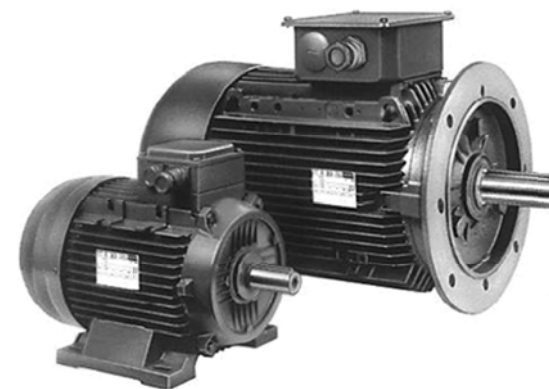


# **РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Методические указания  
к расчетно-графическому заданию  
по курсу «Электрические машины»



Бишкек 2015

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЕСТЕСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»

# РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Методические указания  
к расчетно-графическому заданию  
по курсу «Электрические машины»

УДК 621.313.333  
Р 24

Рецензент

*А. П. Балянов* – канд. техн. наук, доц.

Составитель

*И. В. Бочкарев*

Рекомендовано к изданию

кафедрой «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»

Р 24 РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРО-  
ДВИГАТЕЛЕЙ: методические указания к расчетно-графическому  
заданию по курсу «Электрические машины» / сост.: И. В. Бочка-  
рев. Бишкек: КРСУ, 2015. 79 с.: ил.

Дано описание конструкций асинхронных электродвигателей. Из-  
ложена методика расчета и конструирования общепромышленных элек-  
тродвигателей малой и средней мощности, даны указания по выполне-  
нию отдельных этапов расчета. Приведен пример расчета, представлены  
необходимые справочные материалы для расчета.

Методические указания предназначены для студентов электро-  
энергетических специальностей и могут служить практическим руко-  
водством при расчете и конструировании асинхронных машин.

## ВВЕДЕНИЕ

**Назначение настоящих методических указаний** состоит в том, чтобы сформировать у студента навыки инженерных расчетов, помочь понять и осознать материал лекционных занятий по курсу «Электрические машины». Знакомят студента с основными принципами электромагнитных расчетов и конструирования асинхронных двигателей (АД) общепромышленного применения. При этом задача детального объяснения всех тонкостей и особенностей разработки АД различных типов не ставится. Здесь приведены только основные рекомендации, которые позволяют представить объем и последовательность проектирования и правильно сориентироваться в известной литературе по асинхронным машинам. Каждый студент выполняет индивидуальное задание. При этом он должен оценить возможные варианты расчетных и конструктивных решений, оценить их достоинства и недостатки, обосновать принятое им решение.

### 1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ, УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронной машиной называется двухобмоточная электрическая машина переменного тока, у которой только одна обмотка (первичная, расположенная на статоре) получает питание от электрической сети переменного тока. Вторая обмотка (вторичная, расположенная на роторе) замкнута накоротко. Токи во вторичной обмотке появляются в результате электромагнитной индукции. Их частота является функцией угловой скорости ротора, которая, в свою очередь, зависит от момента нагрузки, приложенного к валу.

Наибольшее распространение получили асинхронные машины с трехфазной симметричной обмоткой на статоре и с многофазной симметричной обмоткой на роторе. Машины такого исполнения называют просто «асинхронными машинами», в то время как асинхронные машины иных исполнений относятся к «специальным асинхронным машинам».

Сегодня в мире ежегодно выпускается порядка семи миллиардов электродвигателей. При этом наиболее распространенным типом двигателей переменного тока являются асинхронные двигатели. По количеству они составляют около 90 % всех электрических машин, используемых на практике. Это объясняется тем, что по сравнению с другими типами элек-

тродвигателей, АД имеют наиболее простую конструкцию и, соответственно, более надежны и имеют более низкую стоимость. Разноименно-полусная обмотка ротора асинхронного двигателя может быть короткозамкнутой (беличья клетка) или фазной (присоединяется к контактным кольцам). Наибольшее распространение имеют дешевые в производстве и надежные в эксплуатации двигатели с короткозамкнутой обмоткой на роторе или короткозамкнутые двигатели. Эти двигатели обладают жесткой механической характеристикой (при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной, их частота вращения уменьшается всего на 2–5 %). Двигатели с короткозамкнутой обмоткой на роторе обладают также довольно высоким пусковым вращающим моментом. Их основные недостатки: трудность осуществления плавного регулирования частоты вращения в широких пределах; потребление больших токов из сети при пуске (в 5–7 раз превышающих номинальный ток).

Асинхронные электродвигатели находят в народном хозяйстве широкое применение. Только низковольтные АД (до 500 В питающего напряжения) мощностью от 0,12 до 400 кВт потребляют более 40 % всей вырабатываемой в мире электроэнергии, а годовой их выпуск составляет сотни миллионов, покрывая самые разнообразные потребности промышленного и сельскохозяйственного производства, судовых, авиационных и транспортных систем, систем автоматики, военной и специальной техники. Асинхронные двигатели применяются в станкостроении, в приводах деревообрабатывающих, ткацких, швейных и других видов станков, кузнечнопрессовых, грузоподъемных, землеройных машин, вентиляторов, насосов, компрессоров, центрифуг, в лифтах и т. д. Практически нет отрасли техники, где не использовались бы АД. Можно без преувеличения сказать, что промышленное производство приводится в движение асинхронными двигателями.

Широкое применение АД связано с рядом их достоинств. Асинхронные двигатели – это самые простые в конструктивном отношении и в изготовлении, надежные и самые дешевые из всех типов электрических двигателей. Они не имеют щеточно-коллекторного узла либо узла скользящего токосъема, что помимо высокой надежности обеспечивает минимальные эксплуатационные расходы. В зависимости от числа питающих фаз различают трехфазные и однофазные асинхронные двигатели. Трехфазный асинхронный двигатель при определенных условиях может успешно выполнять свои функции и при питании от однофазной сети. АД широко применяются не только в промышленности, но и в частном секторе, в быту, в домашних мастерских, на садовых участках. Однофазные асинхронные двигатели приводят во вращение стиральные машины, компрессоры холодильников, вентиляторы, небольшие деревообрабаты-

вающие станки, электрические инструменты, насосы для подачи воды. Чаще всего в механизмах и устройствах промышленного назначения применяют трехфазные АД.

Асинхронные машины используются в основном как двигатели, в качестве генераторов они применяются редко.

**Устройство асинхронных электродвигателей.** Трехфазный асинхронный двигатель традиционного исполнения, обеспечивающий вращательное движение, представляет собой электрическую машину, состоящую из двух основных частей: неподвижного статора и вращающегося ротора. Общий вид асинхронного двигателя серии 4А представлен на рис. 1. Двигатель содержит **статор 10** и **ротор 9**. Статор состоит из шихтованного магнитопровода (сердечника, пакета), набранного из изолированных друг от друга листов электротехнической стали толщиной обычно 0,5 мм и **обмотки 14**, размещенной в пазах сердечника. Магнитопровод представляет собой малое магнитное сопротивление для магнитного потока, создаваемого обмоткой статора. Шихтуется сердечник для уменьшения вихревых токов, возникающих в процессе перемагничивания сердечника вращающимся магнитным полем. Листы собирают и скрепляют таким образом, что в магнитопроводе формируются зубцы и пазы статора.

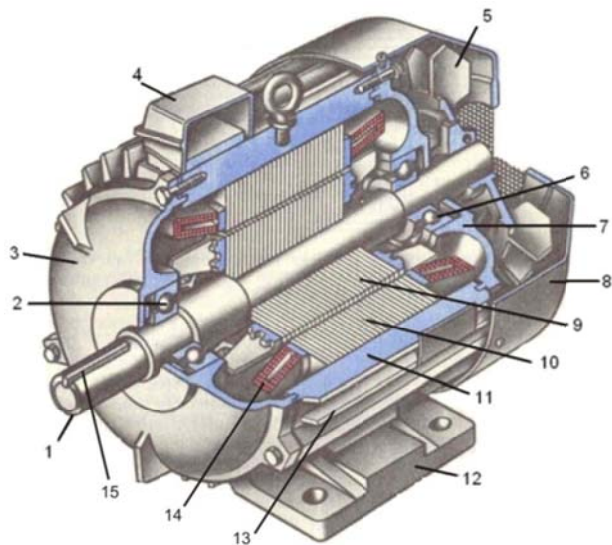


Рис. 1. Общий вид асинхронного двигателя серии 4А

В пазы магнитопровода укладывается распределенная трехфазная **обмотка статора**. Обмотка в простейшем случае состоит из трех фазных катушек, оси которых сдвинуты в пространстве по отношению друг к другу на  $120^\circ$ . Обмотка статора в зависимости от типа машин может быть трех-, двух- или однофазной. Трехфазная обмотка соединяется в зависимости от напряжения сети в треугольник или в звезду. Обычно в **коробку выводов 4** выводятся начала и концы каждой фазной обмотки. Это позволяет в зависимости от величины линейного напряжения питающей сети соединять фазы обмотки статора как звездой, так и треугольником. Если в паспорте двигателя указано:  $\Delta/Y - 220/380$  В, то это означает, что при напряжении сети 220 В обмотки соединяются треугольником, а при напряжении 380 В – звездой.

Магнитопровод статора с обмоткой запрессовывают в **станину 11**. Она отливается из алюминиевого сплава или из чугуна.

Ротор двигателя состоит из **магнитопровода 9**, также набранного из штампованных листов стали с выполненными в нем пазами, в которых располагается обмотка ротора. Магнитопровод закреплен на **вале 1**, на котором с двух сторон напрессованы **подшипники 2, 6**. При сборке машины подшипники размещают в посадочные места **подшипниковых щитов 3 и 7**, которые крепятся к станине 11. Таким образом, ротор размещается внутри статора так, что его сердечник находится точно внутри сердечника статора. Статор и ротор разделены воздушным зазором, который для машин небольшой мощности находится в пределах от 0,2 до 0,5 мм. Подшипники служат для уменьшения трения при вращении ротора.

Для улучшения условий охлаждения машины на ее вал обычно насаживают **вентилятор 5**, который закрывают **кожухом 8**. Двигатель, изображенный на рис. 2 имеет закрытое обдуваемое исполнение. Поэтому для увеличения поверхности охлаждения станина имеет продольные **ребра 13**, которые играют роль радиатора. Для прикрепления двигателя к фундаменту или непосредственно к приводимому в движение механизму на станине предусмотрены **лапы 12** с отверстиями для крепления. На выходном конце вала в шпоночном пазу расположена **шпонка 15**.

Различают два вида обмоток ротора: фазную и короткозамкнутую. Наибольшее применение получила короткозамкнутая обмотка типа «беличьей клетки». Для серийных АД малой и средней мощности обмотку ротора изготавливают путем заливки под давлением в пазы алюминиевого сплава. При этом в пакете ротора 1 заодно отливаются стержни 2 и короткозамыкающие кольца 5 с вентиляционными крыльшками 4 для улучшения условий охлаждения двигателя, затем пакет напрессовывается на вал 3 (рис. 2). На разрезе, выполненном на этом рисунке, видны профили пазов, зубцов и стержней ротора. В замыкаю-

щих кольцах с обеих сторон сердечника обычно расположены пазы для закрепления балансировочных грузиков.

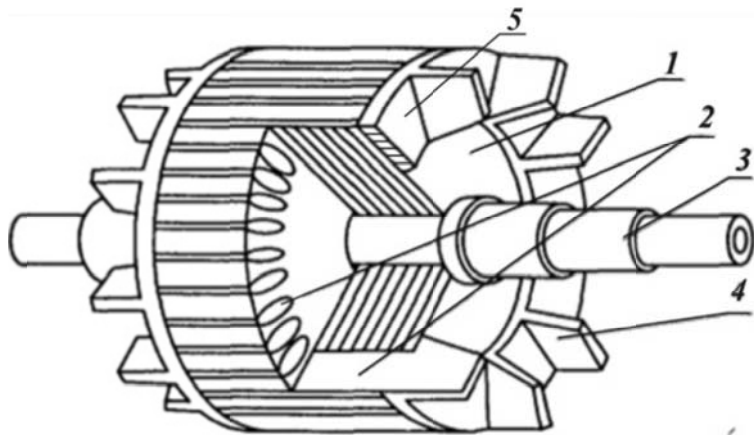


Рис. 2. Ротор асинхронного двигателя с литой короткозамкнутой обмоткой

Обмотка ротора крупных двигателей содержит латунные или медные стержни, которые вбивают в пазы, а по торцам устанавливают короткозамыкающие кольца, к которым припаивают или приваривают стержни. Принципиальный вид такой обмотки показан на рис. 3.

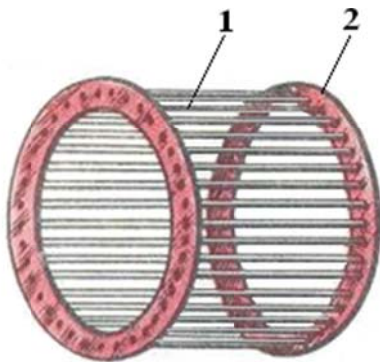


Рис. 3. Сварная короткозамкнутая обмотка ротора типа «беличьей клетки». 1 – стержень; 2 – короткозамыкающее кольцо

**Принцип действия трехфазных асинхронных двигателей.** Асинхронный электродвигатель – это электрическая машина для преобразования электрической энергии в механическую. В основе принципа действия асинхронного двигателя лежит закон электромагнитной индукции. При питании трехфазной обмотки статора создается вращающееся магнитное поле, частота вращения которого (синхронная частота вращения) равна

$$n_1 = 60f_1 / p,$$

где  $f_1$  – частота питающего напряжения;  $p$  – число пар полюсов обмотки статора.

Вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них ЭДС, которая вызывает в обмотке ротора протекание переменного тока. В результате этого возникают механические усилия, заставляющие ротор вращаться в сторону вращения магнитного поля. При этом частота вращения ротора  $n_2$  меньше частоты вращения поля  $n_1$ , т. е. ротор совершает асинхронное вращение по отношению к полю. Разница частот вращения ротора и поля в большинстве случаев невелика и составляет лишь несколько процентов. Поэтому частоту вращения ротора часто оценивают не в абсолютных единицах (об/мин или об/с), а в относительных, вводя понятие скольжения:

$$s = (n_1 - n_2) / n_1.$$

Таким образом, асинхронная машина является электромеханическим преобразователем энергии, в котором возникновение момента на валу ротора возможно лишь при различных частотах вращения магнитного поля и ротора.

## 2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ И СПОСОБЫ МОНТАЖА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Режимы работы электрических машин в условиях эксплуатации весьма разнообразны. Машины могут работать с полной нагрузкой в течение длительного времени (как, например, генераторы на электрических станциях, электродвигатели насосных установок и т. д.) и в продолжение относительно короткого промежутка времени (например, крановые двигатели). В современных автоматизированных промышленных установках электрические машины весьма часто имеют циклический режим работы. Зачастую электрические машины работают с переменной

нагрузкой. Очевидно, что при различных режимах работы электрические машины нагреваются неодинаково. Согласно ГОСТ 183-74, электрические машины изготавливаются для трех основных номинальных режимов работы.

**Продолжительным номинальным режимом работы S1** называется режим работы при неизменной номинальной нагрузке, продолжающийся столько времени, что превышения температуры всех частей электрической машины при неизменной температуре охлаждающей среды достигают практически установившихся значений.

**Кратковременным номинальным режимом работы S2** называется работа электродвигателя при неизменной нагрузке в течение времени, недостаточного для достижения электродвигателем установившейся температуры, после чего следует остановка на время, достаточное для охлаждения до температуры, не более чем на 20 °С превышающей температуру окружающей среды.

**Повторно-кратковременным режимом работы S3** называется режим работы, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки (рабочие периоды) при неизменной температуре охлаждающей среды чередуются с кратковременными периодами отключения машины (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры отдельных частей машины могли достигнуть установившихся значений.

Возможность использования асинхронных двигателей в тех или иных режимах определяется техническими условиями на двигатели.

**Способы монтажа.** Монтаж электрических машин определяет способ крепления электрической машины в месте ее установки и способ ее сочленения с рабочим механизмом. Монтаж машин в большинстве случаев осуществляется на лапах или посредством фланцев. При этом возможно горизонтальное или вертикальное расположение вала машины. Разновидности конструктивного исполнения электрических машин по способу монтажа определяются ГОСТом 2479–79. Наиболее употребительной формой исполнения являются электрические машины с горизонтальным расположением вала, с двумя щитовыми подшипниками и станиной на лапах для крепления установки на горизонтальном основании. Для крепления двигателей на вертикальных стенках на подшипниковом щите выполняют фланец.

За высоту оси вращения электрической машины  $h$  принимают расстояние от оси вращения до опорной плоскости электродвигателя (рис. 4а). Толщина регулировочных прокладок, применяемых при установке, в высоту оси вращения не входит.

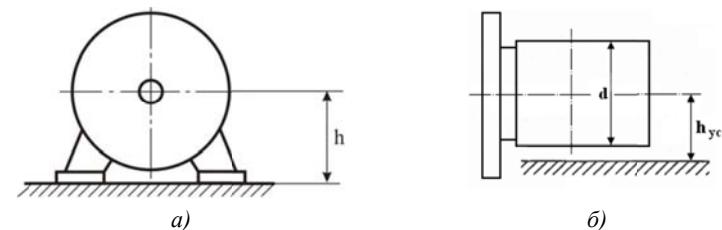


Рис. 4. Высота оси вращения электродвигателя

Для электродвигателей фланцевой формы исполнения, встраиваемых машин и машин других специальных видов крепления устанавливают условную высоту оси вращения  $h_{усл}$  (рис. 4б). Величину  $h_{усл}$  принимают равной (0,51... 0,54)  $d$ , где  $d$  – диаметр наибольшей окружности, в которую вписывается корпус электродвигателя. Вычисленную  $h_{усл}$  округляют до ближайшего меньшего значения стандартной высоты оси вращения электродвигателя.

### 3. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Расчет электрической машины – это неопределенная, многовариантная задача. При одних и тех же исходных данных можно получить целый ряд вариантов машины с различной геометрией и обмоточными данными, выходные характеристики которых в пределах допустимых отклонений удовлетворяют требованиям технического задания. Это связано с тем, что число исходных уравнений значительно меньше числа неизвестных величин, которые надо определить. Такие системы уравнений называются неопределенными и не имеют аналитического решения, причем любой определенный набор численных значений неизвестных величин, удовлетворяющий исходным уравнениям, будет являться их решением. Однако, поскольку мы решаем конкретную физическую задачу, то имеется объективная возможность оценивать полученные результаты и получить рациональные значения искомым неизвестных в результате многократного выполнения единообразных шагов, называемых итерациями. При таком подходе мы на первом шаге произвольно задаемся значениями некоторых переменных, с их помощью вычисляем другие переменные, оцениваем их, при необходимости вновь изменяем выбранные ранее переменные, проводим расчет снова и т. д. Очевидно, что количество шагов итераций зависит от удачного выбора исходных значений. Поэтому на первых этапах расчета, целым рядом величин

задаются, используя рекомендации, выработанные на основе более чем векового опыта мирового электромашиностроения и анализа известных машин такого же типа.

