	5,5...6	1,2	5,5...6,5
	10			1,2	6	1	6
	12					1	6
IP23	2			1,2...1,3	7	1...1,2	6,5...7
	4			1,2...1,3	6,5	1...1,2	6...7
	6			1,2	6...7	1,2	6
	8			1,2...1,3	5,5...6	1,2	5...5,5
	10					1	5,5
	12					1	5,5

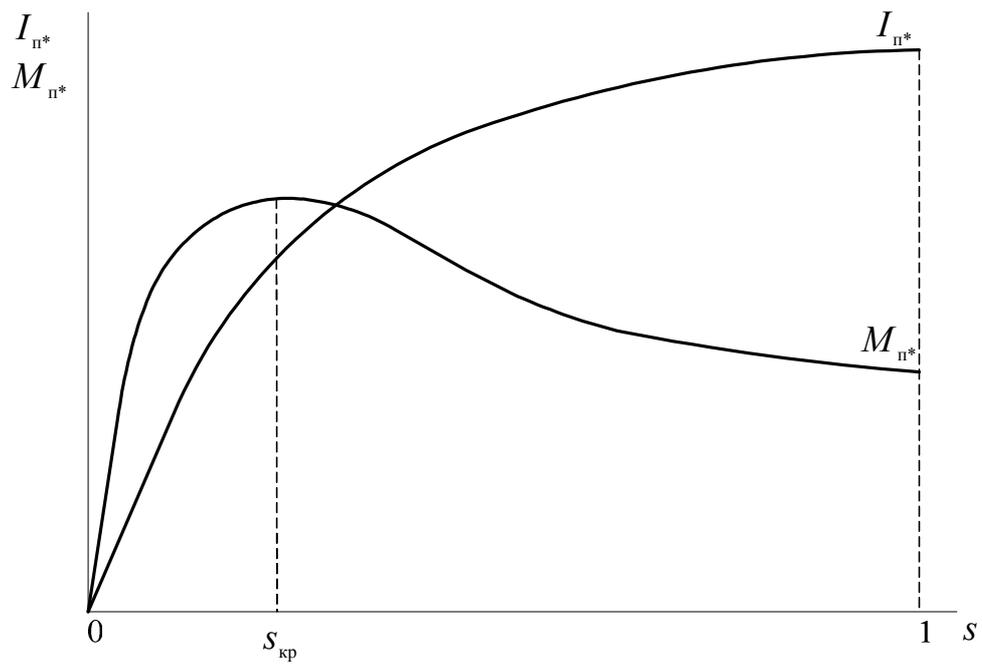


Рис.29. Пусковые характеристики асинхронного двигателя

### 3. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Тепловой расчет асинхронной машины включает в себя расчет максимальных перегревов наиболее нагруженных в тепловом отношении узлов и деталей, а также расчет вентилятора, необходимого для нормального охлаждения активного объема машины. Точный расчет теплового состояния двигателя возможен только при решении нелинейной трехмерной полевой задачи. При учебном проектировании пользуются упрощенной методикой расчета по усредненным коэффициентам теплоотдачи и несколько увеличенным потерям, полученным для номинального режима. Принимается допущение, что основным источником тепла в машине являются потери в обмотках статора и ротора. Предполагается, что максимально допустимая температура нагрева обмоток составляет 120°C для изоляции класса В, 140°C для изоляции класса F, 165°C для изоляции класса H. Коэффициенты увеличения потерь  $k_p$  по сравнению с номинальным режимом составляют:

$k_p = 1,15$  для обмоток с изоляцией класса В;

$k_p = 1,25$  для обмоток с изоляцией класса F;

$k_p = 1,45$  для обмоток с изоляцией класса H.

Электрические потери в пазовой части обмотки статора, Вт,

$$P'_{пз1} = k_p P_{э1} \frac{2l_1}{l_{cp}}.$$

(202)

Электрические потери в лобовой части обмотки статора, Вт,

$$P'_{лз1} = k_p P_{э1} \frac{2l_l}{l_{cp}}.$$

(203)

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой окружающей среды, °С,

$$\Delta \vartheta_{пов1} = K \frac{P'_{пз1} + P_{ст.очн}}{\pi D l_1 \alpha_1};$$

(204)

где  $K$  - коэффициент, учитывающий теплопередачу от обмотки статора через станину в окружающую среду, определяется по табл. 24,

$\alpha_1$  - коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности статора, по рис.30, 31.

Таблица 24

Средние значения коэффициента  $K$

Исполнение по способу защиты	Число полюсов двигателя					
	$2p = 2$	$2p = 4$	$2p = 6$	$2p = 8$	$2p = 10$	$2p = 12$

IP44(54)	0,22	0,2	0,19	0,18	0,17	0,16
IP23	0,84	0,8	0,78	0,76	0,74	0,72

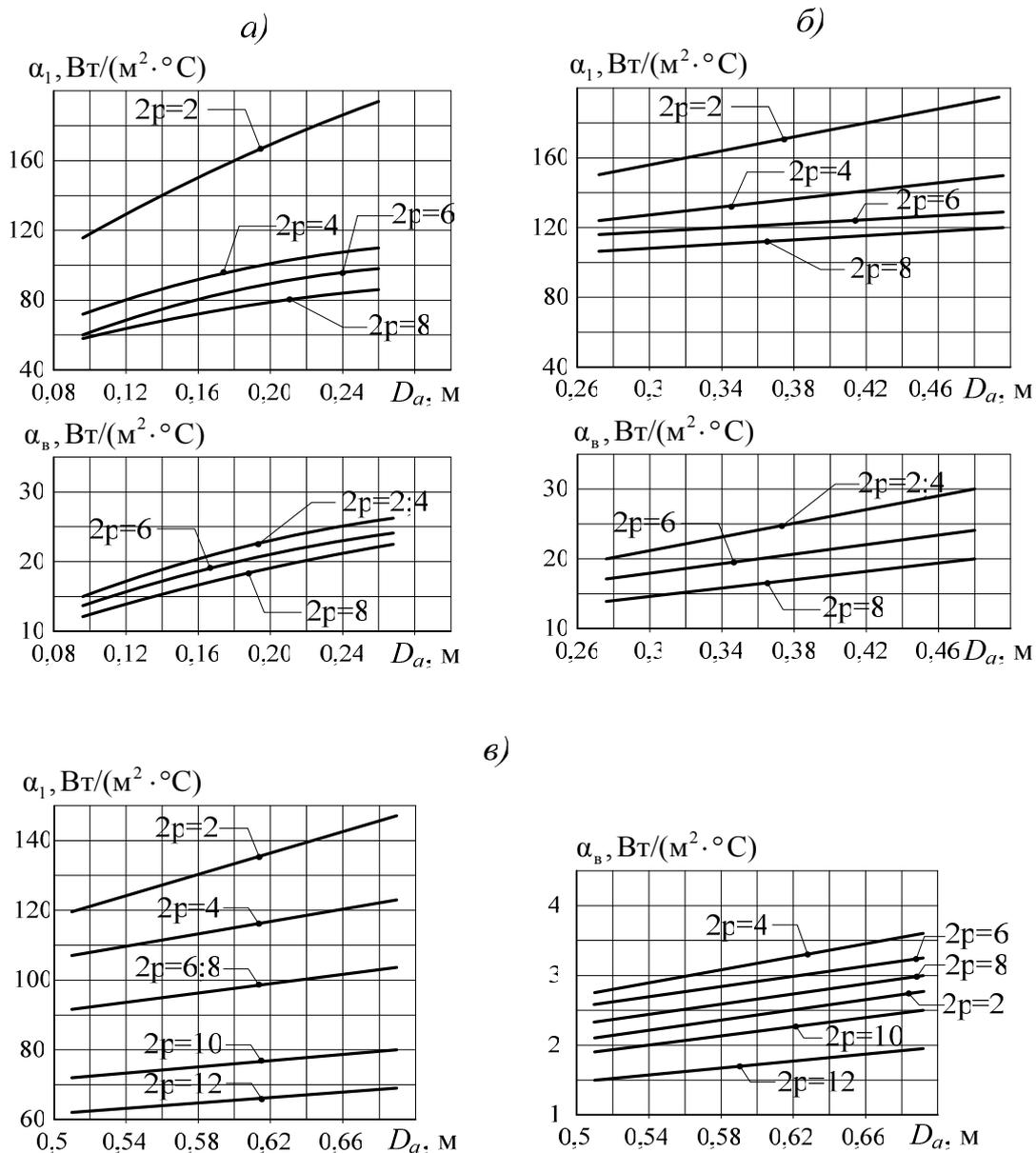


Рис.30. Средние значения коэффициента теплоотдачи с поверхности  $\alpha_1$  и подогрева воздуха  $\alpha_b$  для асинхронных двигателей исполнения IP44(54): а – при  $h < 160$  мм, б – при  $h = 160 \dots 250$  мм, в – при  $h \geq 280$  мм.

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора, °C,

$$\Delta \vartheta_{\text{из.п1}} = \frac{P'_{\text{пэ1}}}{Z_1 l_1 \Pi_{\text{п1}}} \left( \frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{\text{эКВ}}} \right),$$

(205)

где  $\Pi_{\text{п1}}$  - периметр поперечного сечения паза статора, м,

для трапецеидальных пазов

$$\Pi_{\text{п1}} = 2h_{\text{пк}} + b_1 + b_2,$$

(206)

для прямоугольных

$$\Pi_{\text{п1}} = 2(h_{\text{п}} + b_{\text{п}}),$$

(207)

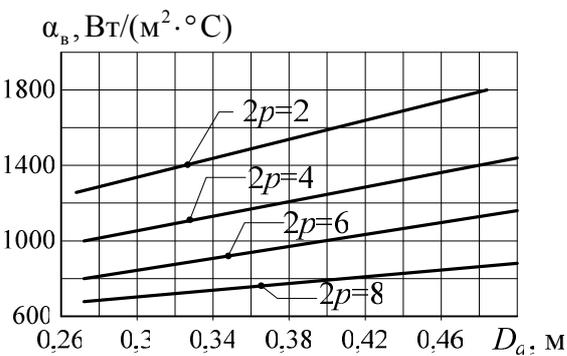
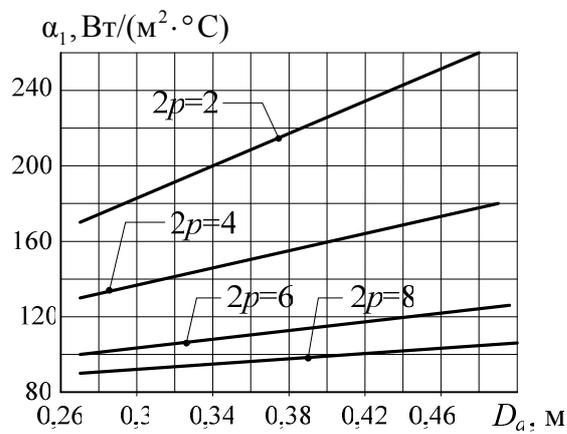
для прямоугольных пазов односторонняя толщина изоляции, м,

$$b_{\text{из}} = 0,5(b_{\text{п}} - n'_{\text{эл}} b'),$$

(208)

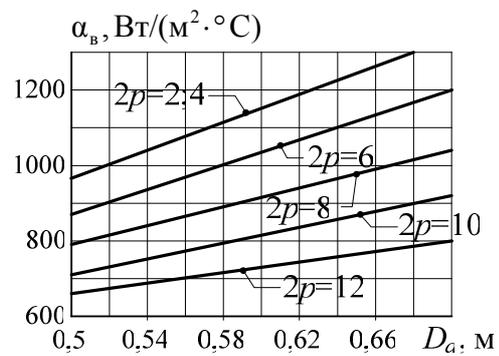
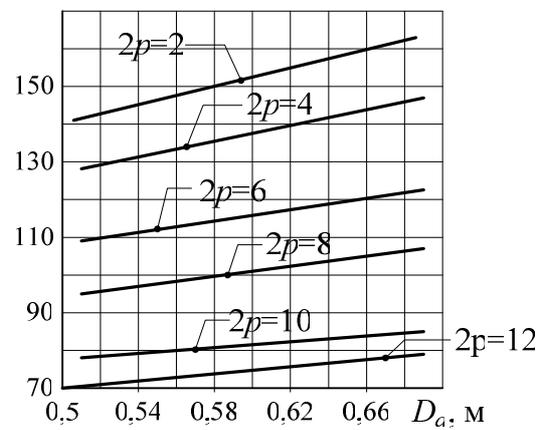
$n'_{\text{эл}}$  и  $b'$  - число и ширина неизолированных проводников, расположенных в одном слое по ширине паза;

$\lambda_{\text{эКВ}}$  - средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции, для классов нагревостойкости изоляции В, F, H  $\lambda_{\text{эКВ}} = 0,16 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;



a)

$\alpha_1, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$



б)

Рис.31. Средние значения коэффициента теплоотдачи с поверхности  $\alpha_1$  и подогрева воздуха  $\alpha_b$  для асинхронных двигателей исполнения IP23: а – при  $h = 160 \dots 250$  мм, б – при  $h \geq 280$  мм

$\lambda'_{\text{экв}}$  - среднее значение теплопроводности внутренней изоляции выпных обмоток,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ , для обмоток из круглого провода  $\lambda'_{\text{экв}}$  определяется по рис. 32, для обмоток из прямоугольного провода  $\frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{\text{экв}}} = 0$ .

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей,  $^\circ\text{С}$ ,

$$\Delta \vartheta_{\text{из.л1}} = \frac{P'_{\text{л1}}}{2Z_{\text{л1}} \Pi_{\text{л1}}} \left( \frac{b_{\text{из.л}}}{\lambda'_{\text{экв}}} + \frac{h_{\text{пл}}}{12\lambda'_{\text{экв}}} \right), \quad (209)$$

где  $\Pi_{л1}$  - периметр поверхности охлаждения лобовой части обмотки, м,  $\Pi_{л1} \approx \Pi_{л1}$ ,  $b_{из.л}$  - односторонняя толщина изоляции лобовой части ка-

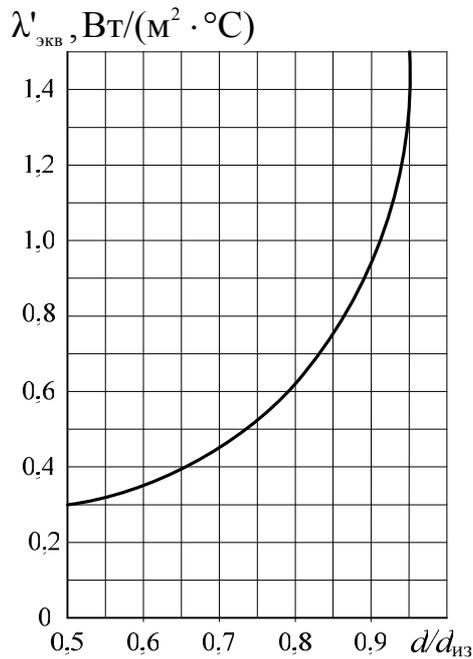


Рис.32. Среднее значение коэффициента теплопроводности

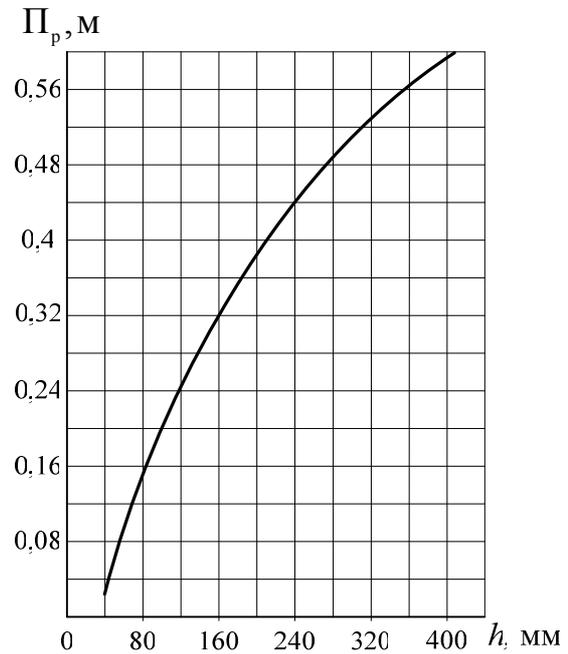


Рис. 33. Среднее значение периметра поперечного сечения ребер корпуса асинхронных машин

тушки (см. таблицы 11, 12), при отсутствии дополнительной изоляции лобовых частей  $b_{из.л} = 0$  (обмотки из круглого провода); для катушек из прямоугольного провода  $\frac{h_{л1}}{12\lambda'_{экр}} = 0$ .

Превышение температуры наружной поверхности изоляции лобовых частей над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta \vartheta_{пов.л1} = \frac{KP'_{лэ1}}{2\pi D l_{выл} \alpha_1} \quad (210)$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta \vartheta'_1 = \frac{[(\Delta \vartheta_{пов1} + \Delta \vartheta_{из.л1})2l_1 + (\Delta \vartheta_{пов.л1} + \Delta \vartheta_{из.л1})2l_л]}{l_{ср}} \quad (211)$$

Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды, с учетом допущения о равенстве температур корпуса и воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta \vartheta_{\text{в}} = \frac{\sum P'_{\text{в}}}{S_{\text{кор}} \alpha_{\text{в}}},$$

(212)

где  $\sum P'_{\text{в}}$  - сумма потерь, отводимых в воздух внутри машины, Вт, для двигателей со степенью защиты IP23

$$\sum P'_{\text{в}} = \sum P' - (1 - K)(P'_{\text{лэ1}} + P_{\text{ст.осн}}),$$

(213,а)

для двигателей степени защиты IP44(54), без учета мощности наружного вентилятора

$$\sum P'_{\text{в}} = \sum P' - (1 - K)(P'_{\text{лэ1}} + P_{\text{ст.осн}}) - 0,9P_{\text{мех}},$$

(213,б)

$\sum P'$  - сумма всех потерь в двигателе при номинальном режиме и расчетной температуре, Вт,

$$\sum P' = \sum P + (k_p - 1)(P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}}),$$

(214)

$\sum P$  - сумма потерь в двигателе в номинальном режиме, Вт, определяется по результатам расчета рабочих характеристик;

$S_{\text{кор}}$  - эквивалентная поверхность охлаждения корпуса, м<sup>2</sup>,

для двигателей со степенью защиты IP23

$$S_{\text{кор}} = \pi D_a (l_1 + 2l_{\text{выл}}),$$

(215,а)

для двигателей со степенью защиты IP44(54) с учетом поверхности ребер станины

$$S_{\text{кор}} = (\pi D_a + 8\Pi_p)(l_1 + 2l_{\text{выл}}),$$

(215,б)

$\Pi_p$  - условный периметр поперечного сечения ребер корпуса, м, по рис.33,

$\alpha_{\text{в}}$  - коэффициент подогрева воздуха, по рис.30, 31.

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды, °С,

$$\Delta \vartheta_1 = \Delta \vartheta'_1 + \Delta \vartheta_{\text{в}}.$$

(216)

Учитывая приближенный метод расчета, значение  $\Delta \vartheta_{1\text{в}}$  должно быть ниже допустимого перегрева на не менее чем на 15-20 %.

Тепловой расчет короткозамкнутого ротора обычно не проводится, так как допустимая температура нагрева его деталей значительно выше допустимой температуры нагрева обмоток.

Вентиляционный расчет двигателя также производится приближенным методом, который заключается в сравнении объема воздуха необхо-

димого для нормальной вентиляции и объема воздуха, который может быть получен при выбранной конструкции двигателя и его системы охлаждения.

Расход воздуха, необходимый для охлаждения двигателя степени защиты IP23, м<sup>3</sup>/с,

$$Q_B = \frac{\sum P'_B}{1100 \Delta \vartheta_B}.$$

(217)

Расход воздуха, создаваемый системой вентиляции, м<sup>3</sup>/с,

$$Q'_B = m'(n_B l_B + 0,1) \frac{n_{2\text{НОМ}}}{100} D_a^2,$$

(218)

где  $m'$  - коэффициент, учитывающий характер течения хладагента в вентиляционных каналах,  $m'=2,6$  для двигателей с  $2p=2$ ,  $m'=3,15$  для двигателей с  $2p \geq 4$ .

