

А.В. Беспалов

**Проектирование асинхронного
двигателя общего назначения
с короткозамкнутым ротором**

**Учебное пособие
для курсового проектирования**



**Издательство
Нижевартовского государственного
гуманитарного университета
2012**

ББК 31.2я73
Б 53

Печатается по постановлению Редакционно-издательского совета
Нижевартовского государственного гуманитарного университета

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение
промышленных предприятий», ОмГТУ *А.В.Щекочихин*

Беспалов А.В.

Б 53 **Проектирование асинхронного двигателя общего назначения с короткозамкнутым ротором:** Учебное пособие для курсового проектирования. — Нижневартовск: Изд-во Нижнеарт. гуманит. ун-та, 2012. — 154 с.

ББК 31.2я73

© Беспалов А.В, 2012
© Издательство НГТУ, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Ведение.....	4
Серии асинхронных машин отечественного производства	5
Асинхронные двигатели иностранного производства	10
Энергосберегающие электродвигатели.....	12
Конструкции двигателей серии 4А	14
Задание на проектирование. Выбор базовой конструкции	18
Выбор главных размеров	20
Расчет обмотки статора	27
Расчет размеров зубцовой зоны статора	34
Составление схемы обмотки статора	41
Выбор воздушного зазора	49
Расчет короткозамкнутого ротора	51
Расчет магнитной цепи.....	61
Параметры асинхронной машины для номинального режима.....	68
Потери и КПД.....	82
Расчет рабочих характеристик.....	89
Пусковые характеристики.....	92
Приложение: пример расчета.....	106
Список литературы.....	154

Введение

«И при железных дорогах
лучше сохранять двуколку»

Козьма Прутков

Проектирование асинхронного двигателя позволит детально познакомиться с его конструкцией, реализовать процесс проектирования отдельного устройства, прочувствовать ограничения, налагаемые на конструкцию устройства системой стандартизации в промышленности. Асинхронный двигатель (АД) является идеальным объектом для выполнения учебного проектирования: конструкция его умеренно сложна и основана на неоднозначных физических эффектах — электромагнитной индукции, эффекта вытеснения тока, эффекта магнитного насыщения, взаимодействия проводников с током и магнитных полей. Двигатель как устройство ограничен с двух сторон: со стороны вала (размеры, пусковой момент, динамика) и со стороны сети (пусковой ток, уровень напряжения, частота). Проектирование именно АД позволяет избежать чисто механических вопросов — отсутствует коллектор, контактные кольца, щетки. В то же время именно АД является до сих пор наиболее используемым в промышленности. Основой учебного проектирования остается методика, изложенная в книгах И.П.Копылова, изданных и переизданных множество раз. В учебном пособии представлена попытка упростить процесс, убрать некоторые незначительные детали, отличающие реальное и учебное проектирование, поскольку по данной методике в настоящее время реальных двигателей не проектируется. Современное проектирование базируется на значительно большей многовариантности и широком использовании математического моделирования и для обучения не подходит, в силу его закрытости, оторванности от основных закономерностей теории электромеханики. Не зная внутренних процессов, компьютерными моделями зачастую пользуются, как «черным ящиком», а это недопустимо для профессионалов — электромехаников. Одним из шагов к постижению внутренней взаимосвязи наиболее совершенной электрической машины — асинхронного двигателя — и является настоящее учебное пособие.

Серии асинхронных машин отечественного производства

В 1946—1949 гг. была создана первая в мировой практике единая серия асинхронных двигателей общего назначения, объединенных общими конструктивными решениями, общей технологией, с широкой унификацией различных узлов и деталей и основанной на единых шкалах мощностей, габаритных, присоединительных и установочных размеров. Эта серия, заменившая восемь существовавших ранее, была названа единой **серией А**. Она охватывала диапазон мощностей от 0,6 до 100 кВт. Двигатели имели два основных исполнения по способу защиты от воздействия окружающей среды: защищенное (обозначение А) и закрытое обдуваемое (обозначение АО).

Появление новых электроизоляционных материалов и успехи в изучении электромагнитных и тепловых процессов в электрических машинах позволили в 1957—1959 гг. создать новую единую серию асинхронных двигателей того же диапазона мощностей — **серию А2**, значительно превосходящую первую серию А по своим технико-экономическим и массогабаритным показателям. Эта серия также имела два основных исполнения: защищенное А2 и закрытое обдуваемое АО2.

В 1952—1956 гг. была разработана единая серия двигателей мощностью от 100 до 1000 кВт, названная серией А-АК (асинхронные двигатели с короткозамкнутыми и фазными роторами). В последующие годы модернизированные отрезки этой серии получили наименование **серии А3**.

Следующая **серия 4А** была спроектирована в 1969—1971 гг. Она базировалась на рекомендациях МЭК по шкале мощностей и установочных размеров и на рекомендациях СЭВ по увязке мощностей и установочных размеров.

В основу построения серии были впервые положены не габаритные диаметры сердечников статора, как в прежних сериях, а высоты оси вращения h , т.е. расстояния от оси вращения ротора до установочной поверхности.

Серия 4А охватывала диапазон мощностей от 0,06 до 400 кВт и выполнялась на 17 стандартных высотах оси вращения (шкала высот оси вращения приведена в табл. 2). На каждой из высот, кроме

$h=225$ мм, выпускались двигатели двух разных длин, различные по мощности. С высотой оси вращения $h=225$ мм выпускались двигатели только одной длины. Таким образом, шкала мощностей серии содержала 33 ступени.

В серии приняты следующие обозначения двигателей:

4A0₁0₂0₃000₄0₅0₆0₇00₈:

4 — Порядковый номер серии (четвертая).

A — Род двигателя (асинхронный).

0₁ — Исполнение по способу защиты от окружающей среды: буква **H** — защищенное, отсутствие знака — закрытое обдуваемое исполнение.

0₂ — Исполнение ротора двигателя: буква **K** — ротор фазный, отсутствие знака — ротор короткозамкнутый.

0₃ — Исполнение двигателя по материалу станины и щитов: **A** — станина и щиты алюминиевые; **X** — станина и щиты алюминиевые или чугунные в любом сочетании материалов; отсутствие знака — станина и щиты чугунные или стальные.

000₄ — Высота оси вращения, мм (две или три цифры).

0₅ — Установочный размер по длине станины *S*, *H* или *L* (меньший, средний или больший).

0₆ — Длина сердечника *A* (меньшая) или *B* (большая) при определенном установочном размере; отсутствие знака означает, что при данном установочном размере (*S*, *M* или *L*) выполняются сердечники только одной длины.

0₇ — Число полюсов (одна или две цифры).

00₈ — Климатическое исполнение и категория размещения (по ГОСТ 15150-69).

В целом в отечественных сериях двигателей обозначения сохраняются в приведенной форме.

Двигатели со степенью защиты IP23 могут работать в средах с содержанием пыли до 2 мг/м³, двигатели со степенью защиты IP44 — до 10 мг/м³. При большей концентрации пыли следует применять двигатели со степенью защиты IP54.

Двигатели выполнялись на следующие номинальные напряжения: 220/380 В — при мощностях от 0,06 до 0,37 кВт, 220/380 и 380/660 В — при мощностях от 0,55 до 110 кВт, 380/660 В —

при мощностях более 132 кВт. Двигатели с высотами оси вращения 50 и 63 мм (мощность 0,06—0,37 кВт) выполнялись с литыми алюминиевыми станинами и подшипниковыми щитами. Более мощные двигатели выполнялись с литыми чугунными станиной и щитами, а двигатели 4АН с $h \geq 280$ мм (мощностью 132 кВт и больше) — со стальной сварной станиной и литыми чугунными щитами.

В статорах всех двигателей с $h \leq 160$ мм выполнялась однослойная обмотка. В остальных двигателях всей серии обмотки двухслойные.

Во всех двигателях с $h \leq 250$ мм и в двигателях с $2p \geq 10$ при $h \geq 280$ мм обмотка статора выполнялась из круглого обмоточного провода. В двигателях $h \geq 280$ мм при $2p \leq 8$ обмотка полужесткая из прямоугольного провода, укладываемая в полуоткрытые пазы.

Серия АИ (Асинхронные Интерэлектро) были разработаны в рамках международной организации Интерэлектро специалистами бывших стран социалистического содружества, в которых был освоен их выпуск. Двигатели серии АИ в отличие от АД серии 4А имели: улучшенные энергетические показатели, улучшенные пусковые характеристики, соответствующие рекомендациям Публикации МЭК 34-12, повышенные показатели надежности, улучшенные виброакустические характеристики (уровень шума снижен по сравнению с серией 4А на 10—15 дБ), сниженный расход активных материалов (меди — на 2,5%, электротехнической стали — на 4%), сниженную массу АД и конструктивных материалов соответственно на 10—15 и 15—20%. Двигатели основного исполнения имеют степень защиты IP54 и IP44. Двигатели с высотой оси вращения 200 мм и более имели степень защиты IP23. Способы охлаждения, принятые в серии, IC0141 для двигателей со степенью защиты IP54 и IP44. 01 означает обдув внешней поверхности двигателя вентилятором, посаженным на вал машины и охлаждающим ее окружающим воздухом. Цифра 41 означает, что воздух внутри машины циркулирует под действием ротора, либо дополнительного внутреннего вентилятора. Машины имели модификации: с фазным ротором (К), частотно регулируемые, многоскоростные, с повышенным скольжением (С), повышенным пусковым моментом (R), однофазные (Y, E), на частоту 60 Гц. По

климатическому исполнению: тропические, влагоморозостойкие, химостойкие, водостойкие.

Асинхронные двигатели **серии 5А** (5АН, 5АНК) выпускаются в последние годы Владимирским электромоторным заводом (ВЭМЗ) и Московским электромеханическим заводом им. Владимира Ильича (ЗВИ). Мощность двигателей серии привязана к установочным размерам по ГОСТ 28330-89. Для поставок на экспорт двигатели этой серии изготавливаются по нормам CENELEC-DOCUMENT 28/64. Двигатели серии 5А полностью взаимозаменяемы с соответствующими типами электродвигателей серий 4А и АИР.

Электродвигатели асинхронные общепромышленные трёхфазные **серии АИС, 6А** имеют привязку мощностей и установочных размеров в соответствии с нормами, принятыми Европейским комитетом по стандартизации в электротехнике (CENELEC документ 28/64) и ГОСТ Р 51689 (вариант II). Электродвигатели асинхронные общепромышленные АИС, 6А выпускаются на базе конструкции электродвигателей основного исполнения со степенью защиты IP54, в односкоростном и многоскоростном исполнении, с повышенным скольжением и других модификаций.

Ярославским электромашиностроительным заводом (ЯЭМЗ, ОАО «ELDIN») разработан и освоен выпуск **серии RA** (российский асинхронный) в диапазоне мощностей от 0,37 до 100 кВт. Серия является развитием идей, заложенных в машинах 4А и АИ, и отвечает требованиям МЭК по всем параметрам.

Серия 7AVE создана Владимирским электромоторным заводом с применением российского стандарта ГОСТ Р 51689-2000, вариант I, и европейского стандарта CENELEC, IEC 60072-1, что позволит устанавливать новые энергосберегающие электродвигатели как на отечественное оборудование, так и на импортное, где в настоящее время используются двигатели иностранного производства. Серия 7 AVE предусматривает повышение КПД от 1,1% (старшие габариты) до 5% (младшие габариты) и охватывает диапазон мощностей от 1,5 до 500 кВт. Особенности конструкции двигателей серии 7AVE: увеличена эффективность использования магнитных материалов, жесткость системы. Используется статорообмоточное

оборудование нового поколения. Новое оборудование и пропиточные лаки обеспечили высокую цементацию обмотки и высокую теплопроводность.

До недавнего времени большинство стран имело негармонизированные национальные стандарты энергоэффективности. Так, страны ЕС ориентировались на нормы CEMEP (1999 г.), Россия — на ГОСТ Р 51677 2000; США — на Energy Policy Act (ЕРАСТ) от 1997 г. С целью устранения несогласованности стандартов по энергоэффективности в 2008 г. был принят международный стандарт IEC 60034-30 «Классы энергоэффективности односкоростных трехфазных асинхронных двигателей». Предусматривается три класса энергоэффективности: IE1 стандартный; IE2 высокий; IE3 «Премиум».

Для повышения энергоэффективности в настоящее время используются сложные методы проектирования, ориентированные на использование мощных вычислительных комплексов. Детали конструкций, применяемые материалы и технологии представляют немалую ценность и являются коммерческой тайной. В то же время, принципиально асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором изменились за последние 50 лет незначительно, их роль в промышленности несколько не уменьшилась. В связи с этим для учебного проектирования используется серия 4А, которая является классикой асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, родоначальником множества ныне выпускаемых серий (хотя в настоящее время снята с производства).

Всего же в России производят электродвигатели более 50 предприятий, хотя многие производимые двигатели имеют узкоспециализированную область применения.

Асинхронные двигатели иностранного производства

Запросы в информационных системах могут показать примерно 50...70 компаний — производителей асинхронных двигателей. Конструкции асинхронных двигателей отличаются только деталями, дизайн классический, отличить один от другого по внешнему виду могут только специалисты. В качестве примера несколько распространенных производителей:

Стандартные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором от *Siemens*: Мощностью от 0.06 кВт до 1000 кВт. Высоты оси вращения от 56 до 225 мм — алюминиевый корпус. Высоты оси вращения от 90 до 450 мм — чугунный корпус. Класс защиты IP55. Напряжение сети: для 50 Гц: 220 В, 380 В, 415 В, 660 В; для 60 Гц: 220 В, 380 В, 440 В, 460 В, 575 В, 660 В.

Двигатели *ABB* относятся к типу трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, отвечающих требованиям международных стандартов IEC (International Electrotechnical Commission — Международная электротехническая комиссия, МЭК) и EN (European Norm — европейские стандарты). Система обозначений, касающаяся методов охлаждения, основана на стандарте IEC 60034-6. Классификация степеней защиты, обеспечиваемой корпусами вращающихся машин, определяется стандартом IEC 60034-5 или EN 60529 для кода IP; стандартом EN 50102 для кода IK. Температурный класс системы изоляции: класс F 155°C; класс B 130°C; класс H 180°C. Электродвигатели общего назначения имеют класс энергоэффективности EFF2. Электродвигатели общего назначения с алюминиевой станиной: диапазон мощности на валу 0,09—55 кВт, 2—6 полюсов. Электродвигатели промышленного назначения с алюминиевой станиной: типоразмеры 63—280, 0,12—90 кВт. Корпус двигателя выполнен из алюминиевого сплава. Двигатели с типоразмерами станины 63 и 180 имеют алюминиевые лапы, а у двигателей с типоразмерами 200—280 лапы выполнены из чугуна. Подшипниковые щиты для двигателей типоразмеров 160—280 выполнены из чугуна. Электродвигатели промышленного назначения со стальной станиной: типоразмеры 280—400, 75—630 кВт. Станина статора представляет собой фасонную штамповку из листовой стали.

Сердечник статора сварен со станиной статора Лапы и подъемные проушины приварены к станине статора. Соединительная коробка и щиты выполнены из чугуна. Низковольтные электродвигатели для обрабатывающих отраслей промышленности: типоразмеры 71...450, от 0,25 до 1000 кВт. Корпуса двигателей, включая лапы, корпус подшипника и соединительную коробку, изготовлены из чугуна.

ABM Greiffenberger разрабатывает и производит трехфазные асинхронные электродвигатели типоразмерами 56...160, мощностью 0,06...30 кВт, 2...12 полюсные, температурный класс изоляции F.

Электродвигатели *Brook Crompton* имеют массивный статор (из чугуна или алюминия). Электродвигатели асинхронные трехфазные переменного тока серии W Premium (WP-DF; WP-UDF) выполняются в чугунном корпусе на мощности 0,75...400 кВт, габариты 80...355. Электродвигатели серии W High (W-DA) в алюминиевом корпусе на мощности 0,07...22 кВт, габариты 63...180. Электродвигатели серии T (T-DA, T-DF, TU-DF) выполняются в алюминиевом корпусе на мощности 0,06...18 кВт, габариты 56...160 и в чугунном корпусе на мощности 11...250 кВт, габариты 180...355. Электродвигатели серии 10 (B-DA, B-DF, BU-DF, A-DA, A-DF, AU-DF) выполняются в алюминиевом корпусе на мощности 0,06...18 кВт, габариты 56...160 и в чугунном корпусе на мощности 11...900 кВт, габариты 180...450.

Энергосберегающие электродвигатели

Вопрос создания энергосберегающих электродвигателей возник одновременно с изобретением самих электрических машин. На Международной электротехнической выставке 1891 г. во Франкфурте-на-Майне, Чарльз Браун (впоследствии основавший компанию АВВ) показал синхронный трехфазный генератор, собственного производства, КПД которого превышал 95%. Асинхронный трехфазный двигатель, представленный Михаилом Доливо-Добровольским, показал КПД 95%. С тех пор показатели КПД трехфазного асинхронного двигателя удалось улучшить всего на один-два процента. Наиболее остро интерес к энергосберегающим двигателям возник в конце 1970-х годов во время мире нефтяного энергетического кризиса. Оказалось, что сэкономить одну тонну условного топлива во много раз дешевле, чем добыть. Во время кризиса во много раз выросли капиталовложения в сферу энергосбережения. Во многих странах стали выделять специальные гранды на энергосберегающие программы.

После проведения анализа проблемы энергосбережения оказалось, что более половину электроэнергии, вырабатываемой в мире, расходуют электродвигатели. Потому над их совершенствованием работают все ведущие электротехнические компании в мире.

Увеличение КПД в энергосберегающих двигателях достигается за счет:

- увеличения доли активных материалов — меди и стали;
- использование более тонкой и высококачественной электротехнической стали;
- применение вместо алюминия меди в роторных обмотках;
- уменьшения воздушного зазора в статоре с помощью прецизионного технологического оборудования;
- оптимизации формы зубцовой зоны магнитопровода и конструкции обмоток;
- использование подшипников более высокого класса;
- особой конструкции вентилятора;

По статистическим данным, цена всего двигателя составляет менее 2% суммарных затрат на жизненный цикл. Так, если двигатель работает 4000 часов ежегодно в течение 10 лет, то

на электроэнергию приходится примерно 97% всех затрат на весь жизненный цикл. Еще около одного процента приходится на монтаж и техобслуживание. Поэтому увеличение КПД двигателя средней мощности на 2% позволит окупить увеличение стоимости энергосберегающего двигателя уже через 3 года, в зависимости от режима работы. Практический опыт и расчеты показывают, что увеличение стоимости энергосберегающего двигателя окупается за счет сэкономленной электроэнергии при эксплуатации в режиме S1 за год-полтора (при годовой наработке 7000 часов).

Отрицательным свойством электродвигателей с повышенным КПД по сравнению с обычными являются:

- на 10—30% выше стоимость;
- несколько больше масса;
- более высокая величина пускового тока.

Объемы энергосбережения в результате внедрения энергоэффективного двигателя могут оказаться незначительными по сравнению с потенциалом привода с переменной скоростью. Каждый дополнительный процент КПД требует увеличения массы активных материалов на 3—6%. При этом момент инерции ротора возрастает на 20—50%. Поэтому высокоэффективные двигатели уступают обычным по динамическим показателям, если при их разработке специально не учитывается это требование.

При выборе в пользу энергоэффективного двигателя, необходимо тщательно подходить к вопросу цены. По прогнозам аналитиков медь будет дорожать значительно быстрее стали. Постоянные магниты из редкоземельных материалов будут дорожать больше и быстрее, чем медь, что приведет к значительному подорожанию таких двигателей. То есть двигатель с повышенным содержанием этих материалов будет дороже при последующей замене по истечении срока службы.

Конструкции двигателей серии 4А

Отрезок серии двигателей с короткозамкнутым ротором закрытого обдуваемого исполнения с высотами оси вращения от 160 до 250 мм охватывает диапазон мощностей от 15 до 90 кВт (в четырехполюсном исполнении). На рис. 1 показана конструкция одной из таких машин. Станина 1 и торцевые щиты 2 отлиты из чугуна. Наружный вентилятор 3 крепится на выступающем конце вала 4. Вентилятор закрыт кожухом из листовой стали 5. На станине укреплена коробка выводов 6. При установке она может быть повернута в удобном для подводки питающего кабеля направлении.

Сердечник статора 7 выполнен из листов электротехнической стали 2013 и после опрессовки скреплен скобами 8. Сердечник закреплен в станине стопорными винтами 9, предохраняющими его от проворачивания. Пазы сердечника — полузакрытые. Обмотка 10 — всыпная из круглого обмоточного провода марки ПЭТ-155 или ПЕТ-155М. Сердечник ротора 11 выполняется из той же стали, что и статор, и в спрессованном состоянии заливается алюминием. Одновременно с заливкой пазов отливаются замыкающие кольца 12 и вентиляционные лопасти. На замыкающих кольцах с обоих торцов ротора крепятся балансирующие грузы 13.

Сердечник ротора в машинах с высотой оси вращения $h < 255$ мм крепится на валу горячей посадкой. При больших h для крепления применяют шпонки. Вал ротора выполнен из стали 45. Вентилятор — литой из алюминия на стальной втулке 14, которая служит для крепления вентилятора на валу.

Подшипниковые щиты крепятся к станине при помощи болтов 15. В центре щита имеются отверстия, расточенные под посадку наружных обойм подшипников 16 и 17. Каждый из подшипников закрыт с обеих сторон подшипниковыми крышками 18 и 19, препятствующими вытеканию смазки при работе машины. Подшипниковые крышки имеют развитые поверхности прилегания к валу с лабиринтными уплотнениями.