Существует несколько подходов к расчету электрических машин. При этом подавляющее большинство известных расчетных методик общепромышленных электрических машин основано на использовании машинной постоянной Арнольда  $C_A$ :

$$C_A = \frac{D^2 \cdot l}{P'/n} = \frac{1}{\pi^2 \cdot k_b \cdot k_o \cdot \alpha_1 \cdot A \cdot B_\delta},$$

где  $D$  и  $l$  – главные размеры машины, соответственно, внутренний диаметр и расчетная длина сердечника статора;

$P'$  – расчетная мощность;

$n$  – синхронная частота вращения;

$k_b$  – коэффициент формы кривой поля;

$k_o$  – обмоточный коэффициент;

$A$  – линейная токовая нагрузка;

$B_\delta$  – индукция в воздушном зазоре;

$\alpha_1$  – расчетный коэффициент полюсного перекрытия.

Так как произведение  $D^2 \cdot l$  пропорционально активному внутреннему объему машины, который однозначно определяет габарит в целом, то машинная постоянная позволяет определить тот минимальный объем машины, при котором можно выполнить требования технического задания. При этом параметры, входящие в правую часть этого уравнения, представляют собой относительные величины, которые для различных машин изменяются в достаточно узких диапазонах и поэтому могут быть на первом этапе проектирования достаточно точно выбраны по исходному техническому заданию.

### Общие указания по оформлению РГЗ

Результаты РГЗ оформляются в виде пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка со ссылками на литературу и промежуточными вычислениями оформляется в редакторе WORD в соответствии с правилами оформления и сдается в бумажной и электронной форме.

Графическая часть РГЗ должна содержать:

1. Эскиз активных частей АД;
2. Эскизы пазов статора и ротора (в масштабе, с размерами).
3. Рабочие и пусковые характеристики.
4. Чертеж общего вида рассчитанного электродвигателя с продольным и поперечным разрезами.

Чертеж общего вида (формат А4 или А3) выполняется на компьютере в любом графическом редакторе (AutoCAD, CorelDRAW, Компас) в соответствии с требованиями ЕСКД. Масштаб для общего вида выбирается таким, чтобы на одном листе разместить две проекции рассчитанного АД.

### Исходное задание

Техническое задание содержит номинальные данные проектируемой машины и указания о режиме ее работы. Кроме того, могут быть заданы также энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности  $\cos\phi$ ) и дополнительные требования, например, кратности максимального и минимального моментов, а также кратность пускового тока. Исходные данные для расчета приведены в прил. 1.

Расчет начинают с выбора и подробного изучения базовой машины, на которую ориентируются при проведении всех расчетов и разработке конструкции отдельных узлов. За базовую обычно выбирается конструкция АД одной из серий, выпускаемых в настоящее время. Например, при проектировании АД общего назначения малой и средней мощности (до 400 кВт) в качестве базовой следует выбирать конструкцию двигателей серии 4А или АИ. Кроме того, необходимо выбрать (если это однозначно не задано в исходном задании) исполнение по способу монтажа, степень защиты от воздействия окружающей среды и систему охлаждения рассчитываемой машины.

Для удобства практического использования приведенной ниже методики расчета совместим ее с примером расчета электродвигателя типа 4А80А6, имеющего следующие исходные данные:

- номинальная мощность  $P_2 = 0,75$  кВт;
- номинальное напряжение  $U_n = 220/380$  В;
- номинальная частота питающей сети  $f = 50$  Гц;
- число полюсов  $2p = 6$ ;
- высота оси вращения  $h = 80$  мм;
- режим работы – длительный  $S1$ .
- кратность пускового момента  $M_n / M_n = 2,0$ ;
- перегрузочная способность  $M_M / M_n = 2,2$ ;
- кратность пускового тока  $I_n / I_n = 4,0$ .

### 3.1. Выбор базовой модели АД и основных электротехнических материалов

В качестве базовой модели, которая берется за основу при выполнении всех расчетов и конструировании двигателя, выбираем основное конструктивное исполнение трехфазных машин единой серии 4А.

На процесс проектирования машины в значительной мере влияют четыре фактора: степень защиты, способ охлаждения, способ монтажа и условия эксплуатации.

**Степень защиты** определяет способность оболочки электрической машины обеспечивать защиту от попадания внутрь твердых посторонних тел, проникновения воды и защиту обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими или движущимися частями, находящимися внутри машины. Для АД на напряжение до 1000 В в мировой практике приняты две основные степени защиты: закрытое IP44 и защищенное IP23. Выбираем для рассчитываемого двигателя степень защиты **IP44**, как наиболее часто используемую.

**Исполнение по способу охлаждения** определяет систему вентиляции машины, а именно: вид хладагента (воздух, водород, вода и т. д.), устройство цепи для циркуляции хладагента и способ его перемещения. Машины исполнения IP44 обычно имеют наружный обдув при помощи вентилятора, установленного на выступающем конце вала вне корпуса (исполнение **IC0141**).

**Исполнение по способу монтажа** определяет конструкцию подшипниковых щитов, способ крепления машины и направление оси вала, исполнения концов вала. Для рассчитываемого АД выбираем исполнение **IM1001** – машина на лапах с двумя подшипниковыми щитами, вал расположен горизонтально и имеет один выступающий конец вала цилиндрической формы, лапы обращены вниз.

**Климатические условия и место размещения** электродвигателя устанавливают условия эксплуатации в части воздействия климатических факторов внешней среды. Для обеспечения длительной и безотказной работы для рассчитываемого АД выбираем климатическое исполнение и категорию размещения **УЗ** (У – умеренный климат, З – использование в закрытом помещении без искусственного регулирования климатических условий).

Перед началом расчета для проектируемого АД необходимо произвести **выбор основных электромагнитных материалов**, которые разделяются на активные и электроизоляционные. Активные материалы служат для обеспечения оптимальных условий для протекания в машине элек-

тромагнитных процессов и делятся на магнитные и проводниковые. Электроизоляционные материалы служат для изоляции токоведущих частей.

*а) Магнитные материалы.* Для магнитопроводов низковольтных АД следует применять холоднокатаную изотропную электротехническую сталь. Различные марки этой стали отличаются друг от друга степенью легирования кремнием. Рекомендуемые марки стали в зависимости от высоты оси вращения  $h$  приведены в табл.1.

Таблица 1

Рекомендуемые марки холоднокатаной электротехнической стали для магнитопроводов АД

$h$ , мм	Марки стали	Коэффициент заполнения пакета сталью		
		статор	к.з. ротор	фаз. ротор
50÷250	2013	0,97	0,97	0,95
280÷355	2312 и 1312	0,95	0,97	0,95
400÷560	2411	0,95	0,97	0,95

Для рассчитываемого АД принимаем холоднокатаную изотропную электротехническую сталь марки **2013**.

*б) Проводниковые материалы.* Обмоточные провода выпускаются круглого и прямоугольного сечения. В АД общего назначения на напряжение до 1000 В применяются в основном провода с эмалевой изоляцией. Для АД с мощностью до 100 кВт ( $h \leq 250$  мм) применяют провода круглого сечения диаметром от 0,29 до 1,62 мм, а при мощности свыше 100 кВт – провода прямоугольного сечения. Марки наиболее широко используемых обмоточных проводов приведены в табл. 2.

*в) Электроизоляционные материалы.* В систему изоляции АД входят пазовая, междуфазная и витковая изоляция обмотки статора, изоляции выводных концов и внутренних соединений. Срок службы машины определяется в первую очередь сроком службы изоляции, а толщина пазовой и междувитковой изоляции в значительной степени влияет на массогабаритные показатели машины. Выбранный класс нагревостойкости определяет уровень допустимых электромагнитных нагрузок. Конструкция системы изоляции выбирается в зависимости от высоты оси вращения и способа укладки обмотки по рекомендациям, приведенным в [1, 2, 3]. Для АД общего назначения следует выбрать класс нагревостойкости



**B** при  $h = 50 \div 132$  мм и **F** при  $h = 100 \div 135$  мм, допускающие нагрев машин соответственно до  $130^\circ\text{C}$  и  $155^\circ\text{C}$ .

Для рассчитываемого АД принимаем провод марки **ПЭТВ** и изоляцию класса нагревостойкости **B**.

Таблица 2

Рекомендуемые марки обмоточных проводов

Марка провода	Класс нагревостойкости	Характеристика провода
ПЭТВ	B	Круглый, с пониженной стойкостью к тепловым ударам
ПЭТ-155	F	Круглый, с большой стойкостью к тепловым ударам
ПЭТВМ	B	Круглый, с повышенной механической прочностью
ПЭТВМ-155	F	Круглый, с повышенной механической прочностью
ПЭТВП	B	Прямоугольный
ПЭТП	F	Прямоугольный

### 3.2. Электромагнитный расчет

Электромагнитный расчет включает в себя следующие два этапа – поисковый расчет и проверочный расчет. В процессе *поискового расчета* определяются геометрические размеры и обмоточные данные активных частей машины: производится выбор главных размеров, расчет статора, выбор воздушного зазора и расчет ротора. *Проверочный расчет* выполняется для оценки выходных характеристик спроектированной машины: производится расчет магнитной цепи, определяются параметры схемы замещения, выполняется расчет рабочих и пусковых характеристик и полученные результаты сравниваются с заданными в исходном задании параметрами.

#### 3.2.1. Поисковый расчет

**а) Выбор главных размеров.** Главными размерами АД являются внутренний диаметр пакета статора  $D$  и его расчетная длина  $l$ .

Обозначения геометрических размеров показаны на рис. 5.

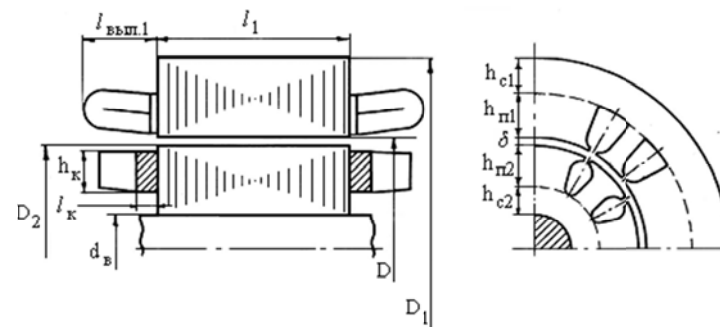


Рис. 5. Активные части электродвигателя

1. Так как ряд высот оси вращения  $h$  стандартизован, то расчет диаметральных размеров машины и, в частности, наружный диаметр статора  $D_1$  необходимо увязать со значением  $h$ . В инженерных расчетах наружный диаметр статора  $D_1$  можно определить по соотношению

$$D_1 = 2h(1 - k_h),$$

где коэффициент  $k_h = 1 - D_1/2h$  определяется по табл. 3.

Таблица 3

Значение коэффициента  $k_h$

$h, \text{мм}$	59–90	100–160	180–280	315–355
$k_h$	0,18	0,15	0,13	0,065

Для проектируемой машины  $k_h = 0,18$ . Тогда

$$D_1 = 2h(1 - k_h) = 2 \cdot 80(1 - 0,18) = 131,2 \text{ мм.}$$

Принимаем  $D_1 = 131$  мм.

2. Внутренний диаметр статора  $D$

$$D = k_D \cdot D_1,$$

где  $k_D = D / D_1$  – конструктивный коэффициент (табл. 4).

Таблица 4

Значение конструктивного коэффициента  $k_D$

$2p$	2	4	6, 8
$k_D$	$0,52 \pm 0,59$	$0,59 \pm 0,66$	$0,64 \pm 0,76$

Для проектируемой машины выбираем  $k_D = 0,67$ .

$$D = k_D D_1 = 0,67 \cdot 131 = 87,8 \text{ мм.}$$

Принимаем  $D = 88 \text{ мм.}$

3. Число полюсов по заданию  $2p = 6$ . Тогда число пар полюсов  $p = 3$  и синхронная частота вращения

$$n = f / p = 50 / 3 = 16,67 \text{ об/с.}$$

4. Полюсное деление  $\tau = \pi D / 2p = \pi \cdot 88 / 6 = 46,1 \text{ мм.}$

5. У машин переменного тока расчетная (электромагнитная) мощность, которая входит в формулу машинной постоянной  $C_A$ , равна

$$P' = m_1 E_1 I_1,$$

где  $m_1$  – число фаз обмотки статора;

$E_1$  – ЭДС фазы обмотки статора;

$I_1$  – ток фазы обмотки статора.

На первом этапе величину  $E_1$  определим по выражению

$$E_1 = k_E U_H,$$

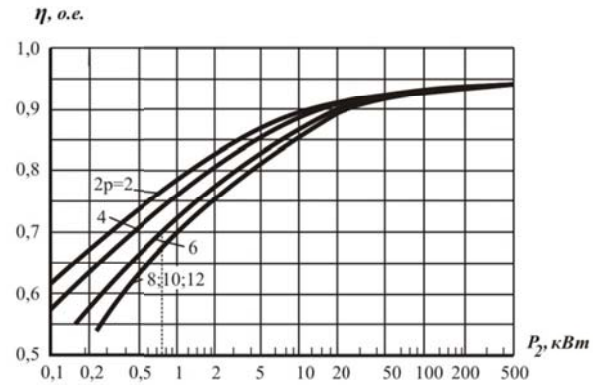
где  $k_E$  – коэффициент падения напряжения на первичной обмотке, который приближенно можно вычислить по выражению

$$k_E = 0,98 - p / (70 \div 200) = 0,98 - 3 / 70 = 0,935.$$

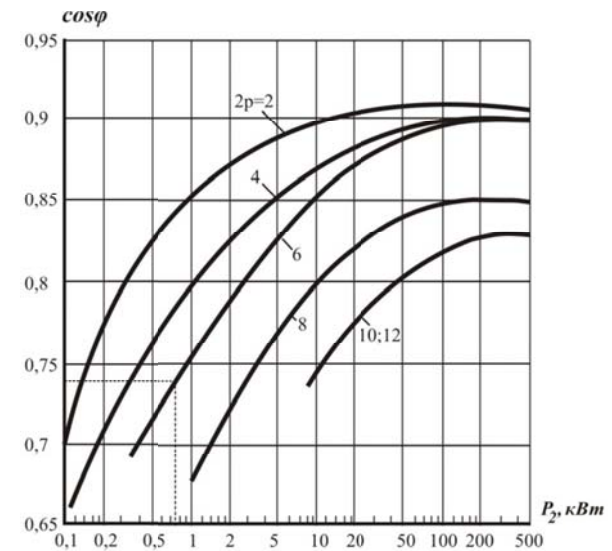
6. Расчетная мощность

$$P' = \frac{k_E P_2}{\eta \cos \varphi} = \frac{0,935 \cdot 750}{0,7 \cdot 0,74} = 1353 \text{ ВА.}$$

Значения КПД  $\eta$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi$  выбираем по рис. 6.



а)



б)

Рис. 6. Средние значения  $\eta$  и  $\cos \varphi$  асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, с исполнением по защите IP44; способ охлаждения IC0141

7. Индукция в воздушном зазоре. При  $D \leq 225$  мм индукцию  $B_\delta$  можно выбрать с учетом выражения

$$B_\delta = K + D_1 / (1200 \div 1800),$$

где  $K = 0,75$  для  $2p = 4, 6, 8$ ;  
 $K = 0,62$  для  $2p = 2$ .

При  $D = 250 \div 500$  мм индукцию  $B_\delta$  можно выбрать по [1].

Для  $2p = 6$  выбираем  $K = 0,75$ . Тогда  $B_\delta = 0,75 + 131 / 1200 = 0,86$  Тл.

8. Линейная нагрузка (А/мм) выбирается по выражениям:

$A = 0,1D_1 + (5 \div 10)$  для  $D_1 \leq 300$  мм;

$A = 0,1D_1 \pm (1 \div 5)$  для  $D_1 = 310 \div 420$  мм («+» при  $2p = 2$ ; «-» при  $2p \geq 4$ ).

При  $D_1 = 131$  мм получаем  $A = 0,1 \cdot 131 + 10 = 23,1$  А/мм.

Следует отметить, что предложенные рекомендации по выбору индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$  и линейной нагрузки  $A$  основаны на усредненных данных серийных машин, поэтому выбранные значения  $B_\delta$  и  $A$  являются приблизительными и их можно при необходимости откорректировать, например, в соответствии со значениями, принятыми в серийных машинах аналогичной мощности и частоты вращения, приведенными в [5].

9. Коэффициент формы кривой поля  $k_\theta = B_{\theta f} / B_{cp}$  принимают в зависимости от ожидаемого насыщения зубцов  $k_z = (F_\delta + F_{z1} + F_{z2}) / F_\delta$  по табл. 5.

Точность выбора величины  $k_z$  оцениваем после расчета магнитной цепи (см. п. 56).

Таблица 5

Значение коэффициентов формы кривой поля  $k_\theta$ , насыщения зубцов  $k_z$  и полюсного перекрытия  $\alpha_1$

$k_z$	1	1,1	1,25	1,5	1,75	2
$k_\theta$	1,11	1,1	1,09	1,08	1,07	1,06
$\alpha_1$	0,637	0,66	0,71	0,74	0,77	0,78

Принимаем  $k_\theta = 1,1$ ;  $\alpha_1 = 0,66$ ;  $k_z = 1,1$ .

10. Предварительное значение обмоточного коэффициента  $k_o$  выбирают в зависимости от типа обмотки статора:

- при  $h = 50 \div 160$  мм ( $P_{2n} < 12 \div 15$  кВт) применяется однослойная обмотка, для которой обмоточный коэффициент принимаем  $k_o = 0,96$ ;
- при  $h = 180 \div 250$  мм применяется двухслойная обмотка, для которой принимаем  $k_o = 0,92$ .

Для рассчитываемого АД принимаем однослойную обмотку и обмоточный коэффициент  $k_o = 0,96$ .

11. Расчетная длина сердечника статора

$$l = \frac{10^6 P'}{\pi^2 k_\theta k_o \alpha_1 \cdot AB_\delta D^2 n} = \frac{1353 \cdot 10^6}{\pi^2 1,1 \cdot 0,96 \cdot 0,66 \cdot 23,1 \cdot 0,85 \cdot 88^2 \cdot 16,67} = 78,01 \text{ мм.}$$

Полученное значение округляют до целого числа. Принимаем  $l = 78$  мм.