Расход воздуха, необходимый для охлаждения двигателя степени защиты IP44, м<sup>3</sup>/с,

$$Q_B = \frac{k_m \sum P'_B}{1100 \Delta \vartheta_B},$$

(219)

где  $k_m$  - коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором,

$$k_m = m' \sqrt{\frac{n_{2\text{НОМ}}}{100} D_a},$$

(220)

$m'$  - коэффициент, учитывающий характер течения хладагента в вентиляционных каналах,  $m'=2,6$  для двигателей с  $2p=2$  при  $h \leq 132$  мм,  $m'=3,3$  для двигателей с  $2p=2$  при  $h \geq 160$  мм,  $m'=1,8$  для двигателей с  $2p \geq 4$  при  $h \leq 132$  мм,  $2p \geq 4$ ,  $m'=2,5$  для двигателей с  $2p \geq 4$  при  $h \geq 160$  мм.

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором, м<sup>3</sup>/с,

$$Q'_B = 0,6 \frac{n_{2\text{НОМ}}}{100} D_a^3.$$

(221)

Расход воздуха  $Q'_B$  для нормальной вентиляции должен быть больше расхода воздуха  $Q_B$ .

#### 4. МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВАЛА

Асинхронные двигатели изготавливаются преимущественно с горизонтальным расположением вала. Валы несут на себе всю массу вращающихся частей, и через них передается механический момент двигателя. При сочленении двигателей с исполнительными механизмами на валы действуют дополнительные изгибающие силы. На валы могут действовать силы одностороннего магнитного притяжения, вызванные магнитной несимметрией, а также усилия обусловленные небалансом вращающихся частей и усилия из-за крутильных колебаний. Правильно сконструированный вал обеспечивает механическую прочность и жесткость – он воспринимает все действующие на него нагрузки без остаточных деформаций и не допускает задевания ротора о статор. Для предотвращения резонансных явлений и связанных с ними вибраций, критическая частота вращения вала должна быть больше рабочих частот вращения двигателя.

Валы асинхронных машин изготавливаются в основном из стали 45. Для повышения механических свойств валы обязательно термически обрабатывают. Размеры вала определяются при разработке конструкции. Валы имеют ступенчатую форму с большим диаметром в месте посадки магнитопровода ротора. При переходе с одного диаметра на другой, для предупреждения механических напряжений в местах перехода, должны быть предусмотрены галтели. Отношение радиуса галтели к диаметру вала должно быть больше 0,05. По этой же причине не следует применять отношение диаметров соседних ступеней вала более 1,3. Для фиксации магнитопровода ротора на валу иногда предусматривается упорный буртик. Шейки вала для посадки подшипников спереди и сзади обычно выполняются одного диаметра и одной длины, так же как и шейки вала под подшипниковые крышки.

Диаметр вала под магнитопроводом, см,

$$d_c = k_b \sqrt[3]{\frac{P_{2\text{ном}}}{n_{2\text{ном}}}},$$

(222)

где  $k_b$  - коэффициент,  $k_b = 24...29$  для машин мощностью до 400 кВт,  $k_b = 18...20$  для машин мощностью более 400 кВт.

Свободный конец вала может быть цилиндрическим или коническим (конус Морзе). Цилиндрическая форма свободного конца вала является наиболее распространенной.

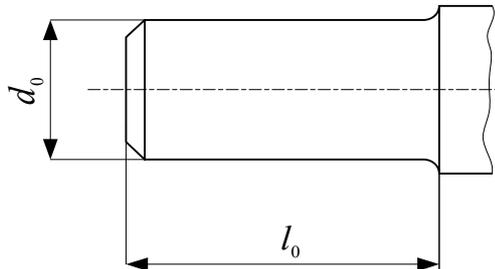
Размеры свободного конца вала цилиндрической формы определяются стандартами по максимальному моменту вращения, (см. табл. 25). На валу может находиться ряд шпонок для закрепления различных узлов. Их размеры приведены в табл. П.5.2. С целью унификации **ширину** всех ис-

пользуемых шпонок следует выбирать одинаковой. Шпонки для свободного конца вала также выбираются по стандарту.

При конструировании вала необходимо согласовать размеры шеек вала под подшипники с размерами самих подшипников. Следует заметить, что в асинхронных машинах в основном используются подшипники качения, в двигателях с  $h \leq 200$  мм оба подшипника обычно шариковые однорядные, в двигателях с  $h > 200$  мм подшипник, находящийся у выходного конца вала роликовый, а находящийся на противоположном конце вала - шариковый.

Таблица 25

Размеры свободного конца вала

					
$d_0$ , мм	$l_0$ , мм	Наибольший момент вращения, Н·м	$d_0$ , мм	$l_0$ , мм	Наибольший момент вращения, Н·м
7	16	0,25	48	110	200
9	20	0,63	55	110	355
11	23	1,25	60	140	450
16	40	4,5	65	140	630
18	40	7,1	70	140	800
19	40	8,25	75	140	1000
22	50	14	80	170	1250
24	50	18	85	170	1600
28	60	31,5	90	170	1900
32	80	50	95	170	2360
38	80	90	100	210	2800
42	110	125	110	210	4000

#### 4.1 Расчет вала на жесткость

При расчете на жесткость делается допущение о том, что вся масса ротора с обмоткой и участок вала под ними приложена в виде однородной сосредоточенной силы  $G_p$  посередине длины магнитопровода. Масса остальных вращающихся деталей считается равной нулю.

Масса ротора, кг,

$$m_p = 6500D_2^2l_2$$

(223)

Вес ротора, Н,

$$G_p = gm_p,$$

(224)

где  $g = 9,81 \text{ кг/м}^2$ , - ускорение свободного падения.

Для расчета прогиба вала необходимо иметь эскиз вала со всеми его размерами. Примерный эскиз вала представлен на рис. 34.

Вал разбивается на три участка:  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , и рассчитываются все необходимые размеры (см. рис.34). Прогиб вала на середине магнитопровода, м,

$$f_G = \frac{G_p}{3El^2}(S_b a^2 + S_a b^2),$$

(225)

где  $E = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$  – модуль упругости стали,

$$S_a = \sum \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i},$$

(226)

$$S_b = \sum \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i},$$

(227)

$J_i$  - экваториальный момент инерции вала, для любого участка с диаметром  $d_i$ , м<sup>4</sup>,

$$J_i = \frac{\pi d_i^4}{64},$$

(228)

$l$  - расстояние между серединами подшипников, м, см. рис.34.



$$S_0 = \sum \frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}.$$

(232)

Первоначальное смещение ротора под действием технологических факторов (износ подшипников, прогиб вала, неточность обработки), м,

$$e_0 = 0,1\delta + f_G + f_n.$$

(233)

Сила одностороннего магнитного тяжения вследствие смещения ротора. Н,

$$T_0 = 2,94D_2l_2' \frac{e_0}{\delta} \cdot 10^5,$$

(234)

где  $l_2'$  - длина пакета ротора без учета радиальных каналов, м.

Дополнительный прогиб вала под действием силы  $T_0$ , м,

$$f_T = \frac{f_G T_0}{G_p}.$$

(235)

Окончательный прогиб вала под действием сил магнитного тяжения, м,

$$f_M = \frac{f_T}{1 - \left(\frac{f_T}{e_0}\right)}.$$

(236)

Результирующий прогиб вала, м,

$$f = f_M + f_G + f_n.$$

(237)

Результирующий прогиб вала асинхронной машины при сочленении упругой муфтой может составлять не более 10 % от величины воздушного зазора  $\delta$ .

Критическая частота вращения, об/мин,

$$n_k \approx 30 \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{f_T}{e_0}\right)}{f_G}}.$$

(238)

Критическая частота вращения  $n_k$  должна отличаться от рабочей частоты  $n_{2ном}$  не менее, чем на 30 %.

## 4.2 Расчет вала на прочность

Расчет вала на прочность заключается в определении напряжений, возникающих в сечении каждой его ступени (сечения *A, B, B, Г, Д, Е* по рис.34). Расчетные значения сопоставляются с допускаемыми для выбранного материала.

При передаче вращательного момента вал испытывает совместное действие напряжения изгиба и напряжения кручения. При совместном действии изгиба и кручения по теории наибольших касательных напряжений, приведенное к случаю изгиба в рассматриваемом сечении, Па,

$$\sigma_{\text{при}} = \frac{1}{W_i} \sqrt{M_{\text{и}i}^2 + (k \alpha M_{\text{ном}})^2},$$

(239)

где  $W$  - момент сопротивления при изгибе в рассматриваемом сечении,  $\text{м}^3$ ,

$$W_i = 0,1d_i^3,$$

(240)

на участках вала, ослабленных шпоночными канавками, момент сопротивления определяется по диаметру  $d_{\text{ш}}$  (см. табл. П.5.2)

$k$  - коэффициент перегрузки,  $k = 2 \dots 2,5$ ,

$\alpha$  - коэффициент, учитывающий реверс, в нереверсивных машинах  $\alpha = 0,6$ , в реверсивных,  $\alpha = 0,8$ ,

$M_{\text{и}i}$  - изгибающий момент в рассматриваемом сечении, Н·м,

на участках вала  $c$ , см. рис.34,

$$M_{\text{и}i} = kF_{\text{н}}z_i,$$

(241,а)

на участках вала  $b$ , см. рис.34,

$$M_{\text{и}i} = kF_{\text{н}}c \left( 1 - \frac{y_i}{l} \right) + (G_p + T) \frac{\alpha y_i}{l},$$

(241,б)

на участках вала  $a$ , см. рис.34,

$$M_{\text{и}i} = [kF_{\text{н}}c + (G_p + T)b] \frac{x_i}{l};$$

(241,в)

момент от установившегося магнитного тяжения, Н,

$$T = \frac{T_0}{1 - \frac{f_{\text{г}}}{e_0}}.$$

(242)

Предел текучести для стали 45  $\sigma_{\text{T}} = 3600 \cdot 10^5$  Па, допускаемое значение напряжения в любом сечении не должно превышать  $0,7 \cdot \sigma_{\text{T}}$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

### РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ ОБМОТОК.

В расчетах используются следующие общепринятые буквенные обозначения:

$m(m_1)$  – число фаз обмотки статора;

$f$  – частота питающего напряжения;

$p$  – число пар полюсов машины ( $2p$  – число полюсов);

$q$  – число пазов на полюс и фазу;

$\tau_n$  – полюсное деление в пазах;

$t_z$  – зубцовое деление;

$N$  – число слоёв обмотки в пазу;

$a$  – число параллельных ветвей обмотки;

$Z_1$  – число пазов (зубцов) статора;

$Z_\phi$  – число пазов статора, приходящихся на одну фазу;

$y_1$  – шаг обмотки статора;

$\beta$  – относительный шаг (укорочение или удлинение) обмотки;

$n_1$  – синхронная частота вращения магнитного поля статора;

$\omega_1$  – угловая скорость волны м.д.с.

$A, B, C$  – названия фаз трёхфазной обмотки.

Обозначение выводов обмотки:

1-я фаза ( $A$ ): начало  $U1$ , конец  $U2$ ;

2-я фаза ( $B$ ): начало  $V1$ , конец  $V2$ ;

3-я фаза ( $C$ ): начало  $W1$ , конец  $W2$ .

Нейтральная (нулевая) точка обозначается  $N$ .

В асинхронных машинах старых серий выводы обмотки маркируются:

1-я фаза ( $A$ ): начало  $C1$ , конец  $C4$ ;

2-я фаза ( $B$ ): начало  $C2$ , конец  $C5$ ;

3-я фаза ( $C$ ): начало  $C3$ , конец  $C6$ .

### 1. Требования, предъявляемые к обмоткам статора.

#### Классификация обмоток.

К статорным обмоткам машин переменного тока предъявляются следующие основные требования:

- форма кривой индуктированной в обмотке ЭДС должна быть близка к синусоидальной и отличаться от неё не более чем на 5%;

- должна обеспечиваться одинаковая величина ЭДС во всех фазах обмотки и их относительный сдвиг на 120 градусов;

- обмотка статора асинхронной машины должна создавать круговое вращающееся с определённой частотой магнитное поле;

- активные и индуктивные сопротивления фаз и параллельных ветвей обмотки должны быть одинаковы;
- схема обмотки должна обеспечивать заданное число полюсов машины;
- сечение проводников обмотки должно быть рассчитано на определённую величину тока;
- обмотка должна быть удобной в изготовлении и ремонте, хорошо вентилироваться, иметь необходимую механическую, термическую и электрическую прочность в течение установленного срока работы машины.

В настоящее время разработаны статорные обмотки машин переменного тока, которые отвечают перечисленным требованиям.

Классификация статорных обмоток может быть проведена по следующим признакам:

- по числу сторон катушек, размещённых в пазу статора, обмотки разделяются на *однослойные, двухслойные и одно-двухслойные*;
  - однослойные обмотки бывают *концентрические простые и концентрические “вразвалку”*, бывают *шаблонные*, которые в свою очередь разделяются на *простые, “вразвалку” и цепные*;
  - двухслойные обмотки подразделяются на *петлевые равнокатушечные, концентрические и волновые*;
  - обмотки бывают *сосредоточенные и распределённые*;
  - обмотки могут быть с *целым или дробным* числом пазов на полюс и фазу;
  - обмотки могут иметь *полный (диаметральный) шаг, шаг укороченный или удлиненный*;
  - по конструктивному исполнению обмотки различают на *всыпные с мягкими секциями и обмотки с жёсткими секциями или полусекциями*.
- Существуют и другие признаки, по которым можно классифицировать обмотки машин переменного тока.

## 2. Основные элементы и соотношения трёхфазных обмоток

**Виток.** Исходным элементом обмотки является *виток*. Активные стороны витка располагаются в пазах, которые находятся под соседними разноимёнными магнитными полюсами машины. Части витка, соединяющие активные стороны и расположенные по торцам магнитопровода вне паза, называются *лобовыми соединениями*. Виток может быть выполнен из нескольких параллельных проводников, что делает секцию более эластичной и облегчает её укладку в пазы.

**Катушка.** Один или несколько последовательно соединённых витков образуют *катушку* или *секцию* обмотки. Если секция состоит из одного

витка, то такую обмотку называют стержневой, так как в этом случае находящиеся в пазах проводники обычно представляют собой стержни. Обмотка, состоящая из многовитковых секций, называется *катушечной*.

**Катушечная группа.** Катушечной группой называется совокупность  $q$  катушек, расположенных в соседних пазах, и соединённых между собой последовательно. Число катушечных групп в фазе в двухслойной обмотке равно  $2p$ , а в однослойной –  $p$ .

Исключение, с точки зрения определения катушечной группы, составляют цепные обмотки, которые могут выполняться с несплошными фазными зонами.

Геометрические размеры катушек в катушечной группе могут быть одинаковы, либо различаться. Часто катушечные группы обмотки содержат одинаковое число катушек. В общем случае число катушек в катушечных группах обмотки может быть различным.

**Фаза обмотки.** Фаза обмотки может содержать одну или несколько катушечных групп, которые соединяются между собой последовательно или параллельно. Может применяться и смешанное соединение катушечных групп в фазе. Параллельное соединение применяется при больших фазных токах, а также в тех случаях, когда предусматривается переключение отдельных катушечных групп. Схема включения катушечных групп должна обеспечивать необходимое число полюсов машины и их правильное чередование.

**Обмотка машины** – это система фаз машины, соединённых по схеме звезда или треугольник.

**Число пазов статора** определяется числом фаз ( $m_1$ ), числом полюсов машины ( $2p$ ) и числом катушек в катушечной группе ( $q$ ):

$$Z_1 = 2p \cdot m \cdot q \quad . \quad (\text{П.1.1})$$

Учитывая, что для трёхфазных машин  $m = 3$ , выражение (1) принимает вид:

$$Z_1 = 6 \cdot p \cdot q \quad . \quad (\text{П.1.2})$$

Очевидно, что  $Z_1$  всегда число **целое**.

Число пазов статора должно быть выбрано так, чтобы отношение  $Z_1/m$  при однослойной обмотке было чётным числом, а при двухслойной обмотке было числом целое. Это условие связано с числом катушек обмотки, которое при однослойной обмотке составляет половину числа пазов, а при двухслойной обмотке равно числу пазов.

**Число пазов на полюс и фазу.** Из выражения (П.1.1) следует:

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} \quad (\text{П.1.3})$$

т.е.  $q$  представляет собой число пазов статора, приходящихся на один полюс и одну фазу машины. Одновременно при целом  $q$  оно равно числу катушек в катушечной группе. Оно может быть любым числом не равным нулю, как целым, так и дробным, больше и меньше единицы.

Увеличение  $q$  в катушечной группе делает индуктированную ЭДС более синусоидальной и является одним из способов улучшения формы кривой ЭДС машины. Однако следует учитывать, что при заданном диаметре расточки статора, числе фаз и числе пар полюсов машины увеличение  $q$  вызывает уменьшение зубцового деления, которое ограничивается технологическими условиями.

В асинхронных двигателях при двухслойной обмотке избегают применять дробное  $q$  из-за ухудшения формы кривой м.д.с. При наличии целого  $q$  на каждой фазной зоне всегда находится  $q$  сторон катушек, что улучшает форму кривой м.д.с. В учебном проектировании число  $q$  должно быть **целым**. Лишь в многополюсных машинах в виде исключения допускается принимать дробное значение  $q$ . В многополюсных трёхфазных асинхронных двигателях малой мощности при малом числе пазов применяют и однослойные обмотки с  $q = 1$ .

Так как в катушечной группе может быть только целое число катушек, то при дробном  $q$  катушечные группы будут содержать разное количество катушек. В этом случае число  $q$  показывает среднее количество катушек в катушечной группе.

При расчете обмотки статора из возможного диапазона  $Z_{1 \min} \dots Z_{1 \max} = \frac{\pi D}{t_{Z1 \max}} \dots \frac{\pi D}{t_{Z1 \min}}$  выбирается такое значение  $Z_1$ , которое удовлетворяет ограничениям, налагаемым на выражения (П.1.1) - (П.1.3).

**Полюсное деление в пазах** – это выраженное числом пазов расстояние между центрами двух смежных разнополярных полюсов машины

$$\tau_n = \frac{Z_1}{2p}. \quad (\text{П.1.4})$$

В пределах полюсного деления токи в проводниках обмотки протекают в одном направлении.

**Число полюсов** машины определяется частотой вращения магнитного поля статора, что влияет на схему обмотки статора. По числу полюсов машины разделяются на двухполюсные и многополюсные (4-х, 6-ти, 8-ми и т.д.). В создании каждого полюса участвуют все фазы обмотки. Чередувание полюсов происходит через  $m \cdot q$  пазов.

Частота вращения магнитного поля, созданного током обмотки статора, определяется выражением:

$$n_1 = \frac{60f}{p} \quad (\text{П.1.5})$$

Выражение (П.1.5) играет важную роль при изучении работы машины переменного тока. Оно показывает, что в двигательном режиме изменение частоты вращения магнитного поля статора и связанное с ним изменение частоты вращения ротора достигается регулированием частоты питающего напряжения и изменением числа пар полюсов машины. В генераторном режиме при стандартной частоте 50 Гц выражение (П.1.5) определяет жёсткое соотношение между числом полюсов машины и частотой вращения:  $p \cdot n_1 = 3000$ .

**Шаг обмотки (ширина катушки)** – это выраженное числом пазов расстояние между активными сторонами катушки,

$$y_1 = \frac{Z_1}{2p} \pm \varepsilon = \tau_n \pm \varepsilon, \quad (\text{П.1.6})$$

где  $\varepsilon$  - укорочение (удлинение) шага обмотки.