В двигателях меньшей мощности устанавливаются два шариковых подшипника. При большей мощности со стороны выводного

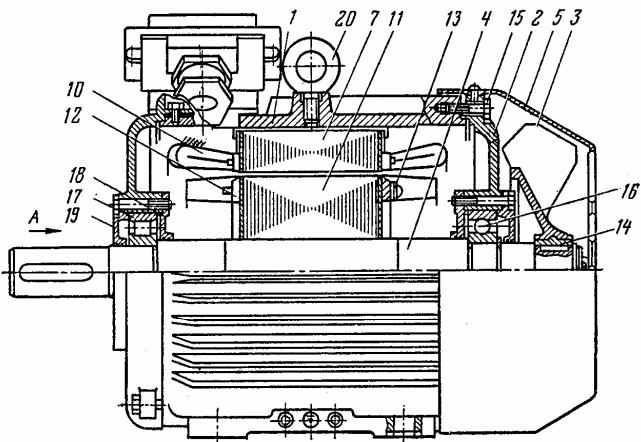
конца устанавливают роликовый подшипник, а с противоположной стороны — шариковый.

Станина крепится к фундаменту с помощью лап, имеющих отверстия под крепежные болты. Сверху станина имеет прилив с резьбовым отверстием, в которое ввинчивается рым-болт 20 для подъема двигателя при монтаже.

На лапах выполнены отверстия с резьбой, в которые ввинчиваются болты 21 для подсоединения шин заземления.

Пазы роторов двигателей отрезка серии с высотой оси вращения 160—250 мм — закрытые грушевидные, а в двухполюсных двигателях с $h=250$ мм — закрытые лопаточные.

Двигатели защищенного исполнения этого отрезка серии (рис. 2) отличаются от рассмотренных выше конструкцией станины 1, подшипниковых щитов 2 и наличием диффузоров 3. Наружный вентилятор в них отсутствует. Охлаждающий воздух под действием вентиляционных лопаток на замыкающих кольцах ротора засасывается в жалюзи 4, расположенные на подшипниковых щитах, омывает лобовые части обмотки 5 и ярмо сердечника статора 6 и выбрасывается в выходные отверстия станины 7. Диффузоры служат для разделения областей с пониженным давлением (перед вентиляционными лопатками) и с повышенным давлением (выше вентиляционных лопаток).



Вид А

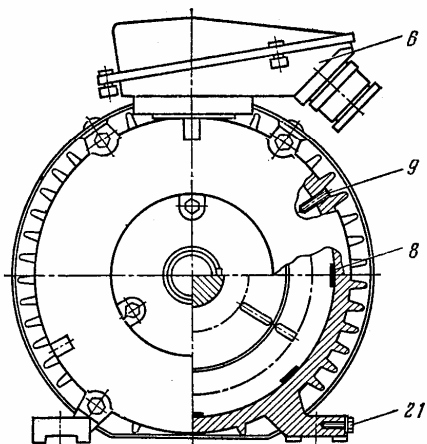
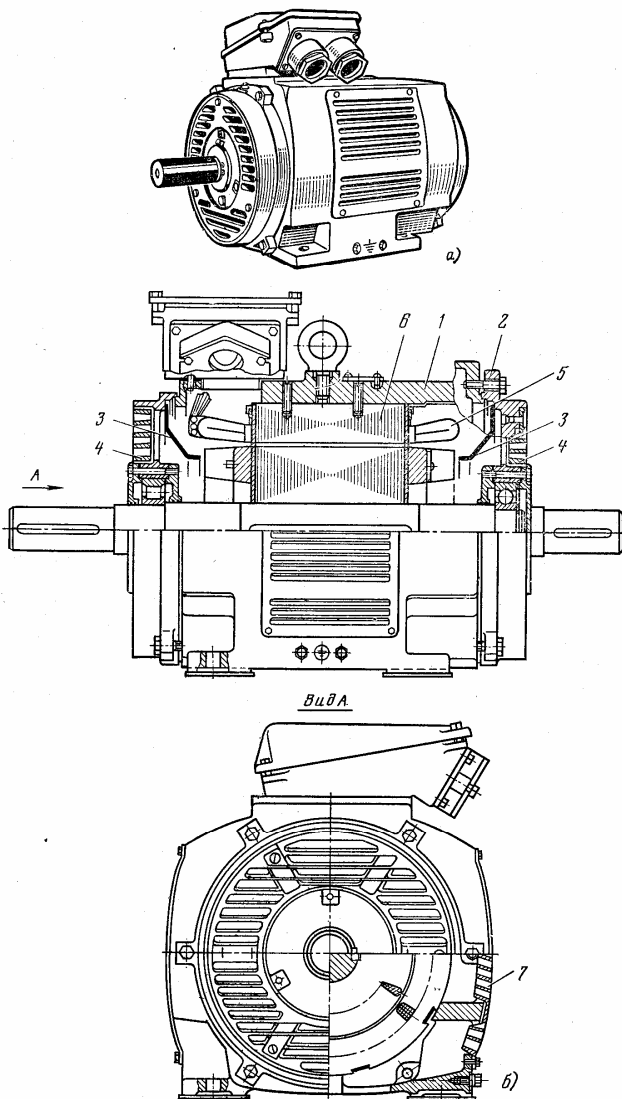


Рис. 1. Конструкция асинхронного двигателя серии 4А со степенью защиты IP44, $h=160$ мм



**Рис. 2. Асинхронный двигатель серии 4А
со степенью защиты IP23, $h=180$ мм:**
а — общий вид; б — продольный и поперечный разрезы

Задание на проектирование. Выбор базовой конструкции

Техническое задание на учебное проектирование асинхронного двигателя содержит номинальные данные проектируемой машины, указания о режиме ее работы, конструктивной форме исполнения, степени защиты от воздействия окружающей среды, системе охлаждения. В отношении требований, не оговоренных в задании, спроектированная машина должна удовлетворять соответствующим стандартам:

Таблица 1

Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные мощностью от 0,12 до 400 кВт включительно. Общие технические требования	ГОСТ Р 51689-2000
Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и рабочие характеристики	ГОСТ 28173, МЭК 60034-1
Машины электрические вращающиеся. Ряды номинальных мощностей, напряжений и частот.	ГОСТ 12139, МЭК 60038
Машины электрические вращающиеся. Установочно-присоединительные размеры.	ГОСТ 18709, МЭК 60072
Машины электрические вращающиеся. Классификация степеней защиты, обеспечиваемых оболочками вращающихся электрических машин.	ГОСТ 17494, МЭК 60034-5
Машины электрические вращающиеся. Методы охлаждения. Обозначения.	ГОСТ 20459, МЭК 60034-6
Машины электрические вращающиеся. Условные обозначения конструктивных исполнений по способу монтажа.	ГОСТ 2479, МЭК 60034-7
Машины электрические вращающиеся. Обозначения выводов и направления вращения	ГОСТ 26772, МЭК 60034-8
Машины электрические вращающиеся. Допустимые уровни шума.	ГОСТ 16372, МЭК 60034-9
Машины электрические вращающиеся. Встроенная температурная защита.	ГОСТ 27895, МЭК 60034-11
Машины электрические вращающиеся. Пусковые характеристики односкоростных трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором напряжением до 660 В.	ГОСТ 28327, МЭК 60034-12
Машины электрические вращающиеся. Допустимые	ГОСТ 20815, МЭК

мые вибрации.	60034-14
Система изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация.	ГОСТ 8865, МЭК 60085
Совместимость технических средств электромагнитная. Двигатели асинхронные на напряжение до 1000 В. Нормы и методы испытаний на устойчивость к электромагнитным помехам	ГОСТ 50034, МЭК 1000.2-1
Машины электрические асинхронные мощностью от 1 до 400 кВт включительно. Двигатели. Показатели энергоэффективности.	ГОСТ Р 51677-2000
Машины электрические вращающиеся. Классы энергоэффективности односкоростных трехфазных асинхронных электродвигателей	IEC-60034-30

Выбор главных размеров

Расчет асинхронных машин начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра статора D и расчетной длины воздушного зазора l_δ . Размеры D и l_δ связаны с мощностью, угловой скоростью и электромагнитными нагрузками выражением машинной постоянной:

$$\frac{D^2 l_\delta \Omega}{P'} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_{об} A B_\delta} \quad (1)$$

Расчет проводят, задаваясь на основании имеющихся рекомендаций значениями электромагнитных нагрузок (A и B_δ), коэффициентов (α_δ , k_B и $k_{об}$), и приближенно определяют расчетную мощность P' . Остаются два неизвестных (D и l_δ), однозначное определение которых без дополнительных условий невозможно. Таким условием является отношение $\lambda = l_\delta / D$.

У большинства выполненных асинхронных двигателей общего назначения отношение λ изменяется в достаточно узких пределах, характерных для заданного исполнения и числа полюсов машины. Это позволит однозначно определить главные размеры, исходя из (1).

Выбор главных размеров проводят в следующей последовательности.

Высоту оси вращения предварительно определяют по рис. 3, a или b для заданных P_2 и $2p$ в зависимости от исполнения двигателя.

Затем из ряда высот осей вращения (табл. 2) берут ближайшее меньшее стандартное значение h . Наружный диаметр статора D_a берут из второй строки табл. 2 в зависимости от выбранной высоты оси вращения.

Приведенные в табл. 2 наружные диаметры статоров для каждой из h нормализованы и соответствуют данным серии асинхронных машин 4А. При выбранном значении h изменение D_a в меньшую сторону нецелесообразно, так как при этом возрастут электромагнитные нагрузки. Увеличение D_a при той же h требует тщательной конструкторской и технологической проработки, доказывающей возможность такого изменения.

Внутренний диаметр статора D определяется по приближенному выражению:

$$D = K_D D_a.$$

Коэффициент K_D (табл. 3) характеризует отношения внутренних и наружных диаметров сердечников статоров асинхронных двигателей серии 4А при различных числах полюсов.

Далее находят полюсное деление τ , м,

$$\tau = \pi D / 2p.$$

и расчетную мощность P' , Вт,

$$P' = mIE = P_2 \frac{k_E}{\eta \cos \varphi},$$

где P_2 — мощность на валу двигателя, Вт;

k_E — отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, которое может быть приближенно определено по рис. 4.

Предварительные значения η и $\cos \varphi$, если они не указаны в задании на проектирование, могут быть взяты по кривым рис. 5, построенным по данным двигателей серии 4А.

Предварительный выбор электромагнитных нагрузок A , А/м, и B_δ , Тл, должен быть проведен особо тщательно, так как они определяют не только расчетную длину сердечника, но и в значительной степени характеристики машины.

Рекомендации по выбору A и B_δ , представлены в виде кривых на рис. 6.

Коэффициент полюсного перекрытия α_δ и коэффициент формы поля k_B в асинхронных машинах определяются степенью уплощения кривой поля в зазоре, возникающей при насыщении зубцов статора и ротора. Значения коэффициентов предварительно принимают:

$$\alpha_\delta = 2/\pi \approx 0,64; k_B = \pi/2 \sqrt{2} = 1,11.$$

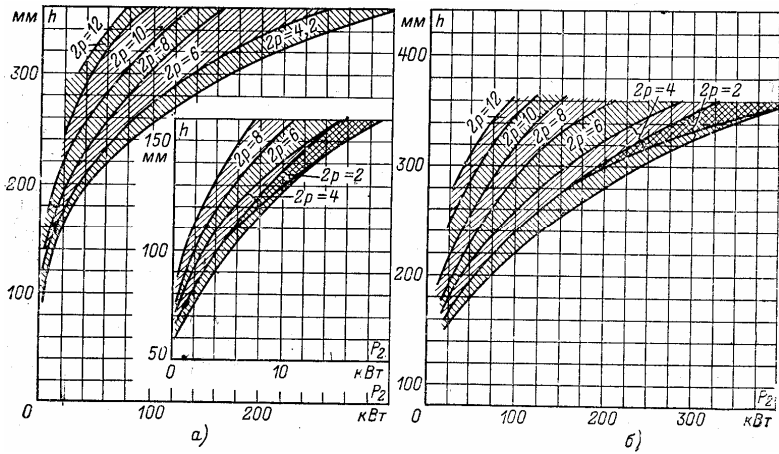


Рис. 3. Высота оси вращения h двигателей серии 4А различной мощности и частоты вращения а — со степенью защиты IP44; б — с IP23

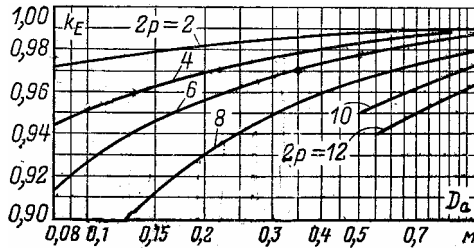


Рис. 4. Значения коэффициента K_E

Таблица 2

Высоты оси вращения электрических машин (по ГОСТ 13267-73) и соответствующие им наружные диаметры статоров асинхронных двигателей серии 4А

h , мм	56	63	71	80	90	100	112	132
D_a , м	0,089	0,1	0,116	0,131	0,149	0,168	0,191	0,225
h , мм	160	180	200	225	250	280	315	355
D_a , м	0,272	0,313	0,349	0,392	0,437	0,530	0,590	0,660

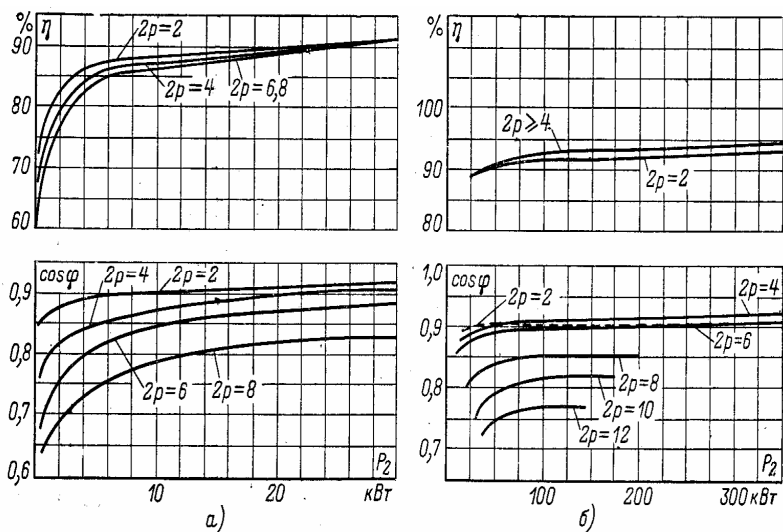


Рис. 5. Примерные значения КПД и $\cos \varphi$ асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP44

а — двигателей мощностью до 30 кВт;
б — двигателей мощностью до 400 кВт

Таблица 3

Отношение $K_D = D / D_a$ в двигателях серии 4А
при различных числах полюсов

$2p$	2	4	6	8—12
K_D	0,52—0,57	0,64—0,68	0,70—0,72	0,74—0,77

Таблица 4

Расчетная ширина радиальных каналов b_k при $b_k = 10$ мм

δ , мм	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,5	3,0
b'_k , мм	7,3	7,1	7,0	6,9	6,8	6,7	6,2	5,7

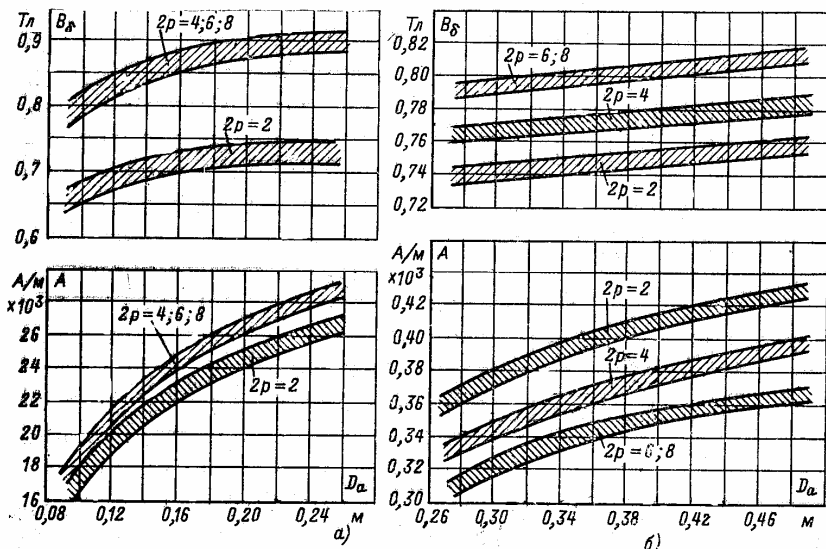


Рис. 6. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP44

a — при высоте оси вращения $h \leq 132$ мм;

б — при $h = 160 \div 250$ мм

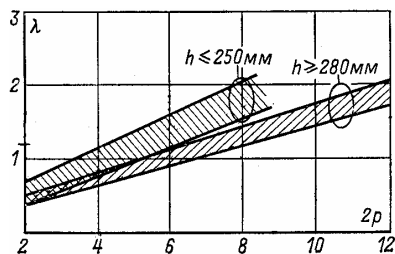


Рис. 7. Отношение $\lambda = l_8/\tau$ у двигателей серии 4А со степенью защиты IP44

Предварительное значение обмоточного коэффициента $k_{об1}$ для однослойных обмоток $k_{об1} = 0,95 \div 0,96$, для двухслойных и однодвухслойных обмоток при $2p = 2$ $k_{об1} = 0,90 \div 0,91$ и при большей полюсности $k_{об1} = 0,91 \div 0,92$.

Синхронная угловая скорость вала двигателя Ω , рад/с, рассчитывается по формуле

$$\Omega = 2\pi \frac{n_1}{60} \text{ или } \Omega = 2\pi \frac{f_1}{p},$$

где n_1 — инхронная частота вращения, об/мин;
 f_1 — частота питания, Гц.

Из (1) с учетом значения α_δ расчетная длина воздушного зазора, м,

$$l_\delta = \frac{P'}{D^2 \Omega k_B k_{об1} AB_\delta}.$$

Отношение $\lambda = l_\delta/\tau$ должно находиться в пределах, показанных на рис. 7 для принятого исполнения машины. Если λ оказывается чрезмерно большим, то следует повторить расчет для ближайшей из стандартного ряда большей высоты оси вращения h . Если λ слишком мало, то расчет повторяют для следующей в стандартном ряду меньшей высоты h .

Для расчета магнитной цепи помимо l_δ необходимо определить полную конструктивную длину и длину стали сердечников статора (l_1 и l_{cm1}) и ротора (l_2 и l_{cm2}). В асинхронных двигателях, длина сердечников которых не превышает 250—300 мм, радиальных вентиляционных каналов не делают. Сердечники шихтуются в один пакет. Для такой конструкции

$$l_1 = l_{cm1} = l_\delta.$$

В более длинных машинах сердечники подразделяют на отдельные пакеты длиной 40—60 мм. Крайние пакеты могут быть более длинными. В двигателях с литой короткозамкнутой обмоткой ротора число пакетов из-за сложности заливки уменьшают и пакеты выполняют более длинными.

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

$$n_{нак} = \frac{l_{cm}}{l_{нак}} \approx \frac{l_\delta}{l_{нак}} = \text{целое число}.$$

При этом число радиальных каналов $n_k = n_{нак} - 1$.

Длина стали сердечника статора в таких машинах

$$l_{cm1} = l_{нак} n_{нак}.$$

или при пакетах разной длины

$$l_{cm1} = \sum l_{нак}.$$

Конструктивная длина сердечника статора

$$l_1 = l_{cm1} + b_k n_k.$$

Окончательное значение l_δ для машин с $\delta < 1,5$ мм

$$l_\delta \approx l_{cm1}.$$

В машинах с $\delta \geq 1,5$ мм при расчете l_δ учитывают искривление магнитных силовых линий потока в воздушном зазоре над радиальными вентиляционными каналами:

$$l_\delta \approx l_1 - b'_k n_k,$$

где b'_k — расчетная ширина радиальных каналов, зависящая от соотношения δ и b_k . Значение b'_k при $b_k=10$ мм определяется по табл. 4 либо из выражения

$$b'_k = \gamma' \delta,$$

где

$$\gamma' = \frac{2(b_k / \delta)^2}{5 + 2(b_k / \delta)}.$$

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

$$l_{cm2} = \sum l_{нак2} = l_2 - n_k b_k.$$

Расчет обмотки статора

Следующий этап расчета включает определение числа пазов статора Z_1 и числа витков в фазе обмотки статора W_1 .

Вначале выбирают предварительно зубцовое деление t_1 в зависимости от типа обмотки, номинального напряжения и полюсного деления машины.

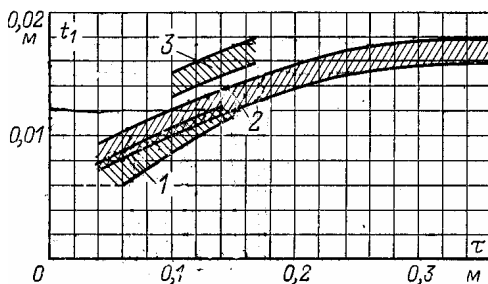


Рис. 8. Зубцовое деление статора асинхронных двигателей со всыпной обмоткой

Значения t_1 асинхронных двигателей серии 4А со всыпной обмоткой показаны на рис. 8, на котором зона 1 для двигателей с высотой оси вращения $h \leq 90$ мм; зона 2 — для машин ($90 < h \leq 250$ мм); зона 3 — для многополюсных двигателей с $h \geq 280$ мм, выполняемых со всыпной обмоткой.

Далее рекомендуется рассмотреть диапазон возможных значений t_1 в пределах указанных значений зубцовых делений $t_{1min} - t_{1max}$. Тогда возможные числа пазов статора, соответствующие выбранному диапазону t_1 ,

$$Z_{1min} : Z_{1max} = \frac{\pi D}{t_{1max}} : \frac{\pi D}{t_{1min}}.$$

Окончательное число пазов статора Z_1 следует выбирать в полученных пределах с учетом условий, налагаемых требованиями симметрии обмотки, и желательного для проектируемой машины значения числа пазов на полюс и фазу q . Число пазов статора в любой обмотке асинхронных машин должно быть кратно числу фаз, а число $q = Z_1 / 2pm$ в большинстве асинхронных машин должно быть целым. Окончательное значение $t_1 = \pi D / 2pmq$ не должно выходить за указанные выше пределы более чем на 10% и

в любом случае для двигателей с $h \geq 56$ мм не должно быть менее 6—7 мм.