При  $l < 250$  мм действительная длина сердечника равна расчетной  $l_1 = l$ , так как в машине радиальных каналов не выполняют. При  $l > 250$  мм сердечник выполняют в виде отдельных пакетов длиной  $l_{\text{пак}} = 80 \div 100$  мм, разделенных между собой радиальными вентиляционными радиальными каналами шириной  $b_k = 10$  мм. Для рассчитываемого АД действительная длина сердечника равна расчетной, т. к. в машине нет радиальных каналов.

12. Оптимальность выбранных главных размеров оценивают по значению конструктивного фактора  $\lambda = l / \tau$ , которое должно находиться в следующих пределах:  $\lambda = 0,7 \div 2,2$  для  $2p = 4-8$  и  $\lambda = 0,5 \div 1,7$  для  $2p = 2$ .

$\lambda = l / \tau = 78 / 46,1 = 1,69$ . Эта величина  $\lambda$  для  $2p = 6$  допустима.

**б) Расчет статора.** Конфигурация пазов и зубцов статора определяется мощностью машины и типом обмотки. В машинах  $h \leq 250$  мм (с номинальной мощностью  $P_{2n} < 100$  кВт, напряжением  $U_n \leq 660$  В) применяются вспенные обмотки из эмалированного провода круглого сечения. При  $h \geq 280$  мм используются обмотки из полужестких катушек из прямоугольного провода. Обмотки из жестких катушек также наматывают из прямоугольных проводов и применяют во всех машинах с  $U_n \geq 3$  кВ.

Выбранный тип обмотки, в свою очередь, определяет форму паза. При прямоугольных проводах рекомендуются пазы с параллельными стенками (зубцы в таких пазах имеют трапециевидное сечение, а индук-

ция в них неравномерна). При круглых обмоточных проводах вспной обмотки в принципе могут использоваться пазы произвольной конфигурации. Однако в двигателях серии 4А при такой обмотке используются трапециевидные пазы, при которых зубец имеет параллельные стенки  $b_{z1} = const$  (рис. 7). Индукция в таких зубцах постоянна и магнитное напряжение в них меньше, чем в зубцах трапециевидального сечения.

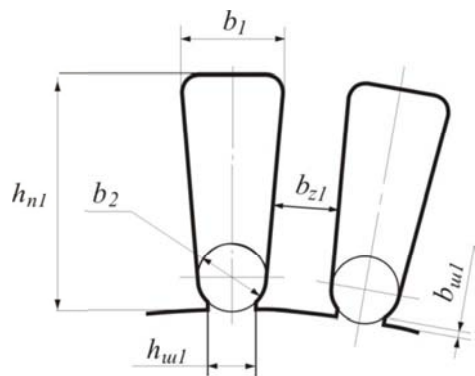


Рис. 7. Пазы статора

Для выбора числа пазов статора  $Z_1$  принимаем число пазов на полюс и фазу  $q$  по табл. 6.

Таблица 6

Рекомендуемые числа пазов на полюс и фазу

$h, \text{ мм}$	Число $q$				
	$2p = 2$	4	6	8	10
56–71	4	2	2	1,5	
80–100	4	3	2	1,5	–
112–132	4	3	3	2	–
160	6	4	3	2	–
180–225	6	4	4	3	–
250–355	8	5	4	3	3

Выбираем однослойную концентрическую обмотку с числом пазов на полюс и фазу  $q = 2$ .

13. Число пазов

$$Z_1 = 2ptq = 6 \cdot 3 \cdot 2 = 36.$$

14. Шаг обмоток по пазам

$$y = \beta \frac{Z_1}{2p} = 1 \frac{36}{6} = 6,$$

где  $\beta$  – относительное укорочение шага обмотки: для однослойной обмотки  $\beta = 1$  (т. е. шаг диаметральный  $y = \tau$ ); для двухслойной обмотки  $\beta = 0,58 \div 0,63$  при  $2p = 2$  и  $\beta = 0,8 \div 0,85$  при  $2p \geq 4$ .

Шаг необходимо округлить до целого числа, после чего, при необходимости, следует уточнить укорочение шага  $\beta = y \cdot 2p / Z_1$ .

15. Коэффициент укорочения

$$k_y = \sin\left(\frac{\pi}{2}\beta\right) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot 1\right) = 1.$$

16. Коэффициент распределения

$$k_p = \frac{\sin\left(q \frac{\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{0,5}{2 \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 2}\right)} = 0,966,$$

где  $\alpha = \pi / (mq)$  – угол фазной зоны обмотки.

17. Обмоточный коэффициент

$$k_o = k_y \cdot k_p = 1 \cdot 0,966 = 0,966.$$

18. Номинальный ток фазы статора

$$I_{1H} = \frac{P_2}{m_1 U \eta \cos \varphi} = \frac{750}{3 \cdot 220 \cdot 0,7 \cdot 0,74} = 2,16 \text{ А.}$$

19. Число эффективных проводников в пазу

$$N_n = \frac{\pi \cdot D a_1}{I_{1H} Z_1} = \frac{\pi \cdot 88 \cdot 23,1 \cdot 1}{2,16 \cdot 36} = 82,1,$$

где  $a_1$  – число пар параллельных ветвей в обмотке одной фазы.

В зависимости от способа соединения катушечных групп можно получить  $2p \geq a_1 \geq 1$ , причем  $2p$  должно без остатка делиться на  $a_1$ . В АД с  $h \leq 132$  мм обычно  $a_1 = 1$ . Число  $N_n$  должно быть *целым*, а для двухслойной обмотки, кроме того, четным числом. Принимаем  $N_n = 82$ .

20. Число витков в фазе обмотки статора

$$W_1 = \frac{N_n Z_1}{2 a_1 m} = \frac{82 \cdot 36}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 492.$$

21. Магнитный поток

$$\Phi = \frac{k_E U_1}{4 k_o k_o W_1 f} = \frac{0,935 \cdot 220}{4 \cdot 1,1 \cdot 0,96 \cdot 492 \cdot 50} = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

22. Индукция в зазоре

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot 10^6}{\alpha_1 \cdot \tau \cdot l} = \frac{1,96 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{0,66 \cdot 46,1 \cdot 78} = 0,855 \text{ Тл.}$$

Значение индукции  $B_\delta$  не должно сильно отличаться от выбранного в п. 7.

23. Уточняем линейную нагрузку

$$A = \frac{2 \cdot I_{1H} W_1 m_1}{\pi D} = \frac{2 \cdot 2,16 \cdot 492 \cdot 3}{\pi \cdot 88} = 23,06 \text{ А/мм.}$$

Значение  $A$  не должно сильно отличаться от выбранного в п. 8.

24. Магнитопровод статора надо спроектировать так, чтобы он не насыщался. Для этого принимаем предварительно допустимые индукции в зубцах и спинке статора по табл. 7:  $B_{z1} = 1,7$  Тл,  $B_{c1} = 1,6$  Тл.

25. Зубцовое деление статора

$$t_1 = \pi D / Z_1 = \pi \cdot 88 / 36 = 7,7 \text{ мм.}$$

Таблица 7

Допустимые значения индукции на различных участках магнитной цепи

$2p$	$B_{z1}$ , Тл	$B_{c1}$ , Тл	$B_{z2}$ , Тл	$B_{c2}$ , Тл
2	1,75÷1,95	1,50÷1,65	1,75÷1,95	1,35÷1,45
4	1,75÷1,95	1,50÷1,65	1,75÷1,95	1,15÷1,25
6	1,75÷1,95	1,45÷1,60	1,75÷1,95	1,05÷1,15
8	1,70÷1,90	1,20÷1,35	1,70÷1,90	0,75÷0,85

26. Ширина зубца статора

$$b_{z1} = \frac{B_\delta t_1 l}{B_{z1} l_1 k_c} = \frac{0,768 \cdot 7,7 \cdot 78}{1,7 \cdot 78 \cdot 0,97} = 4,0 \text{ мм.}$$

Коэффициент заполнения пакета сталью  $k_c$  принимается 0,97 для оксидированных (при  $h \leq 250$  мм) и 0,95 для лакированных (при  $h \geq 280$  мм) листов толщиной 0,5 мм.

27. Высота спинки статора

$$h_{c1} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 B_{c1} l_1 k_c} = \frac{1,96 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 1,6 \cdot 78 \cdot 0,97} = 8,1 \text{ мм.}$$

28. Размеры паза статора в штампе

$$h_{n1} = (D_1 - D) / 2 - h_c = (131 - 88) / 2 - 8,1 = 13,4 \text{ мм;}$$

$$b_1 = \pi (D + 2h_{n1}) / Z_1 - b_{z1} = \pi (88 + 2 \cdot 13,4) / 36 - 4 = 6,0 \text{ мм;}$$

$$b_2 = \frac{\pi (D + 2h_{u1}) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{\pi (88 + 2 \cdot 0,5) - 36 \cdot 4}{36 - \pi} = 4,0 \text{ мм;}$$

$$h_1 = h_{n1} - h_{u1} - (b_2 - b_{u1}) / 2 = 13,4 - 0,5 - (4,0 - 2,5) / 2 = 12,2 \text{ мм.}$$

Высоту шлица  $h_{u1}$  принимают  $h_{u1} = 0,5$  при  $h \leq 132$  мм,  $h_{u1} = 1,0$  при  $h \geq 160$  мм. Ширина шлица  $b_{u1}$  должна обеспечить возможность укладки проводников обмотки статора в паз. В сериях АД величина  $b_{u1}$  нормализуется и выбирается по табл. 8.

Таблица 8

Среднее значение ширины шлица паза статора

$h$ , мм	$b_{u1}$ , мм при $2p$			
	2	4	6	8
50–63	1,8	1,8	1,8	1,8
71	2,0	2,0	2,0	2,0
80, 90	3,0	3,0	2,5	2,7
100, 112	3,5	3,5	3,0	3,0
132	4,0	3,5	3,5	3,5

Высоту и ширину шлица  $h_{u1}$  принимает  $h_{u1} = 0,5$  и  $b_{u1} = 2,5$  мм.

### 29. Размеры паза в свету

$$b'_1 = b_1 - \Delta_c; \quad b'_2 = b_2 - \Delta_c; \quad h'_{n1} = h_n - \Delta_c,$$

где  $\Delta_c$  – припуск на сборку:  $\Delta_c = 0,1$  мм при  $h \leq 132$  мм;  $\Delta_c = 0,2$  мм при  $h = 160 \div 250$  мм;  $\Delta_c = 0,3$  мм при  $h = 280 \div 355$  мм.

$$b'_1 = b_1 - \Delta_c = 6,0 - 0,1 = 5,9 \text{ мм};$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta_c = 4,0 - 0,1 = 3,9 \text{ мм};$$

$$h'_{n1} = h_n - \Delta_c = 12,2 - 0,1 = 12,1 \text{ мм}.$$

### 30. Площадь паза в свету

$$S_n = 0,5(b'_1 + b'_2)h_1 + \pi(b'_1)^2/8 - b_{u1}h_{u1} = \\ = 0,5(5,9 + 3,9) \cdot 12,1 + \pi 5,9^2/8 - 2,5 \cdot 0,5 = 54,51 \text{ мм}^2.$$

### 31. Площадь изоляции

$$S_{из} = b_{из1}(2h'_{n1} + b'_1 + 0,5\pi b'_2 - b_{u1}) + b_{из2}0,5b'_2,$$

где  $b_{из1}/b_{из2}$  – односторонняя толщина изоляции в пазу.

Для класса изоляции  $B$  применяют лавсановую пленку ПЭТФ, для  $F$  и  $H$  – имидофлекс. Толщину изоляции принимают по рекомендациям, приведенным в табл. 9.

Таблица 9

Значения односторонней толщины изоляции в пазу

$h$ , мм	50÷80	90÷132	160÷250
$b_{из1}/b_{из2}$ , мм	0,2/0,3	0,25/0,35	0,4/0,5

Для выбранного класса изоляции  $B$  для полузакрытых пазов выбираем лавсановую пленку ПЭТФ. Толщина изоляции  $b_{из1}/b_{из2} = 0,2 / 0,3$  мм. Тогда площадь изоляции равна

$$S_{из} = b_{из1}(2h'_{n1} + b'_1 + 0,5\pi b'_2 - b_{u1}) + b_{из2}0,5b'_2 = \\ = 0,2(2 \cdot 12,1 + 5,9 + 0,5 \cdot \pi \cdot 3,9 - 2,5) + 0,3 \cdot 0,5 \cdot 3,9 = 7,33 \text{ мм}^2.$$

Лист статора рассчитываемого АД показан на рис. 8.

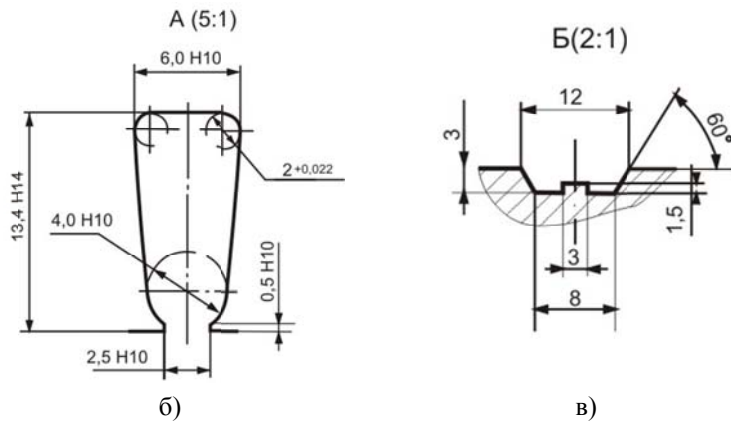
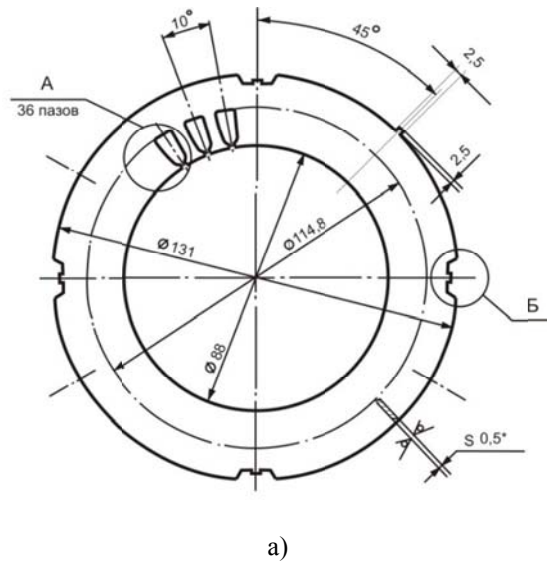


Рис. 8. Лист (а), паз (б) и выемка для сварочного шва (в) пакета статора

32. Площадь изолированного паза

$$S_{\text{ин}} = S_{\text{п}} - S_{\text{из}} = 59,23 - 7,33 = 51,9 \text{ мм}^2.$$

33. Диаметр изолированного проводника  $d_{\text{из}}$  определяется с учетом допустимого коэффициента заполнения паза  $k_z = 0,68 \div 0,72$  для машинной обмотки и  $k_z = 0,72 \div 0,75$  для ручной

$$d_{\text{из}} = \sqrt{\frac{k_z S_{\text{ин}}}{N_{\text{п}} n_{\text{эл}}}} = \sqrt{\frac{0,7 \cdot 54,51}{82 \cdot 1}} = 0,682 \text{ мм}.$$

Принимаем провод марки ПЭТВ с эмалевой изоляцией класса В. Выбираем ближайший стандартный провод, имеющий диаметры  $d_{\text{из}} / d = 0,675 / 0,62 \text{ мм}$ , площадь  $q_{\text{пр}} = 0,302 \text{ мм}^2$  (см. прил. 2).

Плотность тока

$$J_1 = \frac{I_{1\text{H}}}{a_1 \cdot n_{\text{эл}} \cdot q_{\text{пр}}} = \frac{2,16}{1 \cdot 1 \cdot 0,302} = 7,2 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

Величину  $J_1$  сравниваем с рекомендуемым значением  $J_{1\text{доп}}$  по рис. 9.

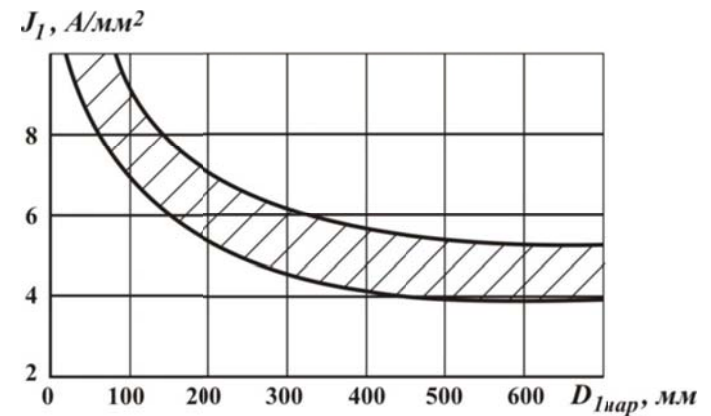


Рис. 9. Рекомендуемые значения плотности тока в обмотке статора  $J_1$

По рис. 13 при  $D_1 = 131 \text{ мм}$  получаем, что  $J_{1\text{доп}} = 7,0 \div 9,0 \text{ А/мм}^2$ , т. е. полученное расчетное значение плотности тока допустимо.

**в) Воздушный зазор.** Величина воздушного зазора  $\delta$  в значительной степени определяет энергетические показатели машины. Уменьшение  $\delta$  приводит к уменьшению намагничивающего тока  $I_{\mu}$ , уменьшению потерь в меди и увеличению  $\cos\phi$ . Однако чрезмерное уменьшение  $\delta$  приводит к резкому увеличению амплитуды пульсации индукции в воздушном зазоре  $B_{\delta}$ , что обуславливает увеличение поверхностных и пульсационных потерь и уменьшает КПД машины. Величина  $\delta$  зависит в основном от  $D$  и длины вала  $L_{в.л}$  между подшипниками. Так как величина  $D$  определяется допусками на размеры (чем больше  $D$ , тем больше допуск), а величина  $L_{в.л}$  определяется величиной  $l$ , которая, в свою очередь, также зависит от  $D$ , то величина  $\delta$  увеличивается с увеличением  $D$ . Поэтому выбор  $\delta$  производится в зависимости от величины  $D$ .