Если шаг обмотки равен полюсному делению ( $y_1 = \tau_n$ ), такой шаг называется *полным* или *диаметральным*. Когда  $y_1 < \tau_n$  – шаг укороченный; при  $y_1 > \tau_n$  – удлинённый. Укорочение шага является одним из методов подавления высших гармонических в кривой ЭДС, что улучшает технико-экономические показатели машины. Необходимо отметить, что укорочение шага приводит к некоторому уменьшению первой (основной) гармоники ЭДС, что в принципе нежелательно. Однако подавление пятой и седьмой гармоник приводит к более благоприятному эффекту. Количественно *укорочение шага* равно разности  $y_1 - \tau_n$ .

*Относительное укорочение шага* – это отношение укорочения шага к полюсному делению –  $\frac{y_1 - \tau_n}{\tau_n}$ .

*Относительный шаг обмотки* - это отношение реального шага к полюсному делению (к диаметральному шагу)

$$\beta = \frac{y_1}{\tau_n} \quad (\text{П.1.7})$$

Используются следующие рекомендации по выбору величины шага. В простых однослойных концентрических обмотках, имеющих  $q$  шагов, средний шаг должен быть равен полюсному делению, т.е. должен быть диаметральным ( $y_1 = \tau_n$ ,  $\beta = 1$ ). В концентрических обмотках, выполненных “вразвалку”, средний шаг меньше диаметального (всего шагов  $q/2$ ). В шаблонных и цепных обмотках укороченный шаг выбирается из условия  $\beta = 0,75 \dots 0,85$ . В двухслойных обмотках шаг выбирается с укорочением

$\beta = 0,75...0,85$ , однако в мощных двухполюсных двигателях с целью уменьшения длины лобовых частей обмотки, шаг выбирается из условия  $\beta = 0,5...0,6$ . Укорочение шага обмотки позволяет подавлять пятую, седьмую и кратные им гармоники в кривой ЭДС, что в свою очередь уменьшает паразитные электромагнитные моменты двигателя.

Удлиненный шаг вследствие увеличенного расхода обмоточного провода применяется только в специальных машинах, например в многоскоростных двигателях.

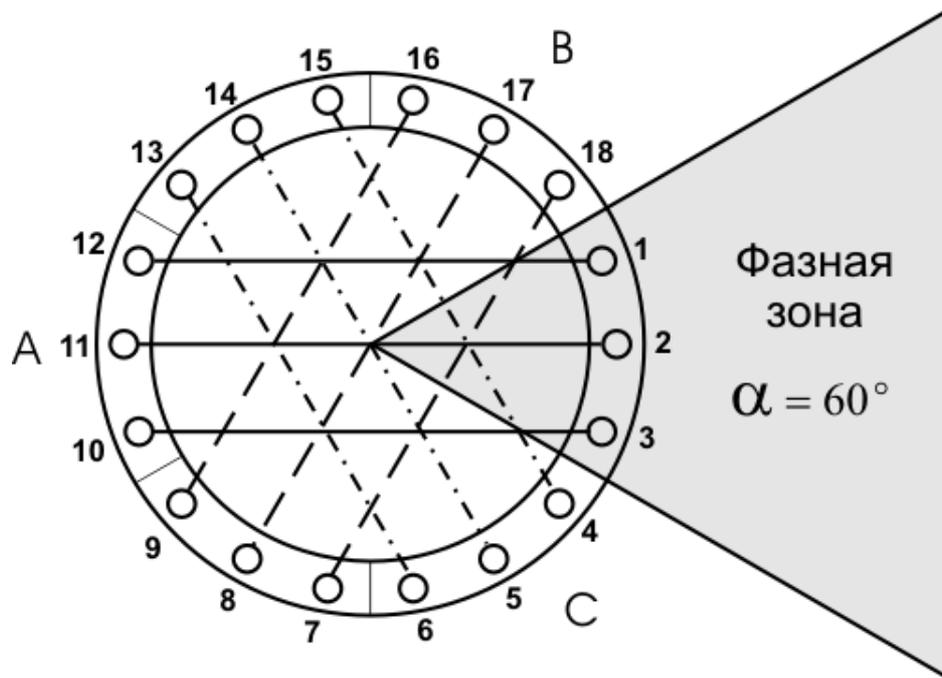


Рис. П.1.1 – К определению фазной зоны  $m=3, 2p=2, Z_1=18 \alpha=60^\circ$

**Электрический градус** связан с геометрическим градусом соотношением:

1 электрический градус =  $p$  геометрических градусов

Равенство электрического и геометрического градусов имеет место только у двухполюсных машин ( $p=1$ ), где 360 геометрическим градусам окружности рашочки статора соответствует 360 электрических градусов ( $2\tau$ ). Окружность рашочки статора четырехполюсной машины ( $p=2$ ) имеет  $360 \cdot 2 = 720$  электрических градусов ( $4\tau$ ), и т.д.

**Фазная зона.** Участок зубцовой зоны статора, на котором располагается одна сторона катушечной группы, называется *фазной зоной*. Она занимает  $q$  зубцовых делений и образует центральный угол

$$\alpha = \frac{360 \cdot p}{Z_1} \cdot q = \frac{360 \cdot p}{2p \cdot m \cdot q} \cdot q = \frac{360}{2m} \text{ эл. град.}$$

Если на каждом из этих участков расположены стороны катушек, принадлежащих одной фазе обмотки, такие обмотки называются обмотками со *сплошными фазными зонами* и выполняются они только с диаметральным шагом и  $q$  равном целому числу

Если на каждом из этих участков расположены стороны катушек разных фаз, то такие обмотки называются обмотками с *несплошными фазными зонами* и выполняются они с укороченным шагом.

Трёхфазные обмотки, обычно, выполняются *шестизонными*. Это означает, что два полюсных деления (360 эл. градусов) разделяются на шесть частей – по одной части на каждую фазу в пределах одного полюсного деления. В этом случае центральный угол составляет (рис. П.1.1)

$$\alpha = \frac{360}{2 \cdot 3} = 60 \text{ эл. градусов}$$

Фазная зона может быть также выражена длиной дуги окружности расточки статора, мм:

$$\frac{\pi D_1}{2p} = \frac{\tau}{m}$$

Для получения шестизонной обмотки соединение катушечных групп должно быть выполнено с соблюдением следующих правил.

В однослойных простых концентрических и шаблонных обмотках катушечные группы должны иметь согласное включение, при котором конец одной катушечной группы соединяется с началом последующей группы.

В однослойных обмотках “вразвалку” (концентрические, цепные и шаблонные) и в двухслойных обмотках катушечные группы должны иметь встречное включение, т.е. конец первой катушечной группы соединяется с концом второй группы, а начало второй группы – с началом третьей катушечной группы и т.д.

Кроме шестизонных применяются и трёхзонные статорные обмотки, у которых фазная зона составляет 120 эл. градусов. Для этого пазы статора, лежащие под двумя полюсами машины, разделяются на три части. Это приводит к тому, что в двухслойных обмотках при согласном соединении число последовательно соединённых рядом лежащих катушек в катушечной группе увеличивается в два раза. Происходит это за счёт того, что в два раза уменьшается число катушечных групп, которые теперь занимают  $2q$  рядом лежащих пазов см. рис. П.1.2.

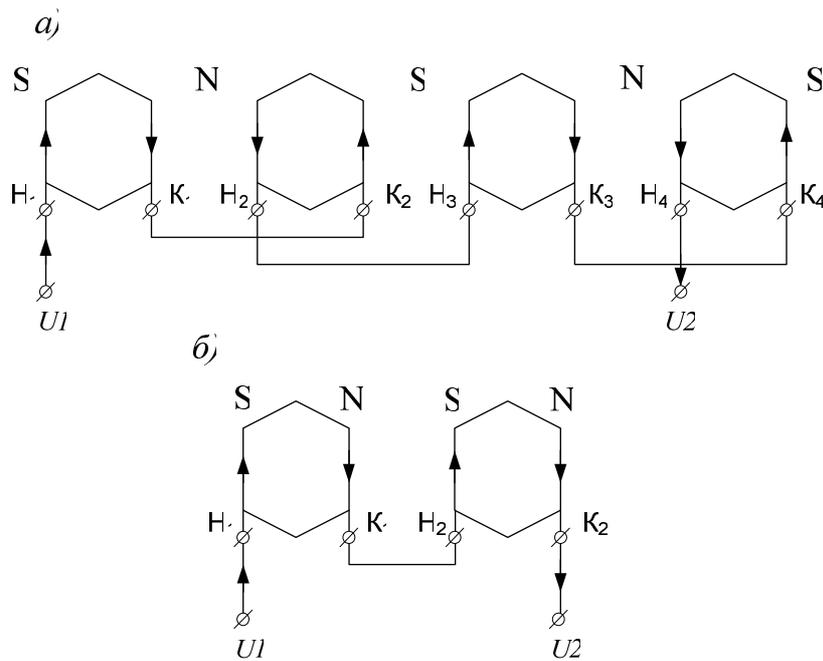


Рис. П.1.2 – а) шестизонная  $q = 3$  и б) трёхзонная  $q = 6$  обмотки при  $p = 4$ ,  $Z_1 = 36$

Трёхзонные обмотки используются в специальных машинах, например, в многоскоростных двигателях. Здесь шестизонная обмотка создаёт меньшее число полюсов, что определяет большую частоту вращения машины, а переход к трёхзонной обмотке обеспечивает большее число полюсов и соответственно меньшую частоту вращения.

**Расположение начал фаз.** Начала трех фаз (U1, V1, W1) на схеме обмотки не могут быть выбраны произвольно. Они должны быть сдвинуты относительно друг друга на  $120$  эл. градусов или  $\frac{2}{3}\tau$ . Это минимально возможное расстояние, которое рекомендуется выбирать с целью концентрации выводов обмотки на участке.

Для определения этого расстояния в пазах необходимо найти угол между двумя соседними пазами  $\alpha_n = \frac{360p}{Z_1}$  в электрических градусах. С

учётом, что угол сдвига между началами фаз в пазах  $\frac{120}{\alpha_n} = \frac{120Z_1}{360p} = \frac{Z_1}{3p}$  или

для трёхфазных обмоток при  $Z_1 = 6pq$  получаем расстояние между нача-

лами фаз, выраженное в пазах  $\frac{Z_1}{3p} = \frac{6pq}{3p} = 2q$  пазов.

**Чередование фазных зон.** Для всех трёхфазных обмоток с целью экономии обмоточного и изоляционного материала независимо от числа полюсов и конструктивного исполнения обмоток в шестизонных обмотках существует следующий закон чередования фаз по кругу:  $U1(A) - W2(Z) - V1(B) - U2(X) - W1(C) - V2(Y)$ .

**Образование параллельных ветвей.** Если при расчёте электрической машины предусмотрены параллельные ветви, то необходимо проверить возможное число параллельных ветвей в зависимости от числа полюсов машины.

При составлении схемы также необходимо учесть правило соединения катушечных групп в случае наличия параллельных ветвей.

Существует два способа образования параллельных ветвей в обмотке статора – распределённый и сосредоточенный. Схема сосредоточенного способа образования параллельных ветвей показана на рис. П.1.3,*а*; распределённого – на рис. П.1.3,*б*. Стрелками указано направление тока в катушечных группах.

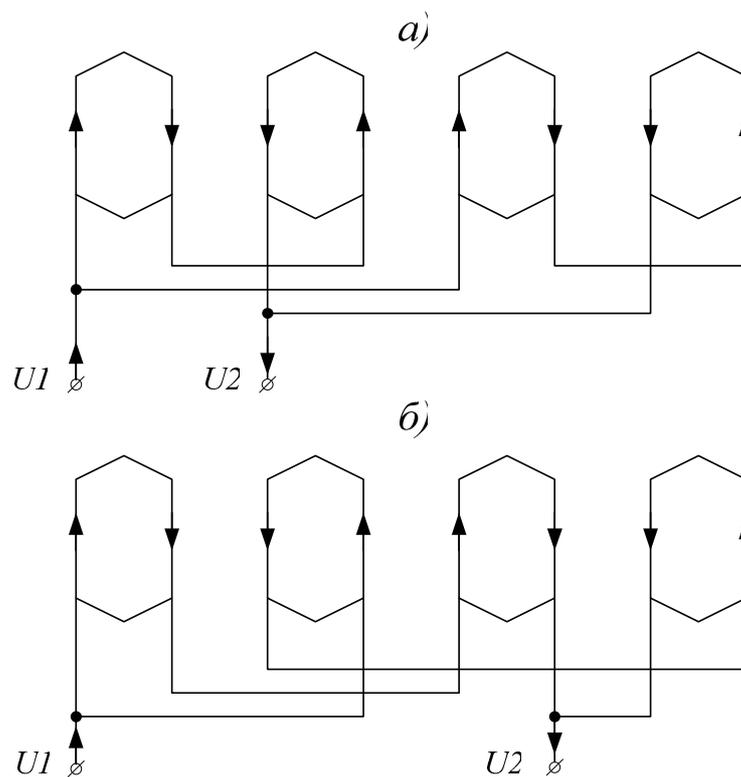


Рис. П.1.3 – Сосредоточенный *а*) и распределённый *б*) способы образования параллельных ветвей обмотки с  $2p = 4$ .

На рис. П.1.4 показано правильное и неправильное соединение двух катушечных групп при  $q = 2$ , на что указывают направления токов в катушках.

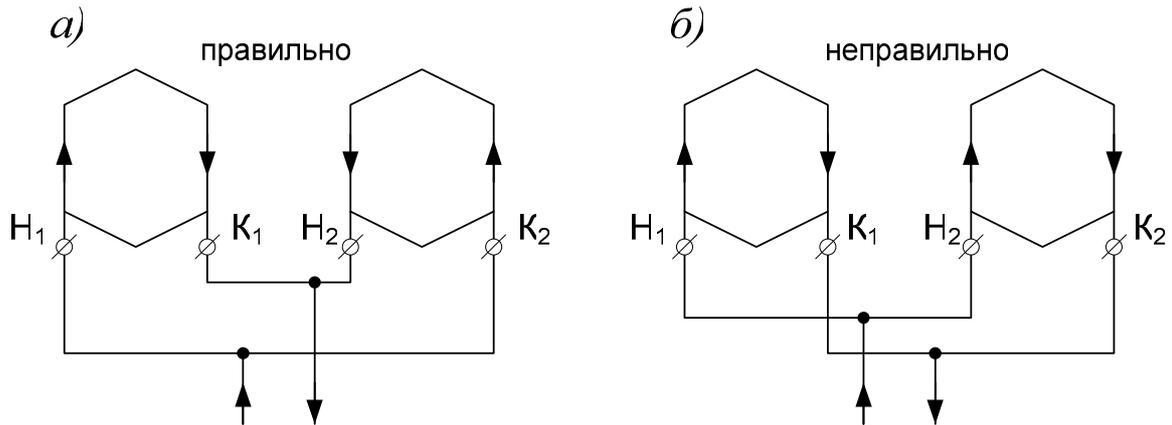


Рис. П.1.4 – Соединение двух катушечных групп с двумя параллельными ветвями ( $a=2$ ): а) – правильное соединение; б) – неправильное соединение.

Способ образования параллельных ветвей влияет на работу обмотки и всей машины. Для идеального случая, когда воздушный зазор машины строго одинаков по всей окружности и магнитные взаимодействия ротора и статора равномерны по всей окружности, оба способа равноценны. В этом случае способ сосредоточенных ветвей предпочтительней лишь потому, что даёт меньший расход обмоточного и электроизоляционного материала. Достоинством распределённых параллельных ветвей является то, что токи в них везде одинаковы, вне зависимости от состояния воздушного зазора. Однако такое соединение не способствует выравниванию магнитных сил взаимодействия ротора со статором при неравномерном воздушном зазоре.

### 3. Магнитное поле трёхфазной машины.

Вращающееся магнитное поле трёхфазной машины, как это следует из теории электрических машин, получается в результате наложения трёх пульсирующих магнитных полей, созданных магнитодвижущими силами фаз обмотки. Непосредственное участие в создании такого поля и формировании его параметров принимает обмотка статора. Необходимым условием образования вращающегося поля является питание машины симметричным трёхфазным напряжением и размещение фаз обмотки по окружности расточки статора под углом 120 эл. градусов. Без принятия специальных мер кривая распределения м.д.с. и магнитной индукции в воздушном зазоре машины на участке  $2\tau$  имеет периодическую несинусоидальную форму. Первая гармоника этого поля, играющая решающую роль в создании электромагнитного момента машины, описывается уравнением

$$F(x, t) = F_m \cdot \sin\left(\omega_1 t - \frac{\pi x}{\tau}\right) \quad (\text{П.1.8})$$

где  $F_m$  – амплитуда волны м.д.с. вращающегося поля;

$\omega_1$  – угловая скорость питающего напряжения;

$x$  – текущая координата по окружности расточки статора.

Это уравнение описывает *круговое поле* машины. Такое поле графически можно представить вектором, вращающимся с частотой  $n_1$ , длина которого составляет  $F_m$  и остаётся неизменной, а конец вектора описывает окружность.

Координата точки окружности статора, в которой волна м.д.с. имеет наибольшее значение  $F_m$ , составляет

$$x = \frac{\tau}{\pi} \left( \omega_1 t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Угловая скорость волны м.д.с., рад/с,

$$\omega_1 = \frac{2 \pi n_1}{60}. \quad (\text{П.1.9})$$

За один период переменного тока волна м.д.с. (и магнитной индукции) создаёт два полюсных деления.

Уравнение (П.1.8) объясняет способ изменения направления вращения ротора (реверсирование) асинхронного двигателя. Положим, одному направлению вращения ротора, условно принятому за положительное, соответствует положительное значение координаты  $x$ . Пусть это имеет место при прямом порядке следования фаз питающего напряжения (А – В – С). Очевидно, что вращение ротора в противоположном направлении сопровождается изменением на противоположное знака  $x$ . Последнее достигается изменением порядка следования фаз на обратный (А – С – В; С – В – А; В – А – С). Отсюда следует правило – для реверсирования асинхронного двигателя необходимо поменять местами два любых питающих провода на клеммном щитке машины.

#### 4. Однослойные обмотки.

У машин с однослойной обмоткой каждый паз статора полностью занят только одной стороной катушки. Такие обмотки применяются в электрических машинах небольшой и средней мощности (до 15 кВт). Однослойные обмотки имеют некоторые преимущества перед двухслойными обмотками:

- отличаются высоким значением коэффициента заполнения паза проводниками из-за отсутствия изоляционных прокладок между слоями;
- имеется возможность механизировать намотку катушек и их укладку в пазы статора;
- просты по конструкции и сравнительно дешёвы в изготовлении.

К недостаткам однослойных обмоток можно отнести:

- увеличенный расход обмоточного провода из-за значительной длины и вылета лобовых частей (примерно на 20%);

- ограниченные возможности построения обмоток с укороченным шагом и дробным  $q$  ;
- повышенные потери в обмотке статора и повышенные добавочные потери;
- провалы момента в механической характеристике машины;
- число пазов статора должно быть кратным трем для трехзонных и кратным шести для шестизонных обмоток.

Указанные недостатки однослойных обмоток становятся особенно ощутимыми с увеличением мощности машины, что и ограничивает их применение отмеченной выше величиной мощности.

**Простая концентрическая обмотка.** Концентрические обмотки имеют следующие характерные особенности:

- все катушки катушечной группы имеют различную ширину и концентрически охватывают одна другую;
- число пазов статора, приходящихся на одну фазу ( $Z_\phi = Z_1 / m$ ) – чётное;
- число катушек на все три фазы в два раза меньше числа пазов статора;
- число катушечных групп в фазе равняется числу пар полюсов машины.

У простой концентрической обмотки шаг наружной самой широкой катушки в группе (наибольший шаг) определяется по формуле

$$y_{\text{нб}} = 4q - 1 \quad (\text{П.1.10})$$

Шаг каждой последующей внутренней катушки уменьшается на два пазовых деления.