Число эффективных проводников в пазу u_n должно быть целым, а в двухслойной обмотке желательно, чтобы оно было кратным двум. Применение двухслойных обмоток с нечетным u_n допускается лишь в исключительных случаях. Поэтому полученные в расчете числа u_n приходится округлять до ближайшего целого или четного числа. Вначале определяют предварительное число эффективных проводников в пазу u'_n при условии, что параллельные ветви в обмотке отсутствуют ($a=1$):

$$u'_n = \frac{\pi DA}{I_{1n} Z_1},$$

где A — принятое ранее значение линейной нагрузки. А/м;

I_{1n} — номинальный ток обмотки статора, А:

$$I_{1n} = \frac{P_2}{m U_n \eta \cos \varphi}$$

(η и $\cos \varphi$ заданы или выбраны вначале расчета).

Затем находят такое число параллельных ветвей обмотки a , при котором число эффективных проводников в пазу либо будет полностью удовлетворять отмеченным условиям, либо потребует лишь незначительного изменения:

$$u_n = a u'_n. \quad (2)$$

Число a при этом, естественно, может быть взято только из ряда возможных чисел параллельных ветвей для обмотки данного типа и заданного числа полюсов.

Полученное из (2) число u_n округляют до ближайшего целого или четного в зависимости от типа обмотки.

Окончательное число витков в фазе обмотки

$$W_1 = U_n Z_1 / 2 a m.$$

Окончательное значение линейной нагрузки, А/м,

$$A = 2 I_{1n} W_1 m / \pi D.$$

Оно должно лишь незначительно (не более 5%) отличаться от принятого ранее.

Схему обмотки статора выбирают в зависимости от мощности машины. Машины мощностью до 12—15 кВт в большинстве

случаев имеют однослойную концентрическую обмотку. В машинах большей мощности всыпные обмотки выполняются двухслойными, а при механизированной укладке применяют однодвухслойные или двухслойные концентрические обмотки, которые могут быть уложены в пазы без подъема шага. Все обмотки из прямоугольного провода выполняются только двухслойными. Обмоточный коэффициент $k_{об} = k_p k_y$ рассчитывается в зависимости от принятого укорочения шага обмотки β и числа q . Для первой

гармоники $k_p = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}} = \frac{0,5}{q \sin \frac{30^\circ}{q}}$. Значения k_y находят по

$k_y = \sin \frac{\pi}{2} \beta$. Для однослойных обмоток k_y всегда равен единице, кроме обмоток с несплошной фазной зоной.

Расчетное укорочение двухслойных обмоток, выполненных с одной большой катушкой в катушечной группе, зависит от числа q и равно:

$$\beta = \frac{2}{3} \cdot \frac{q+1}{q}.$$

Обмоточный коэффициент двухслойной концентрической обмотки равен $k_{об}$ обычной двухслойной обмотки, на базе которой построена концентрическая.

В двухслойных обмотках асинхронных двигателей шаг выполняют в большинстве случаев с укорочением, близким $\beta=0,8$.

После расчета $k_{об1}$ уточняют значение потока Φ , Вб,

$$\Phi = \frac{k_E U_{1n}}{4k_p m_1 k_{об1} f_1} \quad (3)$$

и определяют индукцию в воздушном зазоре B_δ Тл,

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau l_\delta} = \frac{p\Phi}{Dl_\delta} \quad (4)$$

Если полученное значение B_δ выходит за пределы рекомендуемой области (см. рис. 6) более чем на 5%, следует принять другое значение числа u_n и повторить расчет.

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

$$q_{\text{эф1}} = I_{1л}/aJ_1.$$

С точки зрения повышения использования активных материалов плотность тока J_1 должна быть выбрана как можно большей, но при этом возрастают потери в меди обмотки. Увеличение потерь сказывается, во-первых, на повышении температуры обмотки и, во-вторых, на КПД двигателя.

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

$$J = (AJ)/A.$$

Значения AJ для асинхронных двигателей различного исполнения и мощности приведены на рис. 9.

В обмотках, предназначенных для механизированной укладки, диаметр изолированного провода обычно берут не более 1,4 мм, а при ручной укладке (двигатели с $h > 160$ мм) — не более 1,7 мм.

Если расчетное сечение эффективного проводника в машинах со вспной обмоткой выше значений, соответствующих указанным диаметрам, то эффективный проводник разделяется на несколько элементарных. Для этого по табл. 5 подбирается сечение $q_{\text{эл}}$ и число элементарных проводников $n_{\text{эл}}$, составляющих один эффективный, таким образом, чтобы диаметр $d_{\text{эл}}$ элементарных проводников не выходил за указанные пределы, а их суммарная площадь сечения была близка к расчетному сечению эффективного проводника:

$$q_{\text{эл}}n_{\text{эл}} = q_{\text{эф}}.$$

Среднее значение диаметра изолированного провода вычислено с учетом расчетной средней двусторонней толщины эмалевого изоляционного слоя, принимаемой как округленное среднее арифметическое из минимальной и максимальной толщины.

Таблица 5

Характеристики проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм ²
0,125	0,147	0,01227
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
0,20	0,23	0,0314
0,224	0,259	0,0394
0,25	0,285	0,0491
0,28	0,315	0,0616
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
0,50	0,545	0,1963
0,56	0,615	0,246
0,60	0,655	0,283
0,63	0,69	0,312
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
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

В современных машинах стремятся уменьшить число элементарных проводников в одном эффективном до 5—6, а в обмотке, предназначенной для механизированной укладки, до 2—3, для чего увеличивают число параллельных ветвей. В двухполюсных двигателях $n_{эл}$ увеличивают, поскольку число параллельных ветвей в них не может быть более двух.

После окончательного выбора $q_{эл}$, $n_{эл}$ и a следует уточнить плотность тока в обмотке, которая может несколько измениться по сравнению с предварительно принятой при подборе сечений элементарных проводников:

$$J = \frac{I_{1н}}{aq_{эл}n_{эл}}.$$

Корректировка, которая может потребоваться в ходе последующего расчета, как правило, не вносит существенных изменений в полученные данные.

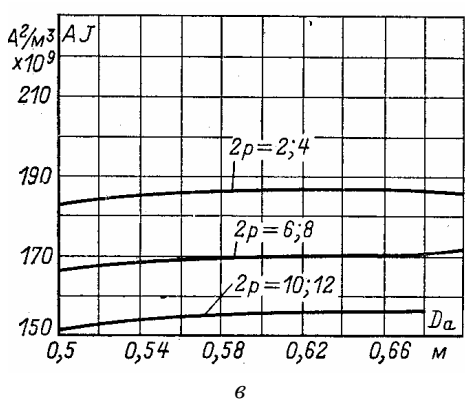
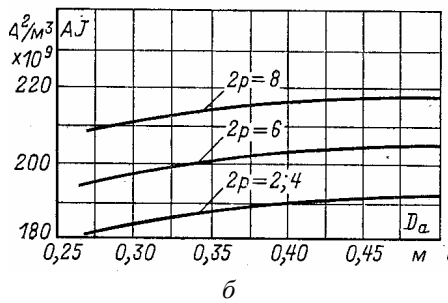
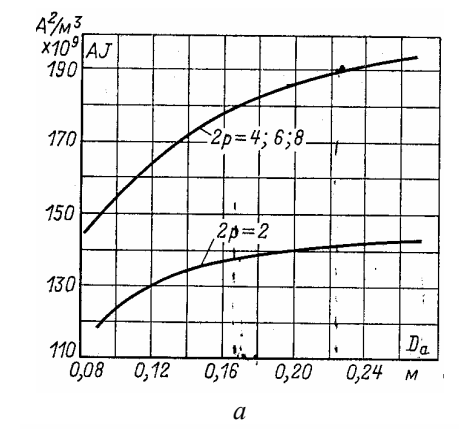


Рис. 9. Средние значения произведения (AJ) асинхронных двигателей со степенью защиты IP44
 а — $h \leq 132$ мм; б — $h = 160 \div 250$ мм; в — $h = 280 \div 355$ мм

Расчет размеров зубцовой зоны статора

Конфигурация пазов и зубцов определяется мощностью машины и типом обмотки. Расчет размеров зубцовой зоны проводят по допустимым индукциям в ярме и в зубцах статора (табл. 6).

По выбранным значениям индукций определяется высота ярма статора, м,

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_a l_{\text{ст1}} k_c}. \quad (5)$$

Таблица 6

Допустимые значения индукции на различных участках магнитной цепи, Тл

Участки магнитной цепи	Обозначение	IP44				
		2	4	6	8	10 и 12
Ярмо статора	B_a	1,4—1,6			1,15—1,35	1,1—1,2
Зубцы статора при постоянном сечении (всыпная обмотка)	B_{z1}	1,7—1,9				1,6—1,8
Зубцы статора в наиболее узком сечении: при полукрытых пазах при открытых пазах	$B_{z1\text{max}}$	1,75—1,95				
	$B_{z1\text{max}}$	1,6—1,8				
Ярмо короткозамкнутого ротора	B_j	≤1,45	≤1,25	≤1,15	0,85	
Зубцы ротора при постоянном сечении (грушевидные пазы)	B_{z2}	1,75—1,85				
Зубцы короткозамкнутого ротора в наиболее узком сечении	B_{z2}	—	1,5—1,7	1,45—1,60		

Круглые обмоточные провода насыпной обмотки могут быть уложены в пазы произвольной конфигурации, поэтому размеры зубцовой зоны выбирают таким образом, чтобы зубцы статора имели параллельные грани (рис. 10). Такие зубцы имеют постоянное

поперечное сечение, индукция в них также не меняется и магнитное напряжение зубцов с параллельными гранями оказывается меньше, чем магнитное напряжение трапецеидальных зубцов при том же среднем значении индукции в них.

Значение коэффициента заполнения сердечника сталью следует брать из табл. 7.

Таблица 7

Рекомендуемые марки холоднокатаной изотропной электротехнической стали (ГОСТ 21427.2-83*), способы изолировки листов и коэффициент заполнения сталью магнитопроводов статора и ротора асинхронных двигателей

h , мм	Марка стали	Статор		Короткозамкнутый ротор	
		Способ изолировки листов	k_c	Способ изолировки листов	k_c
50—250	2013	Оксидирование	0,97	Оксидирование	0,97
280—355	2312	Лакировка	0,95	Оксидная пленка	0,97

Таблица 8

Припуски на сборку при расчете заполнения пазов

h , мм	Припуски, мм,	
	по ширине паза	по высоте паза
	Δb_n	Δh_n
50—132	0,1	0,1
160—250	0,2	0,2
280—355	0,3	0,3
400—560	0,4	0,3

Для всыпной обмотки могут быть выбраны пазы показанной на рис. 10 конфигурации. В двигателях серии 4А выполняются только трапецеидальные пазы (рис. 10,а) с углом наклона граней клиновой части $\beta=45^\circ$ у двигателей с $h \leq 250$ мм и $\beta=30^\circ$ у двигателей с $h \geq 280$ мм при $2p=10$ и 12.

Сначала проводится предварительный выбор размеров, исходя из допустимой индукции в зубцах и ярме статора

$$b_z = \frac{B_\delta t_1 l_\delta}{B_{zcp} l_{cm1} k_c} \quad (6)$$

и h_a по (5).

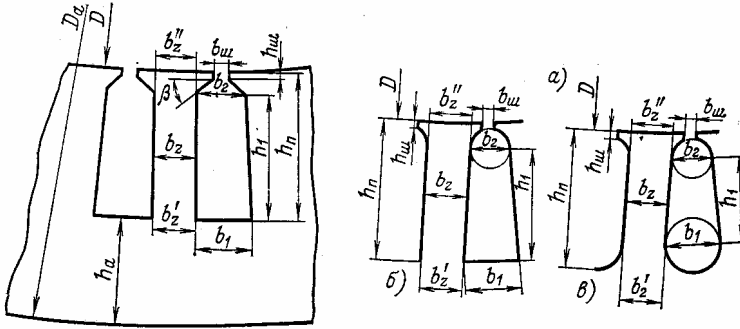


Рис. 10. К расчету размеров зубцовой зоны выпященной обмотки статора

Расчет зубцовой зоны рекомендуется проводить в следующей последовательности (расчетные формулы приведены только для пазов, показанных на рис. 10, а).

По допустимым индукциям в ярме и зубах статора (см. табл. 6) из (5) и (6) определяются высота ярма h_a и ширина зуба b_z статора. Далее находят размеры паза в штампе, м,

$$h_n = \frac{D_a - D}{2} - h_a;$$

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_n)}{Z_1} - b_{z1};$$

$$b_2 = \frac{\pi(D \cdot \operatorname{tg}\beta + 2h_w \operatorname{tg}\beta - b_w) - Z_1 \operatorname{tg}\beta \cdot b_{z1}}{Z_1 \operatorname{tg}\beta - \pi};$$

Полученные размеры округляют до десятых долей миллиметра.

Высоту шлица паза h_w в двигателях с $h \leq 132$ мм принимают $h_w = 0,5$ мм, в двигателях с $h \geq 160$ мм увеличивают до $h_w = 1$ мм.

Ширина шлица паза b_w для двигателей при различных h и $2p$ приведена в табл. 10.

В клиновой части паза располагаются пазовые крышки (в машинах с $h \leq 160$ мм) или пазовые клинья (в более крупных машинах).

Поэтому при расчете площади поперечного сечения паза эти участки не учитывают.

Площадь поперечного сечения паза в штампе, м^2

$$S_n = \frac{b_1 + b_2}{2} h_1,$$

где

$$h_1 = h_n - (h_u + h_k);$$

высота клиновой части паза

$$\left. \begin{aligned} h_k &= \frac{b_2 - b_u}{2} \text{ при } \beta = 45^\circ \\ h_k &= \frac{b_2 - b_u}{2\sqrt{3}} \text{ при } \beta = 30^\circ \end{aligned} \right\}$$

Для расчета коэффициента заполнения паза необходимо определить площадь паза в свету и учесть площадь сечения паза, занимаемую корпусной изоляцией S_{uz} и прокладками в пазу S_{np} . Размеры паза в свету определяются с учетом припусков на шихтовку и сборку сердечников Δb_n и Δh_n :

$$\left. \begin{aligned} b_1' &= b_1 - \Delta b_n; \\ b_2' &= b_2 - \Delta b_n; \\ h_1' &= h_1 - \Delta h_n, \end{aligned} \right\}$$

где Δb_n и Δh_n — см. табл. 8.

Площадь корпусной изоляции, м^2 ,

$$S_{uz} = b_{uz}(2h_n + b_1 + b_2),$$

где b_{uz} — односторонняя толщина изоляций в пазу, м.

Площадь прокладок в пазу, м^2 :

для двигателей с $h=180 \div 250$ мм

$$S_{np} = 0,4b_1 + 0,9b_2;$$

для двигателей с $h \geq 280$ мм

$$S_{np} = 0,6(b_1 + b_2).$$

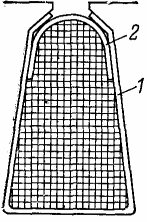
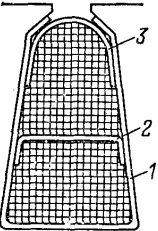
При однослойной обмотке $S_{np} = 0$.

Площадь поперечного сечения паза, остающаяся для размещения проводников обмотки,

$$S_n' = \frac{b_1' + b_2'}{2} h_1' - S_{uz} - S_{np}.$$

Таблица 9

**Изоляция однослойных и двухслойных всыпных обмоток статоров
асинхронных двигателей с высотой оси вращения до 250 мм.
Напряжение до 660 В. Классы изоляции В, F, H**

Тип обмотки	Высота оси	Позиция	Односторонняя толщина, мм
 Однослойная	50—80	1 2	0,2 0,3
	90—132	1 2	0,25 0,35
	160	1 2	0,4 0,5
 Двухслойная	80—250	1 2 3	0,4 0,4 0,5

Контролем правильности размещения обмотки в пазах является значение коэффициента заполнения паза

$$k_3 = \frac{d_{из}^2 u_n n_{эл}}{S'_n},$$

который должен находиться в пределах 0,70—0,75.

Таблица 10

**Средние значения ширины шлица полузакрытых
пазов статора $b_{ш}$, мм**

h , мм	Число полюсов $2p$				
	2	4	6—8	10	12
50—63	1,8	1,8	1,8	—	
71	2,0	2,0	2,0	—	
80, 90	3,0	3,0	2,7	—	
100, 112	3,5	3,5	3,0	—	
132	4,0	3,5	3,5	—	
160—250	4,0	3,7	3,7	—	
280—315	—	—	—	4,0	4,0

Таблица 11

**Расчетные размеры зубцов статоров при трапецидальных или
грушевидных пазах в машинах со всыпной обмоткой (рис. 26)**

Размер	Рис. 10, а	Рис. 10, б	Рис. 10, в
b'_z	$\pi \frac{D+2h_n}{Z} - b_1$	$\pi \frac{D+2h_{п1}}{Z} - b_1$	$\pi \frac{D+2h_{п1}-b_1}{Z} - b_1$
b''_z	$\pi \frac{D+2(h_n-h_1)}{Z} - b_2$	$\pi \frac{D+2h_{ш}+b_2}{Z} - b_2$	$\pi \frac{D+2h_{ш}+b_2}{Z} - b_2$
h_z	$h_{п1}$	$h_{п1}$	$h_{п1} - 0,1b_1$

Если полученное значение ниже указанных пределов, то площадь паза следует уменьшить за счет увеличения h_a или b_z или обоих размеров одновременно в зависимости от принятого при их расчете значения допустимой индукции. Индукция в зубцах и ярме статора при этом уменьшится. Уменьшение индукции ниже пределов, указанных в табл. 6, показывает, что главные размеры двигателя завышены и активная сталь недоиспользована. В этом случае следует уменьшить длину сердечника или перейти на ближайшую меньшую высоту оси вращения.

Если полученное значение k_z выше указанных пределов и его не удастся уменьшить до допустимых пределов даже при размерах h_a и b_z , рассчитанных по наибольшим допустимым значениям B_a и B_z , или перейдя на большее сечение элементарного провода при уменьшении $n_{эп}$, то следует увеличить длину магнитопровода

или просчитать другой вариант двигателя, изменив главные размеры.

Ширина зубца и расчетная высота паза определяются по формулам табл. 11. Обычно при вспяной обмотке $b_z = b'_z = b''_z$. В некоторых случаях возможно некоторое расхождение значений b'_z и b''_z , поэтому рекомендуется рассчитать оба значения b'_z и b''_z и при небольшом расхождении результатов взять среднюю расчетную ширину зубца: $b_z = \frac{(b'_z + 2b''_z)}{3}$. При больших расхождениях следует изменить соотношения размеров пазов.

Составление схемы обмотки статора

Обмотки состоят из секций. Секция может быть одновитковой (состоять из одного витка) и многовитковой (иметь несколько витков) (рис. 11). Части секции, укладываемые в пазы, называются пазовыми или активными, а располагаемые вне паза — лобовыми. Ширина секции определяется шагом обмотки y .

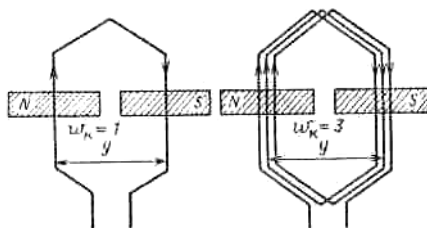


Рис. 11. Одновитковая и трехвитковая секции обмотки статора

Для того чтобы ЭДС проводников двух активных сторон секции суммировались, эти активные стороны должны располагаться под полюсами разной полярности. Поэтому шаг y должен быть примерно равен полюсному делению. Шаг y и полюсное деление τ_{II} задаются в зубцовых делениях. Шаг y равен числу этих делений, расположенных между началом и концом секции. Если $y = 5$, то это означает, что начало секции лежит, например, в пазу 1, а ее конец — в пазу 6 ($1+5$). Шаг y всегда равен целому числу. Полюсное деление τ_{II} равно числу зубцовых (пазовых) делений, расположенных между серединами соседних полюсов. Полюсное деление τ_{II} может иметь как целое, так и дробное значение. Если шаг равен полюсному делению: $y = \tau_{II} = Z_1 / (2p)$ (где Z_1 — общее число зубцов на статоре), то обмотка называется обмоткой с диаметральной шаг, а если $y < \tau_{II}$ — то с укороченным шагом.

По расположению секционных сторон в пазу обмотки делятся на однослойные и двухслойные. Если в пазу размещается только одна секционная сторона (рис. 12), то обмотка будет однослойной, а если две (рис. 13), — двухслойной.

Наибольшее применение находят двухслойные обмотки. Преимущество двухслойных обмоток состоит в том, что у них можно

выполнить укороченный шаг и за счет этого улучшить форму кривых ЭДС и МДС. Кроме того, при укороченном шаге уменьшается расход обмоточного провода.

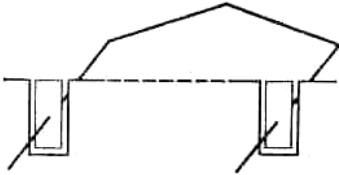


Рис. 12. Расположение в пазах секции однослойной обмотки



Рис. 13. Расположение в пазах секции двухслойной обмотки

Однослойные обмотки имеют диаметральный шаг, что является их основным недостатком. Эти обмотки применяют в машинах мощностью до 16 кВт потому, что у таких машин пазы имеют небольшую площадь и изоляционная прокладка между слоями, необходимая при двухслойной обмотке (табл. 9), занимает относительно большое место. При однослойной обмотке необходимость в такой прокладке отпадает, вследствие чего повышается заполнение паза обмоточным проводом. Другим преимуществом однослойной обмотки является более легкая механизация укладки ее в пазы.

Обмотка каждой фазы выполняется распределенной, т.е. она на каждом полюсном делении размещается в нескольких рядом лежащих пазах. Определяется расположение числом пазов на полюс и фазу обмотки q . Соседние q катушек (секций) одной фазы соединяются между собой последовательно, образуя катушечную группу. Катушечные группы каждой фазы могут соединяться последовательно или путем сочетания последовательного соединения с параллельным образовывать несколько параллельных ветвей обмотки — a .