34. Величина воздушного зазора  $\delta$  определяется по следующим эмпирическим формулам:

$$\delta = 0,0028D_1 \text{ для } 2p = 2; \delta = 0,002D_1 \text{ для } 2p = 4; \delta = 0,0016D_1 \text{ для } 2p = 6,8.$$

При этом зазор  $\delta$  должен быть кратен 5, минимальная величина 0,20 мм.

Для  $2p = 6$  получим  $\delta = 0,002 \cdot D_1 = 0,002 \cdot 131 = 0,262$  мм.

Принимаем  $\delta = 0,25$  мм.

**г) Расчет ротора.** Расчет к. з. ротора выполняется следующим образом: выбирают число пазов ротора  $Z_2$  в соответствии с числом  $Z_1$ , т. е. исходя из допустимых соотношений между ними. Затем, с учетом требований задания к выходным характеристикам, выбирается форма паза и рассчитываются размеры зубцов, ярма и паза. Определив поперечное сечение паза и величину тока в стержне, оценивают плотность тока в стержне обмотки ротора, которая не должна превышать допустимых значений. После этого определяют размеры к.з. кольца.

35. Внешний диаметр ротора

$$D_2 = D - 2\delta = 88 - 2 \cdot 0,25 = 87,5 \text{ мм.}$$

36. Длина ротора  $l_2 = l_1 = 78$  мм.

37. Форма и число пазов ротора. При  $h \leq 355$  мм обмотка ротора литая алюминиевая. Одновременно со стержнями отливаются короткозамы-

кающие кольца и вентиляционные лопатки. Выбор формы пазов короткозамкнутого ротора зависит от полезной мощности  $P_2$ , числа пазов  $Z_1$ , числа полюсов  $2p$  и требуемых пусковых характеристик. В АД применяются следующие формы пазов:

- при  $h \leq 132$  мм – овалы полузакрытые;
- при  $h = 160 \div 250$  мм – овалы закрытые (кроме  $h = 250$  мм и  $2p = 2$ );
- при  $h = 250 \div 355$  мм и  $2p = 2$  – бутылочные закрытые;
- при  $h = 280 \div 355$  мм и  $2p \geq 4$  – овалы закрытые с уменьшенным сечением в верхней части.

Размеры шлицевой части овалных полузакрытых пазов (см. рис. 10) при  $h \leq 100$  мм выбирают равными  $h_{u2} = 0,5$  мм и  $b_{u2} = 1,0$  мм; при  $h = 112 \div 132$  мм выбирают  $h_{u2} = 0,75$  мм и  $b_{u2} = 1,5$  мм.

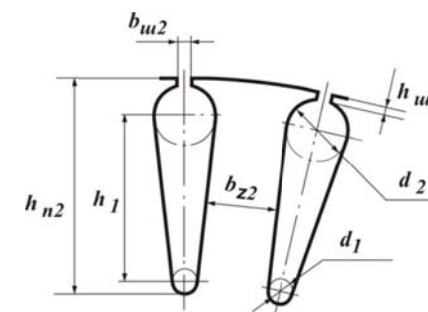


Рис. 10. Пазы ротора

Число пазов ротора выбираем по табл. 10. Для уменьшения паразитных моментов в машинах с  $h \leq 160$  мм выполняют скос пазов роторов на одно зубцовое деление статора  $t_{ск} = t_1$ .

Таблица 10

Рекомендуемые числа пазов статора и ротора

$h$ , мм	$Z_1/Z_2$ при $2p$			
	2	4	6	8
50–63	24/19	24/18	36/28	–
71	24/19	24/18	36/28	36/28
80–100	24/19	36/28	36/28	36/28
112–132	24/19	36/34	54/51	48/44



С учетом высоты оси вращения и числа пазов статора выбираем  $Z_1/Z_2 = 36/28$ . Исходя из минимума паразитных моментов, принимаем скос пазов роторов на 1 зубцовое деление статора  $t_{ck} = t_1$ .

Размеры паза ротора вычисляются исходя из допустимых индукций в зубце и в спинке, а также из условия получения постоянной ширины зубца по всей его высоте. Допустимые индукции в зубцах  $B_{z2}$  и спинке  $B_{c2}$  ротора выбирают по табл. 7:  $B_{z2} = 1,8$  Тл,  $B_{c2} = 0,95$  Тл.

### 38. Зубцовое деление ротора

$$t_2 = \pi \cdot D_2 / Z_2 = \pi \cdot 87,5 / 28 = 9,8 \text{ мм.}$$

39. Сердечник ротора насаживается непосредственно на вал, поэтому его внутренний диаметр равен наружному диаметру вала

$$d_g = k_g D_1 = 0,23 \cdot 131 = 30 \text{ мм,}$$

где  $k_g = 0,19$  для  $h = 50 \div 63$  мм и  $k_g = 0,23$  для  $h = 71 \div 355$  мм.

При необходимости, значение  $d_g$  принимаем равным рекомендуемым размерам вала  $d_3$  по табл. 11.

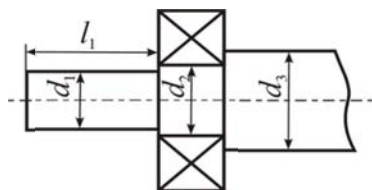


Таблица 11.

Рекомендуемые размеры вала со стороны выходного конца

h, мм	63	71	80	90	100	112	132	160	180	200	225	250	280	315	355
$l_1$ , мм	30	40	50	50	60	80	80	110	110	140	140	140	170	170	210
$d_1$ , мм	14	19	22	24	28	32	38	48	55	60	65	75	80	90	100
$d_2$ , мм	15	20	25	25	30	35	45	50	60	65	70	85	85	95	110
$d_3$ , мм	20	27	30	32	37	43	54	60	70	75	80	100	100	110	125

### 40. Ток в стержне ротора

$$I_2 = k_I I_1 \frac{2m_1 W_o k_o}{Z_2} = 0,775 \cdot 2,16 \frac{2 \cdot 3 \cdot 492 \cdot 0,966}{28} = 170 \text{ А.}$$

Здесь  $k_I = I_2 / I_1 \approx \cos \varphi + 0,04 = 0,74 + (0,035 \div 0,04) = 0,775$ , причем  $k_I$  должен быть не более 0,99.

### 41. Ширина зубца ротора при допустимой индукции

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} t_2 l}{B_{z2} l_2 k_c} = \frac{0,855 \cdot 9,8 \cdot 78}{1,8 \cdot 78 \cdot 0,97} = 4,8 \text{ мм.}$$

### 42. Расчетная высота спинки ротора

$$h_{c2p} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2l_2 k_c B_{c2}} = \frac{1,96 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 78 \cdot 0,97 \cdot 0,95} = 13,6 \text{ мм.}$$

43. Поскольку часть потока проникает в вал, поэтому высоту паза можно увеличить, приняв расчетный диаметр вала  $d_{g,p} = (0,6 \div 1,0) d_g$  (меньшие значения выбираются при  $2p = 2$ ). Тогда высота паза ротора равна

$$h_{n2} = 0,5(D_2 - d_{g,p}) - h_{c2p} = 0,5(87,5 - 1 \cdot 30) - 13,6 = 15,1 \text{ мм.}$$

44. Размеры шлицевой части паза ротора при овальных полузакрытых пазах можно принять равными  $h_{u2} = 0,5$  мм,  $b_{u2} = 1$  мм. Тогда размеры паза

$$d_2 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{u2}) - Z_2 b_{z2}}{Z_2 + \pi} = \frac{\pi(87,5 - 2 \cdot 0,5) - 28 \cdot 4,8}{28 + \pi} = 4,3 \text{ мм;}$$

$$d_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{n2}) - Z_2 b_{z2}}{Z_2 - \pi} = \frac{\pi(87,5 - 2 \cdot 15,1) - 28 \cdot 4,8}{28 - \pi} = 1,7 \text{ мм.}$$

Высота между центрами окружностей паза

$$h_1 = h_{n2} - h_{u2} - 0,5(d_2 + d_1) = 15,1 - 0,5 - 0,5(4,8 + 1,7) = 11,6 \text{ мм.}$$

Для качественной заливки ротора и по условиям прочности штампа должно быть  $d_1 \geq 1,5 \div 2$  мм при  $h \leq 132$  мм и  $d_1 \geq 3$  мм при  $h \geq 160$  мм. Эти требования выполняются.

45. Действительная высота спинки статора

$$h_{c2} = 0,5(D_2 - d_6) - h_{n2} = 0,5(87,5 - 30) - 15,1 = 13,6 \text{ мм.}$$

По условиям механической прочности должно быть  $h_{c2} \geq 4$  мм. Чертеж рассчитанного листа ротора показан на рис. 11.

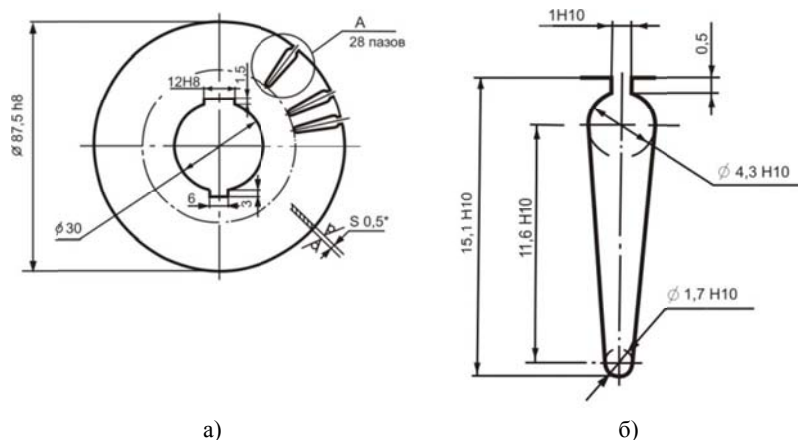


Рис. 11. Лист (а) и паз (б) ротора

46. Поперечное сечение стержня, равное площади паза ротора

$$q_c = q_{n2} = \frac{\pi}{8}(d_2^2 + d_1^2) + 0,5(d_2 + d_1)h_1 = \\ = \frac{\pi}{8}(4,3^2 + 1,7^2) + 0,5(4,3 + 1,7)11,6 = 43,2 \text{ мм}^2.$$

47. Плотность тока в стержне ротора

$$J_c = I_2 / q_c = 170 / 43,2 = 3,9 \text{ А/мм}^2.$$

Плотность тока  $J_c$  не должна превышать  $2,5 \div 3,6$  А/мм<sup>2</sup> для машин закрытого обдуваемого исполнения *IP44* и  $3,0 \div 4,0$  А/мм<sup>2</sup> для машин защищенного исполнения *IP23*.

48. Коэффициент приведения тока кольца к току стержня

$$\Delta = 2 \sin(\pi p / Z_2) = 2 \sin(\pi 3 / 28) = 0,66.$$

49. Ток короткозамыкающего кольца

$$I_k = I_2 / \Delta = 170 / 0,66 = 257,6 \text{ А.}$$

50. Размеры к. з. кольца (сечение  $q_k$ , высота  $h_k$  и ширина  $l_k$ , см. рис. 5)

$$q_k = I_k / J_k = 257,6 / 3,28 = 78,4 \text{ мм}^2,$$

где допустимая плотность тока  $J_k = 2,0 \div 3,5$  А/мм<sup>2</sup>.

$$h_k = (1,1 \div 1,25)h_{n2} = 1,15 \cdot 15,1 = 17,4 \text{ мм}; l_k = q_k / h_k = 78,4 / 17,4 = 4,5 \text{ мм.}$$

Окончательно площадь сечения к.з. кольца

$$q_k = h_k l_k = 17,4 \cdot 4,5 = 78,3 \text{ мм}^2.$$

**Конструкция сердечника ротора.** Сердечники роторов асинхронных двигателей при  $D_2 < 990$  мм выполняют с непосредственной посадкой на вал без промежуточной втулки. В двигателях с высотой оси вращения  $h \leq 250$  мм применяют горячую прессовую посадку сердечников на гладкий вал без шпонки. В двигателях  $h \geq 250$  мм сердечники крепят с помощью шпонки.

В большинстве двигателей с высотой оси вращения  $h \geq 250$  мм выполняют аксиальные каналы (в спинке) в целях некоторого улучшения условий охлаждения ротора и снижения его массы и момента инерции. Наличие каналов оказывает влияние на магнитное напряжение ярма ротора и должны быть учтены при расчете магнитной цепи.

Общий вид спроектированного ротора показан на рис. 12.

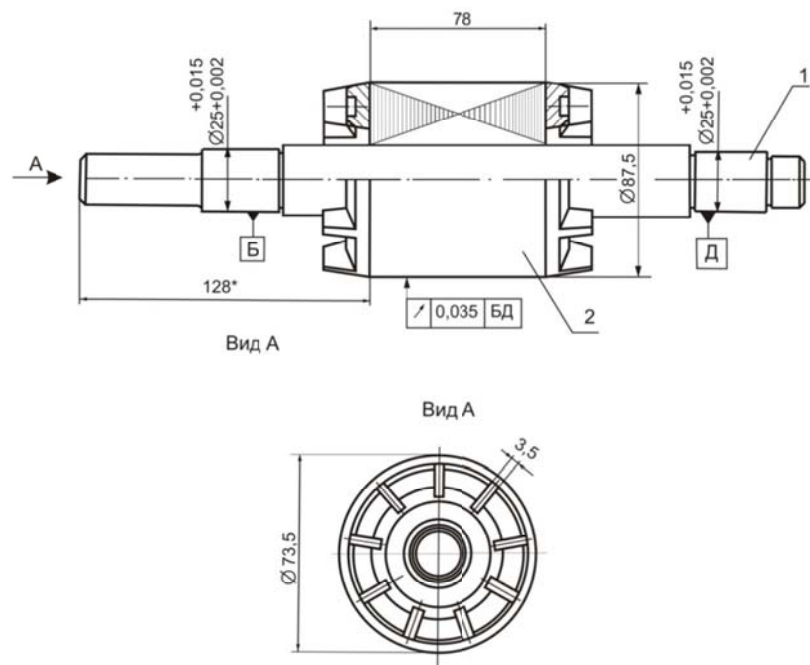


Рис.12. Общий вид ротора.

1 – вал; 2 – пакет ротора с короткозамкнутой обмоткой

### 3.2.2. Проверочный расчет

**а) Расчет магнитной цепи.** Расчет магнитной цепи производится для определения тока намагничивания  $I_{\mu}$ , необходимого для создания в машине магнитного потока  $\Phi$  требуемой величины. Расчет проводят для режима холостого хода двигателей, при котором для асинхронных машин характерно относительно сильное насыщение стали зубцов статора и ротора. Насыщение зубцовых зон приводит к уплощению кривой магнитного поля, учет которого проводится с использованием специально рассчитанной кривой намагничивания для зубцов. Пространственное распределение индукции в спинках учитывается с помощью специальной кривой намагничивания для них. Магнитная цепь рассчитывается на один полюс.

51. Индукция в отдельных участках магнитной цепи

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} t_1 l}{b_{z1} l_1 k_c} = \frac{0,855 \cdot 7,7 \cdot 78}{4,0 \cdot 78 \cdot 0,97} = 1,7 \text{ Тл};$$

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} t_2 l}{b_{z2} l_2 k_c} = \frac{0,855 \cdot 9,8 \cdot 78}{4,8 \cdot 78 \cdot 0,97} = 1,8 \text{ Тл};$$

$$B_{c1} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 h_{c1} l_1 k_c} = \frac{1,96 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 8,1 \cdot 78 \cdot 0,97} = 1,6 \text{ Тл};$$

$$B_{c2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 h_{c2} l_1 k_c} = \frac{1,96 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 13,6 \cdot 78 \cdot 0,97} = 0,96 \text{ Тл}.$$

52. Коэффициент воздушного зазора (коэффициент Картера)

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} k_{\delta 2} = 1,23 \cdot 1,04 = 1,28,$$

где

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \delta} = \frac{7,7}{7,7 - 5,67 \cdot 0,25} = 1,23;$$

$$k_{\delta 2} = \frac{t_2}{t_2 - \gamma_2 \delta} = \frac{9,8}{9,8 - 1,78 \cdot 0,25} = 1,04;$$

$$\gamma_1 = \frac{4}{\pi} \left( \frac{b_{u1}}{2\delta} \arctg \frac{b_{u1}}{2\delta} - \ln \sqrt{1 + \left( \frac{b_{u1}}{2\delta} \right)^2} \right) =$$

$$= \frac{4}{\pi} \left( \frac{2,5}{2 \cdot 0,25} \arctg \frac{2,5}{2 \cdot 0,25} - \ln \sqrt{1 + \left( \frac{2,5}{2 \cdot 0,25} \right)^2} \right) = 5,67;$$

$$\gamma_2 = \frac{4}{\pi} \left( \frac{b_{u2}}{2\delta} \arctg \frac{b_{u2}}{2\delta} - \ln \sqrt{1 + \left( \frac{b_{u2}}{2\delta} \right)^2} \right) =$$

$$= \frac{4}{\pi} \left( \frac{1}{2 \cdot 0,25} \arctg \frac{1}{2 \cdot 0,25} - \ln \sqrt{1 + \left( \frac{1,0}{2 \cdot 0,25} \right)^2} \right) = 1,78.$$

53. Намагничивающая сила воздушного зазора

$$F_{\delta} = 10^{-3} \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta \cdot k_{\delta} = 795,8 \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} = 795,8 \cdot 0,855 \cdot 0,25 \cdot 1,28 = 217,7 \text{ A},$$

где  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость воздуха.

54. Напряженности поля определяем по таблицам намагничивания в зависимости от выбранной марки стали (была выбрана сталь 2013).

Намагничивающие силы магнитных участков.

Зубцы статора

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot h_{z1} = 1,15 \cdot 13,4 = 15,41 \text{ A},$$

где  $H_{z1} = 1,15$  А/мм (см. прил. 3);

$$h_{z1} = h_{n1} = 13,4 \text{ мм}.$$

Зубцы ротора

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot h_{z2} = 1,52 \cdot 14,93 = 22,7 \text{ A},$$

где  $H_{z2} = 1,52$  А/мм;

$$h_{z2} = h_{n2} - 0,1d_1 = 15,1 - 0,1 \cdot 1,7 = 14,93 \text{ мм}.$$

Спинка статора  $H_{c1} = 0,75$  А/мм (см. прил. 3),

$$F_{c1} = H_{c1} \frac{\pi(D_1 - h_{c1})}{4p} = 0,75 \frac{\pi(131 - 8,1)}{4 \cdot 3} = 24,1 \text{ A}.$$

Спинка ротора  $H_{c2} = 0,171$  А/мм (см. прил. 3),

$$F_{c2} = H_{c2} \frac{\pi(d_b + h_{c2})}{4p} = 0,171 \frac{\pi(30 + 13,6)}{4 \cdot 3} = 1,95 \text{ A}.$$

Намагничивающая сила на один полюс

$$\begin{aligned} F_{\Sigma} &= F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2} + F_{c1} + F_{c2} = \\ &= 217,7 + 15,41 + 22,7 + 24,1 + 1,95 = 281,86 \text{ A}. \end{aligned}$$

55. Намагничивающий ток

$$I_{\mu} = \frac{2pF_{\Sigma}}{0,9m_1W_1k_0} = \frac{6 \cdot 281,86}{0,9 \cdot 3 \cdot 492 \cdot 0,966} = 1,31 \text{ A}.$$

В относительных единицах намагничивающий ток равен

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1H}} = \frac{1,31}{2,16} = 0,61.$$

В АД мощностью не более 2÷3 кВт допускается  $I_{\mu}^* = 0,5 - 0,65$ .