Шаг наименьшей катушки составляет

$$y_{\text{нм}} = 2q + 1 \quad (\text{П.1.11})$$

Диаметральный (средний) шаг обмотки

$$y_{\text{ср}} = \frac{Z_1}{2p} = \frac{y_{\text{нб}} + y_{\text{нм}}}{2} = 3q = \tau. \quad (\text{П.1.12})$$

**Порядок расчёта и построения развёрнутой схемы однослойной простой концентрической обмотки.**

*Изложенные при этом рекомендации во многом остаются справедливыми и при построении схем других типов обмоток.*

Имеются следующие исходные данные:

- машина трёхфазная ( $m_1 = 3$ ), четырёхполюсная ( $2p = 4$ );
- обмотка однослойная ( $N = 1$ ), распределённая ( $q = 2$ );
- катушечные группы соединены последовательно (число параллельных ветвей  $a = 1$ ).
  - число пазов статора

$$Z_1 = 2p \cdot m \cdot q = 4 \cdot 3 \cdot 2 = 24 \text{ пазов ;}$$

- полюсное деление

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{24}{4} = 6 \text{ пазов}$$

- - число катушек в катушечной группе – 2 ( $q = 2$ );
- - наибольший шаг наружной катушки

$$y_{\text{нб}} = 4q - 1 = 4 \cdot 2 - 1 = 7 \text{ пазов ,}$$

- - наименьший шаг внутренней катушки

$$y_{\text{нм}} = 2q + 1 = 2 \cdot 2 + 1 = 5 \text{ пазов ,}$$

- - средний шаг обмотки

$$y_{\text{ср}} = \tau = \frac{y_{\text{нб}} + y_{\text{нм}}}{2} = \frac{7 + 5}{2} = 6 \text{ пазов}$$

- - фазная зона

$$\text{ф.з.} = \frac{\tau}{m_1} = \frac{6}{3} = 2 \text{ пазов.}$$

Графическое изображение схемы обмотки (рис.П.1.5) рекомендуется выполнять в следующем порядке:

- на листе бумаги (миллиметровки) вертикальными линиями изображаются пазы статора (в примере их 24), и каждому из них присваивается свой номер;

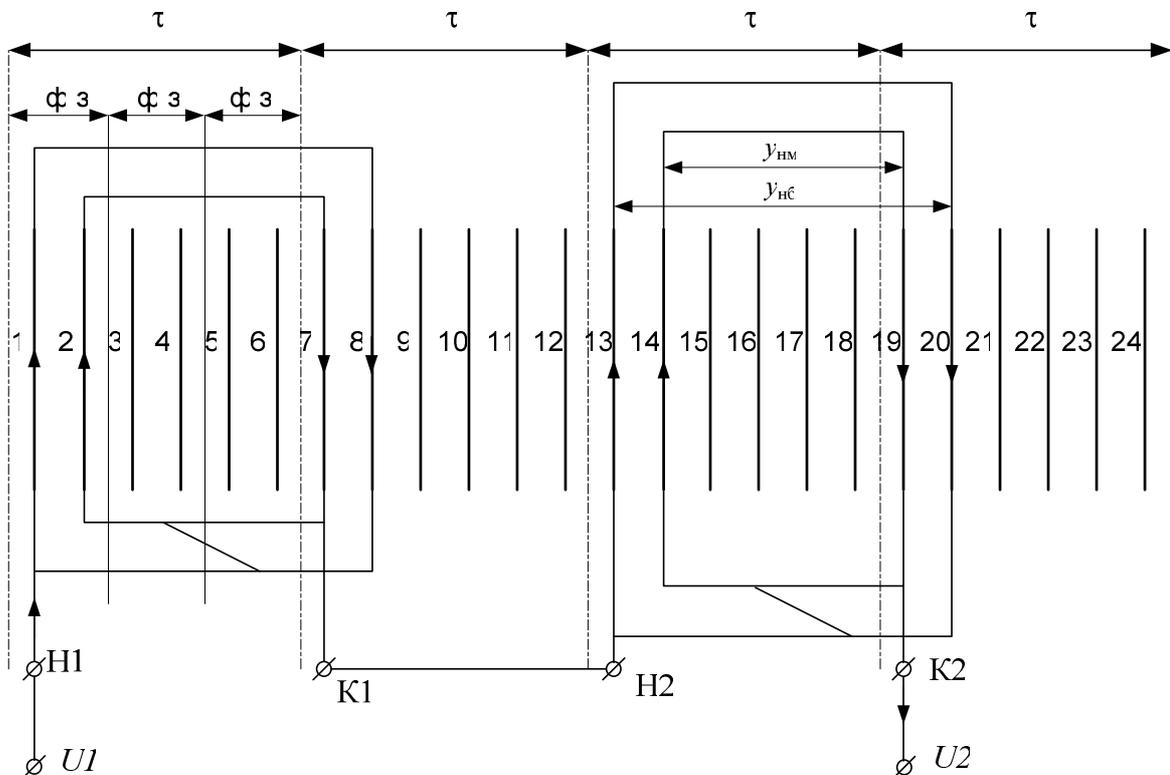


Рис. П.1.5 – Однослойная простая концентрическая обмотка (схема одной фазы).  $m = 3$ ,  $N = 1$ ,  $2p = 4$ ,  $q = 2$ ,  $a = 1$ ,  $Z_1 = 24$ ,  $\tau = 6$ ,  $y_{\text{нб}} = 7$ ,  $y_{\text{нм}} = 5$

- указываются полюсные деления  $\tau$  (в примере их четыре), соответствующие магнитным полюсам машины, каждое из которых содержит  $\tau$  пазов (в примере  $\tau = 6$ );

- размещаются в пазах катушки катушечных групп первой фазы  $A$  ( $U1-U2$ ). Активные стороны большой катушки первой катушечной группы помещаются в первый и восьмой пазы, что соответствует наибольшему шагу  $y_{нб} = 8 - 1 = 7$ . Стороны малой катушки помещаются во второй и седьмой пазы ( $y_{нм} = 7 - 2 = 5$ ). Короткой наклонной чертой показывается переход из большой катушки в малую. Буквой  $K1$  обозначается выводной конец первой катушечной группы. Следует убедиться в том, что левые стороны двух катушек первой катушечной группы лежат в пределах одного полюсного деления (северный полюс), а правые стороны – в зоне второго полюсного деления (южный полюс). При размещении катушек второй катушечной группы следует руководствоваться следующими соображениями. Полная окружность статора содержит 720 эл. градусов (четырёхполюсная машина) и 24 паза. На каждый паз приходится  $720/24=30$  эл. градусов. Вторая катушечная группа фазы должна быть сдвинута относительно первой на 360 эл. градусов, т.е. на  $360/30=12$  пазов. Поэтому стороны большой катушки второй катушечной группы должны размещаться в пазах 13 и 20 ( $1+12=13$ ,  $8+12=20$ ,  $y_{нб} = 20 - 13 = 7$ ), стороны малой катушки в пазах 14 и 19 ( $2+12=14$ ,  $7+12=19$ ,  $y_{нм} = 19 - 14 = 5$ ). Выходной конец второй катушечной группы обозначается  $H2$  и указывается переход из большой катушки в малую.

- Далее возникает вопрос о способе соединения концов двух катушечных групп. Последовательное соединение групп определено условиями задачи. Оно может быть выполнено, во-первых, соединением конца  $K1$  первой катушечной группы с началом  $H2$  второй (как показано на схеме обмотки), или, во-вторых, соединением концов  $K1$  и  $K2$ , а вывод  $H2$  в этом случае станет играть роль конца  $U2$  первой фазы. Для установления правильного способа соединения выводных концов катушечных групп нужно указать направление тока в проводниках, соответствующие векторной диаграмме токов. Ток в первой фазе  $I_A$  протекает от начала  $U1$  к концу  $U2$ .

- Для получения четырёхполюсной машины направление тока в проводниках, лежащих в пределах соседних полюсных делений, должно изменяться на противоположное (вверх или вниз). Это имеет место при соединении вывода  $K1$  с выводом  $H2$ , как показано на схеме. Если бы вывод  $K1$  был соединён с выводом  $K2$ , то одинаковое направление токов было бы в пределах двух смежных полюсных делений, в результате чего получилась бы двухполюсная машина, что противоречит заданию.

Размещение в пазах двух катушечных групп фаз  $B$  ( $U1-U2$ ) и  $C$  ( $W1-W2$ ) выполняется аналогично тому, как это сделано для фазы  $A$ . Фазы  $B$  и  $C$  смещены по окружности статора относительно фазы  $A$  на 120 и 240

эл. градусов. Поэтому левая сторона первой катушки первой катушечной группы фазы *B* укладывается в 5-й паз, что соответствует указанному сдвигу на 120 эл. градусов или, то же самое на 4 паза ( $120/30=4$  паза) относительно левой стороны первой катушки фазы *A*. Левая сторона первой катушки фазы *C* укладывается в 9-й паз, отступив от 1-го на 8 пазов, т.е. обеспечив сдвиг фазы *C* относительно фазы *A* на 240 эл. градусов ( $240/30=8$  пазов). В примере было рассмотрено выполнение простой концентрической обмотки для того случая, когда число пар полюсов  $p$  – чётное (в нашем примере  $p = 2$ ). Аналогично выполняются обмотки при других чётных значениях  $p$ . Лобовые части катушечных групп таких обмоток располагаются в двух плоскостях (ярусах), что наглядно видно на схеме обмотки рис.П.1.6, поэтому такие обмотки называются двухплоскостными. число катушечных групп, лобовые части которых расположены в одной плоскости, равно  $1,5p$ . Недостатком рассмотренного типа обмоток является большой вылет лобовых частей, обусловленный их расположением в не-

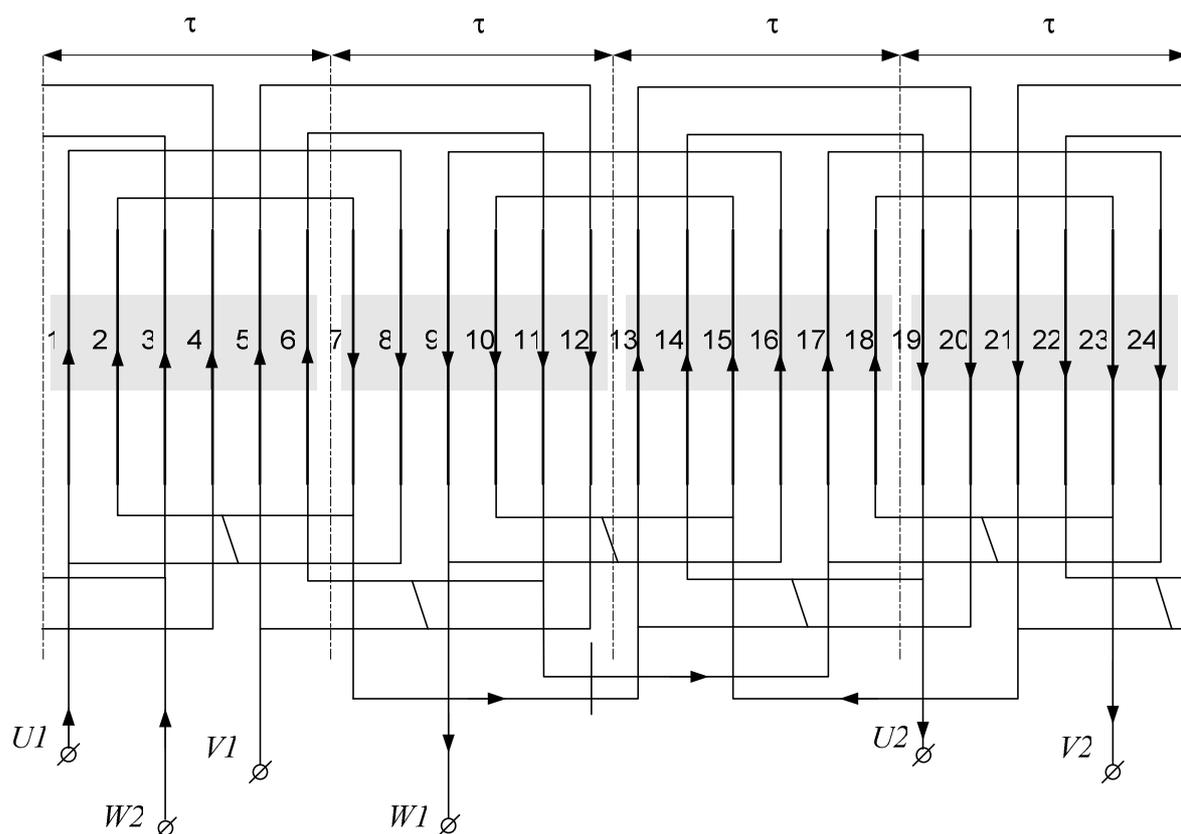


Рис. П.1.6 – Однослойная простая концентрическая обмотка (полная схема):  $m = 3$ ,  $N=1$ ,  $2p = 4$ ,  $q = 2$ ,  $a = 1$ ,  $Z_1 = 24$ ,  $\tau = 6$ ,  $y_{нб} = 7$ ,  $y_{нм} = 5$

скольких ярусах.

При нечётном числе пар полюсов машины, т.е. когда число полюсов  $2p$  составляет 2, 6, 10, 14 и т.д., двухплоскостная обмотка должна иметь “переходную” катушечную группу, лобовые части которой находятся и в первом и во втором ярусах. Это обусловлено тем, что каждая фаза содержит нечётное число катушечных групп. Пример такой обмотки приведён на рис. П.1.7. Для её построения использованы следующие исходные данные:  $m_1=3$ ,  $N=1$ ,  $2p=6$ ,  $q=2$ ,  $a=1$ ,  $Z_1=36$ . “Переходной” является вторая катушечная группа фазы С (на рисунке выделена).

**Концентрическая обмотка “вразвалку”.** Обмотка “вразвалку” является усовершенствованием простой концентрической обмотки. В ней достигается уменьшение размеров лобовых частей, что приводит к сокращению расхода обмоточного провода примерно на 7%; отпадает необходимость в “переходной” катушечной группе в обмотках с нечётным  $q$ . Применяется в машинах с малым числом полюсов и большим значением  $q$  ( $q \geq 6$ ), например, в асинхронных двигателях серии 4А мощностью до 15 кВт.

Это число может быть целым лишь в том случае, когда  $p$  – чётное.

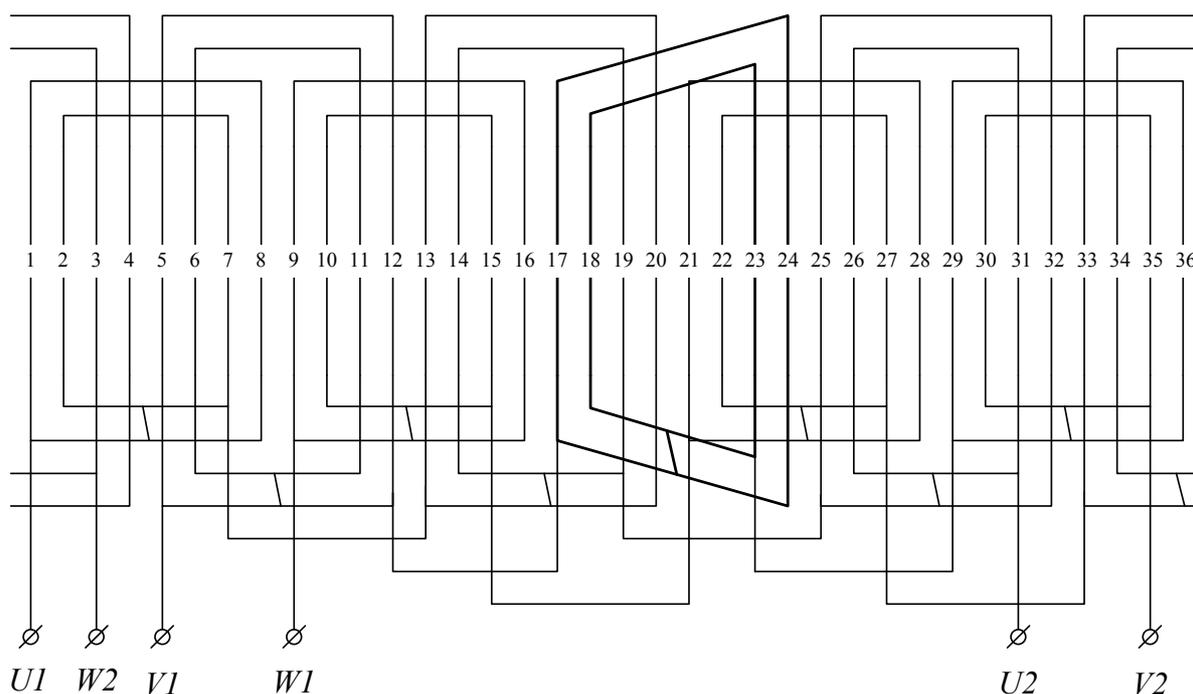


Рис.П.1.7 – Однослойная простая концентрическая обмотка с переходной катушечной группой:  $m_1=3$ ,  $N=1$ ,  $2p=6$ ,  $q=2$ ,  $a=1$ ,  $Z_1=36$ ,  $y_{нм}=5$ ,  $y_{нб}=7$ .

Название “вразвалку” обмотка получила потому, что каждая её катушечная группа, содержащая  $q$  катушек, разбивается на две концентри-

ческие полугруппы по  $\frac{q}{2}$  катушек в каждой, т.е. катушечная группа как бы “развалена” надвое.

Достоинством обмотки “вразвалку” является ещё и то, что она применима для машин с малым числом полюсов, а также в обмотках с нечётным  $q$ . Отмеченные преимущества реализуются в результате того, что обмотка выполняется **трёхъярусной** и в одном ярусе располагаются лобовые части катушечных групп, принадлежащих одной фазе.

На рис.П.1.8 приведена схема однослойной concentрической обмотки “вразвалку”, выполненная при следующих исходных данных:  $m_1=3$ ,  $N=1$ ,  $2p=2$ ,  $q=6$ ,  $a=1$ ,  $Z_1=36$ . В этой обмотке каждая фаза состоит из одной катушечной группы, включающей шесть катушек ( $q=6$ ). Эти катушки раз-

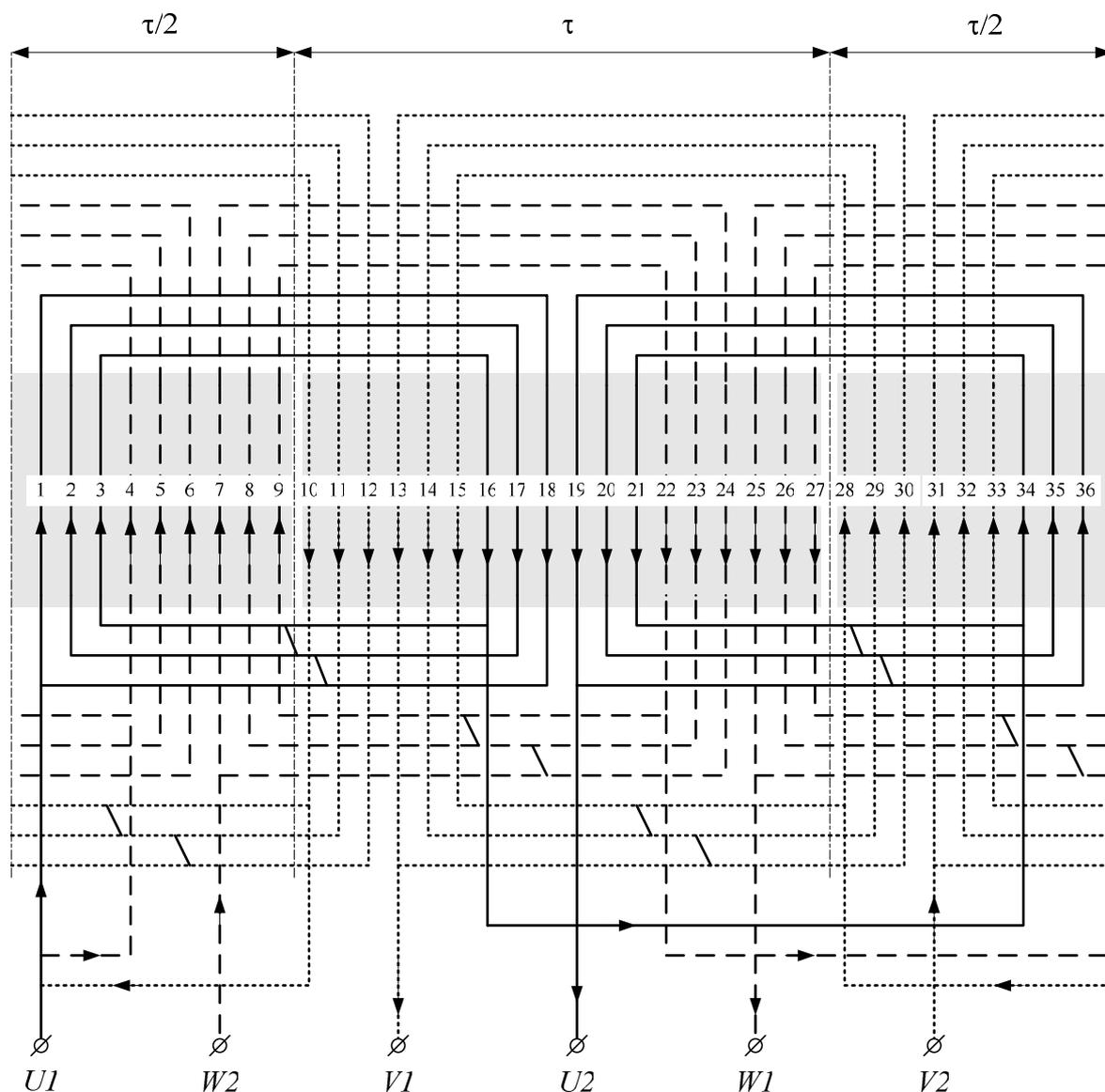


Рис.П.1.8 – Однослойная concentрическая обмотка «в развалку»:  $m_1=3$ ,  $N=1$ ,  $2p=2$ ,  $q=6$ ,  $a=1$ ,  $Z_1=36$ ,  $y_{HM}=13$ ,  $y_{H6}=17$

делены (“развалены”) на две подгруппы по три концентрических катушки в каждой. Между собой подгруппы соединены так, чтобы протекание токов обеспечивало получение двухполюсной машины. Например, фаза  $A$  выполнена из двух подгрупп, первая из которых размещена в пазах 1, 2, 3 – 16, 17, 18; вторая в пазах 19, 20, 21 – 34, 35, 36. Выходной конец  $K1$  первой подгруппы соединён с выходным концом  $K2$  второй, что обеспечивает необходимое направление тока в активных проводниках катушек. Подгруппы фаз  $B$  и  $C$  скомпонованы аналогично. На схеме видно, что лобовые части катушек фазы  $A$  занимают первый ярус (короткий вылет). Лобовые части фаз  $C$  и  $B$  занимают соответственно второй и третий ярусы (более длинные вылеты). На схеме указаны переходы между катушками. Включение фаз может быть выполнено по схеме звезда или треугольник.