По конфигурации катушек и последовательности соединения их друг с другом обмотки подразделяются на петлевые и волновые. На рис. 14 показаны катушки петлевой и волновой обмоток. Наибольшее распространение в машинах переменного тока получили петлевые обмотки.

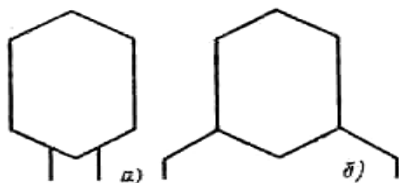


Рис. 14. Секции петлевой (а) и волновой (б) обмоток ↑

Существует целый ряд схем однослойных обмоток машин переменного тока. Все они одинаковы в электрическом и магнитном отношении и различаются только по форме лобовых частей катушек. Для изображения схем обмоток машин широко применяются схемы-развертки, которые получаются, если статор разрезать по образующей и развернуть в плоскость. На этой плоскости вертикальными линиями изображаются пазы. Начертив развертку статора и наметив пазы с проводниками, разбивают их по фазам и устанавливают границы полюсных делений. На каждом полюсном делении располагаются $3q$ пазов. Затем условно задаются направлением ЭДС в проводниках. ЭДС проводников, расположенных под соседними полюсами, должны иметь противоположные направления. Проводники, принадлежащие к одной фазе, соединяют в катушки, затем катушки соединяют между собой таким образом, чтобы их ЭДС складывались, а лобовые части и межкатушечные соединения были возможно короче. Рассмотрим схемы некоторых видов однослойных обмоток.

Концентрические обмотки. Эти обмотки подразделяются на двухплоскостные и трехплоскостные. Построим двухплоскостную обмотку по следующим данным: $Z = 24$, $2p = 4$ и $m = 3$.

Число пазов на полюс и фазу $q = Z / (2pm) = 24 / (4 \cdot 3) = 2$.

Разобьем пазы по зонам (рис. 15). Первые q пазов (1 и 2) будут относиться к началу фазы А (АН), следующие q пазов (3 и 4) к концу фазы С (СК), затем следующие q пазов (5 и 6) к началу фазы В (ВН) и т.д. Предположим, что в данный момент времени первые $3q$ пазов (с 1 по 6) располагаются под полюсом одной полярности, следующие $3q$ пазов (с 7 по 12) — под полюсом другой полярности и т.д.

Зададимся направлением ЭДС в проводниках. Так как пазы с 1 по 6 располагаются под полюсом одной полярности, то во всех проводниках, уложенных в эти пазы, ЭДС будут иметь одинаковое направление (на рис. 15 — вверх). Пазы с 7 по 12 располагаются под полюсом другой полярности, и ЭДС проводников в этих пазах будут направлены в противоположную сторону (вниз). На следующем полюсном делении ЭДС в проводниках опять будет направлена вверх, а на последнем (четвертом) — вниз.

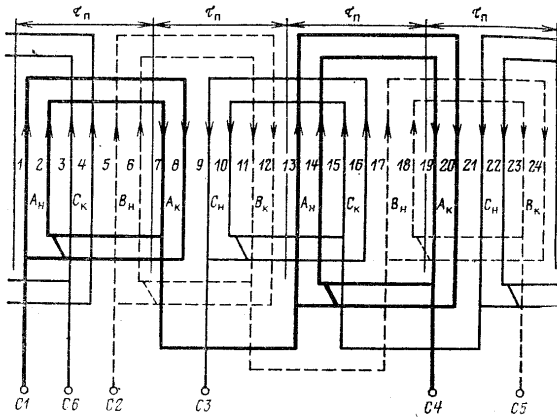


Рис. 15. Схема-развертка концентрической двухплоскостной обмотки ($Z = 24$, $2p = 4$, $m = 3$)

Катушки образуются путем соединения между собой проводников, расположенных в пазах и имеющих маркировку начала и конца данной фазы. В этом случае ЭДС проводников катушки будут суммироваться. Предположим, что намотка идет по часовой стрелке: проводники паза 1 соединяют с проводниками паза 8, проводники паза 2 — с проводниками паза 7 и т.д.

Для наглядности на рис. 15 катушки фаз А и С изображены линиями различной толщины, а фазы В — штриховой линией.

У двухплоскостной обмотки катушки каждой катушечной группы охватывают одна другую, т.е. являются концентрическими. Кроме того, при четном p половина катушечных групп имеет длинные лобовые части, которые располагаются в одной плоскости, а другая половина — короткие лобовые части, располагающиеся

в другой плоскости. Поэтому такие обмотки называются двух-плоскостными (рис. 16, а).

При нечетном числе пар полюсов каждая фаза содержит нечетное число катушечных групп. В этом случае одну из катушечных групп делают изогнутой: ее лобовые части с каждой стороны сердечника постепенно переходят из одной плоскости в другую.

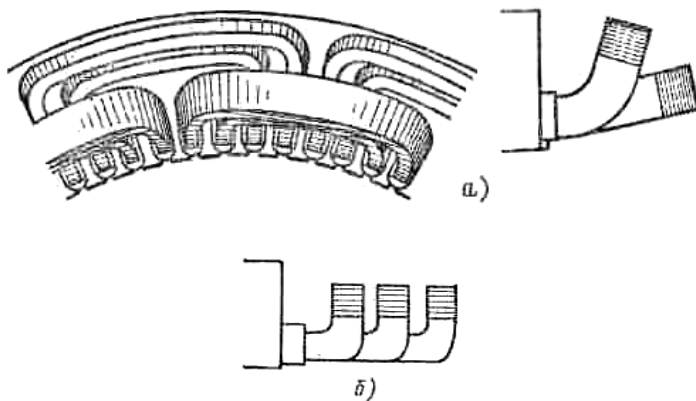


Рис. 16. Расположение лобовых частей трехфазных двухплоскостной (а) и трехплоскостной (б) обмоток

Катушки каждой фазы соединяются между собой так, чтобы их ЭДС суммировались.

Для того чтобы получить сдвиг между ЭДС фаз на 120° , нужно соответствующим образом выполнить отводы от обмоток. Обмотки каждой фазы начинаются с проводника, расположенного в одном из пазов с индексом начала данной фазы (АН, ВН или СН). Вывод от этого проводника будет соответственно иметь одно из обозначений С1, С2 или С3. На рисунке обмотка фазы А начинается с проводника первого паза, фазы В — с проводника пятого паза, фазы С — с девятого паза. Обычно между отводами от начал соседних фаз располагается $2q$ пазов. Заканчивается обмотка фазы проводником последней катушки, расположенным в пазу и имеющим один из индексов АК, ВК или СК. Отводы от этих проводников фаз будут иметь обозначения С4, С5, С6.

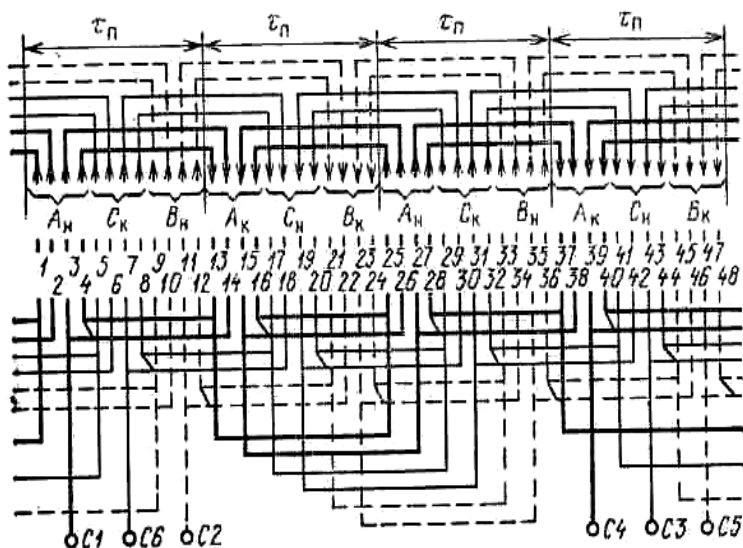


Рис. 17. Схема-развертка концентрической трехплоскостной обмотки ($Z = 48$, $2p = 4$, $m = 3$, $q = 4$)

Для выводов обмоток якоря разрабатываемых машин ГОСТ 26772-85 устанавливает новые обозначения. Выводы обозначаются буквами латинского алфавита U, V, W, причем начала и концы каждой фазы — дополнительно цифрами, стоящими после букв: начало — цифрой 1, конец — цифрой 2, например U1, U2, V1, V2, W1, W2, и промежуточные выводы — буквами с последующими цифрами 3, 4 и т.д.

Построение схем разверток других типов обмоток проводится аналогично.

На рис. 17 показана схема трехплоскостной концентрической обмотки. Лобовые части располагаются в трех плоскостях, для каждой фазы предназначена своя плоскость (см. рис. 16, б).

Шаблонные обмотки. В этих обмотках катушки имеют одинаковую ширину и форму. На рис. 18 показана одна из разновидностей шаблонных обмоток — цепная обмотка.

Однослойные обмотки технологичны, их укладку в пазы легче механизировать, чем укладку двухслойных. Поэтому в последние годы область применения однослойных обмоток расширилась.

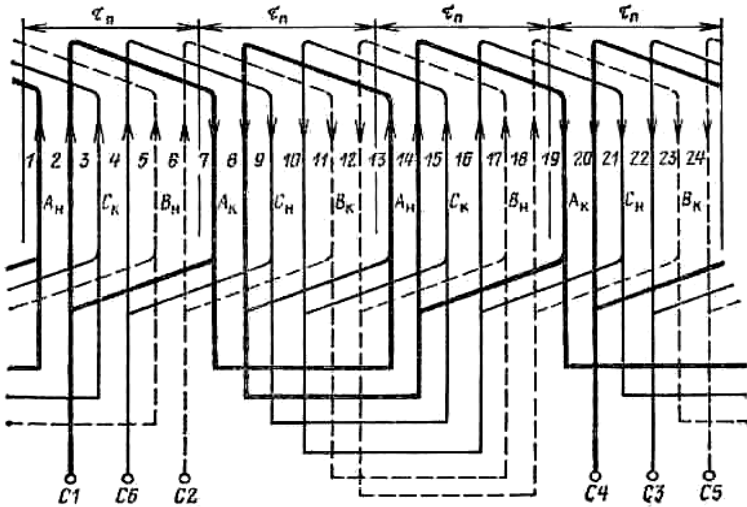


Рис. 18. Цепная обмотка ($Z = 24$, $2p = 4$, $\tau = 3$)

Двухслойные обмотки находят более широкое применение из-за возможности выбора у них оптимального шага. У этих обмоток стороны катушки располагаются сверху и внизу соответствующих пазов, отстоящих друг от друга на расстоянии шага y . На схеме-развертке верхняя катушечная сторона изображается сплошной линией, а нижняя — штриховой.

Построим схему-развертку двухслойной обмотки для машины с $z = 24$, $2p = 4$, $q = 2$. Полусное деление, выраженное в зубцовых делениях для этой машины, $\tau_{\Pi} = z / 2p = 24 / 4 = 6$.

Шаг обмотки примем укороченным: $y \approx 0,8\tau_{\Pi} = 0,8 \cdot 6 \approx 5$. Распределим верхние стороны катушек в пазах на фазные зоны по $q = 2$ пазов в каждой зоне (первая строка таблицы на рис. 19). Затем с шагом y соединяем их с соответствующими нижними сторонами. Проложив такие соединения, получим разбивку нижних катушечных сторон пазов по зонам (вторая строка таблицы).

Как видно из рис. 19, распределение нижних сторон катушек по фазным зонам будем иметь сдвиг по отношению к разбивке верхних слоев. Нетрудно убедиться, что при диаметральном шаге

($y = \tau_{\Pi}$) распределение по зонам верхних и нижних слоев будет совпадать. Следовательно, сдвиг относительного положения катушечных сторон верхнего и нижнего слоев одной фазы является характерным для обмоток с укороченным шагом. В этом случае в части пазов будут располагаться катушечные стороны, принадлежащие разным фазам. В общем случае сдвиг нижнего слоя относительно верхнего составляет $(1-\beta)\tau_{\Pi}$ пазов, где $\beta=y/\tau_{\Pi}$ — укорочение обмотки. Катушечные группы между собой должны соединяться таким образом, чтобы их ЭДС складывались. В двухслойной обмотке, количество катушечных групп в 2 раза больше, чем у однослойной.

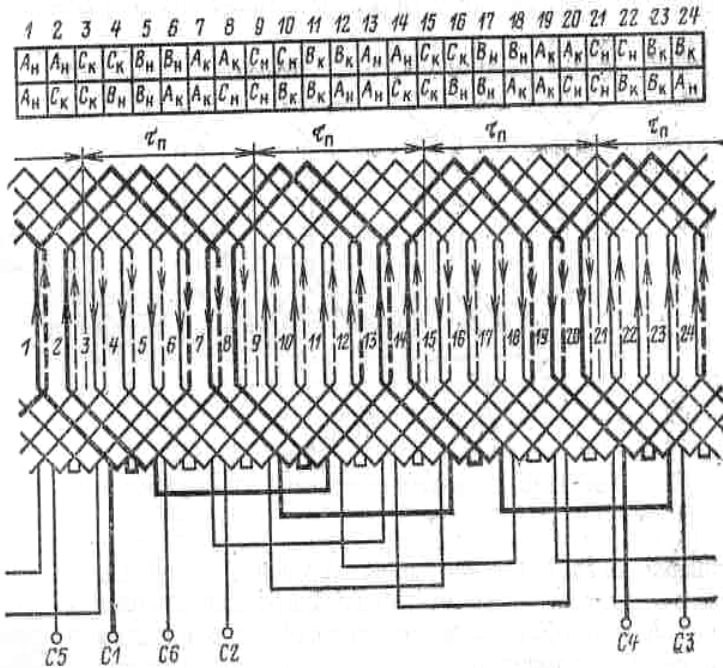


Рис. 19. Двухслойная петлевая обмотка ($Z=24, 2p=4, t=3$)

Выбор воздушного зазора

Воздушный зазор δ во многом определяет энергетические показатели асинхронного двигателя. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше его магнитное сопротивление и магнитное напряжение. Поэтому уменьшение зазора приводит к соответственному уменьшению МДС магнитной цепи и намагничивающего тока двигателя, благодаря чему возрастает его $\cos\varphi$ и уменьшаются потери в меди обмотки статора. Но уменьшение δ приводит к увеличению поверхностных и пульсационных потерь. Поэтому КПД двигателей с очень малыми зазорами часто даже становится меньше.

Для двигателей мощностью менее 20 кВт воздушный зазор, м:

$$\text{при } 2p = 2 \quad \delta \approx (0,3 + 1,5D) \cdot 10^{-3};$$

$$\text{при } 2p \geq 4 \quad \delta \approx (0,25 + D) \cdot 10^{-3}.$$

Для двигателей средней и большой мощности

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

Зависимость воздушного зазора от внутреннего диаметра статора у двигателей серии 4А приведена на рис. 20.

Поверхностные и пульсационные потери в двигателях зависят не только от амплитуд, но и от частоты пульсаций индукции в воздушном зазоре. Для уменьшения этого вида потерь δ в быстроходных двигателях выполняют большим.

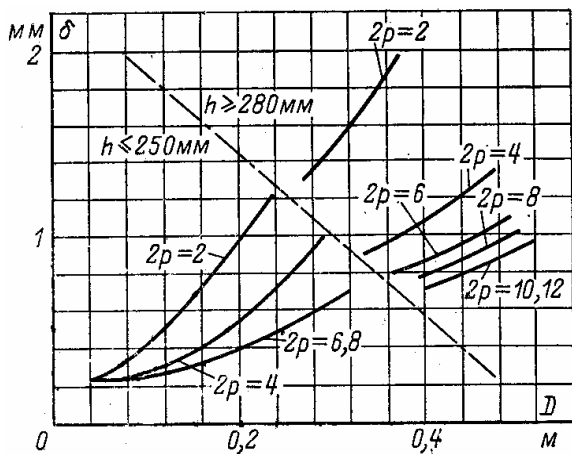


Рис. 20. К выбору воздушного зазора в асинронных двигателях

Воздушный зазор, полученный по эмпирическим формулам или из графиков, следует округлять до 0,05 мм при $\delta < 0,5$ мм и до 0,1 мм при $\delta > 0,5$ мм. Например: 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,6 мм и т.д.

Далее необходимо провести механический расчет вала проектируемого двигателя. Прогиб вала не должен быть больше 10% воздушного зазора.

Расчет короткозамкнутого ротора

Короткозамкнутые обмотки роторов в отличие от всех других существующих обмоток не имеют определенного числа фаз и числа полюсов. Один и тот же ротор может работать в машинах, статоры которых выполнены на различные числа полюсов. Это, в частности, определило возможность использования короткозамкнутых роторов в двигателях с регулированием частоты вращения путем переключения числа пар полюсов обмотки статора.

Обычно принято считать, что каждый стержень обмотки образует одну фазу короткозамкнутой обмотки. Тогда число ее фаз равно числу пазов ($m_2=Z_2$) и обмотка каждой из фаз имеет $1/2$ витка, т.е. $W_2 = 1/2$, так как при $m_2=Z_2$ к каждой фазе относится один стержень с двумя участками замыкающих колец, расположенных с разных торцов ротора (рис. 21). Обмоточный коэффициент такой обмотки равен единице, а условное число пазов на полюс и фазу

$$q_2 = \frac{Z_2}{2p_2 m_2} = \frac{1}{2p_2}.$$

В поле воздушного зазора машины помимо основной присутствует целый спектр гармоник более высокого порядка, каждая из которых наводит ЭДС в обмотке ротора, поэтому ток в стержнях обмотки имеет сложный гармонический состав.

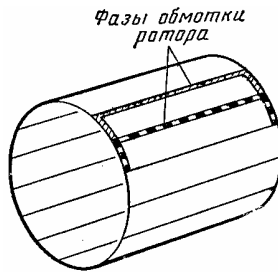


Рис. 21. Фазы обмотки короткозамкнутого ротора

В результате взаимодействия токов и полей высших гармоник возникают электромагнитные моменты, которые при неблагоприятном соотношении Z_1 и Z_2 могут существенно ухудшать механическую характеристику двигателя.

Таблица 12

**Рекомендуемые числа пазов короткозамкнутых
асинхронных двигателей**

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

Примечания: Звездочкой отмечены числа пазов, применяемые в основном в машинах малой мощности.

Влияние синхронных или асинхронных моментов от высших гармоник на момент от первой гармонической приводит к появлению пиков и провалов в результирующей кривой момента.

В поле зазора присутствуют так называемые зубцовые гармоники, которые вызывают шум и вибрацию при работе двигателя при нормальном режиме. Наилучшие сочетания Z_1 и Z_2 для короткозамкнутых двигателей с различными числами $2p$ сведены в табл. 12, в которой предлагается несколько возможных вариантов чисел пазов ротора при данных Z_1 и $2p$. В двигателях малой мощности обычно выполняют $Z_2 < Z_1$. Это объясняется в основном тем, что с увеличением Z_2 ток в стержнях ротора уменьшается и в двигателях небольшой мощности их сечения становятся очень малыми. В более крупных двигателях иногда выполняют $Z_2 > Z_1$, с тем чтобы ограничить ток в стержнях ротора и увеличить равномерность распределения проводников обмотки по длине расточки.

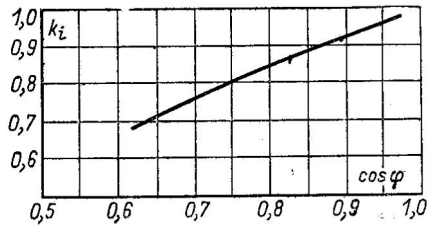


Рис. 22. Коэффициент k_i в зависимости от $\cos \varphi$

Ток в стержне определяется по формуле

$$I_2 = k_i I_1 v_i,$$

где k_i — коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания и сопротивления обмоток на отношение I_1/I_2 . Его приближенное значение может быть взято из кривой рис. 22 в зависимости от номинального $\cos \varphi$, которым задавались в начале расчета;

v_i — коэффициент приведения токов.

При этом с учетом принятых для короткозамкнутой обмотки чисел фаз и витков в фазе коэффициент приведения токов

$$v_i = \frac{m_1 W_1 k_{об1}}{m_2 W_2 k_{об2}} = \frac{2m_1 W_1 k_{об1}}{Z_2}.$$

Сечение стержней, м^2 ,

$$q_c = I_2 / J_2. \quad (7)$$

Плотность тока в стержнях ротора машин закрытого обдуваемого исполнения при заливке пазов алюминием выбирается в пределах $J_2=(2,5\div 3,5)\cdot 10^6$ А/м², а при защищенном исполнении на 10—15% выше, причем для машин больших мощностей следует брать меньшие значения плотности тока.

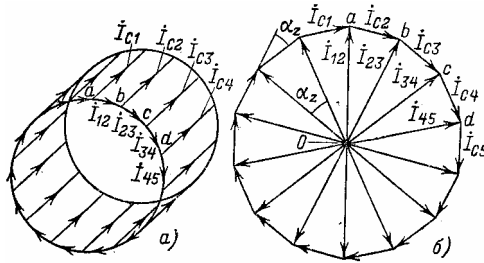


Рис. 23. К расчету тока в замыкающих кольцах короткозамкнутой обмотки ротора

Ток в короткозамкнутых кольцах находят, исходя из следующих соображений.

Токи в стержнях сдвинуты относительно друг друга, на угол $\alpha_z=2p\pi/Z_2$. Начертив многоугольник токов в стержнях (рис. 23, б), стороны которого являются векторами токов стержней, сдвинутых по фазе на угол α_z , убеждаемся, что системе уравнений токов будут соответствовать направления токов на участках колец, показанные на рис. 23, б. Угол между их векторами тоже равен α_z . Обозначив токи в кольце $I_{кл}$, а токи в стержнях I_2 , можем написать:

$$I_{кл} = I_2/\Delta, \quad (8)$$

где

$$\Delta = 2 \sin \frac{\alpha_z}{2} = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}.$$

Выражение (8) является расчетной формулой для определения тока в замыкающих кольцах короткозамкнутых роторов.