В АД средней и большой мощности

$$I_{\mu}^* \leq 0,2.$$

56. Коэффициенты насыщения

$$k_z = \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} = \frac{217,7 + 15,41 + 22,7}{217,7} = 1,17;$$

$$k_{\mu} = F_{\Sigma} / F_{\delta} = 281,86 / 217,7 = 1,29,$$

где  $k_z$  и  $k_{\mu}$  – коэффициенты насыщения зубцовой зоны и магнитной цепи.

Обычно  $k_z = 1,15 \div 1,5$ ;  $k_{\mu} = 1,2 \div 1,45$ .

Отметим, что величина  $k_z$  мало отличается от выбранной в п. 9.

#### б) Расчет параметров Т-образной схемы замещения.

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора  $r_1$ ,  $x_1$  и ротора  $r_2$ ,  $x_2$ , а также сопротивления намагничивающего контура  $r_m$ ,  $x_m$ , входящие в эквивалентную электрическую схему замещения машины (рис. 13). При изменении скольжения  $S$  ротора от скольжения холостого хода  $S_{xx}$  до номинального скольжения  $S_n$  значения параметров схемы замещения принимаются постоянными. Их величины определяются исходя из геометрических размеров, обмоточных данных и электрических свойств материала обмоток. Выразив параметры схемы замещения в относительных единицах, можно оценить правильность выбранных размерных соотношений и расчета обмоточных данных АД.

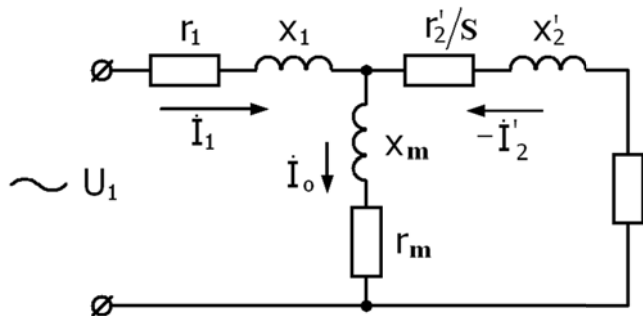


Рис. 13. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

57. Активное сопротивление фазы обмотки статора

$$r_1 = \rho_{m75} \frac{l_{cp} W_1 10^{-3}}{q_{np} n_{эл} a_1},$$

где  $\rho_{m75}$  – удельное сопротивление, величина которого при температурах 75 °С и 115 °С соответственно равна 1/47 и 1/41 Ом·мм<sup>2</sup>/м;

$l_{cp}$  – средняя длина витка.

Среднюю длину витка  $l_{cp}$  находят как сумму прямолинейных пазовых и изогнутых лобовых частей катушки  $l_{cp} = 2(l_n + l_l)$ . Длина пазовой части  $l_n$  равна длине стали сердечника статора  $l_n = l_1$ . Лобовая часть катушки имеет сложную конфигурацию (рис. 14). Точные расчеты ее длины  $l_l$  и длины вылета  $l_{выл.л}$  требуют предварительного определения всех размеров катушки и сопряжены со значительными объемами расчетов, данные которых в дальнейшем электромагнитном расчете обычно не используются. Для машин малой и средней мощности и в большинстве случаев для крупных машин достаточно точные для практических расчетов результаты дают эмпирические формулы, учитывающие основные особенности конструктивных форм катушек. В обмотках статоров из круглого провода длина лобовой части

$$l_l = K_l b_{cp} + 2B = 1,75 \cdot 53,1 + 2 \cdot 0,015 = 93 \text{ мм},$$

где  $b_{cp}$  – средняя ширина катушки:

$$b_{cp} = \frac{\pi(D + h_{nl})}{2p} \beta = \frac{\pi(88 + 13,4)}{6} \cdot 1 = 53,1 \text{ мм}.$$

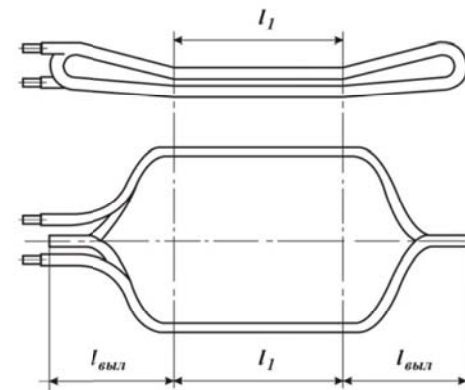


Рис. 14. Катушка обмотки статора

Коэффициент  $K_l$  выбирается при  $2p = 2$  равным  $K_l = 1,45$ ; при  $2p = 4$  равным  $K_l = 1,55$ ; при  $2p = 6$  равным  $K_l = 1,75$ ; при  $2p \geq 8$  равным  $K_l = 1,9$ . Тогда

$$l_{cp} = 2(l_1 + l_l) = 2(78 + 93) = 342 \text{ мм};$$

$$r_1 = \rho_{m75} \frac{l_{cp} W_1 10^{-3}}{q_{np} n_{эл} a_1} = \frac{1}{47} \frac{342 \cdot 492 \cdot 10^{-3}}{0,302 \cdot 1 \cdot 1} = 11,95 \text{ Ом}.$$

Относительное значение

$$r_{1*} = r_1 / Z = 11,95 / 101,85 = 0,117,$$

где  $Z = U_{1н} / I_{1н} = 220 / 2,16 = 101,85 \text{ Ом}$ .

Длина вылета лобовой части (рис. 14)

$$l_{выл.л} = (0,19 + 0,1p) b_{cp} + 10 = (0,19 + 0,1 \cdot 3) 53,1 + 10 = 36 \text{ мм}.$$

58. Активное сопротивление алюминиевого стержня ротора

$$r_c = \rho_{ал75} \frac{l_c 10^{-3}}{q_c} = \frac{1}{24,5} \frac{78 \cdot 10^{-3}}{43,2} = 73,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

где  $\rho_{ал75}$  – удельное сопротивление, величина которого равна при температурах 75 и 115 °С соответственно для алюминия литого 1/24,5 и 1/22 Ом·мм<sup>2</sup>/м;

для роторов, залитых под давлением  $\rho_{ал75} = 1/21,5$  и 1/20,5 Ом·мм<sup>2</sup>/м.

59. Сопротивление короткозамыкающего кольца

$$r_k = \rho_{ал75} \frac{\pi D_k 10^{-3}}{Z_2 q_k} = \frac{1}{24,5} \frac{\pi \cdot 70,1 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 78,3} = 4,15 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

где  $D_k = D_2 - h_k = 87,5 - 17,4 = 70,1$  мм.

60. Сопротивление фазы ротора

$$r_2 = r_c + 2 \cdot r_k / \Delta^2 = 73,7 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 4,15 \cdot 10^{-6} / 0,66^2 = 92,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

61. Приведенное к статору сопротивление фазы ротора

$$r'_2 = r_2 \frac{4m_1 (W_1 k_0)^2}{Z_2} = 92,7 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3 (492 \cdot 0,966)^2}{28} = 8,97 \text{ Ом}.$$

Относительное значение

$$r'_{2*} = r'_2 / Z = 8,97 / 101,85 = 0,088.$$

Приведенное сопротивление стержня

$$r'_c = r_c \frac{4m_1 (W_1 k_0)^2}{Z_2} = 73,7 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3 (492 \cdot 0,966)^2}{28} = 7,13 \text{ Ом}.$$

62. Проводимость паза статора

$$\lambda_{n1} = 0,66 + \frac{2h_1}{3(b_1 + b_2)} + \frac{h_{u1}}{b_{u1}} = 0,66 + \frac{2 \cdot 13,4}{3(6,0 + 4,0)} + \frac{0,5}{2,5} = 1,47.$$

Формулы для пазов других конфигураций приведены в [1, 2].

63. Проводимости лобовых частей статора для однослойной и двухслойной обмотки

$$\lambda_{n1} = 0,34 \frac{q}{l_1} (l_n - 0,64\tau\beta) = 0,34 \frac{2}{78} (94,3 - 0,64 \cdot 46,1 \cdot 1) = 0,56.$$

64. Проводимость дифференциального рассеяния

$$\lambda_{o1} = \frac{t_1 \cdot k_0^2}{1,1 \cdot k_q \delta \cdot k_\delta} \xi_\beta = \frac{7,7 \cdot 0,966^2}{1,1 \cdot 10,3 \cdot 0,25 \cdot 1,28} 1,153 = 2,19,$$

где  $\xi_\beta = 1 + 0,9(q-1)|\beta - 0,83| = 1 + 0,9(2-1)|1 - 0,83| = 1,153$ ;

$$k_q = 10,5 - 0,2(q-1) = 10,5 - 0,2 \cdot (2-1) = 10,3.$$

65. Суммарная проводимость статора

$$\sum \lambda_1 = \lambda_{n1} + \lambda_{n1} + \lambda_{o1} = 1,47 + 0,56 + 2,19 = 4,22.$$

66. Индуктивное сопротивление обмотки статора

$$X_1 = 4\pi \cdot f \mu_0 W_1^2 \frac{l_1 10^{-3}}{pq_1} \sum \lambda_1 = 1,58 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \cdot 492^2 \frac{78}{3 \cdot 2} 4,22 = 10,5 \text{ Ом}.$$

Относительное значение

$$X_{1*} = X_1 / Z = 10,5 / 101,85 = 0,103.$$

67. Проводимость паза ротора

$$\lambda_{n2} = 0,66 + \frac{2h_1}{3(d_1 + d_2)} + \frac{h_{w2}}{b_{w2}} = 0,66 + \frac{2 \cdot 11,6}{3(4,3 + 1,7)} + \frac{0,5}{1} = 1,88.$$

68. Проводимость лобовых частей ротора

$$\lambda_{l2} = \frac{D_k}{Z_2 l \Delta^2} \ln \frac{4,7 D_k}{h_k + 2l_k} = \frac{70,1}{28 \cdot 78 \cdot 0,66^2} \ln \frac{4,7 \cdot 70,1}{17,4 + 2 \cdot 4,5} = 0,16,$$

где  $D_k$  – по п. 59;  $\Delta$  – по п. 48.

69. Дифференциальное рассеяние ротора.

Для к. з. ротора принимаем  $\zeta_\beta = 1$ ,  $k_0 = 1$ ,  $q_2 = 1$ .

$$k_q = 10,5 - 0,2 \cdot (q_2 - 1) = 10,4;$$

$$\lambda_{o2} = \frac{t_2}{1,1 k_q \delta \cdot k_\delta} \xi = \frac{9,8}{1,1 \cdot 10,4 \cdot 0,25 \cdot 1,28} = 2,56.$$

70. Проводимость рассеяния скоса пазов ротора (при скосе на 1 зубцовое деление статора при  $\beta = 1$ )

$$\beta_{ск} = \beta \frac{t_1}{t_2} = 1 \frac{7,7}{9,8} = 0,786;$$

$$\lambda_{ск} = t_2 \cdot \beta_{ск}^2 / (9,5 \cdot \delta \cdot k_\delta \cdot k_\mu) = 9,8 \cdot 0,786^2 / (9,5 \cdot 0,25 \cdot 1,28 \cdot 1,29) = 1,55.$$

Отметим, что в АД с  $h > 160$  мм скос пазов не делают.

71. Суммарная проводимость рассеяния ротора

$$\sum \lambda_2 = \lambda_{n2} + \lambda_{l2} + \lambda_{o2} + \lambda_{ск} = 1,88 + 0,16 + 2,56 + 1,55 = 6,15.$$

72. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора

$$X_2 = 7,9 \cdot 10^{-9} \cdot f \cdot l_2 \sum \lambda_2 = 7,9 \cdot 10^{-9} \cdot 50 \cdot 78 \cdot 6,15 = 1,89 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

73. Приведенное к статорной обмотке индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора

$$X'_2 = X_2 \frac{4m_1 (W_1 k_0)^2}{Z_2} = 1,89 \cdot 10^{-4} \frac{4 \cdot 3 (492 \cdot 0,966)^2}{28} = 18,35 \text{ Ом.}$$

Относительное значение

$$x'_{2*} = x'_2 / Z = 18,35 / 101,85 = 0,18.$$

74. Параметры намагничивающего контура и сопротивление короткого замыкания

$$C_1 = 1 + X_1 / X_m = 1 + 10,5 / 167,9 = 1,062;$$

$$X_m = U_1 / I_\mu = 220 / 1,31 = 167,9 \text{ Ом;}$$

$$X_\kappa = C_1 X_1 + C_1^2 \cdot X'_2 = 1,062 \cdot 10,5 + 1,062^2 \cdot 18,35 = 31,85 \text{ Ом.}$$

Относительное значение  $x_{m*} = x_m / Z = 167,9 / 101,85 = 1,65$ .

Для оценки правильности расчетов необходимо сравнить полученные значения со среднестатистическими данными (большие значения соответствуют машинам меньших мощностей)

$$r_{1*} = r_1 / z = 0,02 \div 0,2; r'_{2*} = r'_2 / z = 0,02 \div 0,2; x_{1*} = x_1 / z = 0,05 \div 0,14;$$

$$x'_{2*} = x'_2 / z = 0,1 \div 0,2; x_{m*} = x_m / z = 1,2 \div 4; r_{m*} = r_m / Z = 0,05 \div 0,2.$$

Сравнение показывает, что параметры спроектированной машины лежат в допустимых пределах.

### в) Расчет потерь, КПД и тока холостого хода.

Потери в АД подразделяют на потери в стали (основные и добавочные), электрические потери в обмотках статора и ротора, механические и добавочные. При изменении нагрузки машины отдельные виды потерь изменяются по-разному: электрические потери  $P_\Sigma$  в обмотках статора и ротора, а также добавочные потери  $P_{доб}$  изменяются пропорционально квадрату тока нагрузки. Механические  $P_{мех}$  и магнитные  $P_\sigma$

потери в стали остаются практически постоянными – такими же, как при холостом ходе.

75. Основные потери в стали рассчитывают только в магнитопроводе статора, так как частота перемагничивания ротора пропорциональна скольжению  $f_2 = s \cdot f_1$  и, соответственно, в рабочих режимах очень мала.

Поэтому потери в стали ротора можно не учитывать. Тогда:

Потери в стали зубцов статора по (3.77)

$$P_{z1} = k_{gz} \rho_{1,0/50} \cdot (f/50)^\beta \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1} = \\ = 1,8 \cdot 2,6 \cdot 1^{1,5} \cdot 1,7^2 \cdot 1,24 = 16,8 \text{ Вт.}$$

Потери в стали спинки статора по (3.78)

$$P_{c1} = k_{gc} \rho_{1,0/50} \cdot (f/50)^\beta \cdot B_{c1}^2 \cdot m_{c1} = \\ = 1,6 \cdot 2,6 \cdot 1^{1,5} \cdot 1,6^2 \cdot 1,85 = 19,7 \text{ Вт,}$$

где  $\rho_{1,0/50}$  и  $\beta = 1,3 \div 1,5$  – удельные потери и коэффициент, зависящие от марки стали;

$k_{gz}$  и  $k_{gc}$  – технологические коэффициенты увеличения потерь, которые для машин мощностью  $P_{2н} < 250$  кВт можно принять равными  $k_{gz} = 1,8$  и  $k_{gc} = 1,6$ , а при  $P_{2н} > 250$  кВт  $k_{gz} = 1,4$  и  $k_{gc} = 1,7$ ;

$m_{z1}$  и  $m_{c1}$  – масса зубцов и спинки статора

$$m_{z1} = \left\{ \frac{\pi}{4} \left[ (D + 2h_{n1})^2 - D^2 \right] - Z_1 S_n \right\} l_1 k_c \rho 10^{-6} = \\ = \left\{ \frac{\pi}{4} \left[ (88 + 2 \cdot 13,4)^2 - 88^2 \right] - 36 \cdot 59,23 \right\} 78 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6} = 1,24 \text{ кг.}$$

$$m_{c1} = \pi \cdot (D_1 - h_{c1}) \cdot h_{c1} \cdot l_1 \cdot k_c \cdot \rho \cdot 10^{-6} = \\ = \pi \cdot (131 - 8,1) \cdot 8,1 \cdot 78 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6} = 1,85 \text{ кг,}$$

где  $S_n$  – по (3.25),  $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$  – удельный вес стали.

Основные потери в стали

$$P_c = P_{z1} + P_{c1} = 16,8 + 19,7 = 36,5 \text{ Вт.}$$

Добавочные потери в стали (поверхностные потери в коронках зубцов статора и ротора и пульсационные потери в теле этих зубцов)

$$P_{c,d} = P_{z1} 2,5 \sqrt{0,1 t_1 (k_\delta - 1)^3} = 16,8 \cdot 2,5 \sqrt{0,1 \cdot 7,7 (1,28 - 1)^3} = 5,5 \text{ Вт.}$$

Полные потери в стали

$$P_{cm} = P_c + P_{c,d} = 36,5 + 5,5 = 42 \text{ Вт.}$$

76. Электрические потери холостого хода

$$P_{\text{Э10}} = 3 \cdot I_\mu^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 1,31^2 \cdot 11,95 = 61,5 \text{ Вт.}$$

77. Механические потери (в подшипниках и вентиляционные) по (3.85)

$$P_{\text{мех}} = k_m (6 \cdot n)^2 (D_1/1000)^4 = 1,13 \cdot (6 \cdot 16,67)^2 (131/1000)^4 = 3,5 \text{ Вт,}$$

где  $k_m = 1$  для  $2p = 2$ ;

$k_m = 1,3 \cdot (1 - D_n / 1000)$  для  $2p \geq 4$ .