**Простая шаблонная обмотка.** Шаблонные обмотки, или как их ещё называют, равнокатушечные обмотки содержат катушки одинаковых геометрических размеров. Их изготавливают на шаблонах трапецеидальной формы. При укладке в пазы лобовые части катушек располагают в двух плоскостях. Все катушки имеют одинаковый диаметральный шаг. В этом заключаются преимущества шаблонных обмоток. К недостаткам можно отнести большое количество пересечений лобовых частей катушек, что вызывает повышенный расход обмоточного провода.

Развёрнутая схема простой шаблонной обмотки приведена на рис. П.1.9. Её исходные данные:  $m_1 = 3$ ,  $N = 1$ ,  $2p = 2$ ,  $q = 4$ ,  $a = 1$ ,  $Z_1 = 24$ . Каждая фаза обмотки содержит одну катушечную группу из четырёх катушек одинаковой геометрической формы. Шаг обмоток диаметральный  $y_1 = 12$  (из 1 в 13). Указаны направления токов в проводниках, определяющие заданное число полюсов машины.

**Шаблонная обмотка “вразвалку”.** Такая обмотка может быть выполнена только при чётном  $q$ . Обычно она выполняется как равнокатушечная. По сравнению с простой шаблонной обмоткой имеет более короткие лобовые части, которые у всех катушек отогнуты в одну сторону. На рис. П.1.10 представлена шаблонная обмотка “вразвалку”, выполненная на основе следующих исходных данных:  $m_1 = 3$ ,  $N = 1$ ,  $2p = 2$ ,  $q = 4$ ,  $a = 1$ ,  $Z_1 = 24$ . Полюсное деление  $\tau = 12$ , шаг обмотки  $y = 10$ .

У некоторых типов шаблонных обмоток “вразвалку” подгруппы состоят из катушек различных размеров. В них широкая катушка охватывает узкую, поэтому такую обмотку иногда называют “шаблонной концентрической”. Пример обмотки приведён на рис. П.1.11.

Достоинством этой обмотки по сравнению с равнокатушечной – это меньшее число перекрещиваний лобовых частей, что позволяет делать их укладку более плотной. Недостаток – необходимость изготовления катушек различных размеров.

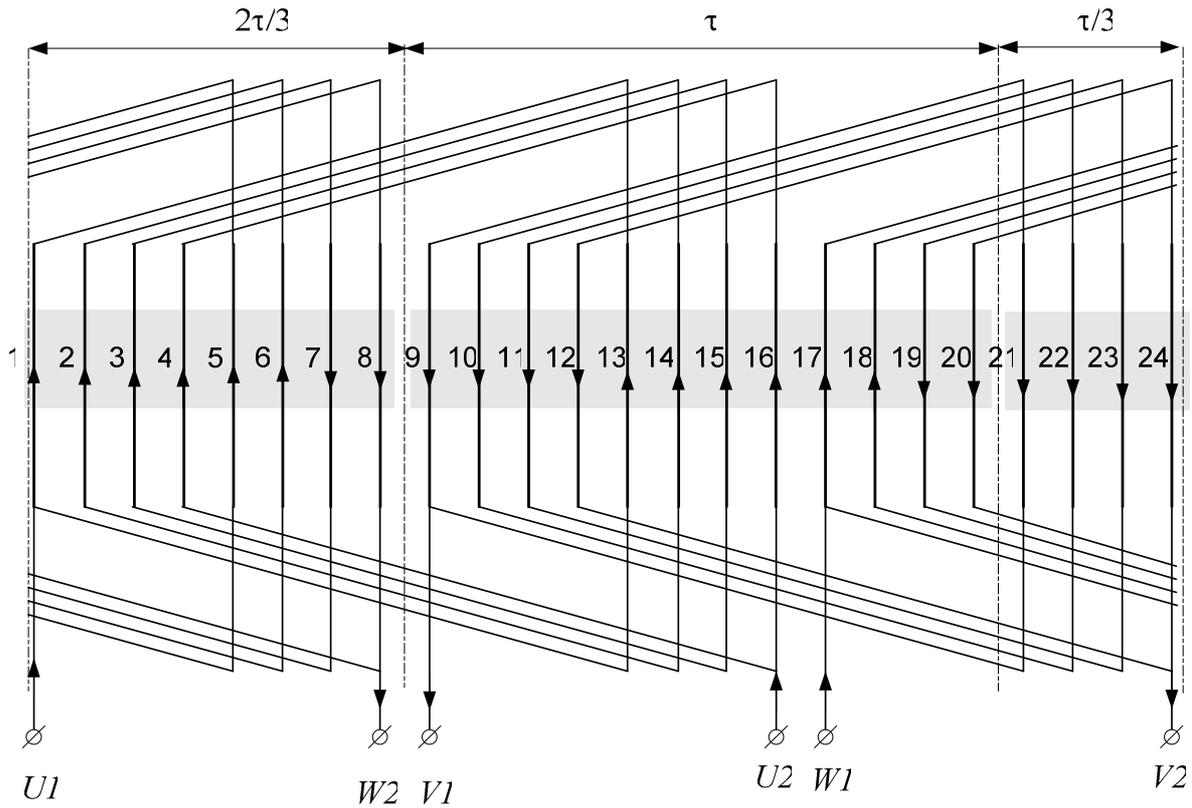


Рис.П.1.9 – Однослойная простая шаблонная обмотка :  $m_1=3$ ,  $N=1$ ,  $2p=2$ ,  $q=4$ ,  $a=1$ ,  $Z_1=24$ ,  $y_1=12$ ,

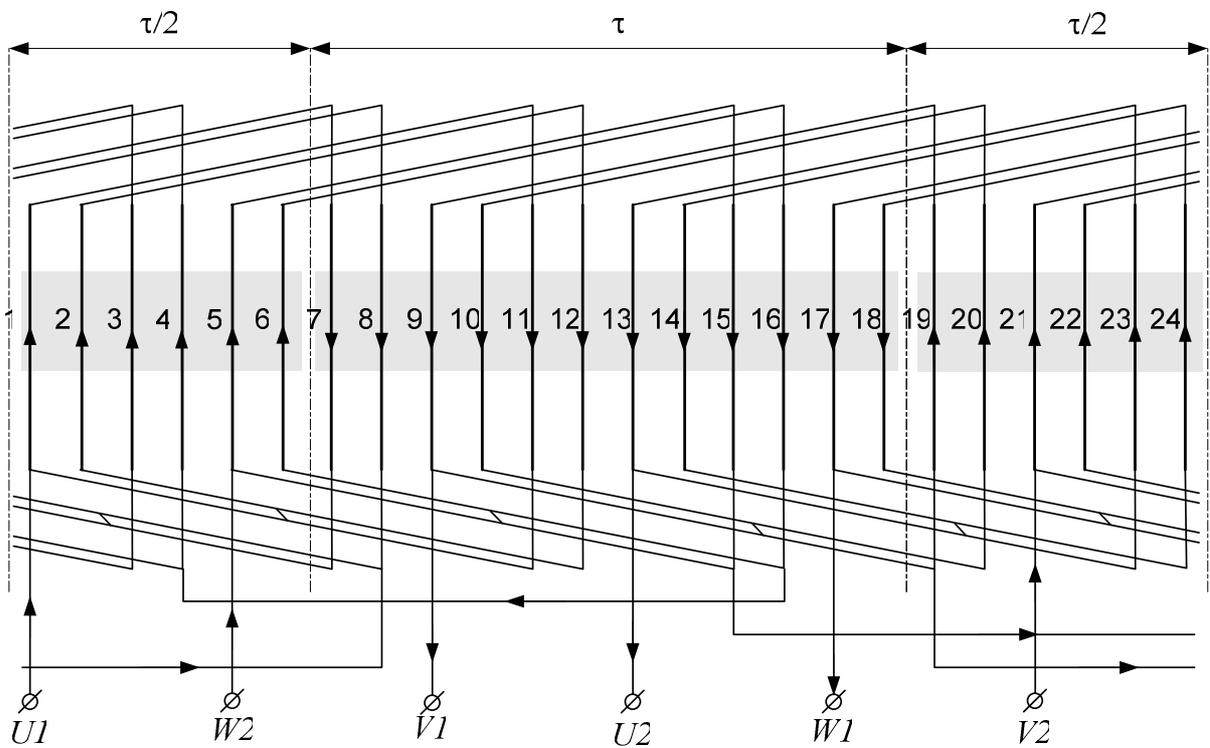


Рис.П.1.10 Однослойная шаблонная обмотка “вразвалку”,  $m_1 = 3$ ,  $N = 1$ ,  $2p = 2$ ,  $q = 4$ ,  $a = 1$ ,  $Z_1 = 24$ ,  $\tau = 12$ ,  $y = 10$

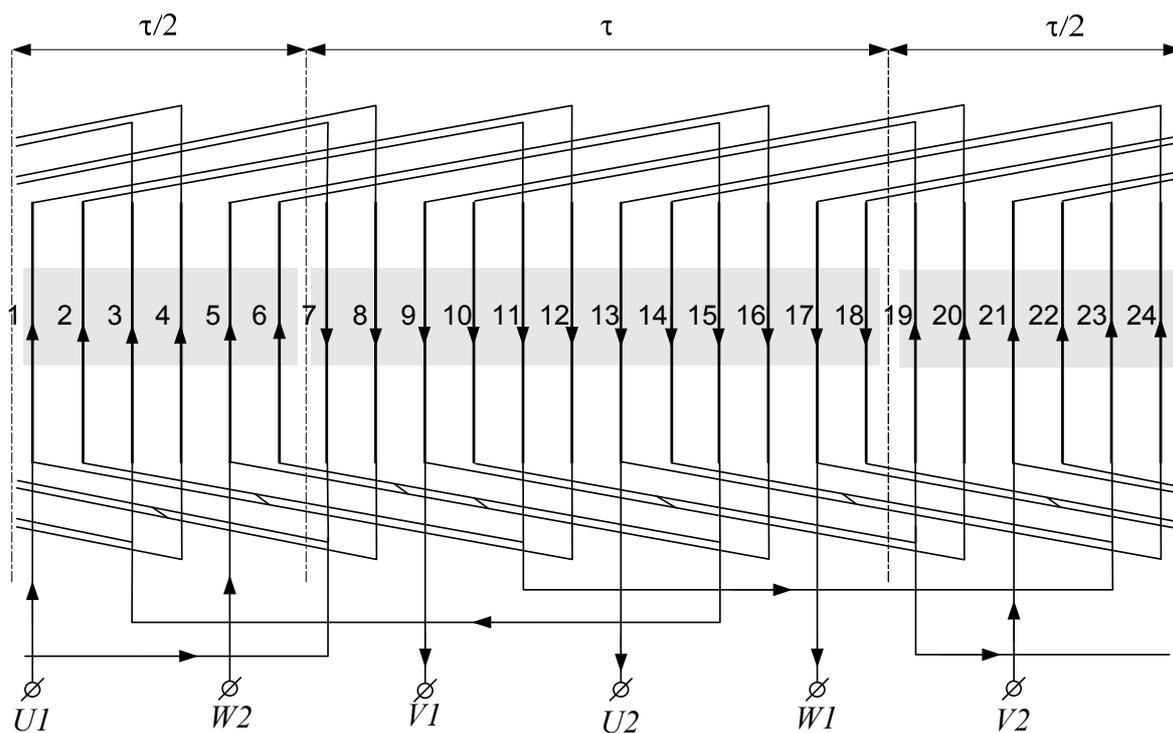


Рис.П.1.11 Однослойная шаблонная концентрическая обмотка,  $m_1 = 3$ ,  $N = 1$ ,  
 $2p = 2$ ,  $q = 4$ ,  $a = 1$ ,  $Z_1 = 24$ ,  $\tau = 12$ ,  $y_{\text{нм}} = 9$ ,  $y_{\text{нб}} = 11$

## 5. Двухслойные обмотки.

В машинах переменного тока мощностью свыше 15 кВт применяются двухслойные обмотки. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с однослойными обмотками, основными из которых являются:

- возможность выполнения любого укорочения шага обмотки, который может быть как чётным так и нечётным. Этим достигается экономия обмоточного провода, приближение кривой ЭДС к синусоидальной форме, уменьшение индуктивного сопротивления, что положительно влияет на эксплуатационные свойства машины;
- возможность выполнения несимметричных обмоток и обмоток с  $q_1$  любой дробности;
- возможность выполнения разноразвитковых катушек с целью полного использования площади паза статора, когда число активных проводников в пазу должно быть нечётным;
- возможность механизировать процесс укладки обмотки.

К недостаткам двухслойных обмоток можно отнести:

- затруднения при укладке (ручной) последних катушек обмотки на протяжении шага, вызванные необходимостью удерживать навесу верхние стороны катушек первого уложенного шага;
- в случае повреждения нижнего слоя катушки при ремонте необходимо поднимать целый шаг обмотки;

○ невозможность выполнить разъемный статор без подъема катушек из пазов.

Двухслойные обмотки разделяются на петлевые, равносекционные, концентрические и волновые.

**Петлевая равнокатушечная обмотка.** Вначале отметим, что число катушек двухслойной обмотки равно числу пазов  $Z_1$ . Каждая фаза обмотки содержит  $\frac{Z_1}{3}$  катушек и  $2p$  катушечных групп. Катушечные группы фазы могут соединяться последовательно или параллельно. При параллельном соединении направление токов в катушечных группах, а, следовательно, и полярность полюсов магнитного поля машины остаются такими же, как и при последовательном соединении катушечных групп обмотки. Наибольшее возможное число параллельных ветвей в фазе двухслойной обмотки с целым  $q$  равно числу катушечных групп в фазе, а значит числу полюсов, т.е.  $a_{\max} = 2p$ .

В качестве примера на рис.П.1.12 показана схема двухслойной пет-

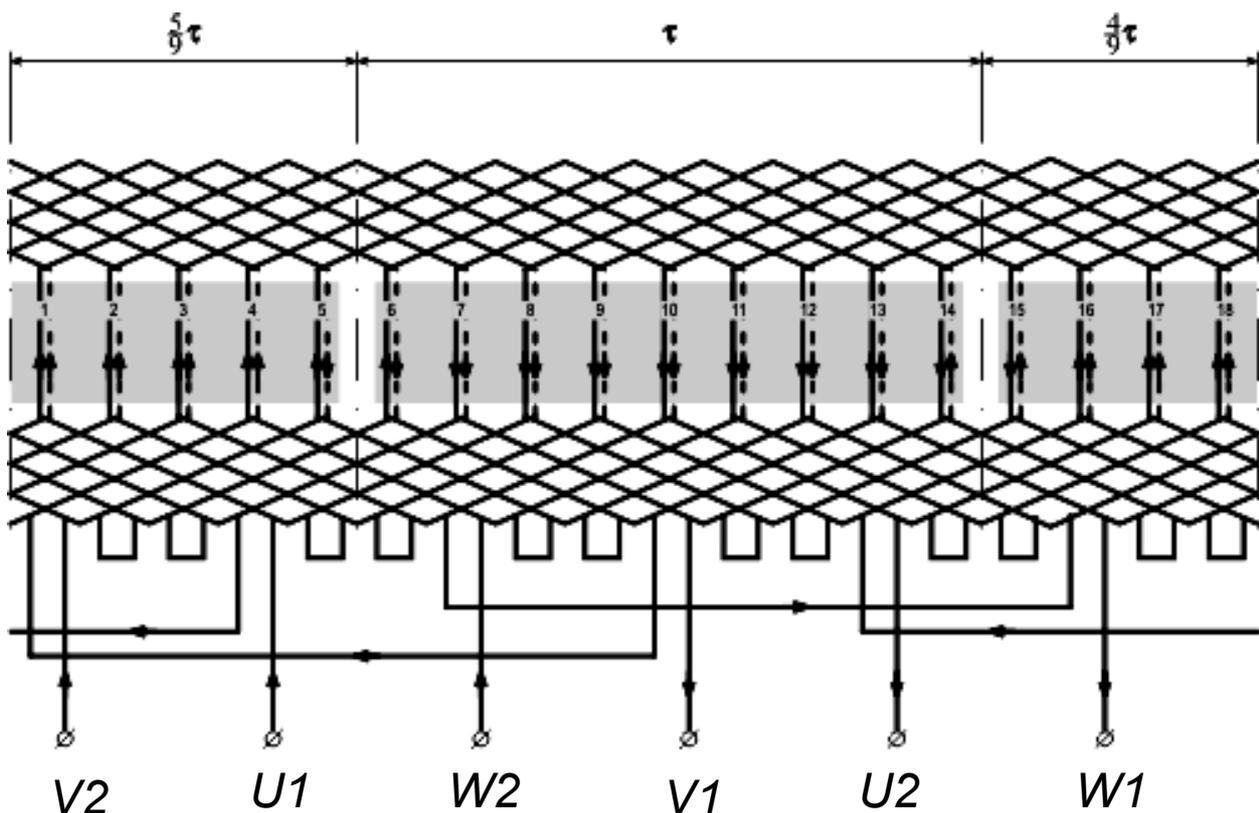


Рис. П.1.12. – Двухслойная петлевая равнокатушечная обмотка. ,  $m_1 = 3$ ,

$$N = 21, 2p = 2, q = 4, a = 1, Z_1 = 18, \tau = 9, y = 7, \beta = \frac{7}{9}$$

левой равнокатушечной обмотки с укороченным шагом. При построении

схемы принято:  $m_1 = 3$ ,  $N = 2$ ,  $2p = 2$ ,  $q = 3$ ,  $a = 1$ ,  $Z_1 = 18$ ,  $\tau_n = 9$ . Относительный шаг обмотки  $\beta = \frac{7}{9}$ , относительное укорочение шага  $\varepsilon = \frac{2}{9}$ . Шаг обмотки  $y_1 = 7$ . При изображении схемы обмотки принято верхний слой, расположенный со стороны воздушного зазора, указывать сплошной линией, нижний слой – пунктирной. Начало  $U1$  первой фазы входит в первую катушку первой катушечной группы. Левая сторона катушки помещается в верхний слой первого паза, правая сторона в нижний слой восьмого паза, правая сторона в нижний слой восьмого паза, что обеспечивает шаг обмотки равный  $y_1 = 8 - 1 = 7$ . Вторая и третья катушки первой катушечной группы соединяются последовательно с первой катушкой с помощью переходов, показанных в нижней части лобовых соединений. Первая катушечная группа включена последовательно с помощью перемычки со второй катушечной группой, три катушки которой размещены в пазах 1 – 12, 18 – 11, 17 – 10. Конец первой фазы –  $U2$ . Схемы второй и третьей фаз аналогичны первой. Начало второй фазы  $V1$  смещено относительно начала первой фазы на 120 эл. градусов чему соответствует 6 пазов, и направлено в верхний слой седьмого паза. Начало третьей фазы смещено на 6 пазов по отношению к началу второй фазы и направлено в верхний слой 13-го паза. После указания стрелками токов, нетрудно заметить, что в пазах 5 и 6, 14 и 15 их направление противоположно в верхнем и нижнем слое каждого из этих пазов, что явилось следствием укорочения шага обмотки.