Плотность тока в замыкающих кольцах $J_{кл}$ выбирают в среднем, на 15—20% меньше, чем в стержнях. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, замыкающие кольца, имея лучшие условия охлаждения по сравнению со стержнями, являются своего

рода радиаторами, которые отводят тепло стержней, усиливая их охлаждение. Во-вторых, в машинах, в которых для улучшения пусковых характеристик используют эффект вытеснения тока, большое сопротивление замыкающих колец снижает кратность увеличения общего сопротивления обмотки ротора при пуске.

Площадь поперечного сечения замыкающих колец, м^2 ,

$$q_{\text{кл}} = I_{\text{кл}}/J_{\text{кл}}.$$

Сечение колец в роторах со вставными стержнями представляет собой прямоугольник, размеры которого ($a_{\text{кл}} \times b_{\text{кл}}$) выбирают таким образом, чтобы $b_{\text{кл}} = (1,1 \div 1,25)h_{\text{н}2}$ (рис. 24).

Замыкающие кольца литой обмотки обычно выполняют с поперечным сечением в виде неправильной трапеции. Средняя высота кольца выбирается из условия $b_{\text{кл}} \geq 1,2h_{\text{н}2}$.

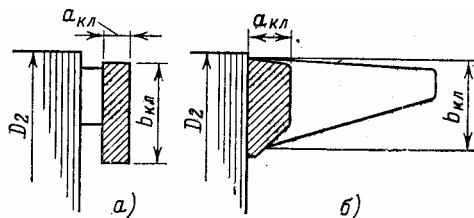


Рис. 24. Размеры замыкающих колец короткозамкнутого ротора:
а — со сварной обмоткой; б — с литой обмоткой

На замыкающих кольцах отливаются вентиляционные лопатки длиной несколько меньшей, чем длина вылета лобовых частей обмотки статора. Количество вентиляционных лопаток выбирают равным простому числу, в 2—3 раза меньшему, чем число пазов ротора.

Расчетное сечение замыкающих колец литой обмотки, м^2 , принимают $q_{\text{кл}} = a_{\text{кл}} b_{\text{кл}}$.

Форма паза короткозамкнутого ротора определяется требованиями к пусковым характеристикам двигателя, его мощностью и числом полюсов. В роторах современных асинхронных двигателей применяют грушевидные, прямоугольные, лопаточные, колбообразные или трапециевидные пазы. Довольно большое распространение получили двухклеточные роторы.

В двигателях с высотами оси вращения до 400 мм наиболее широко распространены роторы с литыми обмотками, при которых возможно выполнение любых требующихся по расчету конфигураций и размерных соотношений стержней с учетом возможности качественной заливки.

Выполняют также двухклеточные роторы с литой обмоткой. Они, как правило, имеют фигурные стержни рабочей обмотки и общие замыкающие кольца.

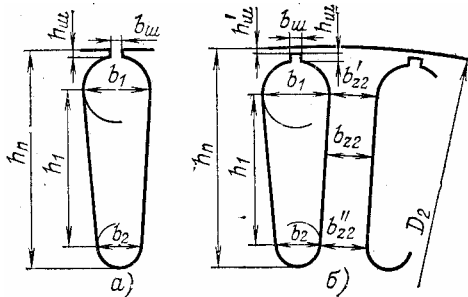


Рис. 25. Грушевидные пазы коротко замкнутого ротора:

а — полузакрытые; *б* — закрытые

При любой конфигурации паза уменьшение ширины верхней части стержней и увеличение их высоты приводят к увеличению пускового момента, но одновременно увеличивается коэффициент магнитной проводимости паза и растет индуктивное сопротивление обмотки ротора. Это ограничивает пусковые токи, но в то же время увеличивает индуктивное сопротивление ротора, что ухудшает коэффициент мощности при номинальном режиме работы и к снижает M_{max} .

То же характерно для двигателей с двухклеточными роторами, имеющими большие пусковые моменты, но низкие коэффициенты мощности при номинальном режиме. Поэтому для обеспечения высоких энергетических показателей номинального режима следует прежде всего ориентироваться на пазы ротора с широкой верхней частью — грушевидные (см. рис. 25).

В асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором серии 4А с высотой оси вращения $h \leq 250$ мм выполняют грушевидные пазы и литую обмотку на роторе (рис. 25, *а*). В двигателях с

$h < 160$ мм пазы имеют узкую прорезь со следующими размерами: $b_{uu}=1,0$ мм и $h_{uu}=0,5$ мм при высоте оси вращения $h < 100$ мм; $b_{uu}=1,5$ мм и $h_{uu}=0,75$ мм при высоте вращения $h = 112 \div 132$ мм. В двигателях с $h = 160 \div 250$ мм выполняют грушевидные закрытые пазы (рис. 25, б) с размерами шлица $b_{uu}=1,5$ мм и $h_{uu}=0,7$ мм. Высота перемычки над пазом в двигателях с $2p \geq 4$ выполняется равной $h'_{uu}=0,3$ мм, в двухполюсных двигателях $h'_{uu}=1,0 \div 1,5$ мм.

Ширина зубцов ротора определяется по допустимой индукции B_{z2} (см. табл. 6):

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} t_2 l_2}{B_{z2} l_{cm2} k_c}.$$

Размеры паза b_1 , b_2 и h_1 (рис. 25) рассчитывают, исходя из сечения стержня q_c и из условия постоянства ширины зубцов ротора.

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{uu} - 2h'_{uu}) - b_{z2}Z_2}{\pi + Z_2}.$$

Далее расчет проводят методом последовательных приближений в следующей последовательности:

1. Задаются значением $b_2 < b_1$
2. Определяют h_1 по следующей формуле

$$h_1 = \frac{Z_2(\pi(D_2 - 2h_{uu} - 2h'_{uu} - b_2) - Z_2(b_{z2} + b_2))}{2\pi(\pi + Z_2)}.$$

3. По формуле (8) определяется площадь паза, которая сравнивается с определенной по (7) площади сечения стержней. Если значение получается меньше, то необходимо несколько уменьшить b_2 и повторять процесс до полного совпадения значений.

После расчета размеры паза следует округлить до десятых долей миллиметра и уточнить площадь сечения стержня q_c :

$$q_c = \frac{\pi}{8}(b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2}(b_1 + b_2)h_1. \quad (8)$$

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

В связи с округлениями результатов расчета необходимо просчитать ширину зубцов в двух сечениях b'_{z2} и b''_{z2} по окончательно принятым размерам паза:

$$b'_{z2} = \pi \frac{D_2 - 2(h_{u'} + h'_{u'}) - b_1 - b_1}{Z_2};$$

$$b''_{z2} = \pi \frac{D_2 - 2h_n + b_2}{Z_2} - b_2.$$

При небольшом расхождении размеров b'_{z2} и b''_{z2} в расчете магнитного напряжения зубцов ротора используется средняя ширина зубца $b_{z2} = (b'_{z2} + b''_{z2})/2$. При заметных расхождениях расчет проводят так же, как для трапециевидальных зубцов ротора.

Расчетная высота зубца принимается по выражению

$$h_{z2} = h_{n2} - 0,1b_2.$$

В двигателях с высотой оси вращения $h=280\div355$ мм выполняют закрытые пазы ротора: при $2p \geq 4$ — трапециевидальные, сужающиеся в верхней части (рис. 26) и при $2p = 2$ — лопаточные (рис. 27). В современных двигателях пазы выполняются неодинаковой величины и формы для получения хороших эксплуатационных и пусковых характеристик.

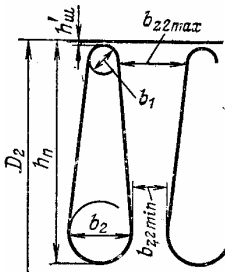


Рис. 26. Трапециевидальные пазы короткозамкнутого ротора

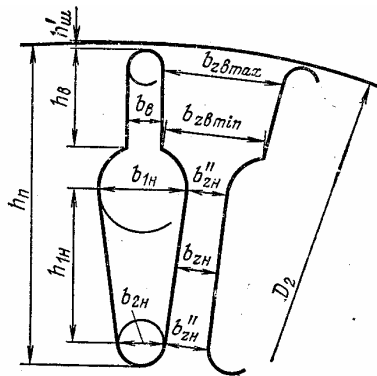


Рис. 27. Лопаточные пазы короткозамкнутого ротора

Сердечники роторов асинхронных двигателей при $D_2 < 990$ мм выполняют с непосредственной посадкой на вал без промежуточной втулки. В двигателях с высотой оси вращения $h_2 \leq 250$ мм применяют горячую посадку сердечников на гладкий вал без шпонки. В двигателях больших размеров сердечники крепят на валу с помощью шпонки. Если диаметр ротора превышает 990 мм, то сердечник шихтуют из отдельных сегментов и крепят на втулке ротора или на продольных ребрах, приваренных к валу (оребрённые валы).

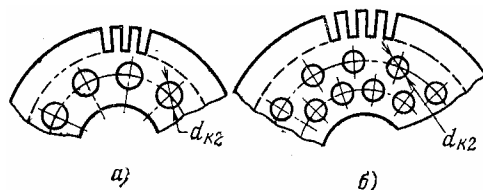


Рис. 28. Аксиальные вентиляционные каналы в сердечнике ротора

В большинстве двигателей с высотой оси вращения $h \geq 250$ мм выполняют аксиальные каналы с целью некоторого улучшения условий охлаждения ротора и снижения его массы и момента инерции. В двигателях серии 4А при $h = 250$ мм аксиальные каналы располагают в одном ряду (рис. 28, а), их число $m_{к2} = 10$, а диаметр $d_{к2} = 15 \div 30$ мм. В двигателях с высотой оси вращения $h = 280 \div 355$ мм в одном ряду располагают 12 каналов диаметром $d_{к2} = 20 \div 30$ мм. В двигателях с $h > 355$ мм число каналов уменьшают до 9, а диаметр увеличивают до 55—100 мм, большие значения $d_{к2}$ относятся к двигателям с большим числом $2p$. Аксиальные каналы могут быть расположены в одном ряду или при больших диаметрах ротора в двух рядах (рис. 28, б).

Радиальные каналы в сердечнике ротора, так же как и в статоре, выполняются лишь при длине сердечника, превышающей 0,25—0,3 м. В таких роторах необходимо предусматривать выполнение также и аксиальных каналов, которые служат для прохода охлаждающего воздуха к радиальным каналам.

Наличие каналов, их диаметр и расположение оказывают влияние на магнитное напряжение ярма ротора и должны быть учтены при расчете магнитной цепи.

Внутренний диаметр сердечника ротора D_j при непосредственной посадке на вал равен диаметру вала D_e и может быть определен по формуле

$$D_e \approx k_e D_a.$$

Значение коэффициента k_e даны в табл. 13.

Таблица 13

Коэффициент k_B для расчета диаметра вала асинхронных двигателей

h , мм	50—63	71—250	280—355		400—500		
$2p$	2—6	2—8	2	4—12	4	6	8—12
k_B	0,19	0,23	0,22	0,23	0,20	0,23	0,25

Если сердечник ротора насажен на втулку или оребренный вал, то внутренний диаметр D_j , м, определяется, исходя из допустимой индукции в ярме ротора, с использованием следующих выражений:

$$h_j = \frac{\Phi}{2B_j l_{cm2} k_c};$$

$$D_j = D_2 - 2(h_{n2} + h_j).$$

Расчет магнитной цепи

Расчет магнитной цепи 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 поля в воздушном зазоре (рис. 29). Поэтому за расчетную индукцию принимается не амплитудное значение, а $B_{расч} = B_{max} \cos \psi \approx 0,82 B_{max}$. По $B_{расч}$ следует определить $H_{расч}$ по основной кривой намагничивания и увеличить затем результат в $k=1/0,82$ раз, приводя напряженность к амплитудному значению индукции. Для воздушного зазора, имеющего линейную зависимость $H=f(B)$, эта операция равносильна непосредственному определению магнитного напряжения зазора по B_{δ} . При определении магнитных напряжений участков магнитной цепи с нелинейными магнитными характеристиками влияние уплощения учитывается специальными кривыми намагничивания для зубцов и ярм асинхронных двигателей, построенными по основной кривой намагничивания с учетом указанных зависимостей. При этом принимают $\alpha_{\delta}=2/\pi$ и $k_{\delta}=1,11$.

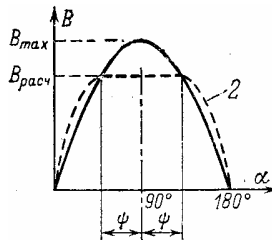


Рис. 29. Кривые индукции в воздушном зазоре асинхронной машины

1 — синусоида; 2 — уплощенная кривая

Расчет магнитной цепи проводится в нижеследующей последовательности. Используя рассчитанные по (3) и (4) соответственно поток полюса и индукцию в воздушном зазоре, находят индукцию в зубцах статора и ротора:

$$B_{z1(2)} = \frac{B_{\delta} t_{1(2)} l_{\delta}}{b_{z1(2)} l_{cm1(2)} k_c}$$

При переменном сечении зубцов рассчитывают либо три значения индукции B_{zmax} , B_{zmin} и B_{zcp} соответственно в наибольшем, наименьшем и среднем сечении зуба либо индукцию $B_{z\frac{1}{3}}$ в сечении на расстоянии $1/3$ высоты от узкой части зуба. Расчетную ширину зубцов определяют в зависимости от конфигурации пазов.

Индукция в ярме статора B_a , Тл,

$$B_a = \frac{\Phi}{2h'_a l_{cm1} k_c},$$

где h'_a — расчетная высота ярма статора, м:

$$h'_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{n1} - \frac{2}{3} d_{\kappa1} m_{\kappa1},$$

где $d_{\kappa1}$ и $m_{\kappa1}$ — диаметр и число рядов аксиальных вентиляционных каналов в статоре. При отсутствии каналов $m_{\kappa1} = 0$.

Индукция в ярме ротора B_j , Тл,

$$B_j = \frac{\Phi}{2h'_j l_{cm2} k_c},$$

где h'_j — расчетная высота ярма ротора, м.

При этом для роторов с посадкой сердечника на втулку или на оребренный вал (крупные асинхронные машины) расчетная высота ярма ротора

$$h'_j = \frac{D_a - D_j}{2} - h_{n2} - \frac{2}{3} d_{\kappa2} m_{\kappa2}, \quad (9)$$

где $d_{\kappa2}$ — диаметр аксиальных каналов ротора;
 $m_{\kappa2}$ — число рядов аксиальных каналов.

При посадке сердечника непосредственно на вал в двигателях с $2p = 2$ и 4 необходимо учитывать, что часть магнитных линий потока замыкается через вал. При этом расчетная высота ярма ротора

$$h'_j = \frac{2+p}{3,2p} \left(\frac{D_2}{2} - h_{n2} \right) - \frac{2}{3} d_{\kappa2} m_{\kappa2}.$$

Для двигателей с $2p \geq 6$ с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал h'_j определяют по (9).

Магнитное напряжение воздушного зазора, А,

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} B_{\delta} \delta k_{\delta} = 1,59 B_{\delta} \delta k_{\delta} \cdot 10^6.$$

В этой формуле k_{δ} — коэффициент воздушного зазора по

$$k_{\delta} = \frac{t}{t - \gamma \delta};$$

δ — воздушный зазор, м;

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора, А,

$$F_{z1} = 2h_{z1}H_{z1},$$

где h_{z1} — расчетная высота зубца статора, м.

При переменном сечении зубцов

$$H_{z1} = (H_{z1\max} + H_{z1\min} + 4H_{z1cp})/6$$

или $H_{z1} = H_{z1/2}$.

Значения напряженности поля в зубцах H_z , А/м, находят в соответствии с индукциями B_z , по кривой намагничивания для зубцов для принятой марки стали (табл. 15, 17). Напоминаем, что сталь выбиралась по табл. 7 при расчете размеров зубцовой зоны статора.

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора, А,

$$F_{z2} = 2h_{z2}H_{z2},$$

где h_{z2} — расчетная высота зубца, м.

При переменном и плавно изменяющемся сечении зубца

$$H_{z2} = (H_{z2\max} + H_{z2\min} + 4H_{z2cp})/6$$

или

$$H_{z2} = H_{z2/2}.$$

Значения H , А/м, определяются по кривой намагничивания для зубцов для принятой марки стали (табл. 15, 17).

Если при расчете зубцов с переменным сечением $H_{z1\max}/H_{z1\min} > 2$, то необходимо подразделить зубец по высоте на две равные части и определить напряженности в каждой из них в отдельности. В этом случае расчетная ширина зубца берется на высоте 0,2 и 0,7 всей высоты зубца от его наиболее узкой части:

$$b_{z0,2} = b_{z\min} + 0,2(b_{z\max} - b_{z\min});$$

$$b_{z0,7} = b_{z\min} + 0,7(b_{z\max} - b_{z\min}).$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны

$$F_{z2} = h_{z2}(H_{z0,2} + H_{z0,7}).$$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta}.$$

Если $k_z > 1,5 \div 1,6$, имеет место чрезмерное насыщение зубцовой зоны; если $k_z < 1,2$, то зубцовая зона мало использована или воздушный зазор взят слишком большим. В обоих случаях в расчет должны быть внесены соответствующие коррективы.

Магнитное напряжение ярма статора, А,

$$F_a = L_a H_a,$$

где L_a — длина средней магнитной линии ярма статора, м:

$$L_a = \pi(D_a - h_a)/2p;$$

H_a , А/м — напряженность поля при индукции B_a по кривой намагничивания для ярма принятой марки стали (табл. 14, 16).

Магнитное напряжение ярма ротора, А,

$$F_j = L_j H_j,$$

где H_j , А/м — напряженность поля при индукции B_j по кривой намагничивания ярма для принятой марки стали (табл. 14, 16);

L_j — длина средней магнитной линии потока в ярме ротора, м. Для всех двигателей, кроме двухполюсных с непосредственной посадкой на вал,

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

где высота спинки ротора

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{n2}.$$

Для двигателей с $2p=2$, сердечник ротора которых непосредственно насажен на вал, длина средней магнитной линии определяется по формуле

$$L_j = 2h_j.$$

Суммарное магнитное напряжение магнитной цепи машины (на пару полюсов), А,

$$F_u = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j.$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$k_\mu = F_u / F_\delta.$$

Намагничивающий ток

$$I_\mu \approx \frac{pF_u}{0,9m_1\omega_1k_{\sigma\delta 1}}.$$

I_μ выражается также в процентах или долях номинального тока:

$$I_{\mu^*} = I_\mu / I_{1н}.$$

Если при проектировании четырехполюсного двигателя средней мощности расчет показал, что $I_{\mu^*} < 0,20 \div 0,18$, то размеры машины выбраны завышенными и активные материалы недоиспользованы. Такой двигатель может иметь высокие КПД и $\cos\varphi$, но большую массу и габариты. Если же в аналогичном двигателе $I_{\mu^*} > 0,30 \div 0,35$, то двигатель будет иметь низкие КПД и $\cos\varphi$. В небольших двигателях мощностью менее 2—3 кВт I_{μ^*} может достигать значения 0,5—0,6, несмотря на правильно выбранные размеры и малое насыщение магнитопровода. Это объясняется относительно большим значением магнитного напряжения воздушно-го зазора, характерным для двигателей малой мощности.

Таблица 14

**Кривая намагничивания для ярма
асинхронных двигателей. Сталь 2013**

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H, \text{ А/м}$									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1,0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	6L8	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110

1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1,9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2,0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Таблица 15

**Кривая намагничивания для зубцов
асинхронных двигателей. Сталь 2013**

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	10460	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Таблица 16

**Кривая намагничивания для ярма
асинхронных двигателей. Сталь 2312**

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	89	91	93	94	96	98	100	102	104	106
0,6	131	134	136	139	141	144	147	150	153	156
0,8	194	198	201	204	208	212	216	220	223	227
0,9	231	235	239	243	248	252	255	260	265	269
1,0	274	279	284	289	295	300	305	311	318	323
1,1	332	338	344	351	357	367	374	382	390	398
1,2	410	418	426	435	444	455	466	475	487	498
1,3	509	521	533	546	558	572	585	600	618	635
1,4	656	675	695	717	740	763	789	815	843	870

1,5	905	934	965	1000	1040	1090	1130	1190	1240	1290
1,6	1370	1440	1520	1590	1660	1720	1820	1910	2010	2100
1,7	2180	2310	2410	2550	2610	2720	2840	2980	3130	3290
1,8	3460	3630	3800	3970	4140	4301	4490	4670	4850	5040
1,9	5220	5600	6000	6400	6900	7400	7900	8500	9100	9700
2,0	10400	11100	11800	12500	13300	14100	14900	15800	16700	17600

Таблица 17

**Кривая намагничивания для зубцов
асинхронных двигателей. Сталь 2312**

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H, A/m$									
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	171
0,6	204	209	213	216	221	224	229	233	237	241
0,8	292	297	302	306	311	316	322	326	331	337
0,9	342	347	353	360	366	372	379	384	390	396
1,0	403	409	417	425	433	440	450	460	470	477
1,1	488	497	509	517	527	537	547	559	570	582
1,2	593	602	613	626	638	651	663	677	695	710
1,3	724	738	755	770	790	804	820	840	857	879
1,4	897	917	936	955	977	1000	1020	1040	1060	1090
1,5	1120	1150	1170	1210	1240	1270	1310	1330	1370	1410
1,6	1450	1490	1530	1560	1610	1650	1690	1750	1790	1840
1,7	1900	1940	2000	2070	2140	2220	2300	2380	2500	2600
1,8	2700	2800	2920	3050	3220	3330	3490	3610	3710	4000
1,9	4160	4350	4600	4800	5030	5330	5430	5790	6130	6420
2,0	6750	7170	7400	7790	8150	8520	9000	9400	9750	10200
2,1	10600	11000	11500	12100	12600	13000	13500	14100	14700	15400
2,2	15900	16500	17300	17800	18500	19100	19600	20300	21100	22000
2,3	23100	24 300	25500	26800	28100	29500	30900	32400	33900	36400

Параметры асинхронной машины для номинального режима

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора x_1 , r_1 , ротора r_2 , x_2 , сопротивление взаимной индуктивности x_{12} и расчетное сопротивление $r_{2'}^1$ (или $r_{2'}$), введением которого учитывают влияние потерь в стали статора на характеристики двигателя.