78. Активная составляющая тока холостого хода по (3.86)

$$I_{oa} = \frac{P_{cm} + P_{\text{мех}} + P_{\text{Э10}}}{3U} = \frac{42 + 3,5 + 61,5}{3 \cdot 220} = 0,16 \text{ А.}$$

79. Ток и коэффициент мощности холостого хода

$$I_o = \sqrt{I_{oa}^2 + I_\mu^2} = \sqrt{0,16^2 + 1,31^2} = 1,32 \text{ А;}$$

$$\cos \phi_{xx} = \frac{I_{oa}}{I_o} = \frac{0,16}{1,32} = 0,121.$$

80. Активное сопротивление намагничивающего контура

$$r_m = P_{cm} / (m_1 I_\mu^2) = 42 / (3 \times 1,31^2) = 8,16 \text{ Ом.}$$



$$r_{m*} = r_m / Z = 8,16 / 101,85 = 0,08.$$

Полученная величина удовлетворяет усредненным данным (см. п. 74).

#### г) Расчет рабочих характеристик.

Рабочими характеристиками называются зависимости частоты вращения  $n_2$  (или скольжения  $S$ ), полезного момента на валу  $M_2$ , тока в фазе статора  $I_1$ , КПД  $\eta$  и  $\cos\varphi_1$  от полезной мощности  $P_2$  при  $U_1 = \text{const}$  и  $f_1 = \text{const}$ . Характеристики строятся для зоны практически устойчивой работы двигателя, т. е. до скольжений  $(1,1 \div 1,2) S_H$ .

81. Расчет рабочих характеристик производится по Г-образной схеме замещения (рис. 13). Характеристики рассчитываем в функции скольжения, а кривые строим от  $P_2$ . Для расчета необходимы следующие исходные данные

$$U_1 = 220 \text{ В}, C_1 = 1,062, r_1 = 11,95 \text{ Ом}, r'_2 = 8,97 \text{ Ом}, X_k = 31,85 \text{ Ом}, \\ I_{oa} = 0,16 \text{ А}, I_{op} = I_\mu = 1,31 \text{ А}, P_{cm} + P_{mex} = 45,5 \text{ Вт}.$$

Вычисляем ориентировочное значение номинального скольжения

$$S'_H \approx r'_2 I_{1H} / U_1 \approx 0,088.$$

В основу метода расчета рабочих характеристик положена Г-образная схема замещения. Формулы для расчета приведены в табл. 12. Расчет проводят, задаваясь произвольными значениями скольжения в диапазоне скольжений  $S = (0,2 \div 1,5) \cdot S'_H$ . По результатам расчета строят кривые рабочих характеристик и определяют номинальные данные, которые надо сравнить с исходным заданием. В случае их несовпадения производят пересчет двигателя, изменив при этом его геометрические размеры и обмоточные данные. Следует отметить, что ГОСТ 183-74 допускает снижение  $\cos\varphi$  на 0,02 при условии, что произведение  $(\eta \cdot \cos\varphi)_{\text{расч}} \geq (\eta \cdot \cos\varphi)$  заданного.

Порядок расчета рабочих характеристик

Наименование показателя	Формулы
1. Активное сопротивление	$R = C_1 r_1 + C_1^2 r'_2 / S$
2. Полное сопротивление	$Z = \sqrt{R^2 + X_k^2}$
3. Дважды приведенный ток ротора	$I_2'' = U / Z$
4. Приведенный ток ротора	$I_2' = C_1 I_2''$
5. Активный ток статора	$I_{1a} = I_{oa} + I_2'' R / Z$
6. Реактивный ток статора	$I_{1p} = I_{op} + I_2'' X_k / Z$ , где $I_{op} = I_\mu$
7. Полный ток статора	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$
8. Коэффициент мощности	$\cos\varphi = I_{1a} / I_1$
9. Потребляемая мощность	$P_1 = m_1 U_1 I_{1a}$
10. Электрические потери ротора	$P_{\Sigma 2} = m_1 I_2'^2 r'_2$
11. Электрические потери статора	$P_{\Sigma 1} = m_1 I_1^2 r_1$
12. Добавочные потери при нагрузке	$P_{\text{доб}} = 0,005 P_1$
13. Суммарные потери	$\Sigma p = P_{cm} + P_{mex} + P_{\Sigma 2} + P_{\Sigma 1} + P_{\text{доб}}$
14. Полезная мощность	$P_2 = P_1 - \Sigma p$
15. К.п.д.	$\eta = P_2 / P_1$

Расчет выполняется с помощью компьютера в табличном редакторе Excel. Результаты расчета рабочих характеристик приведены в табл. 13. По этим результатам строим кривые рабочих характеристик, которые показаны на рис. 15.

Таблица 13

Результаты расчета рабочих характеристик

$S$	$R$	$Z$	$I''_2$	$I'_2$	$I_{1a}$	$I_{1p}$	$I_1$	$\cos \varphi$
0							1,31973	0,109
0,01	1024,4	1024,9	0,21	0,23	0,37	1,32	1,37	0,274
0,02	518,5	519,5	0,42	0,45	0,58	1,34	1,46	0,400
0,03	349,9	351,4	0,63	0,66	0,78	1,37	1,58	0,497
0,04	265,6	267,5	0,82	0,87	0,98	1,41	1,71	0,570
0,05	215,0	217,4	1,01	1,07	1,16	1,46	1,86	0,623
0,06	181,3	184,1	1,20	1,27	1,34	1,52	2,02	0,661
0,07	157,2	160,4	1,37	1,46	1,50	1,58	2,18	0,689
0,0755	146,7	150,1	1,47	1,56	1,59	1,62	2,27	0,701
0,09	125,1	129,1	1,70	1,81	1,81	1,73	2,51	0,723

$S$	$P_1$	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{доб}$	$P_{сум}$	$P_2$	КПД	$S, \%$
0	105,6					0	0	0
0,01	247	67,2	1,4	1,2	115,3	131,9	0,534	1
0,02	385	76,2	5,4	1,9	129,0	255,5	0,665	2
0,03	517	89,0	11,9	2,6	149,0	368,2	0,712	3
0,04	645	105,3	20,5	3,2	174,5	470,0	0,729	4
0,05	766	124,6	31,1	3,8	205,0	561,4	0,733	5
0,06	882	146,6	43,4	4,4	239,8	642,7	0,728	6
0,07	993	170,9	57,1	5,0	278,4	714,3	0,720	7
0,0755	1051	185,1	65,2	5,3	301,1	750,0	0,714	7,55
0,09	1196	225,0	88,1	6,0	364,6	831,0	0,695	9

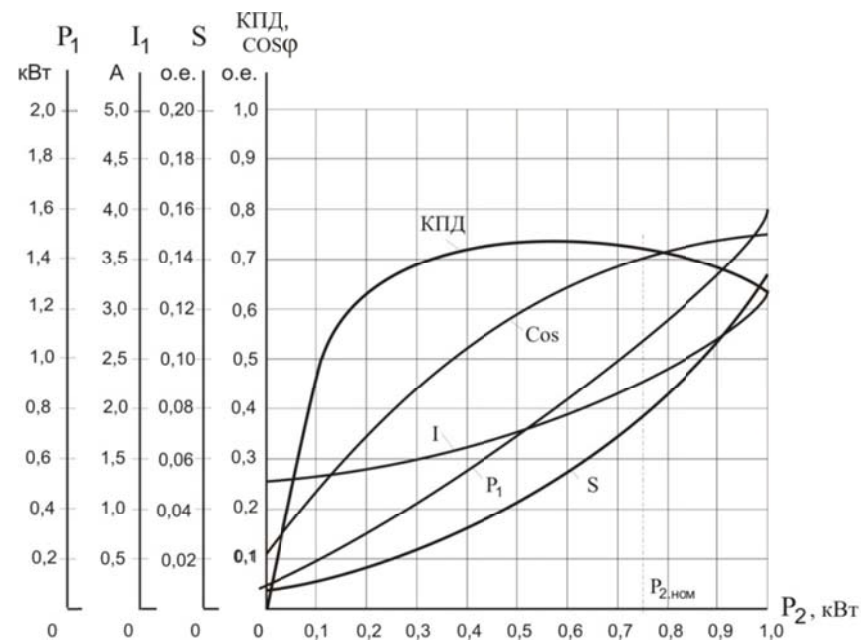


Рис. 15. Рабочие характеристики

По результатам расчета определяем **расчетные номинальные данные**:

- полезная мощность на валу  $P_2 = 750$  Вт;
- коэффициент полезного действия  $\eta = 0,714$ ;
- коэффициент мощности  $\cos \varphi = 0,701$ ;
- скольжение  $S = 0,0755$ ;
- ток статора  $I_1 = 2,27$  А;
- ток ротора  $I'_2 = 1,56$  А.

Полученные данные удовлетворяют исходному техническому заданию.

д) **Расчет пусковых характеристик.** Пусковые характеристики – это зависимости момента  $M$  и тока статора  $I_1$  от скольжения для всего диапазона изменения скольжения от  $S = 1$  до  $S = S_n$ . Расчет пусковых характеристик производится также аналитическим способом по Г-образной схеме замещения аналогично расчету рабочих характеристик в диапазоне от  $S = 1$  до критического скольжения  $S_{кр}$ . При расчете пусковых характеристик необходимо учитывать два явления – вытеснение тока

в пазах к.з. обмотки ротора и насыщение путей потоков рассеяния в зубцах статора и ротора. Вследствие вытеснения тока увеличивается  $r'_2$  и уменьшается  $X'_2$ , а вследствие насыщения уменьшаются  $X_1$  и  $X'_2$ . Последовательность расчета и формулы приведены в табл. 14.

Таблица 14

Порядок расчета пусковых характеристик

Наименование показателя	Формулы
<b>Учет вытеснения</b>	
1. Приведенная высота стержня	$\xi = 0,065 h_{n2} \sqrt{S}$
2. Коэффициент вытеснения	$K_r = \xi \frac{\text{sh } 2\xi + \sin 2\xi}{\text{ch } 2\xi - \cos 2\xi}$
3. Коэффициент демпфирования	$K_d = \frac{3 \text{ sh } 2\xi - \sin 2\xi}{2\xi \text{ ch } 2\xi - \cos 2\xi}$
4. Высота стержня при вытеснении	$h_r = h_{n2} / K_r$
5. Сечение стержня	$q_c = \frac{\pi}{8} (d_1^2 + d_2^2) + \frac{d_1 + d_2}{2} h_1$
6. Ширина стержня при вытеснении	$b_r = d_2 - \frac{d_2 - d_1}{h_1} \left( h_r - \frac{d_2}{2} \right)$
7. Сечение стержня при вытеснении	$q_r = \frac{\pi d_2^2}{8} + \frac{d_2 + b_r}{2} \left( h_r - \frac{d_2}{2} \right)$
8. Коэффициент изменения активного сопротивления	$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} \left( \frac{q_c}{q_r} - 1 \right)$
9. Приведенное активное сопротивление ротора при вытеснении	$r'_{2\sigma} = K_R \cdot r'_2$
10. Проводимость паза при вытеснении	$\lambda_{\Pi 2\sigma} = \lambda_{\Pi 2} K_d + h_{u2} (1 - K_d) / b_{u2}$

Продолжение табл. 14

Наименование показателя	Формулы
<b>Учет вытеснения</b>	
11. Коэффициент изменения индуктивного сопротивления	$K_X = 1 - \frac{\lambda_{\Pi 2} - \lambda_{\Pi 2\sigma}}{\sum \lambda_2}$
12. Индуктивное сопротивление при вытеснении	$X'_{2\sigma} = K_X X'_2$
13. Активное сопротивление короткого замыкания	$r_{кз} = r_1 + C_1 r'_{2\sigma} / S$
14. Индуктивное сопротивление короткого замыкания	$X_{кз} = X_1 + C_1 X'_{2\sigma}$
15. Полное сопротивление короткого замыкания	$Z_{кз} = \sqrt{r_{кз}^2 + X_{кз}^2}$
16. Приведенный ток ротора	$I'_{2\sigma} = U_1 / Z_{кз}$
17. Ток статора	$I_{1\sigma} = I'_{2\sigma} \sqrt{r_{кз}^2 + (x_{кз} + x_m)^2} / C_1 x_m$
<b>Учет насыщения</b> (для каждого значения $S$ выбираем свое значение коэффициента насыщения $k_n = I_{1n} / I_1$ )	
18. Индукция в коронках зубцов	$B = \frac{0,7 k_n I_1 N_n (0,25 + 0,75 \beta + k_0 Z_1 / Z_2)}{a_1 1600 \delta \cdot (0,64 + 2,5 \sqrt{\delta / (t_1 + t_2)})}$
19. Изменение ширины шлица статора	$C_s = 0,08 B (t_1 - b_{u1})$
20. Изменение проводимости паза статора	$\Delta \lambda_{\Pi 1H} = \frac{h_{u1}}{b_{u1}} \frac{C_s}{C_s + 1,5 b_{u1}}$
21. Проводимость паза статора	$\lambda_{\Pi 1H} = \lambda_{\Pi 1} - \Delta \lambda_{\Pi 1H}$
22. Проводимость дифференциального рассеяния	$\lambda_{g1H} = \lambda_{g1} (1 - 0,08 B)$

Наименование показателя	Формулы
<b>Учет насыщения</b> (для каждого значения $S$ выбираем свое значение коэффициента насыщения $k_n = I_{1н} / I_1$ )	
23. Индуктивное сопротивление статора	$X_{1н} = X_1 (\lambda_{П1н} + \lambda_{г1н} + \lambda_n) / \sum \lambda_1$
24. Изменение ширины шлица ротора	$C_R = 0,08B(t_2 - b_{u2})$
25. Изменение проводимости паза ротора	$\Delta\lambda_{П2н} = \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \cdot \frac{C_R}{b_{u2} + C_R}$
26. Проводимость паза ротора	$\lambda_{2П6н} = \lambda_{П26} - \Delta\lambda_{П2н}$
27. Проводимость дифференциального рассеяния ротора	$\lambda_{o2н} = \lambda_{o2} (1 - 0,08B)$
28. Индуктивное сопротивление ротора с учетом вытеснения и насыщения	$X_{26н} = X'_{26н} (\lambda_{П26н} + \lambda_{o2н} + \lambda_{r2}) / \sum \lambda_2$
29. Индуктивное сопротивление короткого замыкания с учетом вытеснения и насыщения	$X_{квн} = X_{1н} + X_{26н}$
30. Полное сопротивление короткого замыкания с учетом вытеснения и насыщения	$Z_{квн} = \sqrt{R_{кв}^2 + X_{квн}^2}$
31. Приведенный ток ротора	$I'_{26н} = U_1 / Z_{квн}$
32. Ток статора	$I_{1н} = \frac{I'_{26н}}{C_1 X_m} \sqrt{r_{кв}^2 + (x_{квн} + x_m)^2}$

Наименование показателя	Формулы
<b>Учет насыщения</b> (для каждого значения $S$ выбираем свое значение коэффициента насыщения $k_n = I_{1н} / I_1$ )	
33. Кратность тока	$K_I = I_{1н} / I_{ном}$
34. Кратность момента	$K_M = \left( \frac{I'_{26н}}{I'_{2ном}} \right)^2 \cdot K_R \frac{S_H}{S}$

Сначала рассчитываем пусковые токи при  $S = 1$  без учета насыщения. Затем задаемся коэффициентом насыщения  $k_n$  и для токов  $I_{1нас} = k_n \cdot I_1$  и  $I'_{2нас} = k_n \cdot I'_2$  рассчитываем токи  $I_{16н}$  и  $I'_{26н}$ , при этом расхождение между токами  $I_{1нас}$  и  $I_{16н}$ , а также между  $I'_{2нас}$  и  $I'_{26н}$  должно быть не более 10÷15 %, в противном случае необходимо изменить  $k_n$  и повторить расчет. При  $S = 1$  величина  $k_n = 1,2 \div 1,4$ . Для уменьшения объема вычислений других точек характеристик определяют приближенное значение критического скольжения

$$S_{кр} \approx r'_2 / (X_1 / C_1 + X'_2) = 8,97 / (10,5 / 1,062 + 18,35) = 0,32.$$

Для  $S_{кр}$  принимают  $k_n = 1,05 \div 1,2$ . Для определения  $k_n$  принимают, что его изменение в диапазоне от  $S = 1$  до  $S = S_{кр}$  происходит по линейному закону. При расчете  $k_r$  и  $k_d$  (пп. 2 и 3 табл. 14) гиперболические функции равны

$$\operatorname{sh} 2\xi = \frac{e^{2\xi} - e^{-2\xi}}{2}; \quad \operatorname{ch} 2\xi = \frac{e^{2\xi} + e^{-2\xi}}{2},$$

где  $e = 2,718$ .

Иходные данные (берутся из расчета рабочих характеристик) приведены в табл. 15, а результаты расчета пусковых характеристик – в табл. 16 и на рис. 16.