Как было отмечено выше, катушечные группы фазы могут соединяться параллельно. При двух или нескольких параллельных ветвях в петлевой равнокатушечной обмотке каждая ветвь может быть образована последовательным соединением соседних катушечных групп, что соответствует сосредоточенному соединению. Если имеет место их равномерное распределение по окружности статора – соединение называется распределённым. Распределённая схема соединений обеспечивает одинаковые токи в параллельных ветвях при неравномерном воздушном зазоре, когда неодинаковы индуктивные сопротивления катушечных групп, расположенных на различных участках окружности статора.

#### **Концентрическая обмотка.**

На рис.П.1.13 приведена схема одной фазы двухслойной концентрической обмотки, составленной при  $m_1 = 3$ ,  $N = 2$ ,  $2p = 4$ ,  $q = 2$ ,  $a = 1$ ,  $Z_1 = 24$ ,  $\tau = 6$ . Видно, что катушечные группы состоят из двух концентрически расположенных катушек ( $q = 2$ ). В общем случае число катушек в катушечной группе может быть больше двух. Тогда средний шаг обмотки будет равен шагу исходной двухслойной обмотки с учётом его укорочения. В рассматриваемом случае шаг большой катушки  $y_1 = \tau = 6$ ; шаг малой ка-

тушки равен четырём. При этом шаг исходной двухслойной обмотки  $y_{cp} = 5$ , укорочение составляет  $\frac{\tau}{6}$ .

Между собой катушечные группы соединяются так, чтобы получить необходимое число полюсов машины. Для этого в приведённой схеме конец катушки первой катушечной группы соединяется с концом катушки второй катушечной группы, начало второй группы соединяется с началом третьей группы, конец третьей группы соединяется с концом четвертой группы.

Фаза обмотки содержит 16 активных сторон катушек. Из них четыре стороны первой катушечной группы, одна сторона третьей и три стороны четвертой групп расположены в нижних слоях пазов, остальные стороны

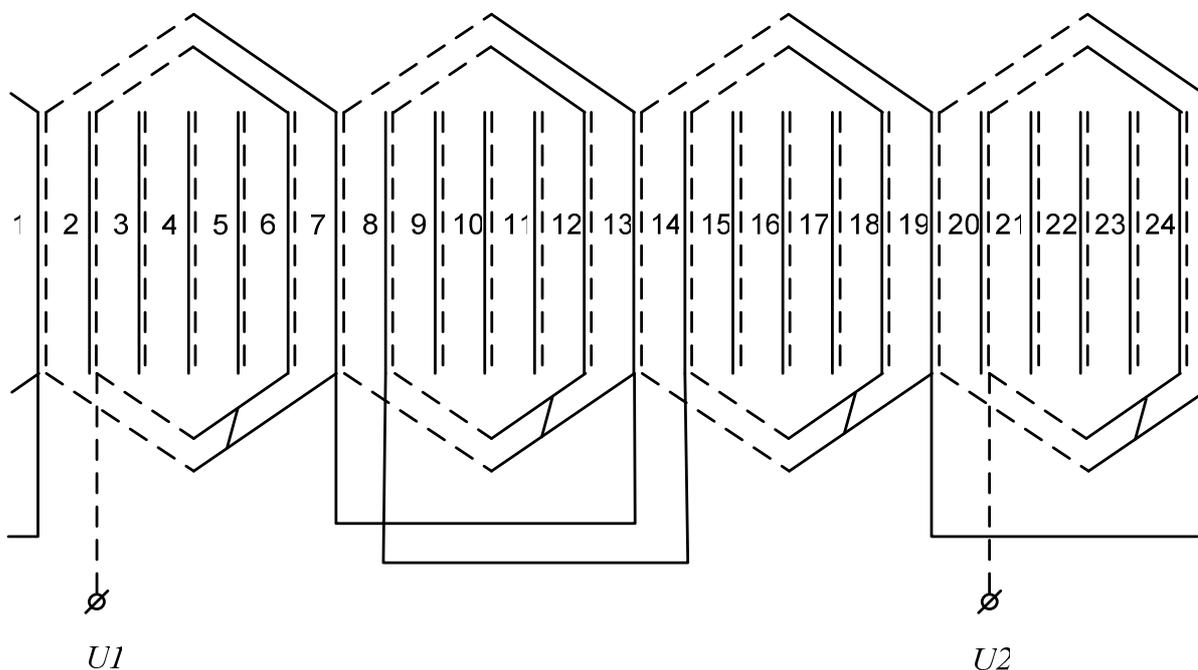


Рис.П.1.13 Схема одной фазы двухслойной концентрической обмотки,  $m = 3$ ,  $N = 2$ ,  $2p = 4$ ,  $q = 2$ ,  $a = 1$ ,  $Z_1 = 24$ ,  $\tau = 6$ ,  $y_{но} = 6$ ,  $y_{нм} = 4$

катушек – в верхних слоях, в результате чего обеспечивается одинаковость ЭДС и индуктивных сопротивлений фазы.

Схемы второй и третьей фаз обмотки выполняются аналогично схеме первой фазы. Они на рис. П.1.13 не приведены, однако показаны начала этих фаз ( $VI$  и  $WI$ ), которые сдвинуты на 4 паза, что в рассматриваемой четырёхполюсной обмотке соответствует 120 эл.градусов.

Концентрическая обмотка может быть выполнена “вразвалку” с разделением катушечных групп на две концентрические подгруппы, что значительно уменьшает длину вылета лобовых частей. Такая обмотка допускает механизированную укладку в паза без “подъёма” шага. Применяется

в серии асинхронных двигателей 4А при  $2p=10$  и  $12$  с высотой оси вращения  $280$  и  $355$  мм.

## 6. Обмоточный коэффициент.

Обмоточный коэффициент  $k_{об}$  учитывает уменьшение ЭДС распределенной обмотки по сравнению с ЭДС обмотки с тем же числом витков, но имеющих диаметральный шаг и сосредоточенных в одной катушке на каждом полюсе. Для любой обмотки  $k_{об}$  может быть найден по векторной диаграмме ЭДС проводников (звезде пазовых ЭДС) как отношение геометрической суммы векторов ЭДС проводников, последовательно соединенных в фазу обмотки (ЭДС фазы) к алгебраической сумме ЭДС этих же проводников.

Общим аналитическим выражением для расчета  $k_{об}$  большинства современных симметричных обмоток с фазной зоной, равно электрическому углу  $\frac{\pi}{m}$  радиан и целым числом шагов на и фазу (кроме некоторых видов специальных обмоток, например с несплошной фазной зоной и ряда других) является

$$k_{об} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m} v}{q \cdot \sin(\frac{\pi}{2mq} v)} \sin(\frac{\pi}{2} \beta v), \quad (\text{П.1.13})$$

где  $v$  - порядковый номер гармоники (для основной гармоники  $v=1$ ),

$\beta = \frac{y_1}{\tau}$  - относительное укорочение (удлинение) обмотки.

Для расчета и анализа обмоток обмоточный коэффициент удобнее представлять в следующем виде:

$$k_{об} = k_p k_y k_{ск}, \quad (\text{П.1.14})$$

где  $k_y$  - коэффициент укорочения обмотки,  $k_p$  - коэффициент распределения обмотки по первой гармонике,  $k_{ск}$  - коэффициент скоса пазов по первой гармонике.

Укорочение, распределение обмотки и скос пазов выполняются для уменьшения влияния высших гармоник на МДС в воздушном зазоре машины.

**Коэффициент укорочения** учитывает уменьшение ЭДС витка обмотки выполненной с укорочением (удлинением) по сравнению с ЭДС витка при диаметральном шаге:

$$k_y = \sin(\frac{\pi}{2} \beta). \quad (\text{П.1.15})$$

В однослойных обмотках  $k_y = 1$ , так как все однослойные обмотки выполняются с диаметральным шагом.

Для двухслойных обмоток при расчете  $\beta$  берется среднее значение шага (для концентрических обмоток) и расчетное значение шага для равнокатушечных обмоток.

**Коэффициент распределения** учитывает уменьшение ЭДС обмотки распределенной по пазам, по сравнению с сосредоточенной обмоткой. Распределение обмоток делается для того, чтобы кривая распределения МДС обмотки имела форму ступенчатой трапеции. Такая форма кривой МДС обеспечивает уменьшение в ней спектра высших гармоник (см. рис. П.1.14).

Коэффициент распределения по первой гармонике для трехфазной обмотки

$$k_{p1} = \frac{0,5}{q \sin \frac{30^\circ}{q}}; \quad (\text{П.1.16})$$

для высших гармоник при целом  $q$ ,

$$k_{pv} = \frac{\sin\left(\frac{\pi v}{6}\right)}{q \sin\left(\frac{\pi v}{6q}\right)}. \quad (\text{П.1.17})$$

Анализ выражений П.1.16, П.1.17 показывает, что при  $q = 1$  коэффициент распределения для всех гармоник равен 1. С увеличением  $q$  коэффициент распределения уменьшается, но по-разному для каждой гармоники, причем с ростом порядкового номера гармоники  $k_{pv}$  уменьшается быстрее.

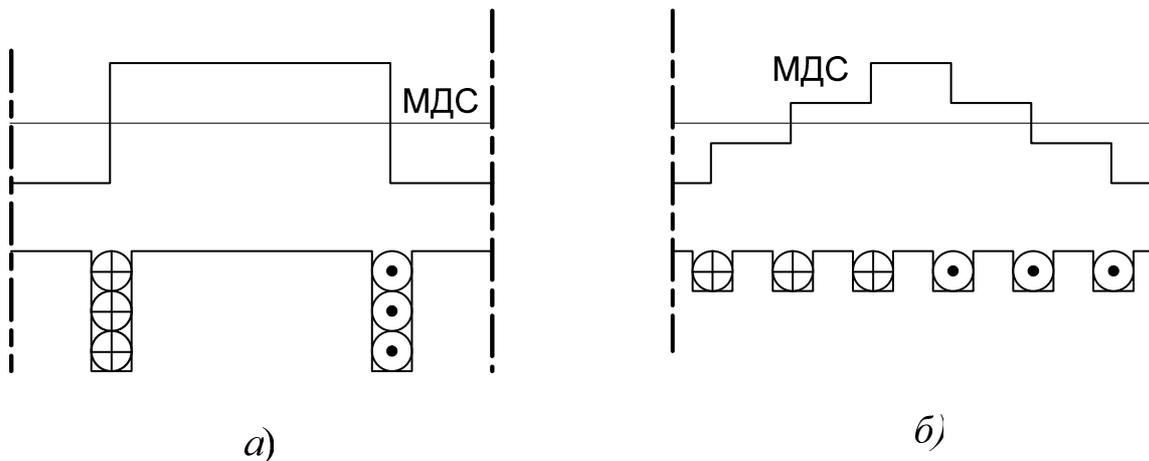


Рис. П.1.14. Кривые МДС сосредоточенной (а) и распределенной (б) обмотки

**Коэффициент скоса пазов.** В трехфазных машинах, помимо высших гармоник произвольного порядка существует спектр гармоник

$$\nu_z = \frac{Z_1}{2p} k \pm 1,$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots$ , для которого значение коэффициента укорочения и распределения будут такими же, как для основной гармоники. Эти гармоники называются зубцовыми. Порядок зубцовых гармоник увеличивается с ростом  $q$ , при этом уменьшается их амплитуда и отрицательное влияние на работу машины. Однако в машинах малой мощности (до 10 кВт) часто невозможно увеличивать  $q$ . В этом случае для уменьшения зубцовых гармоник используется скос пазов статора или ротора, т.е. пазы располагаются не параллельно оси машины, а под некоторым углом  $\gamma_{ск}$ . Обычно скашивают либо пазы статора, либо пазы ротора, причем последнее технологически проще и дешевле.

Скос пазов оценивается в линейных  $b_{ск}$  или, что чаще всего, в относительных  $\beta_{ск}$  единицах, Рис.П.1.15.

Угол скоса, рад,

$$\gamma_{ск\nu} = \frac{\nu b_{ск} \pi}{\tau} = \frac{\nu \cdot \beta_{ск} \cdot 2p}{Z}, \quad (\text{П.1.18})$$

где  $\beta_{ск} = \frac{b_{ск}}{t_z}$ . Обычно скос пазов делается в пределах одного пазового

деления ротора:  $\beta_{ск} = 0, 2 \dots 1, 0$  (меньшая величина скоса относится к машинам большей мощности).

Коэффициент скоса по первой гармонике ( $\nu = 1$ ),

$$k_{ск} = \frac{2 \sin \frac{\gamma_{ск}}{2}}{\gamma_{ск}}. \quad (\text{П.1.19})$$

Помимо уменьшения зубцовых гармоник, скос пазов приводит к уменьшению шума, поэтому все малошумные машины изготавливаются со скошенными пазами.

Если пазы статора скоса не имеют, а скошены пазы ротора, то для обмотки статора  $k_{ск} = 1$ , а скос пазов учитывается при расчете ротора, поэтому в формулах П.1.18, П.1.19 величины  $Z$ ,  $\tau$ ,  $t_z$  берутся из данных расчета ротора.

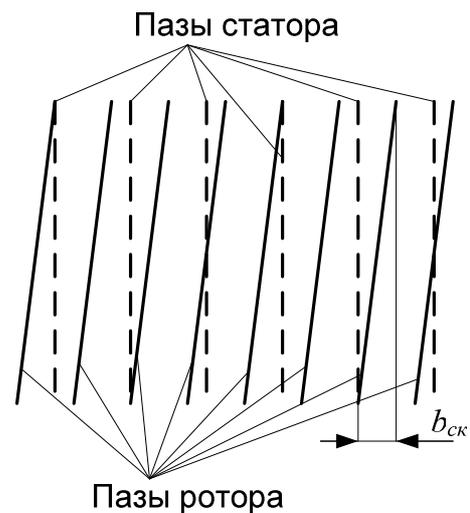


Рис. П.1.15. Скос пазов

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2.**  
**СТАНДАРТНЫЕ МОЩНОСТИ АСИНХРОННЫХ МАШИН,**  
**СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ, ГАБА-**  
**РИТНЫЕ И УСТАНОВОЧНО-ПРИСОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ.**

Таблица П.2.1

Шкала стандартных мощностей асинхронных электрических машин, кВт

0,06	0,09	0,12	0,18	0,25	0,37
0,55	0,75	1,1	1,5	2,2	3
4	5,5	7,5	11	15	18,5
22	30	37	45	55	75
90	110	132	160	200	250
315	400	500	630	800	1000

Таблица П.2.2.

Основные технические данные некоторых трехфазных асинхронных двигателей серии  
 4А (АИ), частота питающей сети 50 Гц, режим работы S1

Номиналь- ная мощ- ность $P_{2ном}$ , кВт	$h$ , мм	$U_{1ном}$ , В при схеме соединения обмоток	Индукция в воздушном зазоре, $B_{\delta}$ , Тл	Линейная нагрузка, А, А/см	Класс на- гревостой- кости	Номиналь- ный КПД, %	Номиналь- ный $\cos \varphi$ , о.е.
Частота вращения поля $n_1 = 1500$ об/мин, IP44(54), IM1001, IC0141							
0,12	56	220/380 $\Delta/\lambda$	0,71	145	F	63,0	0,65
0,18	56		0,75	167	F	64,0	0,64
0,25	63		0,82	162	F	68,0	0,65
0,37	63		0,87	189	H	68,0	0,69
0,55	71	220/380 $\Delta/\lambda$ или 380/660 $\Delta/\lambda$	0,93	188	F	70,5	0,70
0,75	71		0,97	225	H	72,0	0,73
1,1	80		0,84	218	F	75,0	0,81
1,5	80		0,82	231	F	77,0	0,83
2,2	90		0,88	233	F	80,0	0,83
3,0	100		0,90	246	F	82,0	0,83
4,0	100		0,87	254	F	84,0	0,84
5,5	112		0,8	248	F	85,5	0,85
7,5	132		0,90	252	B	87,5	0,86
11,0	132		0,89	264	F	87,5	0,87
15,0	160		0,72	314	B	88,5	0,88
18,5	160		0,69	310	B	89,5	0,88
22,0	180	0,74	333	B	90,0	0,90	
30,0	180	0,79	335	B	91,0	0,89	
37,0	200	0,76	368	B	91,0	0,90	
45,0	200	0,73	362	B	92,0	0,90	
55,0	225	0,76	370	B	92,5	0,90	
75,0	250	0,74	334	B	93,0	0,90	
90,0	250	0,70	413	B	93,0	0,91	
110	280	0,75	446	B	92,5	0,90	
132	280	0,79	473	B	93,0	0,90	

Продолжение таблицы П.2.2.

Номинальная мощность $P_{2ном}$ , кВт	$h$ , мм	$U_{1ном}$ , В при схеме обмоток	Индукция в воздушном зазоре, $B_{\delta}$ , Тл	Линейная нагрузка, А, А/см	Класс надежности	Номинальный КПД, %	Номинальный $\cos \varphi$ , о.е.
Частота вращения поля $n_1 = 1000$ об/мин, IP44(54), IM1001, IC0141							
0,18	63	220/380 $\Delta/\lambda$	0,74	195	F	56,0	0,62
0,25	63		0,71	196	F	59,0	0,62
0,37	71		0,82	208	F	64,5	0,69
0,55	71	220/380 $\Delta/\lambda$ или 380/660 $\Delta/\lambda$	0,80	213	F	67,5	0,71
0,75	80		0,84	227	F	69,0	0,74
1,1	80		0,80	223	F	74,0	0,74
1,5	90		0,85	223	F	75,0	0,74
2,2	100		0,81	231	F	81,0	0,73
3,0	112		0,89	248	F	81,0	0,76
4,0	112		0,87	262	F	82,0	0,81
5,5	132		0,90	258	F	85,0	0,8
7,5	132		0,87	256	F	85,5	0,81
11,0	160		0,75	293	F	85,0	0,86
15,0	160		0,74	292	F	87,5	0,87
18,5	180		0,82	377	F	88,0	0,87
22,0	200		0,70	350	B	90,0	0,90
30,0	200		0,77	375	B	90,5	0,90
37,0	225		0,78	369	B	91,0	0,89
45,0	250	0,76	356	B	91,5	0,89	
55,0	250	0,82	364	B	91,5	0,89	
75,0	280	0,79	401	B	92,0	0,89	
90,0	280	0,74	195	B	92,5	0,89	
110	315	0,71	196	B	93,0	0,90	
132	315	0,82	208	B	93,5	0,90	
Частота вращения поля $n_1 = 750$ об/мин, IP44(54), IM1001, IC0141							
0,25	71	220/380 $\Delta/\lambda$	0,69	211	F	56,0	0,65
0,37	80		0,71	201	F	61,5	0,65
0,55	80	220/380 $\Delta/\lambda$ или 380/660 $\Delta/\lambda$	0,75	210	F	64,0	0,65
0,75	90		0,81	209	F	68,0	0,62
1,1	90		0,81	225	F	70,0	0,68
1,5	100		0,87	248	F	74,0	0,65
2,2	112		0,91	263	F	76,5	0,71
3,0	112		0,88	271	F	79,5	0,74
4,0	132		0,96	257	F	83,0	0,70
5,5	132		0,88	263	F	83,0	0,74
7,5	160		0,78	274	F	86,0	0,75
11,0	160		0,79	284	F	87,0	0,75
15,0	180	380/660 $\Delta/\lambda$	0,81	378	F	87,0	0,82
18,5	200		0,79	379	F	88,5	0,84

Продолжение таблицы П.2.2.