Схемы замещения фазы асинхронной машины, приведены на рис. 30. Физические процессы в асинхронной машине более наглядно отражает схема, изображенная на рис. 30, а. Но для расчета удобнее схема, показанная на рис. 30, б.

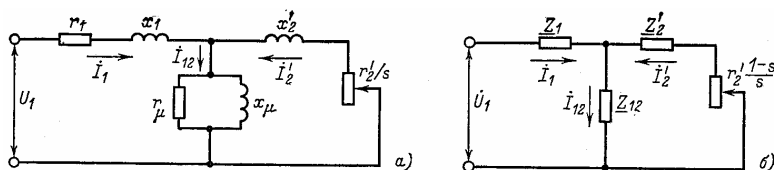


Рис. 30. Схемы замещения фазы обмотки приведенной асинхронной машины

С увеличением нагрузки увеличивается поток рассеяния и в связи с этим из-за возрастания насыщения отдельных участков магнитопровода полями рассеяния уменьшаются индуктивные сопротивления x_1 и x_2 .

Увеличение скольжения в двигателях с короткозамкнутым ротором приводит к возрастанию действия эффекта вытеснения тока, что вызывает изменение сопротивлений обмотки ротора r_2 и x_2 . При расчете рабочих режимов машины в пределах изменения скольжения от холостого хода до номинального эти изменения незначительны и ими обычно пренебрегают.

При расчете пусковых режимов, в которых токи машины в несколько раз превышают номинальный, а частота тока в роторе близка к частоте питающей сети, приходится учитывать изменение параметров от насыщения участков магнитопровода полями рассеяния и от влияния эффекта вытеснения тока.

Активные сопротивления обмоток статора

Активные сопротивления r_1 и r_2 , Ом, определяются по основной расчетной формуле

$$r = k_r \rho_g \frac{L}{q_{эф} a},$$

где L — общая длина эффективных проводников фазы обмотки, м;

$q_{эф}$ — сечение эффективного проводника, м^2 :

$$q_{эф} = q_{эл} n_{эл};$$

$q_{эл}$ — сечение элементарного проводника;

$n_{эл}$ — число элементарных проводников в одном эффективном;

a — число параллельных ветвей обмотки;

ρ_g — удельное сопротивление материала обмотки при расчетной температуре (табл. 18), Ом·м;

k_r — коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока.

Таблица 18

Удельные сопротивления материалов обмоток, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} 10^{-6}$

$t, ^\circ\text{C}$	15	75	100	120	150
Медь	1/57	1/46	1/42,5	1/40	1/37
Алюминий	1/28	1/22,5	1/21	1/19,7	1/18,2
Латунь	1/15,5	1/12,5	1/11,5	1/11	1/10

В проводниках обмотки статора асинхронных машин эффект вытеснения тока проявляется незначительно из-за малых размеров элементарных проводников. Поэтому в расчетах нормальных машин, как правило, принимают $k_r=1$. Некоторое увеличение потерь, обусловленное действием эффекта вытеснения тока, относят к дополнительным потерям.

Общая длина проводников фазы обмотки L , м,

$$L = l_{cp} W,$$

где l_{cp} — средняя длина витка обмотки, м;

W — число витков фазы.

Среднюю длину витка l_{cp} находят как сумму прямолинейных пазовых и изогнутых лобовых частей катушки (рис. 31, 32)

$$l_{cp} = 2(l_n + l_l).$$

Длина пазовой части l_n равна конструктивной длине сердечников машины:

$$l_n = l_{1(2)}.$$

Катушки насыпной обмотки статора.

Длина лобовой части, м,

$$l_l = K_l b_{км} + 2B;$$

вылет лобовых частей обмотки, м,

$$l_{выл} = K_{выл} b_{км} + B.$$

В этих формулах $b_{км}$ — средняя ширина катушки, м:

$$b_{км} = \frac{\pi(D + h_{n1})}{2p} \beta_1;$$

β_1 — относительное укорочение шага обмотки статора.

Для диаметральных двухслойных обмоток, выполненных без укорочения шага, и для однослойных обмоток, включая обмотки из концентрических катушек, имеющих разную ширину, принимают $\beta = 1$; K_l и $K_{выл}$ — коэффициенты, значения которых берут из табл. 19; B — длины вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части, м.

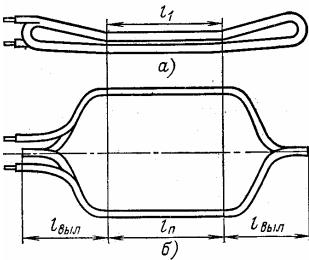


Рис. 31. Катушка двухслойной обмотки статора. Общий вид

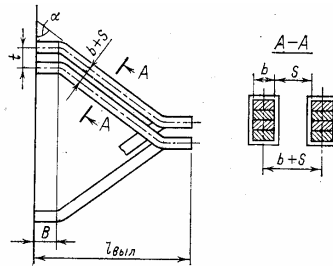


Рис. 32. Размеры лобовой части катушки

Для насыпной обмотки, укладываемой в пазы до запрессовки сердечника в корпус, берут $B = 0,01$ м. В машинах, обмотки которых укладывают после запрессовки сердечника в корпус, вылет прямолинейной части $B = 0,015$ м.

Таблица 19

К расчету размеров лобовых частей катушек верхней обмотки

Число полюсов $2p$	Катушки статора			
	Лобовые части не изолированы		Лобовые части изолированы лентой	
	$K_{л}$	$K_{\text{выл}}$	$K_{л}$	$K_{\text{выл}}$
2	1,20	0,26	1,45	0,44
4	1,30	0,40	1,55	0,50
6	1,40	0,50	1,75	0,62
≥ 8	1,50	0,50	1,90	0,72

*Индуктивные сопротивления обмотки статора
двигателей с фазными роторами*

Индуктивные сопротивления обмоток двигателей с фазными роторами рассчитывают по:

$$x = 15,8 \frac{f}{100} \left(\frac{W}{100} \right)^2 \frac{l'_s}{pq} (\lambda_n + \lambda_a + \lambda_o).$$

Входящие в эту формулу коэффициенты магнитной проводимости обмоток асинхронных машин определяют следующим образом.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния λ_n рассчитывают по формулам, приведенным в табл. 20, в зависимости от конфигурации паза и расположения в нем проводников обмотки. В этих формулах значения коэффициентов k_β и k'_β определяют в зависимости от шага обмотки.

При диаметральном шаге двухслойных обмоток и для всех однослойных обмоток

$$k_\beta = k'_\beta = 1.$$

При двухслойной обмотке с укорочением $2/3 \leq \beta < 1$

$$k'_\beta = 0,25(1 + 3\beta); \quad (10)$$

при укорочении $1/3 \leq \beta \leq 2/3$

$$k'_\beta = 0,25(6\beta - 1); \quad (11)$$

коэффициент

$$k_\beta = 0,25(1 + 3k'_\beta). \quad (12)$$

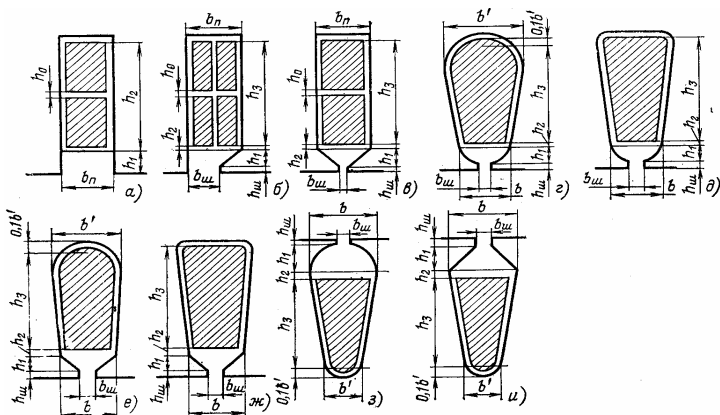


Рис. 33. К расчету коэффициентов магнитной проводимости пазов статора

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_{\delta} = 0,42 \frac{q}{l_{\delta}} (l_{\delta} - 0,64 \beta \tau), \quad (13)$$

где q , l_{δ} и β — число пазов на полюс и фазу, длина лобовой части катушки и относительное укорочение шага обмотки, для которой производится расчет.

Для одно-двухслойных обмоток β находится соответственно:

$$\beta = \frac{2}{3} \frac{q+1}{q};$$

$$\beta = \frac{2}{3} \frac{q+2}{q}.$$

При наличии радиальных вентиляционных каналов для обмотки статора

$$l'_{\delta} = l_1 - 0,5 n_{\kappa} b_{\kappa}$$

и для обмотки ротора

$$l'_{\delta} = l_2 - 0,5 n_{\kappa} b_{\kappa}. \quad (14)$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния для обмоток статора и фазного ротора

$$\lambda_{\delta} = \frac{t}{9,5 \delta k_{\delta}} \xi.$$

Значение коэффициента ξ зависит от числа q , укорочения шага обмотки и размерных соотношений зубцовых зон и воздушного зазора.

Ниже приводятся формулы, в которые при расчете ξ для обмоток статора или ротора следует подставлять данные обмоток и зубцовых зон соответственно статора или ротора.

Для обмоток статора и ротора при q , выраженном целым числом ($q \geq 2$), для обмотки с диаметральной шагом

$$\xi = 2 + 0,022q^2 - k_{оо}^2(1 + \Delta_z);$$

при укороченном шаге обмотки $y = \beta\tau$

$$\xi = k''q^2 + 2k'_\beta - k_{оо}^2(1 + \Delta_z);$$

В этих формулах коэффициенты Δ_z , k' , k'' и k''_β определяются по кривым, приведенным на рис. 34. Для определения k''_β и k' необходимо найти дробную часть числа q , равную c/d (дробное число $q = b + c/d$, где b — целое число, $c/d < 1$ — дробная часть числа q).

Таблица 20

Расчетные формулы для определения коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния фазных обмоток λ_{Π}

Рисунок	Тип обмотки	Расчетные формулы
33, а	Двухслойная	$\frac{h_2 - h_0}{3b_n} k_\beta + \frac{h_1}{b_n} k'_\beta + \frac{h_0}{4b_n}$
	Однослойная	$\frac{h_2}{3b_n} + \frac{h_1}{b_n}$
33, б	Двухслойная	$\frac{h_3 - h_0}{3b_n} k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_n} + \frac{3h_{1Б}}{b_n + 2b_u} + \frac{h_u}{b_u} \right) k'_\beta$
33, в	Двухслойная	$\frac{h_3 - h_0}{3b_n} k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_n} + \frac{3h_{1Б}}{b_n + 2b_u} + \frac{h_u}{b_u} \right) k'_\beta$
	Однослойная	$\frac{h_3}{3b_n} + \frac{h_2}{b_n} + \frac{3h_{1Б}}{b_n + 2b_u} + \frac{h_u}{b_u}$
33г, д, з	Двухслойная и однослойная	$0,4\pi \left(\frac{h_3}{3b_n} k_\beta + \left(0,785 - \frac{b_u}{2b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_u}{b_u} \right) k'_\beta \right)$
33, е, ж, и	Двухслойная и однослойная	$0,4\pi \left(\frac{h_3}{3b_n} k_\beta + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3h_{1Б}}{b + 2b_u} + \frac{h_u}{b_u} \right) k'_\beta \right)$

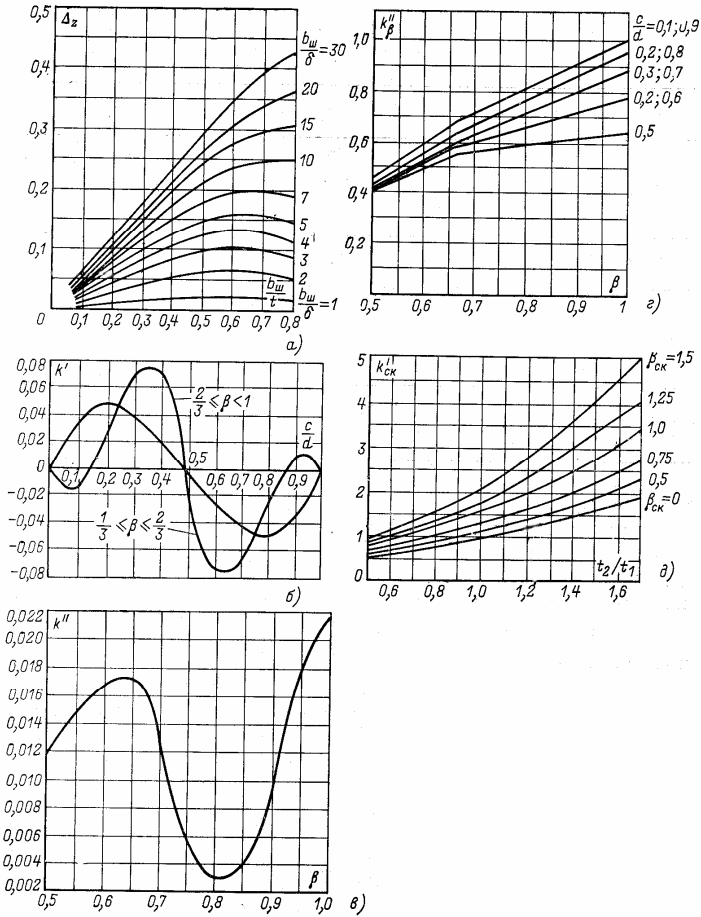


Рис. 34. Коэффициенты к расчету проводимости дифференциального рассеяния

а — коэффициент Δz в зависимости от размерных соотношений $b_{ш}/t$ и $b_{ш}/\delta$;

б — коэффициент κ' в зависимости от дробной части числа q ;

в — коэффициент κ'' в зависимости от укорочения шага обмотки β ;

г — коэффициент $\kappa'_{СК}$ в зависимости от укорочения шага обмотки β и дробной части числа q ;

д — коэффициент $\kappa''_{СК}$ в зависимости от соотношения t_2/t_1 и относительного скоса пазов $\beta_{СК}$

*Сопротивления обмоток двигателей
с короткозамкнутыми роторами*

Активное сопротивление фазы обмотки статора двигателя с короткозамкнутым ротором рассчитывается так же, как и для двигателя с фазным ротором.

Активное сопротивление фазы короткозамкнутого ротора r_2 является расчетным, полученным из условия равенства электрических потерь в сопротивлении r_2 от тока I_c и суммарных потерь в стержне и участках замыкающих колец реальной машины:

$$I_c^2 r_2 = I_c^2 r_c + 2I_{кл}^2 r_{кл}, \quad (15)$$

где I_c — ток в стержне ротора;

$I_{кл}$ — ток в замыкающих кольцах;

r_c — сопротивление стержня;

$r_{кл}$ — сопротивление участка замыкающего кольца, заключенного между двумя соседними стержнями (см. рис. 23).

Ток I_c называют током ротора и в расчетах обозначают I_2 .

Учитывая, что

$$I_{кл} = I_c / \Delta = I_2 / \Delta,$$

где $\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{z_2}$, из (15) получаем:

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

где

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

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

В этих выражениях l_c — полная длина стержня, равная расстоянию между замыкающими кольцами, м;

$D_{кл,ср}$ — средний диаметр замыкающих колец, м (см. рис. 24):

$$D_{кл,ср} = D_2 - b_{кл}; \quad (16)$$

q_c — сечение стержня, м²;

k_r — коэффициент увеличения активного сопротивления стержня от действия эффекта вытеснения тока, при расчете рабочих режимов в пределах изменения скольжения от холостого хода до номинального, для всех роторов принимают $k_r=1$;

$q_{кл}$ — площадь поперечного сечения замыкающего кольца, м²;

ρ_c и $\rho_{кл}$ — соответственно удельные сопротивления материала стержня и замыкающих колец, Ом·м, при расчетной температуре 75°С.

Сопротивление r_2 должно быть приведено к числу витков первичной обмотки.

$$r_2' = r_2 \frac{4m_1(W_1 k_{об1})^2}{Z_2}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

$$x = 15,8 \frac{f}{100} \left(\frac{\omega}{100} \right)^2 \frac{l_\delta'}{pq} (\lambda_n + \lambda_t + \lambda_o)$$

Коэффициенты магнитной проводимости пазового рассеяния λ_n определяются по формулам табл. 20.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния λ_t определяется по (13).

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния λ_{o1} определяют по формуле

$$\lambda_{o1} = \frac{t_1}{12\delta k_\delta} \xi,$$

в которой ξ находится следующим образом:

При открытых пазах статора и отсутствии скоса пазов статора или ротора

$$\xi = \left(2 \frac{t_2}{t_1} - \frac{t_1}{t_2} \Delta_z \right) k_\beta - k_{об1}^2 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2.$$

При полузакрытых или полукрытых пазах статора с учетом скоса пазов

$$\xi = 2k'_{ck} k_{\beta} - k_{\sigma\delta 1}^2 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 (1 + \beta_{ck}^2).$$

В этих формулах t_1 и t_2 — зубцовые деления статора и ротора; Δ_z определяют по кривой рис. 34, а; k_{β} определяют по (12); $\beta_{ck} = b_{ck}/t_2$ — коэффициент скоса, выраженный в долях зубцового деления ротора. При отсутствии скоса пазов $b_{ck}=0$; k'_{ck} определяют по кривым рис. 34, д в зависимости от t_2/t_1 и β_{ck} (при отсутствии скоса пазов — по кривой, соответствующей $\beta_{ck}=0$).

Индуктивное сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора определяют по формуле

$$x_2 = 7,9 f_1 l'_{\delta} \cdot 10^{-6} (\lambda_n + \lambda_a + \lambda_{\sigma}), \quad (17)$$

полученной после подстановки в

$$F_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} B_{\delta} \delta k_{\delta}.$$

значений $m_2=Z_2$ и $q_2=1/2p$ обмотки короткозамкнутого ротора.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора рассчитывают по приведенным в табл. 21 формулам в зависимости от конфигурации паза ротора на рис. 35.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора

$$\lambda_{12} = \frac{t_2}{12\delta k_{\delta}} \xi,$$

где

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

Δ_z находят по кривым рис. 34, а.

При большом числе пазов ротора, приходящихся на пару полюсов, $Z_2/p \geq 10$ можно принять $\xi = 1 - \Delta_z$.

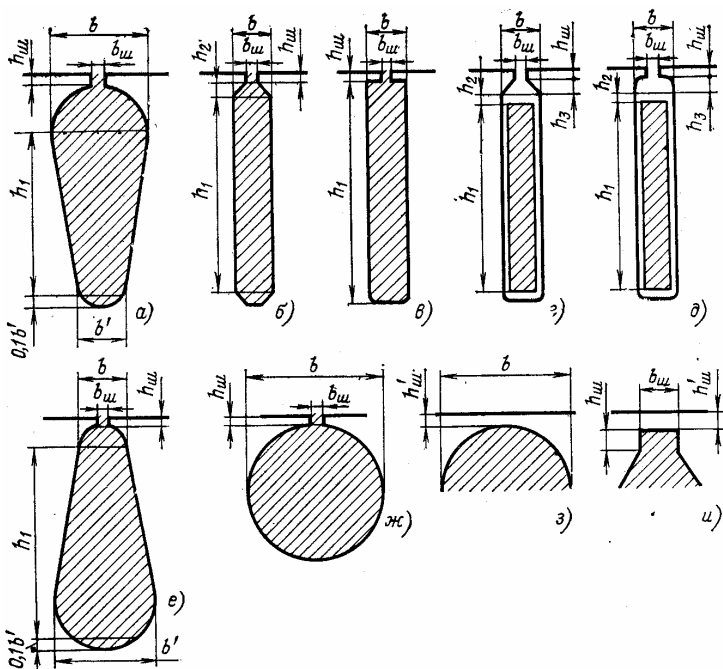


Рис. 35. К расчету магнитной проводимости пазов ротора

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния рассчитывают по следующим формулам.

В роторах с литыми обмотками при замыкающих кольцах, прилегающих к торцам сердечника ротора (см. рис. 24, б), используют формулу

$$\lambda_{\lambda 2} = \frac{2,3D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 l'_\delta \Delta^2} \lg \frac{4,7D_{\text{кл.ср}}}{2a_{\text{кл}} + b_{\text{кл}}},$$

где $D_{\text{кл.ср}}$ — средний диаметр замыкающих колец по (16);

$\Delta = 2 \sin \pi p / Z_2$ — коэффициент приведения токов в кольце к току в стержне;

$a_{\text{кл}}$ и $b_{\text{кл}}$ — средняя высота и ширина колец (см. рис. 24);

l'_δ по (14).

Приведенное к числу витков первичной обмотки индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора

$$x_2' = x_2 \frac{4m(W_1 k_{\sigma\delta 1})^2}{Z_2}$$

Сопротивление схемы замещения r_μ (см. рис. 30, а) должно быть взято таким, чтобы выделяющаяся в нем активная мощность была бы равна мощности, затрачиваемой на потери в стали в реальной машине и отнесенной к одной фазе. Таким образом, $r_\mu = P_{cm} / mI_{0a}^2$, так как активные потери в стали определяются активной составляющей тока холостого хода I_{0a} . Из схемы замещения $r_\mu = E_1^2 m_1 / P_{cm}$, где $E_1 = U_1 - I_1 Z_1$.

Сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора x_μ по схеме замещения может быть определено как $x_\mu = E_1 / I_\mu$.