Таблица 15

Исходные данные для расчета пусковых характеристик

$U_1$	$I_{1ном}$	$S_{ном}$	$I'_{2ном}$	$h_{н2}$	$d_1$	$d_2$	$h_1$	$r'_c$	$r'_2$	$\lambda_{н2}$	$h_{ш2}$
220	2,27	0,0755	1,56	15,1	1,7	4,3	11,6	7,13	8,97	1,88	0,5
$b_{ш2}$	$\Sigma\lambda_2$	$X'_2$	$R_1$	$C_1$	$X_1$	$X_m$	$N_n$	$\beta$	$k_o$	$Z_1$	$Z_2$
1	6,15	18,35	11,95	1,062	10,5	167,9	82	1	0,966	36	28
$a_1$	$t_1$	$t_2$	$\delta$	$b_{ш1}$	$h_{ш1}$	$\lambda_{н1}$	$\lambda_{a_{г1}}$	$\lambda_{л1}$	$\Sigma\lambda_1$	$\lambda_{г2}$	$\lambda_{н2}$
1	7,7	9,8	0,25	2,5	0,5	1,47	2,19	0,56	4,22	2,56	0,16

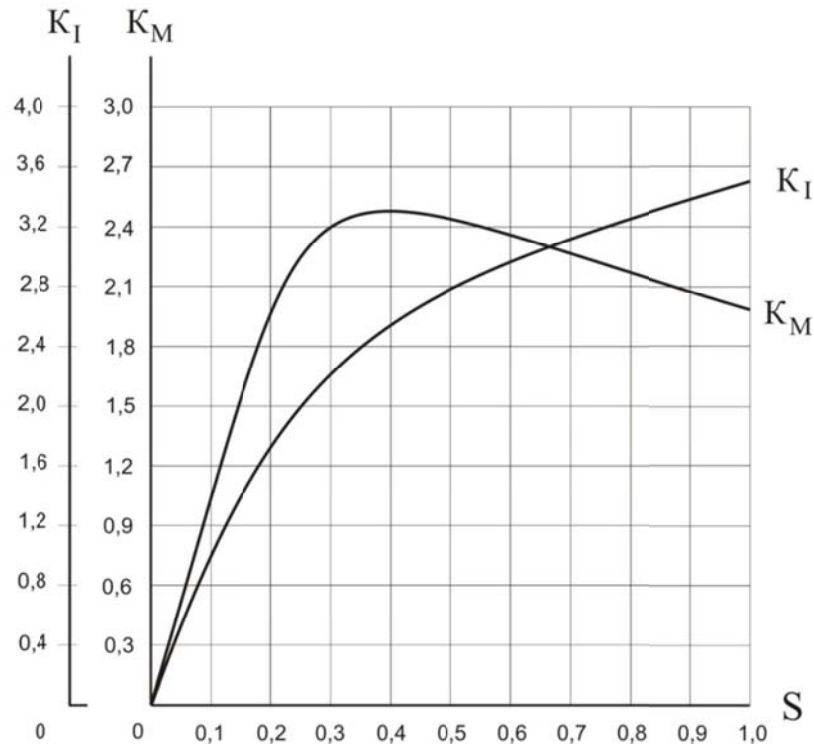


Рис. 16. Пусковые характеристики

Таблица 16

Результаты расчета пусковых характеристик

Учет вытеснения

$S$	$e$	$2e$	$K_r$	$K_d$	$h_r$	$q_c$	$b_r$	$q_r$	$K_R$
0	0,000	0,000							
0,1	0,310	0,621	1,001	1,000	15,09	43,20	1,40	43,20	1,000
0,2	0,439	0,878	1,003	0,999	15,05	43,20	1,41	43,20	1,000
0,3	0,538	1,075	1,007	0,998	14,99	43,20	1,42	43,20	1,000
0,4	0,621	1,242	1,013	0,996	14,90	43,20	1,44	43,20	1,000
0,5	0,694	1,388	1,020	0,994	14,80	43,20	1,47	43,20	1,000
0,6	0,760	1,521	1,029	0,992	14,67	43,20	1,49	43,20	1,000
0,7	0,821	1,642	1,040	0,989	14,52	43,20	1,53	43,20	1,000
0,8	0,878	1,756	1,052	0,985	14,36	43,20	1,56	43,20	1,000
0,9	0,931	1,862	1,065	0,981	14,18	43,20	1,60	43,20	1,000
1	0,982	1,963	1,080	0,977	13,99	43,20	1,65	43,20	1,000

Учет вытеснения

$S$	$r'_{2с}$	$\lambda_{н2с}$	$K_x$	$X'_{2с}$	$r_{кв}$	$X_{кв}$	$Z_{кв}$	$I'_2$
0								
0,1	8,97	1,88	1,000	18,35	107,21	29,99	111,33	1,98
0,2	8,97	1,88	1,000	18,35	59,58	29,98	66,70	3,30
0,3	8,97	1,88	1,000	18,34	43,70	29,98	53,00	4,15
0,4	8,97	1,87	0,999	18,33	35,77	29,97	46,66	4,71
0,5	8,97	1,87	0,999	18,33	31,00	29,96	43,11	5,10
0,6	8,97	1,87	0,998	18,32	27,83	29,95	40,88	5,38
0,7	8,97	1,86	0,997	18,30	25,56	29,94	39,36	5,59
0,8	8,97	1,86	0,997	18,29	23,86	29,92	38,27	5,75
0,9	8,97	1,85	0,996	18,27	22,53	29,91	37,45	5,88
1	8,97	1,85	0,995	18,26	21,48	29,89	36,80	5,98

Продолжение табл. 16

Учет насыщения

$I_1$	$K_n$	$B$	$C_s$	$\Delta \lambda_{n1n}$	$\lambda_{n1n}$	$\lambda_{a \text{ г} 1n}$	$X_{1n}$	$C_R$	$\Delta \lambda_{n2n}$
2,49	1	0,85	0,36	0,017	1,453	2,040	10,084	0,602	0,188
3,82	1,03	1,35	0,56	0,026	1,444	1,954	9,847	0,950	0,244
4,72	1,06	1,71	0,71	0,032	1,438	1,890	9,673	1,206	0,273
5,32	1,08	1,97	0,82	0,036	1,434	1,845	9,553	1,385	0,290
5,73	1,1	2,16	0,90	0,039	1,431	1,811	9,462	1,521	0,302
6,03	1,12	2,31	0,96	0,041	1,429	1,785	9,389	1,629	0,310
6,25	1,14	2,44	1,02	0,043	1,427	1,762	9,329	1,720	0,316
6,42	1,17	2,58	1,07	0,044	1,426	1,739	9,267	1,813	0,322
6,56	1,19	2,68	1,11	0,046	1,424	1,721	9,220	1,883	0,327
6,67	1,21	2,77	1,15	0,047	1,423	1,705	9,178	1,947	0,330

Учет насыщения

$I_1$	$\lambda_{n2n}$	$\lambda_{a \text{ г} 2n}$	$X_{2n}$	$X_{квн}$	$Z_{квн}$	$\Gamma'_{2нн}$	$I_{1нн}$	$K_I$	$K_M$
								0	0
2,49	1,69	2,38	12,64	22,73	109,59	2,01	2,46	1,08	1,45
3,82	1,64	2,28	12,17	22,01	63,52	3,46	3,87	1,70	2,15
4,72	1,60	2,21	11,85	21,52	48,72	4,52	4,92	2,17	2,44
5,32	1,58	2,16	11,63	21,18	41,57	5,29	5,71	2,52	2,51
5,73	1,57	2,12	11,47	20,93	37,40	5,88	6,31	2,78	2,48
6,03	1,56	2,09	11,33	20,72	34,69	6,34	6,78	2,99	2,41
6,25	1,55	2,06	11,21	20,54	32,79	6,71	7,16	3,15	2,31
6,42	1,54	2,03	11,09	20,36	31,36	7,01	7,47	3,29	2,21
6,56	1,53	2,01	10,99	20,21	30,27	7,27	7,72	3,40	2,11
6,67	1,52	1,99	10,90	20,08	29,40	7,48	7,94	3,50	2,01

Полученный в расчете коэффициент насыщения при  $S = 1$ , равный  $k_n = I_{1нн} / I_1$ , необходимо сравнить с ранее выбранным  $k_n$  (см. п. 9). Их расхождение не должно составлять более  $\pm 5\%$ .

Определяем пусковые свойства и перегрузочную способность спроектированного электродвигателя:

- кратность пускового момента  $K_M = M_n / M_n = 2,01$ ;
- кратность пускового тока  $K_I = I_n / I_{1н} = 3,5$ ;
- перегрузочная способность  $K_{пер.} = M_{макс} / M_n = 2,51$ .

Таким образом видно, что полученные параметры режима пуска удовлетворяют исходному техническому заданию.

Сравнение полученных в результате электромагнитного расчета параметров с заданными по техническому заданию приведено в табл. 17.

Таблица 17

Сравнение расчетных и заданных параметров

Наименование параметра	Значение параметра	
	по заданию	по расчету
1. Полезная мощность, кВт	0,75	0,75
2. КПД	0,7	0,714
3. Коэффициент мощности $\cos\varphi$	0,74	0,701
4. Кратность пускового момента $K_n = M_n / M_n$ , не менее	2,0	2,01
5. Кратность максимального момента $K_n = M_m / M_n$ , не менее	2,2	2,51
6. Кратность пускового тока $I_n / I_{1н}$ , не более	4,0	3,5

Видно, что спроектированный электродвигатель удовлетворяет исходным данным (расхождение расчетных и заданных параметров лежат в допустимых пределах).

#### 4. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ

При разработке конструкции за основу рекомендуется взять заводской чертеж аналогичного по исполнению и мощности двигателя. Последовательность выполнения чертежа следующая. Сначала вычерчиваются активные части АД: изображается сердечник ротора (откладываются внутренний диаметр  $d_r$ , внешний диаметр  $D_2$  и длина  $l_2$ ), сердечник статора (внутренний диаметр  $D$ , внешний диаметр  $D_1$  и длина  $l_1$ )

и затем изображаются лобовые части обмоток статора. Для ротора изображаются к. з. кольца (шириной  $l_k$  и высотой  $h_k$ ) и вентиляционные лопатки. Длину вентиляционной лопаткой  $l_{лон}$  принимают  $l_{лон} < l_{выл.л}$ , а число лопаток – в 2÷3 раза меньше  $Z_2$ .

После этого вычерчивают станину, подшипниковые щиты и вентилятор. Размеры станины вычисляются следующим образом:

1. Средняя толщина стенки станины

$$h_{стан} = 2,5 + 0,025h = 2,5 + 0,05 \cdot 80 = 4,5 \text{ мм},$$

где  $h$  – высота оси вращения двигателя, мм.

2. Наружный диаметр станины

$$D_{стан} = D_1 + 2h_{стан} = 131 + 2 \cdot 4,5 = 140 \text{ мм}.$$

3. Длина станины

$$L_{стан} = L_1 + (1,5 \div 2,0)L_{выл.л} = 78 + 2 \cdot 36 = 150 \text{ мм}.$$

4. Число ребер  $N_p$

$$N_p \approx 6,4 \sqrt[3]{h} = 6,4 \sqrt[3]{80} \approx 24 \text{ шт.}$$

Полученное значение числа ребер  $N_p$  необходимо округлить до целого значения, кратного четырем.

5. Длина ребра  $L_p$  равна

$$L_p \approx L_{стан} - (5 \div 10) \text{ мм} = 150 - 6 = 144 \text{ мм}.$$

6. Высота ребра  $h_p$

$$h_p = (0,15 \div 0,25)h = 0,25 \cdot 80 = 20 \text{ мм}.$$

7. Средняя толщина ребра  $b_p$

$$b_p = (b_{pв} + b_{pо}) / 2 = (3 + 5) / 2 = 4 \text{ мм},$$

где  $b_{pв}$  и  $b_{pо}$  – ширина верхней части и основания ребра:

$$b_{pв} = 2r_p = 2 \cdot 1,5 = 3 \text{ мм};$$

$$b_{pо} = b_{pв} + 0,025h_p = 5 \text{ мм},$$

где  $r_p$  – радиус верхней части ребра:

$$r_p = 1,0 \text{ мм при } h = 56 \text{ и } 63 \text{ мм};$$

$$r_p = 1,5 \text{ мм при } h = 71 \div 132 \text{ мм};$$

$$r_p = 2,5 \text{ мм при } h = 160 \div 250 \text{ мм};$$

$$r_p = 3 \div 4,5 \text{ мм при } h > 250 \text{ мм}.$$

8. Минимально допустимое расстояние от нижней точки станины до опорной поверхности лап

$$h_{мин} \approx 3 + (0,015 \div 0,02)h = 3 + 0,0175 \cdot 80 = 4,4 \text{ мм}.$$

*Подшипниковые щиты* предназначены для крепления подшипников; закрепления и координации ротора в радиальном и аксиальном направлениях относительно корпуса и пакета статора; защиты внутренней полости электродвигателя от внешнего механического воздействия и попадания внутрь двигателя посторонних предметов, пыли и влаги; защиты персонала от прикосновения к токоведущим, нагретым и вращающимся частям машины; отвода тепла.

Подшипниковые щиты АД с высотами оси вращения 50÷80 мм выполняются из алюминиевого сплава. В таких щитах отверстия под подшипник армированы (укреплены) стальной втулкой. Подшипниковые щиты АД с высотами оси вращения 80÷250 мм выполнены из чугуна, щиты АД с высотами оси вращения 200 ÷ 250 мм имеют внутреннее оребрение. Подшипниковые щиты соединены со станией замковым соединением и крепятся к ней винтами.

В двигателях с высотами оси вращения 50–132 мм установлены шарикоподшипники типа 180000 с двусторонним уплотнением. Смазка, рассчитанная на весь срок службы, закладывается в них при изготовлении подшипника. Такие подшипники упрощают конструкцию машин и не требуют пополнения смазки в эксплуатации, что уменьшает трудозатраты на обслуживание двигателя. Подшипниковые крышки в этих двигателях отсутствуют. Двигатели больших высот оси вращения имеют подшипниковые узлы, обеспечивающие пополнение и частичную замену смазки без разборки АД и отсоединения его от приводимого механизма.

В АД с высотами оси вращения до 160 мм оба подшипника шариковые, с высотами оси вращения свыше 160 мм – роликовый со стороны привода и шариковый с противоположной стороны, защищенные наружными и внутренними крышками (рис. 17).

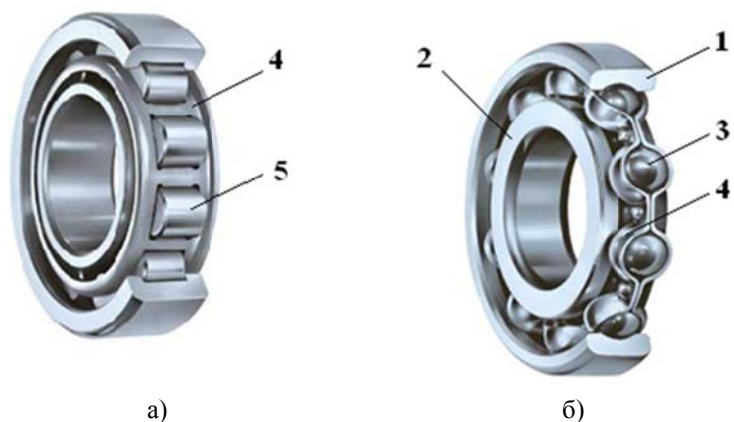


Рис. 17. Шариковый (а) и роликовый (б) подшипники качения.  
1, 2 – наружное и внутреннее кольца; 3 – шарик; 4 – сепаратор; 5 – ролик

Затем переходим к конструированию вала. Вал имеет ступенчатую форму. Отношение диаметров соседних ступеней не должно превышать 1,3. При этом размеры выходного конца вала (диаметр  $d_1$  и длины  $l_1$ ) должны соответствовать ГОСТ 18709-73 и ГОСТ 20839-75. Выбор указанных размеров вала рекомендуется осуществлять по табл. 11.

Поскольку подробный механический расчет всех деталей АД не проводился, то размеры отдельных конструктивных деталей и узлов принимаются приближенно на основе размерных соотношений чертежа, принятого за базу при конструировании. Установочные, габаритные и присоединительные размеры двигателя должны соответствовать ГОСТ.

Разрезы на чертежах следует располагать следующим образом. На продольном виде показывается разрез в верхней части чертежа от осевой линии. На разрезе должны быть показаны болты, крепящие подшипниковые щиты к станине и болты, крепящие крышки подшипников к подшипниковым щитам, а также конструкция и способ крепления сердечников, вентилятора, коробки выводов и т. п. Нижняя половина чертежа выполняется без разрезов и представляет собой вид на машину снаружи. На поперечном виде разрез выполняется справа от осевой линии через сердечники статора и ротора. На разрезе надо показать пазы статора и ротора.

На рис. 18а показан продольный разрез спроектированного электродвигателя, а на рис. 18б – его поперечный разрез.

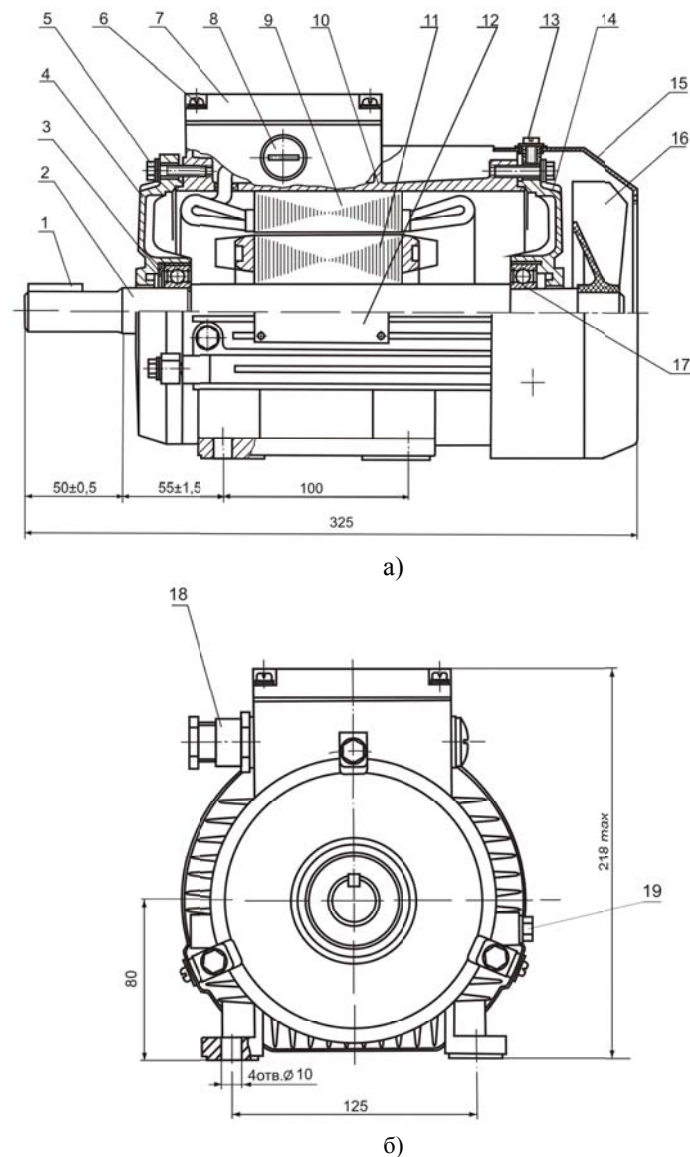


Рис. 18. Общий вид спроектированного электродвигателя



Статор 9 шихтован из холоднокатаной изотропной электротехнической стали марки 2013, листы оксидированы и скреплены в пакет сваркой по наружной поверхности. Паза изолирована лавсановой пленкой ПЭТФ и закрыта пазовыми крышками из такой же пленки. Концы обмотки статора выведены в коробку выводов через резиновую уплотнительную втулку.

Пакет статора с обмоткой запрессован в станину 10 из алюминиевого сплава АЛ9 ГОСТ 2685-75, которая может быть выполнена и из серого чугуна марок СЧ 12-28 и СЧ 15-32 ГОСТ 1412-70. Коробка выводов, охлаждающие ребра и лапы отлиты вместе со станиной в литейной форме, имеющие четыре радиальных разъема, при этом ребра в пределах каждой четверти окружности расположены параллельно друг другу. Предусмотрена возможность ввода кабеля в коробку выводов с левой или с правой стороны. Для этого штуцер 18 присоединяют к коробке выводов с нужной стороны, а свободное отверстие закрывают пробкой 8. Коробка выводов закрыта крышкой 7. Подшипниковые щиты 4 и 14, отлитые из алюминиевого сплава АЛ9, прикреплены к станине 10 болтами 5. Ступицы щитов для повышения прочности армированы стальными втулками и снабжены внутренними ребрами. Для центровки щитов относительно станины на них выполнены выточки, а на станине – заточки, которые образуют замковое соединение.