Номинальная мощность $P_{2ном}$ , кВт	$h$ , мм	$U_{1ном}$ , В при схеме соединения обмоток	Индукция в воздушном зазоре, $B_{\delta}$ , Тл	Линейная нагрузка, А, А/см	Класс нагревостойкости	Номинальный КПД, %	Номинальный $\cos \varphi$ , о.е.
22,0	200	220/380 $\Delta/\lambda$ или 380/660 $\Delta/\lambda$	0,75	404	F	88,5	0,84
30,0	225		0,87	397	B	90,5	0,81
37,0	250		0,81	395	B	90,0	0,83
45,0	250		0,83	382	B	91,0	0,84
55,0	280		0,83	385	B	92,0	0,84
75,0	280		0,82	387	B	92,5	0,85
90,0	315		0,79	360	B	93,0	0,85
110	315		0,83	376	B	93,0	0,85
132	355		0,82	399	B	93,5	0,85
Частота вращения поля $n_1 = 600$ об/мин, IP44(54), IM1001, IC0141							
30,0	250	220/380 $\Delta/\lambda$ или 380/660 $\Delta/\lambda$	0,82	407	F	88,0	0,81
37,0	280		0,78	362	B	91,0	0,78
45,0	280		0,78	411	B	91,5	0,78
55,0	315		0,77	362	B	92,0	0,79
75,0	315		0,77	398	B	92,0	0,80
90,0	355		0,74	407	B	92,5	0,83
110	355		0,76	385	B	93,5	0,83
Частота вращения поля $n_1 = 500$ об/мин, IP44(54), IM1001, IC0141							
45	315	220/380 $\Delta/\lambda$ ; 380/660 $\Delta/\lambda$	0,75	384	B	90,5	0,75
55	315		0,76	379	B	91,0	0,75
75	355		0,86	382	B	91,5	0,76
90	355		0,88	372	B	92,0	0,76
Частота вращения поля $n_1 = 1500$ об/мин, IP23, IM1001, IC01							
18,5	160 (180)	220/380 $\Delta/\lambda$ или 380/660 $\Delta/\lambda$	0,72	394	F	88,5	0,87
22,0	160 (180)		0,69	373	F	90,0	0,88
30,0	180		0,81	418	F	90,0	0,84
37,0	180 (200)		0,79	413	F	90,5	0,89
45,0	200		0,80	424	F	91,0	0,89
55,0	200 (225)		0,78	414	F	92,0	0,89
75,0	225 (250)		0,82	470	F	92,5	0,89
90,0	250 (280)		0,81	472	B	93,5	0,89
110	250 (280)		0,83	507	B	93,5	0,89
132	280		0,85	518	B	93,0	0,89
Частота вращения поля $n_1 = 1000$ об/мин, IP23, IM1001, IC01							
18,5	180	220/380 $\Delta/\lambda$ или 380/660 $\Delta/\lambda$	0,8	397	F	87	0,85
22,0	180 (200)		0,8	383	F	88,5	0,87
30,0	200		0,81	471	F	90	0,88
37,0	200 (225)		0,81	379	F	90,5	0,88
45,0	225 (250)		0,83	430	F	91	0,87

## Окончание таблицы П.2.2.

Номинальная мощность $P_{2ном}$ , кВт	$h$ , мм	$U_{1ном}$ , В при схеме соединения обмоток	Индукция в воздушном зазоре, $B_{\delta}$ , Тл	Линейная нагрузка, А, А/см	Класс нагревостойкости	Номинальный КПД, %	Номинальный $\cos \varphi$ , о.е.
55,0	250	220/380	0,85	392	В	92,5	0,87
75,0	250 (280)	$\Delta/\lambda$	0,85	395	В	93	0,87
90,0	280	или	0,85	445	В	92,5	0,89
110	280 (315)	380/660	0,82	460	В	92,5	0,89
132	315	$\Delta/\lambda$	0,86	452	В	93	0,89
Частота вращения поля $n_1 = 750$ об/мин, IP23, IM1001, IC01							
15,0	180	220/380 $\Delta/\lambda$ или 380/660 $\Delta/\lambda$	0,81	377	F	86	0,80
18,5	180 (200)		0,75	373	F	87,5	0,80
22,0	200		0,75	403	F	89	0,84
30,0	200 (225)		0,76	379	F	89,5	0,82
37,0	225 (250)		0,83	416	F	90	0,81
45,0	250		0,84	410	В	91	0,81
55,0	250 (280)		0,83	425	В	92	0,81
75,0	280		0,82	390	В	92	0,85
90,0	280 (315)		0,82	408	В	92,5	0,86
110	315		0,79	434	В	93	0,86
132	315 (355)		0,79	452	В	93,5	0,86
Частота вращения поля $n_1 = 600$ об/мин, IP23, IM1001, IC01							
22,0	250	220/380 $\Delta/\lambda$ или 380/660 $\Delta/\lambda$			В		
30,0	250				В		
37,0	280						
45,0	280		0,71	402	В	90	0,81
55,0	280 (315)		0,72	407	В	90,5	0,81
75,0	315		0,72	465	В	91	0,82
90,0	315 (355)		0,73	455	В	91,5	0,82
110	355		0,84	450	В	92	0,83
Частота вращения поля $n_1 = 500$ об/мин, IP23, IM1001, IC01							
45	315	220/380 $\Delta/\lambda$ ; 380/660 $\Delta/\lambda$			В		
55	315		0,68	451	В	90,5	0,78
75	355		0,8	442	В	91	0,78
90	355		0,89	444	В	91,5	0,77
110	355		0,93	450	В	92	0,77

Таблица П.2.3.

Стандартные высоты оси вращения,  
и связанные с ними установочно-присоединительные размеры

Стандартная высота оси вращения $h$ , мм		$b_{10}$ , мм	Условное обозначение длины сердечника	$l_{10}$ , мм	$l_{31}$ , мм	$d_{10}$ , мм
Номинальное значение	Допуск					
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
56	-0,5	90		71	36	5,8
63	-0,5	100		80	40	7
71	-0,5	112		90	45	7
80	-0,5	125		100	50	10
90	-0,5	140	S	100	56	10
			L	125		
100	-0,5	160	S	112	63	12
			L	140		
112	-0,5	190	S	114	70	12
			M	140		
			L	159		
132	-0,5	216	S	140	89	15
			M	178		
			L	203		
160	-0,5	254	S	178	108	15
			M	210		
			L	254		
180	-0,5	279	S	203	121	19
			M	241		
			L	279		
200	-0,5	318	S	228	133	19
			M	267		
			L	305		
225	-0,5	356	S	286	149	24
			M	311		
			L	356		
250	-0,5	404	S	311	168	24
			M	349		
			L	406		

## Окончание таблицы П.2.3

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
280	-1	457	S	368	190	28
			M	419		
			L	457		
315	-1	508	S	406	216	28
			M	457		
			L	508		
355	-1	610	S	500	254	28
			M	560		
			L	630		
400	-1	686	S	560	280	35
			M	630		
			L	710		

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3.

## ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

Таблица П.3.1

Диаметр и площадь сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ,  
ПЭТ-155, ПЭТ-имид

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм <sup>2</sup>	Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм <sup>2</sup>
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	0,576
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	1,0	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	1,4	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	2,0	2,095	3,14
0,4	0,44	0,1257	2,12	2,22	3,53
0,425	0,465	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			

Таблица П.3.2

## Размеры и площадь сечения прямоугольных медных проводов

Номинальный размер по большей стороне $b$ , мм	Номинальный размер по меньшей стороне $a$ , мм								
	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0	1,06	1,12	1,18	1,25
	Расчетное сечение, мм <sup>2</sup> ,								
2	1,436	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285
2,12	1,559		1,734		1,905		2,16		2,435
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,16	1,294	2,429	2,585
2,36	1,751		1,95		2,145		2,429		2,735
2,5	1,863	1,97	2,076	2,181	2,85	2,435	2,585	2,736	2,91
2,65	1,983		2,211		2,435		2,753		3,098
2,8	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285
3,0	2,263		2,526		2,785		3,145		3,535
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723
3,35	2,543		2,841		3,135		3,537		3,973
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,54	3,761	3,974	4,223
3,75	2,863		3,201		3,535		3,985		4,473
4	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785
4,25	3,263		3,551		4,035		4,545		5,098
4,5	3,463	3,67	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,41
4,75	3,663		4,101		4,535		5,105		5,723
5	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035
5,3	4,103		4,596		5,085		5,721		6,41
5,6	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785
6	4,663		5,226		5,785		6,505		7,285
6,3	4,903	5,2	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,66
6,7			5,856		6,485		7,289		8,16
7,1			6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,66
7,5					7,285		8,185		9,16
8					7,785	8,265	8,745	9,255	9,785
8,5							9,305		10,41
9							9,865	10,41	11,04
9,5									11,66
10									12,29
10,6									
11,2									
11,8									
12,5									

Продолжение таблицы П.3.2

Номинальный размер по большей стороне $b$ , мм	Номинальный размер по меньшей стороне $a$ , мм								
	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12
	Расчетное сечение, мм <sup>2</sup> ,								
2	2,425	2,585							
2,12		2,753							
2,24	2,742	2,921	3,145	3,369					
2,36		3,089		3,561					
2,5	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137			
2,65		3,495		4,025		4,407			
2,8	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	
3,0		3,985		4,585		5,038		5,638	
3,15	3,943	4,19	4,51	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315
3,35		4,475		5,145		5,667		6,337	
3,55	4,471	4,755	5,11	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163
3,75		5,035		5,785		6,387		7,137	
4	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117
4,25		5,735		6,585		7,287		8,137	
4,5	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177
4,75		6,435		7,385		8,188		9,137	
5	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24
5,3		7,205		8,265	-	9,177		10,24	
5,6	8,101	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51
6		8,185		9,385		10,44		11,64	
6,3	9,101	8,605	9,23	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99
6,7		9,165		10,51		11,7		13,04	
7,1	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69
7,5		10,29		11,79		13,14		14,64	
8	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,6
8,5		11,69		13,39		14,94		16,64	
9	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72
9,5		13,09		14,99		16,74		18,64	
10	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84
10,6		14,63		16,75		18,72		20,84	
11,2		15,47	16,59	17,71	18,68	19,8	20,92	22,04	23,38
11,8				18,67		20,88		23,24	
12,5				19,79	20,89	22,14	23,39	24,64	26,14

Продолжение таблицы П.3.2

Номинальный размер по большей стороне $b$ , мм	Номинальный размер по меньшей стороне $a$ , мм								
	2,24	2,36	2,5	2,65	2,8	3	3,15	3,35	3,55
	Расчетное сечение, мм <sup>2</sup> ,								
2									
2,12									
2,24									
2,36									
2,5									
2,65									
2,8									
3,0									
3,15	6,693								
3,35	7,141								
3,55	7,589	7,829	8,326						
3,75	8,037		8,826						
4	8,597	8,891	9,451	10,65	10,85				
4,25	9,157		10,08		11,35				
4,5	9,717	10,07	10,7	11,38	12,05	12,95	13,63		
4,75	10,28		11,33		12,75		14,41		
5	10,84	11,25	11,95	12,7	13,45	14,45	15,2	16,2	17,2
5,3	11,51		12,7		14,29		16,15		18,27
5,6	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33
6	13,08		14,45		16,25		18,35		20,75
6,3	13,75	14,32	15,2	16,15	17,09	18,35	19,3	20,56	21,82
6,7	14,65		16,2		18,21		20,56		23,24
7,1	15,54	16,21	17,2	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66
7,5	16,44		18,2		20,45		23,08		26,08
8	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85
8,5	18,68		20,7		23,25		26,23		29,63
9	19,8	20,69	21,95	23,3	24,65	26,54	27,8	29,6	31,4
9,5	20,92		23,2		26,05		29,38		33,18
10	22,04	23,05	25,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95
10,6	23,38		25,95		29,13		32,84		37,08
11,2	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21
11,8	26,07		28,95		32,49		36,62		41,24
12,5	27,64	24,95	30,7	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33	43,83

Номинальный размер по большей стороне $b$ , мм	Номинальный размер по меньшей стороне $a$ , мм							
	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,3	5,6
	Расчетное сечение, мм <sup>2</sup> ,							
2								
2,12								
2,24								
2,36								
2,5								
2,65								
2,8								
3,0								
3,15								
3,35								
3,55								
3,75								
4								
4,25								
4,5								
4,75								
5								
5,3								
5,6	20,14	21,54						
6		23,14						
6,3	22,77	24,34	25,92	27,49				
6,7		25,94		29,29				
7,1	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64		
7,5		29,14		32,89		36,64		
8	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94
8,5		33,14		37,39		41,64		46,74
9	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
9,5		37,14		41,89		46,64		52,34
10	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,6		41,54		46,84		52,14		58,5
11,2	41,14	43,94	46,79	49,54	52,34	55,14	58,5	61,86
11,8		46,34		52,24		52,14		65,22
12,5	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14

**ПРИЛОЖЕНИЕ 4.**  
**КРИВЫЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ**

Таблица П.4.1

Основная кривая намагничивания стали 2013

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1	110	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	29
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,5	620	670	780	890	1000	1130	1240	1350	1460	1580
1,6	1700	1860	2020	2180	2340	2500	2700	2800	3000	3200
1,7	3400	3700	4000	4300	4700	5000	5400	5800	6200	6600
1,8	7000	7500	8000	8500	9200	10000	10600	11200	11800	12400
1,9	13000	13600	14200	14800	15600	16500	17300	18100	18900	19800
2	20700	22600	24400	26300	28100	30000	36000	42000	48000	54000
2,1	60000	67000	74000	81000	88000	95000	102000	109000	116000	123000
2,2	130000	138000	146000	154000	162000	170000	178000	186000	194000	202000
2,3	210000	218000	226000	234000	242000	250000	258000	266000	274000	282000
2,4	290000	298000	306000	314000	322000	330000	338000	346000	354000	362000

Таблица П.4.2

Кривая намагничивания для ярма асинхронных машин из стали 2013

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1	185	188	19	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1,9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Таблица П.4.3

Кривая намагничивания зубцов асинхронных машин из стали 2013

$B$ , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H$ , А/м									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	246	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3028
2	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4928
2,1	5140	5440	5740	605	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	10460	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400
2,3	224000	232000	240800	248000	256000	264000	272000	280000	288000	296000
2,4	304000	312000	320000	328000	336000	344000	352000	360000	368000	376000

Таблица П.4.4

## Основная кривая намагничивания (стали 2212, 2214, 2312)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	68	69	70	71	72	73	73	74	75	75
0,5	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
0,6	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
0,7	96	99	103	108	113	118	122	126	131	135
0,8	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185
0,9	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235
1	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294
1,1	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
1,2	400	410	420	430	440	460	470	480	500	520
1,3	550	580	610	650	690	730	780	830	880	940
1,4	1000	1060	1120	1180	1240	1300	1360	1420	1480	1540
1,5	1600	1750	1900	2050	2200	2350	2500	2700	2900	3100
1,6	3400	3600	3800	4100	4400	4700	5300	5900	6500	7100
1,7	7700	8200	8900	9400	10000	10600	11100	11700	12200	12800
1,8	13400	14000	14600	15200	15800	16400	17000	17600	18200	18800
1,9	19400	20000	21800	23700	25700	27800	30000	32200	34400	36600
2	38800	41000	43200	45400	47600	49800	52000	54500	57500	60500
2,1	65500	72500	80000	88000	96000	104000	112000	120000	128000	136000
2,2	144000	152000	160000	168000	176000	184000	192000	200000	208000	216000

Таблица П.4.5

## Кривая намагничивания для ярма асинхронных машин (стали 2212, 2214, 2312)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	89	91	93	94	96	98	100	102	104	106
0,5	108	110	113	115	118	120	122	124	126	128
0,6	131	134	136	139	141	144	147	150	153	156
0,7	159	162	166	169	172	176	180	183	186	190
0,8	194	198	201	204	208	212	216	220	223	227
0,9	231	235	239	243	248	252	255	260	265	269
1	274	279	284	289	295	300	305	311	318	323
1,1	332	338	344	351	357	367	374	382	390	398
1,2	410	418	426	435	444	455	466	475	487	498
1,3	509	521	533	546	558	572	585	600	618	635
1,4	656	675	695	717	740	763	789	815	843	870
1,5	905	934	965	1000	1040	1090	1130	1190	1240	1290
1,6	1370	1440	1520	1590	1660	1720	1820	1910	2010	2100
1,7	2180	2310	2410	2550	2610	2720	2840	2980	3130	3290
1,8	3460	3630	3800	3970	4140	4301	4490	4670	4850	5040
1,9	5220	5600	6000	6400	6900	7400	7900	8500	9100	9700
2	10400	11100	11800	12500	13300	14100	14900	15800	16700	17600

Таблица П.4.6

Кривая намагничивания для зубцов асинхронных машин (стали 2212, 2214, 2312)

$B$ , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	007	008	009
	$H$ , А/м									
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	171
0,5	174	177	180	184	186	190	192	196	198	202
0,6	204	209	213	216	221	224	229	233	237	241
0,7	245	249	253	257	262	267	272	277	282	287
0,8	292	297	302	306	311	316	322	326	331	337
0,9	342	347	353	360	366	372	379	384	390	396
1	403	409	417	425	433	440	450	460	470	477
1,1	488	497	509	517	527	537	547	559	570	582
1,4	593	602	613	626	638	651	663	677	695	716
1,3	724	738	755	770	790	804	820	840	857	879
1,4	897	917	936	955	977	1000	1020	1046	1060	1090
1,5	1120	1150	1170	1210	1240	1270	1316	1330	1370	1410
1,6	1450	1490	1530	1566	1610	1650	1696	1756	1790	1840
1,7	1906	1940	2006	2070	2140	2220	2300	2380	2560	2660
1,8	2700	2800	2920	3050	3220	3330	3490	3616	3710	4006
1,9	4160	4350	4600	4800	5030	5330	5430	5796	6130	6420
2	6750	7170	7400	7790	8150	8520	9000	9400	9750	10260
2,1	10600	11000	11500	12100	12600	13000	13500	14100	14700	15400
2,2	15900	16500	17300	17800	18500	19100	19600	20300	21100	22000
2,3	23100	24300	25500	26800	28100	29500	30966	32400	33900	36400