В расчетной практике параллельное включение сопротивлений r_μ и x_μ оказалось удобнее заменить последовательно включенными сопротивлениями r_{12} и x_{12} (см. рис. 30, б), значения которых с достаточной точностью определяют по следующим формулам:

$$r_{12} = \frac{P_{cm, очн}}{mI_\mu^2};$$

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

Таблица 21

Расчетные формулы для определения коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния короткозамкнутых роторов

Рисунок	Расчетные формулы
35, а	$0,4\pi \left(\left[\frac{h_1}{3b} \left(1 - \frac{\pi b^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_i}{2b} \right] k_{\bar{b}} + \frac{h_i}{b_i} \right)$
35, б	$\left(\frac{h_1}{3b} + \frac{3h_2}{b + 2b_i} \right) k_{\bar{b}} + \frac{h_i}{b_i}$
35, в	$\frac{h_1}{3b} k_{\bar{b}} + \frac{h_i}{b_i}$

Рисунок	Расчетные формулы
35, г	$\frac{h_1}{3b} k_{\bar{b}} + \frac{h_2}{b} + \frac{2h_2}{b + 2b_{\bar{u}}} + \frac{h_{\bar{u}}}{b_{\bar{u}}}$
35, д	$\frac{h_1}{3b} k_{\bar{b}} + \frac{h_2}{b} + 0,785 - \frac{b_{\bar{u}}}{2b} + \frac{h_{\bar{u}}}{b_{\bar{u}}}$
35, е	$0,4\pi \left(\left[\frac{h_1}{3b} \left(1 - \frac{\pi b^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{\bar{u}}}{2b} \right] k_{\bar{b}} + \frac{h_{\bar{u}}}{b_{\bar{u}}} \right)$
35, ж	$\left(0,785 - \frac{b_{\bar{u}}}{2b} \right) k_{\bar{b}} + \frac{h_{\bar{u}}}{b_{\bar{u}}}$

Относительные значения параметров

Параметры асинхронных машин обычно выражают в относительных единицах, принимая за базисные значения номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток статора.

Значения параметров, выраженные в относительных единицах, будем отмечать звездочкой:

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1н}}{U_{1н}}; r_{1*} = r_1 \frac{I_{1н}}{U_{1н}}; x_{12*} = x_{12} \frac{I_{1н}}{U_{1н}};$$

$$x'_{2*} = x'_2 \frac{I_{1н}}{U_{1н}}; r'_{2*} = r'_2 \frac{I_{1н}}{U_{1н}}; r_{12*} = r_{12} \frac{I_{1н}}{U_{1н}}.$$

Относительные значения индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора и приведенного сопротивления обмотки ротора различных асинхронных двигателей нормального исполнения находятся в пределах $x_{1*} = 0,08 \dots 0,14$ и $x'_{2*} = 0,1 \dots 0,16$. Относительные значения сопротивлений взаимной индукции $x_{12*} = 2 \dots 4$. Относительные значения активных сопротивлений обмотки статора и приведенного сопротивления обмотки ротора $r_{1*} \approx r'_{2*} \approx 0,02 \dots 0,03$. Сопротивление r_{12*} обычно составляет $0,05 \dots 0,2$.

Учет скоса пазов

Скос пазов уменьшает влияние высших гармонических и улучшает виброакустические характеристики двигателей, но при скошенных пазах несколько уменьшается ЭДС обмоток. В практических расчетах уменьшение ЭДС от скоса пазов непосредственно не определяют, а влияние скоса учитывают увеличением индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток статора и ротора. С этой целью в расчетную формулу (17) вводят коэффициент $\sigma_{ск}$. Индуктивное сопротивление обмоток при скошенных пазах

$$\left. \begin{aligned} x_{1ск} &= x_1 \sigma_{ск} ; \\ x_{2ск} &= x_2 \sigma_{ск} . \end{aligned} \right\}$$

Приближенное значение коэффициента $\sigma_{ск}$ можно найти по формуле

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

где $b_{ск}$ — скос пазов в линейных размерах.

Скошенные пазы выполняют большей частью лишь в двигателях с короткозамкнутыми роторами с $h \leq 160$ мм. При скосе пазов из-за увеличения индуктивных сопротивлений рассеяния несколько уменьшается перегрузочная способность и пусковой момент двигателя. Поэтому в серии 4А роторы всех двигателей с высотой оси вращения $h < 160$ мм выполняют со скосом пазов на одно зубцовое деление ротора, т.е. $b_{ск} = t_2$.

Потери и КПД

Потери в асинхронных машинах подразделяют на потери в стали (основные и добавочные), электрические потери, вентиляционные, механические и добавочные потери при нагрузке. *Основные потери в стали* в асинхронных двигателях рассчитывают только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора, равная $f_2 = sf_1$, в режимах, близких к номинальному, очень мала и потери в стали ротора даже при больших индукциях незначительны.

В пусковых режимах электрические потери в обмотках во много раз превышают потери номинального режима, поэтому пренебрежение потерями в стали ротора при больших скольжениях не вносит сколько-нибудь заметной погрешности в расчет.

Основные потери в стали статоров асинхронных машин определяют по следующей формуле

$$P_{ст.осн} = p_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta (k_{\sigma a} B_a^2 m_a + k_{\sigma z} B_{zcp}^2 m_{z1}),$$

где β — показатель степени и $p_{1,0/50}$ — удельные потери, Вт/кг, берут из табл. 22;

$k_{\sigma a}$ и $k_{\sigma z}$ — коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов. Для машин мощностью меньше 250 кВт приближенно можно принять $k_{\sigma a} = 1,6$ и $k_{\sigma z} = 1,8$; для машин большей мощности $k_{\sigma a} = 1,4$ и $k_{\sigma z} = 1,7$

B_a и B_{zcp} — индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора, Тл;

m_a, m_{z1} — масса стали ярма и зубцов статора, кг:

$$\begin{aligned} m_a &= \pi (D_a - h_a) h_a l_{cm1} k_c \gamma_c; \\ m_{z1} &= h_{z1} b_{z1cp} Z_1 l_{cm1} k_c \gamma_c; \end{aligned} \quad (18)$$

h_a — высота ярма статора, м:

$$h_a = 0,5 (D_a - D) - h_{n1};$$

h_{z1} — расчетная высота зубца статора, м;

b_{z1cp} — средняя ширина зубца статора, м:

$$h_{z1cp} = \frac{b_{z1}^{\setminus} + b_{z1}^{\setminus\setminus}}{2};$$

γ_c — удельная масса стали; в расчетах принимают $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^2$ кг/м³.

Добавочные потери в стали, возникающие при холостом ходе, подразделяют на поверхностные (потери в поверхностном слое коронок зубцов статора и ротора от пульсации индукции в воздушном зазоре) и пульсационные потери в стали зубцов (от пульсации индукции в зубцах).

Вначале находят амплитуду пульсации индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов статора и ротора, Тл,

$$B_{01(2)} = \beta_{01(2)} k_{\delta} B_{\delta}.$$

Для зубцов статора β_{01} зависит от отношения ширины шлица пазов ротора к воздушному зазору $\beta_{01} = f(b_{u2}/\delta)$, для зубцов ротора — от отношения ширины шлица пазов статора к воздушному зазору $\beta_{02} = f(b_{u1}/\delta)$. Зависимость $\beta_0 = f(b_{u1}/\delta)$ приведена на рис. 36. По B_0 и частоте пульсаций индукции над зубцами, равной $Z_2 n$ для статора и $Z_1 n$ для ротора, рассчитывают удельные поверхностные потери, т.е. потери, приходящиеся на 1 м² поверхности головок зубцов статора и ротора:

для статора

$$P_{nos1} = 0,5 k_{01} \left(\frac{Z_2 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{01} t_2 \cdot 10^3)^2;$$

для ротора

$$P_{nos2} = 0,5 k_{02} \left(\frac{Z_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_1 \cdot 10^3)^2.$$

В этих выражениях $k_{01(2)}$ — коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов статора (ротора) на удельные потери; если поверхность не обрабатывается (двигатели мощностью до 160 кВт, сердечники статоров которых шихтуют на цилиндрические оправки), то $k_{01} = 1,4 \div 1,8$, при шлифованных поверхностях (наружная поверхность роторов машин средней и большой, мощности и внутренняя поверхность статора двигателей $P_2 > 160$ кВт) $k_{01(2)} = 1,7 \div 2,0$;

$n = n_c (1-s) \approx n_c$ — частота вращения двигателя, об/мин.

Полные поверхностные потери статора, Вт,

$$P_{нов1} = p_{нов1} (t_1 - b_{u1}) Z_1 l_{cm1}.$$

Полные поверхностные потери ротора, Вт,

$$P_{нов2} = p_{нов2} (t_2 - b_{u2}) Z_2 l_{cm2}.$$

Для определения пульсационных потерь вначале находится амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов $B_{nyл}$, Тл: для зубцов статора

$$B_{nyл1} \approx \frac{\gamma_2 \delta}{2t_1} B_{z1cp};$$

для зубцов ротора

$$B_{nyл2} \approx \frac{\gamma_1 \delta}{2t_2} B_{z2cp}.$$

В этих формулах B_{z1cp} и B_{z2cp} — средние индукции в зубцах статора и ротора, Тл;

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{(b_{u1}/\delta)^2}{5 + b_{u1}/\delta}; \\ \gamma_2 &= \frac{(b_{u2}/\delta)^2}{5 + b_{u2}/\delta}. \end{aligned} \right\}$$

При открытых пазах на статоре или на роторе при определении γ_1 и γ_2 вместо b_{u1} или b_{u2} подставляют расчетную ширину раскрытия паза, равную

$$b'_{u1(2)} = \frac{b_{u1(2)}}{3} \left(1 + \frac{0,5t_{1(2)}}{t_{1(2)}b_{u1(2)} + \chi_\delta} \right).$$

Индекс 1 — при расчете b'_{u1} , индекс 2 — при расчете b'_{u2} .

Значения коэффициента χ_δ в зависимости от отношения b_n/δ для открытых пазов приведены на рис. 37.

Пульсационные потери в зубцах статора

$$P_{nyл1} \approx 0,11 \left(\frac{Z_2 n}{1000} B_{nyл1} \right)^2 m_{z1}.$$

Пульсационные потери в зубцах ротора

$$P_{\text{пуль2}} \approx 0,11 \left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{\text{пуль2}} \right)^2 m_{z2}.$$

В этих формулах m_{z1} — масса зубцов стали, кг, определяется по (18);

m_{z2} — масса стали зубцов ротора, кг:

$$m_{z2} = h_{z2} b_{z2cp} Z_2 l_{cm2} k_c \gamma_c,$$

где h_{z2} — расчетная высота зубца ротора, м;

b_{z2cp} — средняя ширина зубца ротора, м:

$$b_{z2cp} = (b_{z2max} + b_{z2min})/2.$$

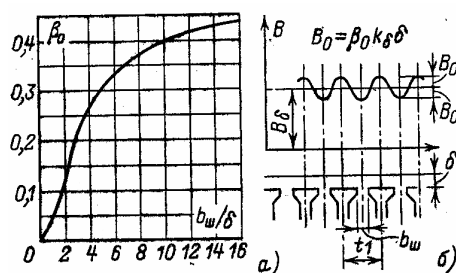


Рис. 36. К расчету поверхностных потерь в асинхронной машине:

a — зависимость $\beta_0 = f(b_{ш}/\delta)$;

б — пульсации индукции в воздушном зазоре

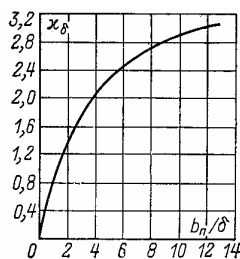


Рис. 37. К определению расчетной ширины шлица паза

Таблица 22

Удельные потери в стали асинхронных двигателей и значения β при толщине листов 0,5 мм (по ГОСТ 21427.2-83*)

Марка стали	$p_{1,0/50}$, Вт/кг	β
2013	2,5	1,5
2312	1,75	1,4

Таблица 23

К расчету механических потерь двигателей большой мощности

2р	2	4	6	8	10	12
K_m	3,65	1,5	0,7	0,35	0,2	0,2

Поверхностные и пульсационные потери в статорах двигателей с короткозамкнутыми или фазными роторами со стержневой обмоткой обычно очень малы, так как в пазах таких роторов мало $b_{и2}$ и пульсации индукции в воздушном зазоре над головками зубцов статора незначительны. Поэтому расчет этих потерь в статорах таких двигателей не производят.

Таким образом, добавочные потери в стали

$$P_{ст,доб} = P_{нов1} + P_{нул1} + P_{нов2} + P_{нул2}$$

и общие потери в стали асинхронных двигателей

$$P_{ст} = P_{ст,осн} + P_{ст,доб}.$$

Обычно $P_{ст,доб}$ — приблизительно на порядок меньше по сравнению с $P_{ст,осн}$.

Электрические потери в асинхронных двигателях рассчитывают раздельно в обмотках статоров и роторов.

Электрические потери во всех фазах обмотки статора, Вт,

$$P_{\sigma 1} = m_1 I_1^2 r_1.$$

Электрические потери в обмотке короткозамкнутого ротора, Вт,

$$P_{\sigma 2} = m_2 I_2^2 r_2 = Z_2 I_2^2 r_2.$$

или

$$P_{\sigma 2} = m_1 I_1^2 r_2'.$$

Механические и вентиляционные потери. Потери на трение в подшипниках и вентиляционные потери в двигателях с радиальной системой вентиляции без радиальных вентиляционных каналов, с короткозамкнутым ротором и вентиляционными лопатками на замыкающих кольцах, Вт,

$$P_{мех} \approx K_m \left(\frac{n}{1000} \right)^2 (10D)^3;$$

$K_m=5$ при $2p=2$, $K_m=6$ при $2p \geq 4$ для двигателей с $D_a \leq 0,25$ м;

$K_m=6$ при $2p=2$; $K_m=7$ при $2p \geq 4$ для двигателей с $D_a > 0,25$ м.

В двигателях с внешним обдувом ($0,1 \leq D_a \leq 0,5$ м)

$$P_{мех} = K_m \left(\frac{n}{10} \right)^2 D_a^4;$$

$K_m=1$ для двигателей с $2p=2$ и $K_m=1,3 (1-D_a)$ при $2p \geq 4$.

В двигателях с радиальной системой вентиляции средней и большой мощности

$$P_{\text{мех}} = 1,2 \cdot 2p\tau^3 (n_{\kappa} + 11) \cdot 10^3,$$

где n_{κ} — число радиальных вентиляционных каналов; при отсутствии радиальных каналов $n_{\kappa}=0$.

В двигателях с аксиальной системой вентиляции

$$P_{\text{мех}} = K_m \left(\frac{n}{1000} \right)^2 (10D_{\text{вент}})^3;$$

где $D_{\text{вент}}$ — наружный диаметр вентилятора, м; в большинстве конструкций можно принять $D_{\text{вент}} \approx D_a$;

$K_m=2,9$ для двигателей с $D_a \leq 0,25$ м;

$K_m=3,6$ для двигателей с $D_a = 0,25 \div 0,5$ м.

В двигателях большой мощности ($0,5 < D_a < 0,9$ м)

$$P_{\text{мех}} = K_m (10D_a)^3.$$

В этом выражении коэффициент K_m берется из табл. 23.

Добавочные потери при нагрузке асинхронных двигателей возникают за счет действия потоков рассеяния, пульсаций индукции в воздушном зазоре, ступенчатости кривых распределения МДС обмоток статора и ротора и ряда других причин. В короткозамкнутых роторах, кроме того, возникают потери от поперечных токов, т.е. токов между стержнями, замыкающихся через листы сердечника ротора. Эти токи особенно заметны при скошенных пазах ротора. В таких двигателях, как показывает опыт эксплуатации, добавочные потери при нагрузке могут достигать 1—2% (а в некоторых случаях даже больше) от подводимой мощности. ГОСТ устанавливает средние расчетные добавочные потери при номинальной нагрузке, равные 0,5% номинальной мощности. При расчетах потерь и КПД двигателей в режимах, отличных от номинального, значение добавочных потерь пересчитывают пропорционально квадрату токов:

$$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб,н}} \left(\frac{I_1}{I_{1н}} \right)^2.$$

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1},$$

где $\sum P$ — сумма всех потерь в двигателе, Вт.

Ток холостого хода двигателя

$$I_{x,x} = \sqrt{I_{x,x,a}^2 + I_{x,x,p}^2}.$$

При определении активной составляющей тока холостого хода принимают, что потери на трение и вентиляцию и потери в стали при холостом ходе двигателя такие же, как и при номинальном режиме. При этом условии

$$I_{x,x,a} = \frac{P_{cm} + P_{mex} + P_{\text{эл}x,x}}{mU_{1n}}.$$

Электрические потери в статоре при холостом ходе приближенно принимаются равными

$$P_{\text{эл}x,x} = mI_{\mu}^2 r_1.$$

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_{x,x,p} \approx I_{\mu}.$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_{x,x} = \frac{I_{x,x,a}}{I_{x,x}}.$$

Расчет рабочих характеристик

Рабочими характеристиками асинхронных двигателей называют зависимости P_1 , I_1 , $\cos \varphi$, η , $s=f(P_2)$, $M=f(P_2)$ и $I_2=f(P_2)$.

Расчет характеристик базируются на Γ -образной схеме замещения (рис. 38), где коэффициент c_1 представляет собой взятое с обратным знаком отношение вектора напряжения фазы \dot{U}_1 к вектору ЭДС E_1 при синхронном вращении машины с учетом сдвига фаз этих векторов. Значение c_1 определяется из выражения

$$c_1 = \frac{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_{12}}{\dot{Z}_{12}} = 1 + \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_{12}} = c_1 e^{-j\gamma},$$

где

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})}.$$

В асинхронных двигателях мощностью более 2—3 кВт, как правило, $|\gamma| \leq 1^\circ$, поэтому реактивной составляющей коэффициента c_1 можно пренебречь, тогда приближенно

$$c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}}.$$

При более точных расчетах определяют и активную и реактивную составляющие c_1 :

$$c_{1a} = \frac{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})}{r_{12}^2 + x_{12}^2}, \quad (19)$$

$$c_{1p} = \frac{x_1 r_{12} - r_1 x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2}. \quad (20)$$

Полное значение c_1

$$c_1 = \sqrt{c_{1a}^2 + c_{1p}^2}. \quad (21)$$

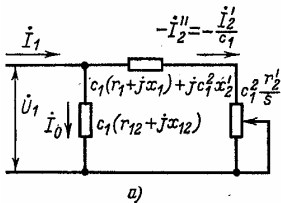


Рис. 38. Преобразованная Г-образная схема замещения приведенной асинхронной машины

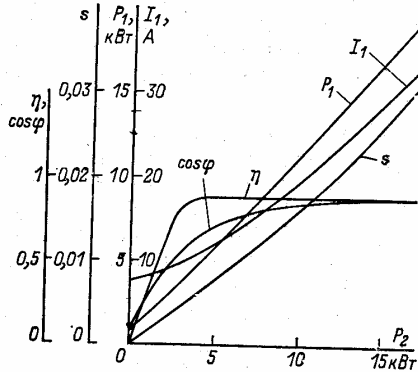


Рис. 39. Рабочие характеристики асинхронного двигателя, $P_2=15$ кВт, $2p=4$, $U=220/380$ В

Формулы для расчета рабочих характеристик приведены в табл. 24. Расчет характеристик проводят, задаваясь значениями скольжений в диапазоне $s \approx (0,2 \dots 1,5) s_n$. Номинальное скольжение можно предварительно взять $s_n \approx r_2'$.

$$\text{Здесь } I_{0p} \approx I_\mu \text{ и } I_{0a} = \frac{P_{ст, очн} + 3I_\mu^2 r_1'}{3U_{1н}}$$

Если $|\gamma| \leq 1^\circ$, то $c_{1p} \approx 0$ и $c_1 \approx 1 + x_1/x_{12}$. Тогда

$$\left. \begin{aligned} a' &= c_1^2; a = c_1 r_1; \\ b' &= 0; b = c_1(x_1 + c_1 x_2') \end{aligned} \right\}$$

Если же расчет c_1 проводить по уточненным формулам (19)–(21), то

$$\left. \begin{aligned} a' &= c_{1a}^2 - c_{1p}^2; a = c_{1a} r_1 - c_{1p} x_1 - b' x_2'; \\ b' &= 2c_{1c} c_{1p}; b = c_{1a} x_1 + c_{1p} r_1 + a' x_2'. \end{aligned} \right\}$$

Для принятых значений скольжения строится характеристика $s = f(P_2)$, по которой уточняется значение s_n , соответствующее заданной номинальной мощности $P_{2н}$ и заполняется последняя графа формуляра.

Формуляр расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя

№ п/п	Расчетная формула	Единица	Скольжение			
			0,005	0,01	S _H
1	$a'r'_2 / s$	Ом				
2	$b'r'_2 / s$	Ом				
3	$R = a + a'r'_2 / s$	Ом				
4	$X = b + b'r'_2 / s$	Ом				
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом				
6	$I''_2 = U_{1H} / Z$	А				
8	$\cos \varphi'_2 = R / Z$	—				
9	$\sin \varphi'_2 = X / Z$	—				
11	$I_{1a} = I_{0a} + I''_2 \cos \varphi''_2$	А				
12	$I_{1p} = I_{0p} + I''_2 \sin \varphi''_2$	А				
13	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А				
14	$I'_2 = c_1 I''_2$	А				
15	$P_1 = 2U_{1H} I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт				
16	$P_{\varphi 1} = 3I_1^2 r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт				
17	$P_{\varphi 2} = 3I_2^2 r'_2 \cdot 10^{-3}$	кВт				
18	$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб,н}} \left(\frac{I_1}{I_{1H}} \right)^2 \cdot 10^{-3}$	кВт				
19	$\sum P = P_{CT} + P_{\text{мех}} + P_{\varphi 1} + P_{\varphi 2} + P_{\text{доб}}$	кВт				
20	$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт				
21	$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_1}$	—				
22	$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	—				

Пусковые характеристики

В соответствии с ГОСТ 28327-89 (МЭК 34-12-80) процесс пуска характеризуется относительным значением начального пускового вращающего момента по отношению к номинальному, относительным значением минимального вращающего момента по отношению к номинальному и относительным значением максимального вращающего момента по отношению к номинальному; эти моменты выражаются в относительных единицах и должны соответствовать приведенным в табл. 25 значениям. Кроме того, в качестве характеристики пусковых свойств используется отношение полной мощности заторможенного ротора к номинальной мощности двигателя (S_T , кВА/кВт) — можно условно считать это мощностью в момент пуска.