Ротор 10 короткозамкнутый имеет магнитопровод, шихтованный из электротехнической стали марки 2013 и литую обмотку из алюминия марки А5 ГОСТ 11069-74. Короткозамыкающие кольца отлиты вместе с вентиляционными лопатками, в кольцах выполнены канавки для крепления балансировочных грузов. Ротор напрессован на вал 2 без шпонки горячим способом. Вал опирается на два шариковых подшипника 17, вставленных в ступицу подшипниковых щитов. Подшипники снабжены двумя уплотнениями (серия 180000 ГОСТ 8882-75) и не нуждаются в пополнении смазки в течение всего срока службы. Между щитом 4 и торцом наружного кольца шарикоподшипника установлена пружинная шайба 3, выполненная в виде волнистого кольца из листовой стали. Перемещая наружное кольцо подшипника в осевом направлении, пружинная шайба выбирает зазор в подшипнике и прижимает с определенным усилием шарик к дорожке качения. Такое поджатие уменьшает шум подшипника, который возникает в результате ударов шариков о дорожку при наличии зазора и увеличивает его долговечность. Кроме того, пружинная шайба 2 компенсирует тепловое расширение вала, препятствуя тем самым заклиниванию подшипников в нагретой машине.

На выходном конце вала выполнен шпоночный паз, в который установлена шпонка 1. На вал посажен центробежный вентилятор 16 из

полипропилена. Вентилятор имеет прямые лопатки и закрыт пластмассовым кожухом 15, который крепится винтами 13 к подшипниковому щиту 14. Кожух 15 имеет входные отверстия прямоугольной формы, через которые при вращении ротора вентилятор засасывает воздух, который при помощи кожуха направляется вдоль ребер станины. Двигатель имеет паспортную табличку 12 и заземляющий болт 19.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании предлагаемой методики можно спроектировать двигатель, удовлетворяющий исходному заданию. После этого в обязательном порядке необходимо оценить работоспособность спроектированной машины. Для этого надо проверить нагрев обмотки статора как наиболее уязвимого в тепловом отношении узла АД, оценить эффективность охлаждения машины, а также проверить, удовлетворяет ли конструкция требованиям прочности и жесткости. Для этого необходимо выполнить тепловой, вентиляционный и механический расчеты.

Вопросы расчета охлаждения и нагрева машины являются одними из основных задач при ее проектировании. Необходимо так спроектировать машину в тепловом и вентиляционном отношении, чтобы она обеспечивала оптимальную температуру, определяемую используемым классом нагревостойкости изоляции при минимальном расходе материалов. При этом для повышения надежности работы машина должна обладать тепловым запасом на случай возможных перегрузок. Таким образом, вентиляционный и тепловой расчеты должны быть органически связаны с электромагнитным расчетом.

Нагрев машины однозначно зависит от эффективности ее охлаждения. В АД наибольшее распространение имеет принудительное охлаждение. Для этого двигатель снабжен вентилятором, который устанавливается или на валу машины, или вращается от постороннего привода. Задача расчета вентиляции заключается в определении количества воздуха, проходящего по отдельным вентиляционным каналам машины и в определении напора, обеспечивающего требуемое количество воздуха.

Работоспособность двигателя как механической системы определяется следующими факторами: допускарным прогибом вала; соотношением номинальной и критической частот вращения; допускарным напряжением, определяемым материалом вала; долговечностью подшипников при заданной нагрузке и частоте вращения. Поэтому для АД проводят соответствующие механические расчеты.

Однако все перечисленные расчеты по оценке работоспособности спроектированного АД выходят за рамки настоящего РГЗ. При этом

следует отметить, что, например, основные механические расчеты (расчет вала, подшипников, шпонок, болтов) были освоены в курсе «Прикладная механика».

В практическом электромашиностроении результаты расчета, аналогичного приведенному выше, принимаются только за основу для дальнейшей доводки, поскольку они дают лишь исходные очертания и первые численные показатели параметров двигателя. Окончательное подтверждение его номинальных данных и рабочих характеристик дают стендовые испытания, в ходе которых могут быть внесены уточнения в геометрию и обмоточные данные машины. Таким образом, выполненный расчет АД следует рассматривать как предмет дальнейшего совершенствования каждого узла и каждой детали.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Технические требования, предъявляемые к электрическим машинам, касающиеся конструкции, способа монтажа, степени защиты, категории размещения, основных режимов работы и др.
2. Структура единых серий АД типа 4А и АИ. Основные модификации базового исполнения.
3. В каких случаях обмотка статора включается в «звезду» или в «треугольник»?
4. Как производится выбор и расчет главных размеров АД?
5. Критерии выбора  $A$ ,  $B_s$  и  $\alpha_s$  и их влияние на параметры ЭМ?
6. Исходя из чего определяют число проводников в пазу статора?
7. Как выбирают  $Z_1$  и число параллельных ветвей?
8. Исходя из чего рассчитывают размеры магнитопроводов?
9. Какими соображениями руководствуются, принимая значение ширины и высоты шлица паза сердечника статора?
10. Поясните, что такое размеры паза сердечника статора в штампе и в свету? Почему размеры паза сердечника статора в штампе больше, чем в свету?
11. Сравнительный анализ различных типов обмоток статора.
12. Назовите класс нагревостойкости выбранного обмоточного провода и поясните, что означает его температурный индекс?
13. Назовите физический смысл обмоточного коэффициента обмотки статора.
14. От чего зависит значение плотности тока в обмотке статора?
15. Почему обмотка статора выполняется распределенной? Что такое «шаг обмотки» (полный, укороченный)? С какой целью выполняют укороченные шаги обмотки? Что такое «относительный шаг» обмотки  $\beta$ ?

16. Как влияет выбор плотности тока в проводниках статора на основные эксплуатационные показатели машины?
17. Расчет обмоточных данных статора АД при круглых проводах.
18. Охарактеризуйте марку электротехнической стали, примененную для спроектированного двигателя.
19. Зачем и как изолируют листы электротехнической стали сердечников асинхронных двигателей? Что такое «коэффициент заполнения стальной сердечника»?
20. Расчет геометрии зубцово-пазовой зоны статора при круглых проводах.
21. Почему в статорах со всыпной обмоткой выполняют зубцы с параллельными стенками? Зависит ли допустимое значение индукции в зубце от его конфигурации?
22. Что такое «эффективный проводник» и «элементарный проводник»? Назовите причину формирования сечения эффективного проводника из нескольких элементарных проводников.
23. Из каких соображений производится выбор величины воздушного зазора? На какие параметры машины влияет его величина?
24. Влияние соотношения  $Z_1/Z_2$  на показатели машины.
25. Как осуществляется выбор формы пазов КЗ ротора?
26. Расчет обмотки и магнитопровода КЗ ротора.
27. На какие показатели влияет соотношение между шириной и высотой паза при определенной площади паза?
28. Для чего и как проводится расчет магнитной цепи и намагничивающего тока.
29. Какие участки магнитной цепи создают наибольшее падение магнитного потенциала?
30. Каким образом и почему влияет величина воздушного зазора на значение намагничивающего тока?
31. Принцип расчета активных и индуктивных сопротивлений АД.
32. Влияние насыщения и вытеснения тока на параметры схемы замещения.
33. Влияние геометрии и обмоточных данных на параметры схемы замещения. Как и на какие параметры схемы замещения влияет изменение скольжения?
34. Какие потери мощности существуют в АД? Методика их расчета.
35. Почему пренебрегают основными потерями в сердечнике ротора?
36. Расчет рабочих характеристик по схеме замещения АД.
37. Основные параметры, характеризующие пусковые свойства АД. Методика расчета пусковых характеристик.

Техническое задание

- 38. Как влияют активные и индуктивные сопротивления статора и ротора на  $M_{пуск}$  и  $M_{макс}$ ? Как изменятся эти параметры, если ротор с прямоугольными пазы заменить ротором с двойной клеткой?
- 39. Если расчетное значение  $M_{пуск}$  ниже заданного, каким образом можно его повысить?
- 40. Если расчетное значение кратности пускового тока превышает заданное, каким образом можно его уменьшить?
- 41. Как влияет на электромагнитный момент АД напряжение сети и ее частота?
- 42. Если  $\cos\phi$  расчетный ниже заданного, то каким образом нужно вести перерасчет чтобы его повысить?
- 43. Когда КПД двигателя достигает максимума?
- 44. Если  $\phi_{расч}$  ниже заданного, то какие составляющие потерь следует уменьшать в первую очередь? Каким образом этого можно достичь?
- 45. Как влияет магнитная индукция  $B_\delta$  в воздушном зазоре на  $\cos\phi$ ?

	Номинальная мощность $P_{2H}, кВт$	Число полюсов $2p$	Высота оси вращения $h, мм$	Пусковые свойства		
				$\frac{M_{П}}{M_{H}}$	$\frac{M_{max}}{M_{H}}$	$\frac{I_{П}}{I_{H}}$
1	0,37	2	63	2,0	2,2	4,5
2	0,25	4	63	2,0	2,2	4,0
3	0,18	6	63	2,1	2,2	3,0
4	1,1	2	71	2,0	2,2	5,5
5	0,37	6	71	2,0	2,2	4,0
6	0,55	6	71	2,0	2,2	4,0
7	2,2	2	80	2,1	2,6	6,5
8	1,1	4	80	2,0	2,2	5,0
9	1,5	4	80	2,0	2,2	5,0
10	0,55	8	80	1,6	1,7	3,5
11	3,0	2	90	2,1	2,5	8,7
12	2,2	4	90	2,1	2,4	6,0
13	1,1	8	90	1,6	1,9	3,5
14	3,0	4	100	2,0	2,4	6,0
15	2,2	6	100	2,0	2,2	5,0
16	1,5	8	100	1,6	1,9	4,0
17	7,5	2	112	2,0	2,8	7,5
18	5,5	4	112	2,0	2,2	7,0
19	4,0	6	112	2,0	2,5	6,0
20	7,5	4	132	2,2	3,0	7,5
21	5,5	8	132	1,9	2,6	5,5
22	5,5	6	132	2,0	2,5	6,0

Продолжение прил. 1

	Номинальная мощность $P_{2H}, \text{кВт}$	Число полюсов $2p$	Высота оси вращения $h, \text{мм}$	Пусковые свойства		
				$\frac{M_{II}}{M_H}$	$\frac{M_{\max}}{M_H}$	$\frac{I_{II}}{I_H}$
23	11,0	6	160	1,2	2,0	6,0
24	15,0	6	160	1,2	2,0	6,0
25	30,0	2	180	1,4	2,5	7,5
26	22,0	4	180	1,4	2,3	7,0
27	18,5	6	180	1,2	2,0	6,0
28	45,0	2	200	1,4	2,5	7,5
29	37,0	4	200	1,4	2,5	7,0
30	22,0	6	200	1,3	2,4	6,5

Напряжение – 220/380 В, частота – 50 Гц.

Ротор – короткозамкнутый; исполнение – закрытое, обдуваемое IP44.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

**Диаметры и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155**

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм <sup>2</sup>
0,08	0,10	0,00502
0,09	0,11	0,00636
0,10	0,122	0,00785
0,112	0,134	0,00985
0,125	0,147	0,01227
(0,132)	0,154	0,01368
0,14	0,162	0,01539
0,15	0,18	0,01767
0,16	0,19	0,0201
0,17	0,20	0,0227
0,18	0,21	0,0255
(0,19)	0,22	0,0284
0,20	0,23	0,0314
(0,212)	0,242	0,0353
0,224	0,259	0,0394
(0,236)	0,271	0,0437
0,25	0,285	0,0491
(0,265)	0,300	0,0552
0,28	0,315	0,0616
(0,30)	0,335	0,0707

Продолжение прил. 2

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм <sup>2</sup>
0,315	0,350	0,0779
0,335	0,370	0,0881
0,355	0,395	0,099
0,375	0,415	0,1104
0,40	0,44	0,1257
0,425	0,465	0,1419
0,45	0,49	0,1590
(0,475)	0,515	0,1772
0,50	0,545	0,1963
(0,53)	0,585	0,221
0,56	0,615	0,246
0,60	0,655	0,283
0,62	0,675	0,302
0,63	0,69	0,312
(0,67)	0,73	0,353
0,71	0,77	0,396
0,75	0,815	0,442
0,80	0,865	0,503
0,85	0,915	0,567
0,90	0,965	0,636

Продолжение прил. 2

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм <sup>2</sup>
0,95	1,015	0,709
1,00	1,08	0,785
1,06	1,14	0,883
1,12	1,20	0,985
1,18	1,26	1,094
1,25	1,33	1,227
1,32	1,405	1,368
1,40	1,485	1,539
1,50	1,585	1,767
1,60	1,685	2,011
1,70	1,785	2,27
1,80	1,895	2,54
1,90	1,995	2,83
2,00	2,095	3,14
2,12	2,22	3,53
2,24	2,34	3,94
2,36	2,46	4,36
2,50	2,60	4,91

Примечание.

1. Провода, размеры которых указаны в скобках, следует применять только в отдельных случаях при обосновании технико-экономической целесообразности.
2. Среднее значение диаметра изолированного провода вычислено с учетом расчетной средней *двусторонней толщины* эмалевого изоляции.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3**

**Кривые намагничивания  
электротехнической стали марки 2013**

**Для зубцов асинхронного двигателя**

<b>B, Тл</b>	0	0,01	0,02	0,03	0,04
	<b>H, А/м</b>				
0,4	124	127	130	133	136
0,5	154	157	160	164	167
0,6	188	191	194	198	201
0,7	223	226	229	233	236
0,8	256	259	262	265	268
0,9	286	290	293	297	301
1,0	324	329	333	338	342
1,1	370	375	380	385	391
1,2	424	430	436	442	448
1,3	486	495	504	514	524
1,4	586	598	610	622	634
1,5	709	722	735	749	763
1,6	850	878	906	934	962
1,7	1150	1180	1220	1250	1290
1,8	1520	1570	1620	1670	1720
1,9	2070	2160	2250	2340	2430
2,0	3150	3320	3500	3680	3860
2,1	5140	5440	5740	6050	6360
2,2	8920	9430	9940	10460	10980
2,3	14400	15100	15800	16500	17200

*Продолжение прил. 3*

**Для зубцов асинхронного двигателя**

<b>B, Тл</b>	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<b>H, А/м</b>				
0,4	138	141	144	147	150
0,5	171	174	177	180	184
0,6	205	208	212	216	220
0,7	240	243	247	250	253
0,8	271	274	277	280	283
0,9	304	308	312	316	320
1,0	346	350	355	360	365
1,1	396	401	406	411	417
1,2	455	461	467	473	479
1,3	533	563	574	584	585
1,4	646	658	670	683	696
1,5	777	791	805	820	835
1,6	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	18000	18800	19600	20500	21400

Продолжение прил. 3

Для ярма асинхронного двигателя

<b><i>B</i>, Тл</b>	0	0,01	0,02	0,03	0,04
	<b><i>H</i>, А/м</b>				
0,4	52	53	54	55	56
0,5	64	65	66	67	69
0,6	80	81	83	85	87
0,7	100	102	104	106	108
0,8	124	126	129	132	135
0,9	152	155	158	161	164
1,0	185	188	191	195	199
1,1	221	225	229	233	237
1,2	262	267	272	277	283
1,3	320	327	334	341	349
1,4	400	410	420	430	440
1,5	520	542	564	586	608
1,6	750	788	826	864	902
1,7	1150	1220	1290	1360	1430
1,8	2000	2160	2320	2490	2650
1,9	3570	3800	4030	4260	4490
2,0	5770	6000	6300	6600	7000

Продолжение прил. 3

Для ярма асинхронного двигателя

<b><i>B</i>, Тл</b>	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<b><i>H</i>, А/м</b>				
0,4	58	59	60	61	62
0,5	71	72	74	76	78
0,6	89	91	93	95	97
0,7	111	113	115	118	121
0,8	138	140	143	146	149
0,9	168	171	174	177	181
1,0	203	206	209	213	217
1,1	241	245	249	253	257
1,2	289	295	301	307	313
1,3	357	365	373	382	391
1,4	450	464	478	492	506
1,5	630	654	678	702	726
1,6	940	982	1020	1070	1110
1,7	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2810	2960	3110	3270	3420
1,9	4720	4930	5140	5350	5560
2,0	7400	7900	8400	9000	9700

Примечание.

В диапазоне индукций ***B*** от 0 до 0,4 Тл напряженность ***H*** изменяется по линейному закону: от 0 до 124 А/м для зубцов и от 0 до 52 А/м для ярма.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гурин Я. С., Кузнецов Б. Н. Проектирование серий электрических машин. М.: Энергия, 1978. 480 с.
2. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев / под ред. И. П. Копылова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2005. 767 с.
3. Гольберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С. Проектирование электрических машин. М.: Высшая школа, 1984. 431 с.
4. Кацман М. М. Расчет и конструирование электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1984. 360 с.
5. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
6. Бочкарев И. В. Проектирование асинхронных электродвигателей. Бишкек: ИЦ «Техник», 2014. 168 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. Области применения, устройство и принцип действия асинхронных электродвигателей .....	3
2. Режимы работы и способы монтажа асинхронных электродвигателей .....	8
3. Расчет и конструирование асинхронных электродвигателей .....	10
3.1. Выбор базовой модели АД и основных электротехнических материалов .....	13
3.2. Электромагнитный расчет .....	15
3.2.1. Поисковый расчет .....	15
3.2.2. Поверочный расчет .....	35
4. Разработка конструкции .....	58
Заключение .....	64
Вопросы для самопроверки .....	65
Приложение 1. Техническое задание .....	68
Приложение 2. Диаметры и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155 .....	70
Приложение 3. Кривые намагничивания электротехнической стали марки 2013 .....	73
ЛИТЕРАТУРА .....	77



Составитель  
*Игорь Викторович Бочкарев*

РАСЧЕТ  
И КОНСТРУИРОВАНИЕ  
АСИНХРОННЫХ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ  
Методические указания  
к расчетно-графическому заданию  
по курсу «Электрические машины»

Корректор *А. А. Матвиенко*  
Компьютерная верстка – *Ю. Ф. Атаманов*

Подписано в печать 7.04.15. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Офсетная печать. Объем 5,0 п.л.  
Тираж 100 экз. Заказ 210

Отпечатано в типографии КРСУ  
720048, г. Бишкек, ул. Горького, 2