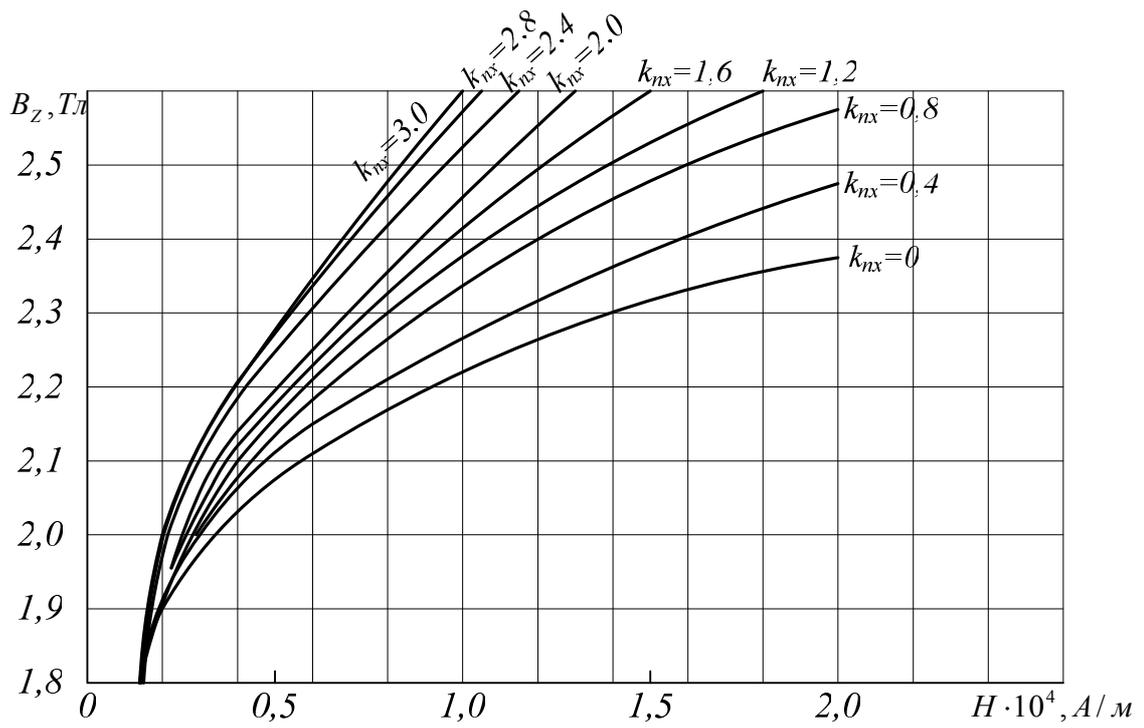


Рис.П.4.1. Кривые намагничивания зубцовых зон стали 2013

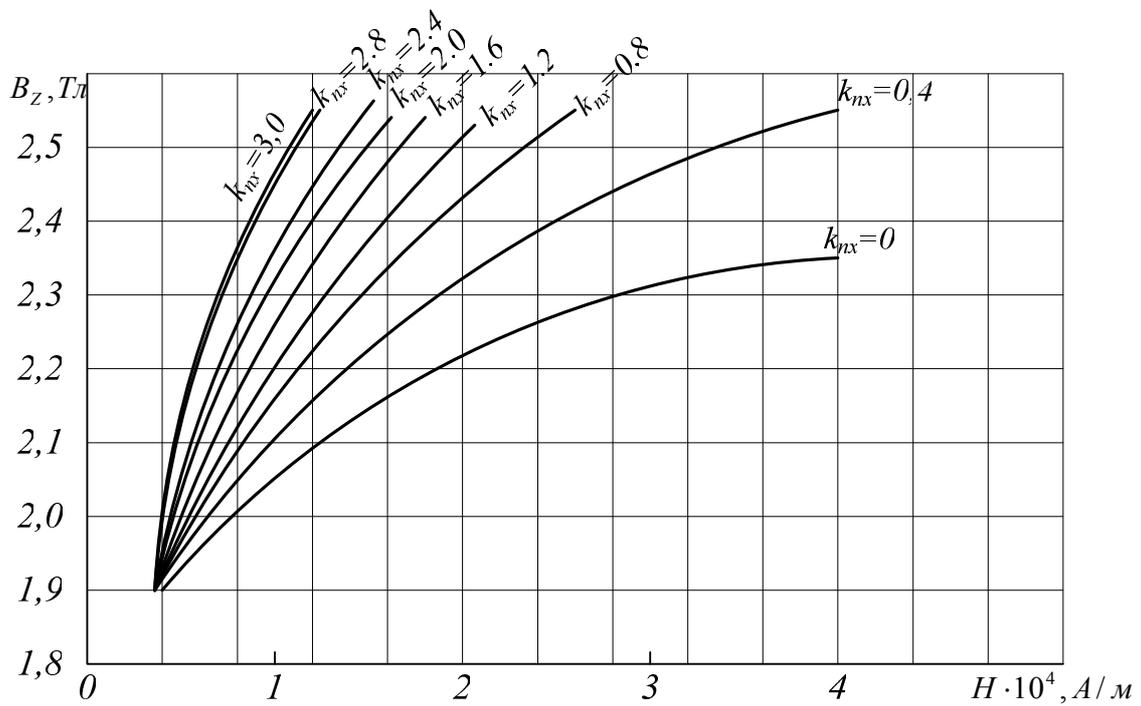


Рис. П.4.2. Кривые намагничивания зубцовых зон стали 2211, 2312, 2411

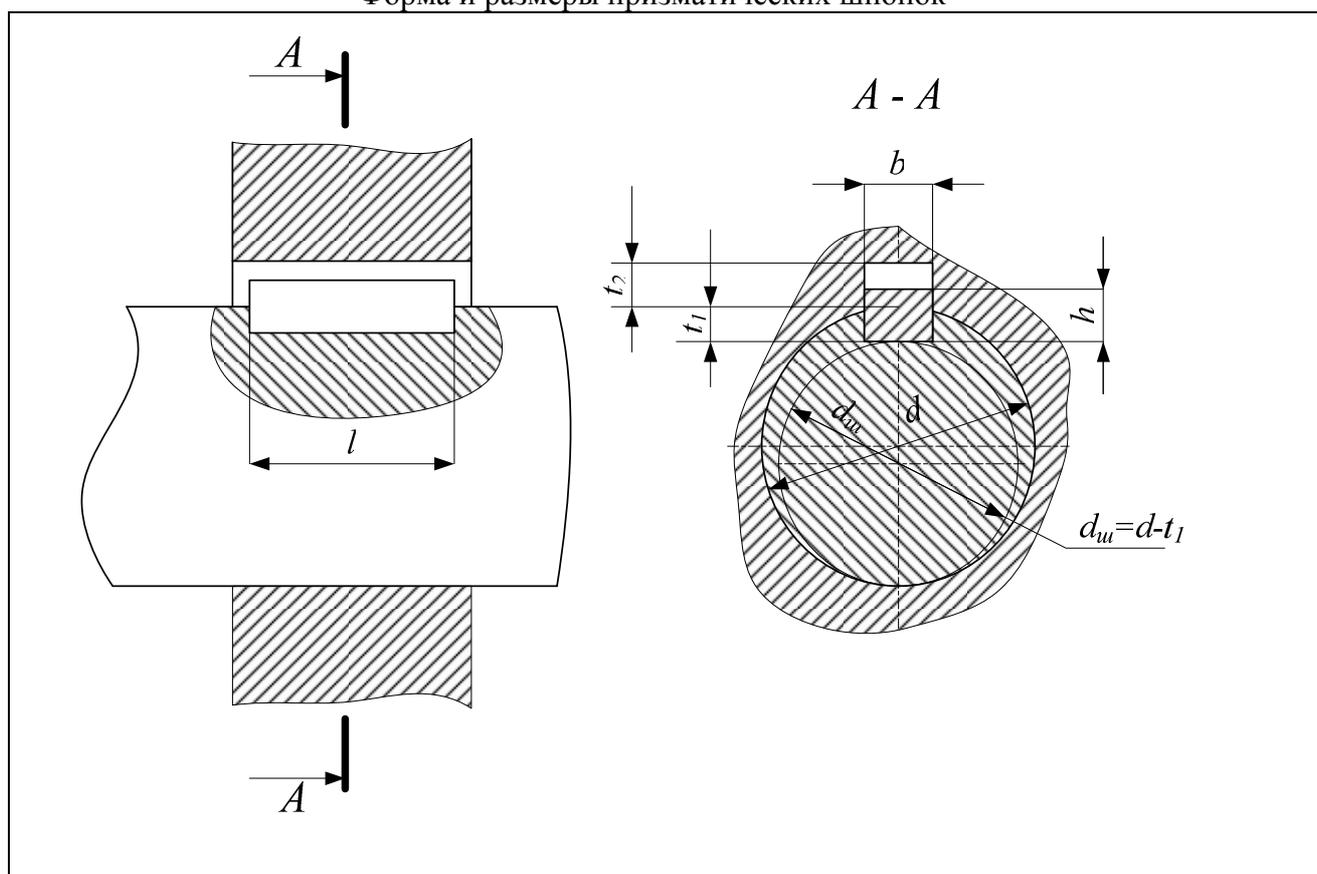


Таблица П.5.1

Размеры муфт втулочно-пальцевых в миллиметрах, в соответствии с ГОСТ 21424-93

$M_{\text{ном}}$ , Н·м, не более	$n_{\text{ном}}$ , $\text{с}^{-1}$ , не более	$d$		$D$ , не бо- лее	$L$ , не более для исполне- ний		$I$ , для ис- полнений		$D_1$	$D_2$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$B$	Пальцы	
		Ряд 1	Ряд 2		1	2	1	2										$d_n$	Кол- во, $z$
6,3	147	9	—	71	43	—	20	—	45	65	22	17	M4	9	12	1	3	8	3
		10;11			49	43	23	20	45	65	22	17	M4	9	12	1	3	8	3
16	127	12;14		75	63	53	30	25	50	71	25	17	M5	9	12	1	3	8	4
		16			83	59	40	28	50	71	30	17	M5	9	12	1	3	8	4
31,5	106	16;18		90	84	60	40	28	62	86	32	20	M6	16	20	1,5	4	10	4
63	95	20;22			100	104			76	50	36	72	96	38	20	M6	16	20	1,5
125	77	25;28	—	120	125	89	60	42	84	116	50	28	M8	18	32	2	5	14	4
		—			30	165	121	80			58							56	2
250	63	32;36	35;38	140	225	169	110	82	105	135	67	28	M10	18	32	2	5	14	6
		40;45	42								75							2	5
500	60	40;45	42	170	226	170	110	82	130	160	80	36	M12	24	40	3	6	18	8
710	50	45;50	48;55	190					95	36	140							178	95
		56			100	18	10												
1000	48	50;56	55	220	286	216	140	105	170	208	120	36	M12	24	40	3	6	18	10
		63	60;65 70								120							10	
2000	38	63;71	65;70 75	250	288	218	170	130	190	238	130	48	M16	30	48	4	8	24	10
		80;90	85		150	4					24							10	
4000	30	80;90	85;95	320	350	270	170	130	240	305	170	60	M16	38	60	4	10	30	10
8000	24	100 110 125	120	400	432	352	210	170	300	185	220	75	M20	48	75	5	12	38	10

Форма и размеры призматических шпонок



Интервал диаметров вала $d$ , мм	Размеры сечения шпонки, мм		Глубина паза, мм		Интервал длин шпонок, $l$ , мм	
			вала	втулки		
	$b$	$h$	$t_1$	$t_2$	от	до
От 6 до 8	2	2	1,2	1,0	6	20
свыше 8 до 10	3	3	1,8	1,4	6	36
свыше 10 до 12	4	4	2,5	1,8	8	45
свыше 12 до 17	5	5	3	2,3	10	56
свыше 12 до 22	6	6	3,5	2,8	14	70
свыше 22 до 30	8	7	4	3	14	70
свыше 30 до 38	10	8	5	3,3	22	110
свыше 38 до 44	12				28	140
свыше 44 до 50	14	9	5,5	3,8	36	160
свыше 50 до 58	16	10	6	4,3	45	180
свыше 58 до 65	18	11	7	4,4	50	200
свыше 65 до 75	20	12	7,5	4,9	56	220
свыше 75 до 85	22	14	9	5,4	63	250
свыше 85 до 95	25				70	280

Продолжение таблицы П.5.2

Интервал диаметров вала $d$ , мм	Размеры сечения шпонки, мм		Глубина паза, мм		Интервал длин шпонок, $l$ , мм	
			вала	втулки		
	$b$	$h$	$t_1$	$t_2$	от	до
свыше 95 до 110	28	16	10	6,4	80	320
свыше 110 до 130	32	18	11	7,4	90	360
свыше 130 до 150	36	20	12	8,4	100	400
свыше 150 до 170	40	22	13	9,4	100	400
свыше 170 до 200	45	25	15	10,4	110	450

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6 СБОРОЧНЫЕ ЧЕРТЕЖИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

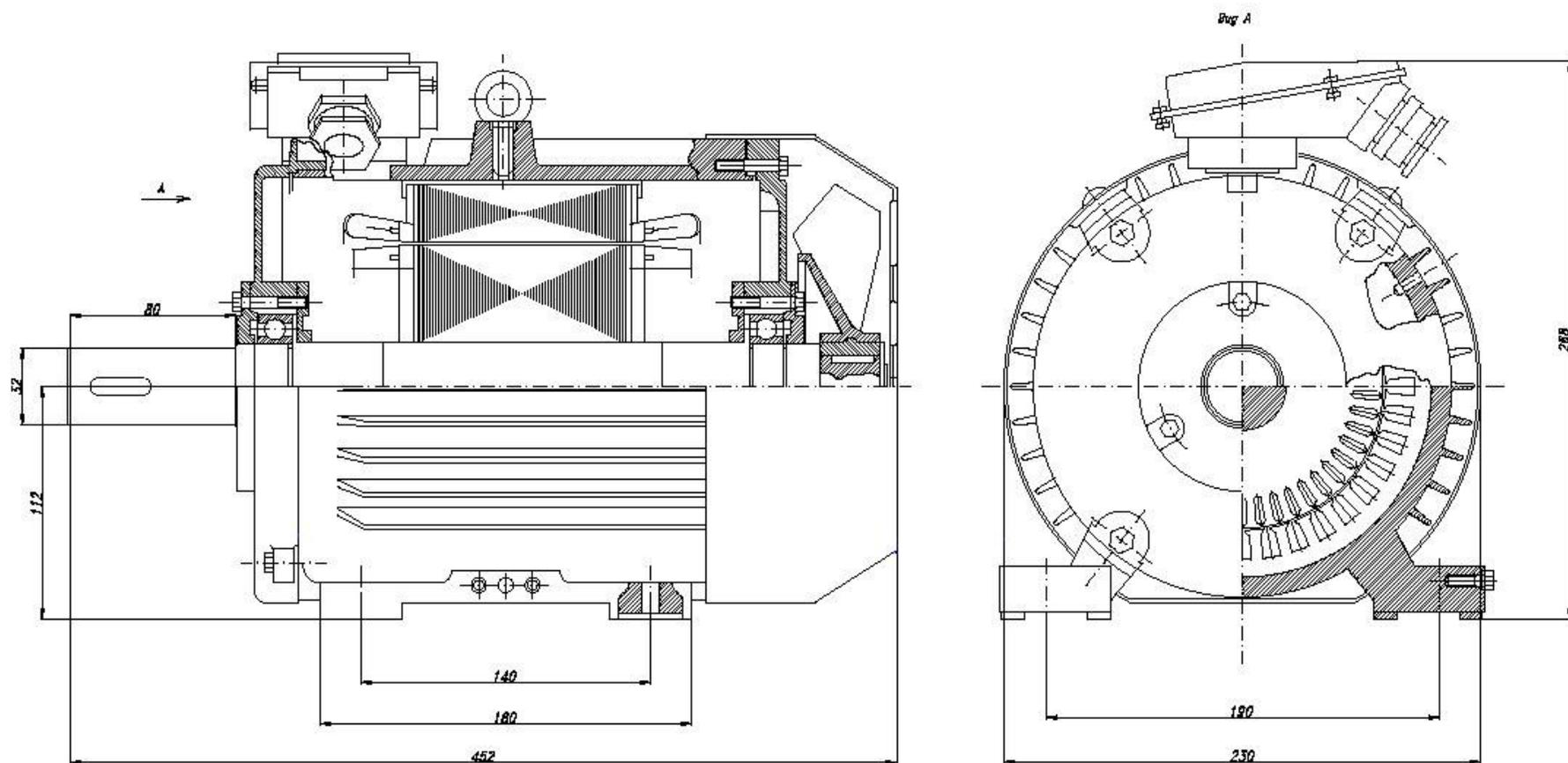


Рис. П.6.1 Асинхронный двигатель степени IP44, IM1001, IC0141 (сборочный чертеж)

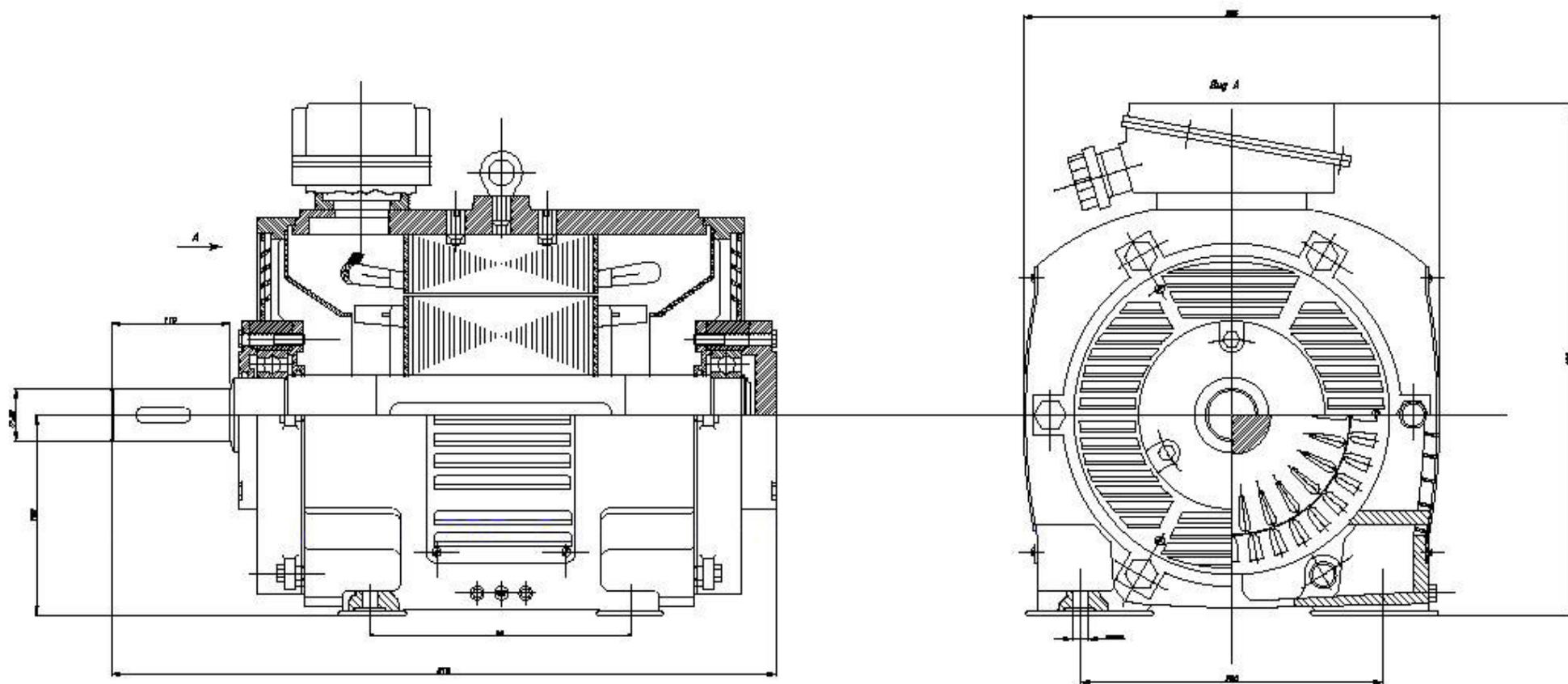


Рис. П.6.2 Асинхронный двигатель степени IP23, IM1001, IC01 (сборочный чертеж)

Разработчик

Доцент

«\_06\_» \_\_декабря\_ 2016 г

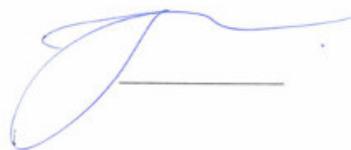


Е.Г. Серeda

Методические материал рассмотрен и утвержден на заседании кафедры  
«Электромеханические комплексы и системы»

«\_06\_» \_\_декабря\_\_ 2016 г., протокол № \_4\_

Заведующий кафедрой



В.В. Никитин