Таблица 25

**Моменты, характеризующие пуск двигателей
исполнения № (по ГОСТ 28327-89)**

Диапазон мощности, кВт	Число полюсов												S_T
	2			4			6			8			
	M_n	M_{min}	M_{max}	M_n	M_{min}	M_{max}	M_n	M_{min}	M_{max}	M_n	M_{min}	M_{max}	
0,4...0,63	1,9	1,3	2,0	2,0	1,4	2,0	1,7	1,2	1,7	1,5	1,1	1,6	13
0,63...1,0	1,8	1,2	2,0	1,9	1,3	2,0	1,7	1,2	1,8	1,5	1,1	1,7	13
1,0...1,6	1,8	1,2	2,0	1,9	1,3	2,0	1,7	1,2	1,8	1,5	1,1	1,7	13
1,6...2,5	1,7	1,1	2,0	1,8	1,2	2,0	1,6	1,1	1,9	1,4	1,0	1,8	13
2,5...4,0	1,6	1,1	2,0	1,7	1,2	2,0	1,5	1,1	1,9	1,3	1,0	1,8	13
4,0...6,3	1,5	1,0	2,0	1,6	1,1	2,0	1,5	1,1	1,9	1,3	1,0	1,7	13
6,3...10	1,5	1,0	2,0	1,6	1,1	2,0	1,5	1,1	1,8	1,3	1,0	1,7	12
10...16	1,4	0,9	2,0	1,5	1,1	2,0	1,4	1,0	1,8	1,2	0,9	1,7	12
16...25	1,3	0,9	1,9	1,4	1,0	1,9	1,4	1,0	1,8	1,2	0,9	1,7	12

При расчете пусковых характеристик необходим учет изменений параметров, вызванных эффектом вытеснения тока и насыщением от полей рассеяния, так как при больших скольжениях токи в обмотках статора и ротора короткозамкнутых двигателей могут превышать свое минимальное значение в 7—7,5 раз.

В то же время при больших токах увеличивается падение напряжения на сопротивлении обмотки статора, что вызывает уменьшение ЭДС и снижение основного потока. Для учета этих факторов необходимо применение ЭВМ.

Учет эффекта вытеснения тока

Известно, что с увеличением частоты тока в стержнях обмотки короткозамкнутого ротора возникает эффект вытеснения тока, в результате которого плотность тока в верхней части стержней возрастает, а в нижней уменьшается. При этом активное сопротивление ротора увеличивается, а индуктивное — уменьшается. Изменение сопротивлений ротора влияет на пусковые характеристики машины.

Эффект вытеснения тока в обмотках короткозамкнутых роторов увеличит начальные моменты двигателей. Относительные изменения сопротивлений оцениваются коэффициентами k_r и k_o . Коэффициент k_r показывает, во сколько раз увеличилось активное сопротивление $r_{c\xi}$ пазовой части стержня при неравномерном распределении плотности тока в нем по сравнению с его сопротивлением при одинаковой плотности по всему сечению стержня r_c :

$$k_r = r_{c\xi} / r_c.$$

Коэффициент демпфирования k_o показывает, как уменьшилась магнитная проводимость $\lambda'_{n\xi}$ участка паза, занятого проводником с током, при действии эффекта вытеснения тока по сравнению с проводимостью того же участка, но при равномерной плотности тока в стержне λ'_n :

$$k_o = \lambda'_{n\xi} / \lambda'_n.$$

Аналитическими выражениями, определяющими k_r и k_o , полученными для прямоугольных стержней являются:

$$\left. \begin{aligned} k_r &= \xi \frac{\operatorname{sh} 2\xi + \sin 2\xi}{\operatorname{ch} 2\xi - \cos 2\xi}, \\ k_o &= \frac{3}{2\xi} \frac{\operatorname{sh} 2\xi - \sin 2\xi}{\operatorname{ch} 2\xi - \cos 2\xi}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

В этих выражениях ξ — так называемая приведенная высота стержня

$$\xi = 2\pi h_c \sqrt{\frac{b_c}{b_n} \frac{f_2}{\rho_{c9}}} \cdot 10^{-7}, \quad (23)$$

где h_c — высота стержня в пазу, м;

b_c и b_n — ширина стержня и ширина паза, м. При расчете роторов со вставными стержнями принимают $b_c = 0,9b_n$; при роторах с литой обмоткой $b_c = b_n$;

f_2 — частота тока в роторе в расчетном режиме, Гц;

$\rho_{c\vartheta}$ — удельное сопротивление материала стержня при расчетной температуре, Ом·м.

При литой алюминиевой обмотке ротора при расчетных температурах 75°C и 115°C соответственно имеем:

$$\xi = 65,15h_c\sqrt{s}$$

и

$$\xi = 63,61h_c\sqrt{s}.$$

При $\xi \leq 1$ эффект вытеснения тока практически не влияет на сопротивления стержней. Это является критерием необходимости его учета при проектировании.

В расчетах условно принимают, что при действии эффекта вытеснения ток ротора распределен равномерно, но не по всему сечению стержня, а лишь по его верхней части, ограниченной высотой h_r , имеющей сечение q_c и сопротивление $r_{c\xi} = r_c q_c / q_r$; h_r называют глубиной проникновения тока в стержень. Для прямоугольных стержней $h_r = h_c / k_r$.

При определении $\lambda_{n\xi}$ аналогично принимают, что ток равномерно распределен по верхней части сечения стержня высотой h_x .

В практических расчетах для определения k_r и k_ϑ пользуются неаналитическими зависимостями (22), а построенными на их основе кривыми $\varphi(\xi)$ и $\varphi'(\xi)$ (рис. 40, 41). Принятые при выводе (22) допущения приводят к положению, что на глубину проникновения не влияют высота и конфигурация стержня. Это позволяет использовать (22) и кривые $\varphi(\xi)$ и $\varphi'(\xi)$ для определения k_r и k_ϑ в стержнях различных конфигураций. Расчет проводят в следующей последовательности: По полной высоте стержня, частоте тока и удельному сопротивлению материала стержня по (23) определяют функцию ξ , в соответствии, с которой по кривым рис. 40 находят функцию φ , а по кривым рис. 41 — функцию φ' .

Далее определяют глубину проникновения тока

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

и коэффициент $k_d = \varphi$.

Коэффициент k_r находят по отношению площадей всего сечения стержня и сечения, ограниченного высотой h_r , т.е.

$$k_r = q_c / q_r.$$

По значениям k_r и k_d можно найти сопротивление пазовой части стержня обмотки ротора и коэффициент магнитной проводимости участка паза ротора, занятого стержнем с током,

$$r_{c\xi} = k_r r_c;$$

$$\lambda'_{n\xi} = k_d \lambda'_n.$$

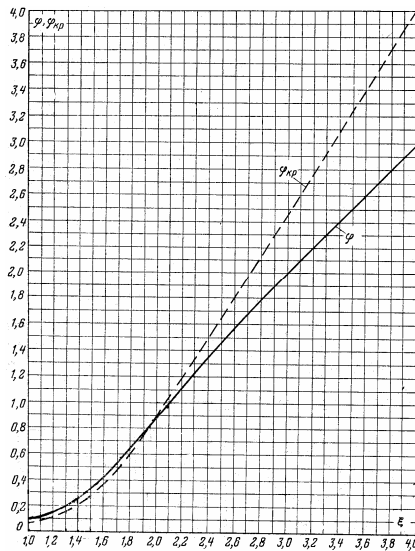


Рис. 40. Кривые φ и φ_{KP} в функции приведенной высоты

ξ ($\varphi \approx \xi - 1$ при $\xi > 4$ и $\varphi \approx 4\xi^{4/45}$ при $\xi < 1$)

Для определения k_r в стержнях некоторых наиболее распространенных конфигураций используют заранее полученные расчетные формулы. Для прямоугольных стержней (рис. 42, а)

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

Для круглых стержней (рис. 42, б)

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

Функция $\varphi_{кр}$ для круглого стержня представлена на рис. 40.

Для грушевидных стержней (рис. 42, в)

$$\left. \begin{aligned} k_r &= q_c / q_r; \\ \text{здесь} \\ q_c &= \frac{\pi(b_1^2 + b_2^2)}{8} + \frac{b_1 + b_2}{2} h_1. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

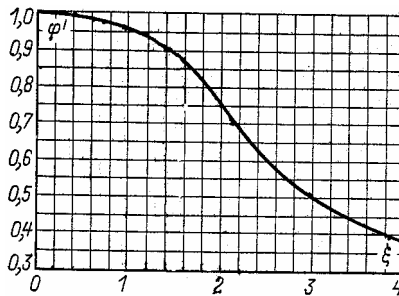


Рис. 41. Зависимость коэффициента φ' от приведенной высоты ξ ($\varphi = 3/2\xi$ при $\xi > 4$).

Площадь сечения q_r при $\frac{b_2}{2} \leq h_r \leq h_1 + \frac{b_2}{2}$

$$q_r = \frac{\pi b_2^2}{8} + \frac{b_2 + b_1}{2} \left(h_r - \frac{b_2}{2} \right), \quad (25)$$

где

$$\begin{aligned} b_r &= b_2 - \frac{b_2 - b_1}{h_1} \left(h_r - \frac{b_2}{2} \right); \\ h_r &= h_c / (1 + \varphi). \end{aligned}$$

При $h_p \leq b_2/2$ площадь

$$q_r = \frac{\pi b_2^2}{4(\varphi_{кр} + 1)}. \quad (26)$$

Для трапецидальных стержней верхней частью (см. рис. 42, з)

$$k_r = q_c/q_r,$$

где q_c и q_r определяют соответственно по (24) и по (25) или по (26);

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

Для других конфигураций стержней k_r может быть определен из общего выражения $k_r = q_c/q_r$ с учетом размерных соотношений стержня.

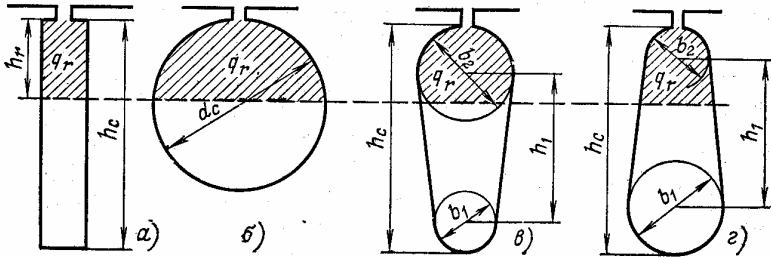


Рис. 42. Расчетная глубина проникновения тока в стержнях различной конфигурации

Для расчета характеристик необходимо учитывать изменение сопротивления всей обмотки ротора r_2 , поэтому удобно ввести коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока:

$$K_R = r_{2\xi}/r_2, \quad (27)$$

где $r_{2\xi}$ — сопротивление фазы короткозамкнутого ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока.

Выражение (27) легко преобразовать в более удобный для расчета вид:

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

Для прямоугольных стержней это выражение приобретает вид:

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} \varphi.$$

Активное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом вытеснения будет равно:

$$r_{2\xi} = r_2 K_R.$$

Обозначив коэффициентом K_x изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока, имеем:

$$x_{2\xi} = x_2 K_x,$$

тогда

$$K_x = \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{n2} + \lambda_{o2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{o2}},$$

где $\lambda_{n\xi}$ — коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учетом эффекта вытеснения тока, рассчитанный по формулам табл. 21 при $k_o = \varphi$.

Влияние насыщения на параметры

При увеличении скольжения свыше критического и в пусковых режимах токи в обмотках возрастают и потоки рассеяния увеличиваются. Коронки зубцов статора и ротора в машинах средней и большой мощности оказываются сильно насыщенными.

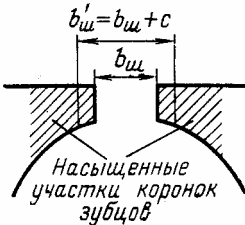


Рис. 43. Насыщенные участки коронок зубцов потоками рассеяния

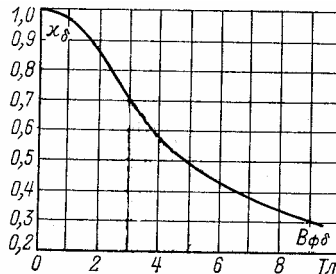


Рис. 44. Функция χ_δ в зависимости от фиктивной индукции $B_{\phi\delta}$

Насыщение коронок зубцов (рис. 43) приводит к увеличению магнитного сопротивления для части потока рассеяния, магнитные линии которого замыкаются через верхнюю часть паза. Поэтому коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния уменьшается. Несколько снижается также магнитная проводимость дифференциального рассеяния. На коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния насыщение стали потоками рассеяния заметного влияния не оказывает. Уменьшение потока пазового рассеяния из-за насыщения приближенно учитывают введением дополнительного раскрытия паза, равного s . Величина дополнительного раскрытия s берется такой, чтобы его магнитное сопротивление потоку рассеяния было равно магнитному сопротивлению насыщенных участков зубцов. При этом условии можно использовать для расчета коэффициента магнитной проводимости паза с учетом насыщения обычные формулы, предполагая, что $\mu_{ст} = \infty$. Уменьшение λ_n из-за насыщения участков зубцов ($\Delta\lambda_{n,нас}$) будет определяться s . Таким образом, s зависит от уровня насыщения верхней части зубцов потоками рассеяния и, следовательно, от МДС паза, т.е. от тока в обмотке. Так как ток обмотки в свою очередь зависит от индуктивного сопротивления, определяемого магнитной проводимостью, то расчет приходится проводить методом последовательных приближений. Первоначально задаются предполагаемой кратностью увеличения тока, обусловленной уменьшением индуктивного сопротивления из-за насыщения зубцовой зоны

$$k_{нас} = I_{нас} / I,$$

где I — ток, рассчитанный для данного режима без учета насыщения;

$I_{нас}$ — ток в этом же режиме работы машины при насыщении участков зубцов полями рассеяния.

Ориентировочно для расчета пусковых режимов принимают $k_{нас} = 1,25 \div 1,4$; для режима максимального момента $k_{нас} = 1,1 \div 1,2$.

Для двигателей с открытыми пазами следует задаваться меньшими значениями $k_{нас}$, при полужакрытых пазах — большими.

Расчет проводят в следующей последовательности: Определяют среднюю МДС обмотки, отнесенную к одному пазу обмотки статора,

$$F_{n,cp} = 0,7 \frac{k_{нас} I_1 u_{n1}}{a} \left(k'_\beta + k_{y1} k_{об1} \frac{Z_1}{Z_2} \right),$$

где I_1 — ток статора, соответствующий расчетному режиму, без учета насыщения;

a — число параллельных ветвей обмотки статора;

u_{n1} — число эффективных проводников в пазу статора;

k'_β — коэффициент, учитывающий уменьшение МДС паза, вызванное укорочением шага обмотки; рассчитывается по (10) или (11);

k_{y1} — коэффициент укорочения шага обмотки;

$k_{об1}$ — обмоточный коэффициент.

По средней МДС $F_{n,cp}$ рассчитывают фиктивную индукцию потока рассеяния в воздушном зазоре

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{n,cp}}{1,6\delta C_N} 10^{-6},$$

где коэффициент

$$C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}}.$$

(t_1 и t_2 — зубцовые деления статора и ротора).

По полученному значению $B_{\phi\delta}$ определяется отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины, характеризуемое коэффициентом χ_δ , значение которого находят по кривой рис. 44.

Далее рассчитывают значения дополнительного раскрытия пазов статора и ротора. Для пазов статора его принимают равным

$$c_1 = (t_1 - b_{u1})(1 - \chi_\delta).$$

Вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента проводимости рассеяния открытого паза статора (рис. 45, а)

$$\Delta\lambda_{n1нас} = \frac{h}{b_{u1}} \frac{c_1}{b_{u1} + c_1}.$$

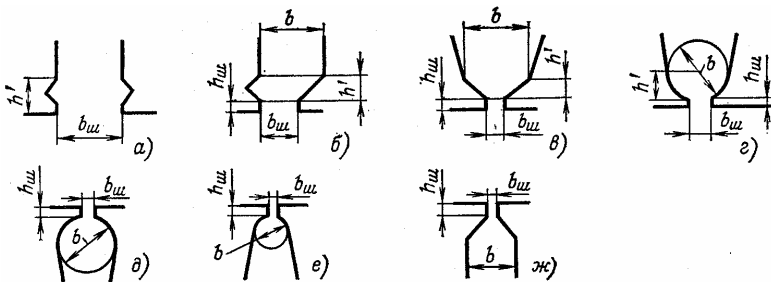


Рис. 45. К расчету влияния насыщения полями рассеяния

Для полуоткрытых и полузакрытых пазов расчетная формула несколько усложняется из-за более сложной конфигурации их верхних клиновидных частей. Для полуоткрытого паза (рис. 45, б)

$$\Delta\lambda_{n1нас} = \frac{h_u}{b_u} \frac{c_1}{b_u + c_1} + \frac{h'}{b_u + b_n} \frac{c_1}{b_u + b_n + c_1}.$$

Для полузакрытого паза (рис. 45, в, з)

$$\Delta\lambda_{n1нас} = \frac{h_u + 0,58h'}{b_u} \frac{c_1}{c_1 + 1,5b_u}.$$

Для фазных и короткозамкнутых роторов дополнительное раскрытие рассчитывают по формуле

$$c_2 = (t_2 - b_u)(1 - \chi_\delta).$$

Уменьшение коэффициента проводимости для открытых и полузакрытых пазов ротора (рис. 45, д, е, ж)

$$\Delta\lambda_{n2нас} = \frac{h_u}{b_u} \frac{c_2}{b_u + c_2}.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении $\lambda_{n1нас}$ определяют для статора из выражения

$$\lambda_{n1нас} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1нас},$$

где λ_{n1} — проводимость, рассчитанная без учета насыщения.

Для ротора

$$\lambda_{n2\xiнас} = \lambda_{n2\xi} - \Delta\lambda_{n2нас},$$

где $\lambda_{n2\xi}$ — проводимость пазового рассеяния ротора для ненасыщенной зубцовой зоны с учетом влияния вытеснения тока.

Коэффициенты проводимости дифференциального рассеяния при насыщении участков зубцов статора $\lambda_{\sigma 1нас}$ и ротора $\lambda_{\sigma 2нас}$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\sigma 1нас} &= \lambda_{\sigma 1} \chi_{\delta}; \\ \lambda_{\sigma 2нас} &= \lambda_{\sigma 2} \chi_{\delta}. \end{aligned} \right\}$$

Значения χ_{δ} берут по кривым рис. 44.

Индуктивное сопротивление обмотки статора с учетом насыщения от полей рассеяния определяют по отношению сумм коэффициентов проводимости, рассчитанных без учета и с учетом насыщения от полей рассеяния:

$$x_{1нас} = x_1 \frac{\sum \lambda_{1нас}}{\sum \lambda_1} = x_1 \frac{\lambda_{n1нас} + \lambda_{\sigma 1нас} + \lambda_{r1}}{\lambda_{n1} + \lambda_{\sigma 1} + \lambda_{r1}}.$$

Для ротора принимают отношения сумм проводимостей, рассчитанных без учета влияния насыщения и действия эффекта вытеснения тока (для номинального режима), и с учетом этих факторов:

$$x'_{2\zeta нас} = x'_2 \frac{\sum \lambda_{2\zeta нас}}{\sum \lambda_2} = x'_2 \frac{\lambda_{n2\zeta нас} + \lambda_{\sigma 2нас} + \lambda_{r2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{\sigma 2} + \lambda_{r2}}.$$

Значения параметров $x_{1нас}$ и $x_{2\zeta нас}$ используют при расчете точек характеристик при скольжениях $s \geq s_{кр}$. Полученные для каждой из точек характеристики значения кратности токов сравнивают с принятыми коэффициентами $k_{нас}$. Если расхождение превышает 10—15%, то расчет для этого значения s повторяют, внося соответствующую корректировку в первоначально принимаемый коэффициент $k_{нас}$.

Индуктивное сопротивление взаимной индукции x_{12} для диапазона скольжений $s > s_{кр}$ может быть принято равным

$$x_{12n} \approx x_{12} \frac{F_u}{F_{\delta}} = k_{\mu} x_{12}.$$

При допущении $\gamma_{12} \approx 0$ коэффициент

$$c_{n1} = 1 + \frac{x_1}{x_{12n}}.$$

и сопротивление правой ветви Г-образной схемы замещения (см. рис. 38): $z_{\epsilon} = c_{1n}(a_n + jb_n)$,

где

$$a_n = r_1 + c_{1n} \frac{r_2'}{s}; b_n = x_1 + c_{1n} x_2'.$$

Ток в обмотке ротора

$$I_2' = \frac{U_{1n}}{|z_{\epsilon}'|} c_{1n} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}}.$$

Сопротивление всей схемы замещения

$$Z_{cx} = \frac{c_{1n}(a_n + jb_n)jx_{12n}c_{1n}}{a_n + j(b_n + x_{12n})}.$$

Ток обмотки статора

$$I_1 = \frac{U_{1n}}{|z_{cx}|} = I_2' \frac{\sqrt{a_n^2 + (b_n + x_{12n})^2}}{c_{1n}x_{12n}}.$$

Расчет при разгоне двигателя от $s=1$ до $s=s_{kp}$ рекомендуется проводить в последовательности, определенной в формуляре (табл. 26). Сопротивления $r_{2\xi}$ и $x_{2\xi}$ должны быть определены заранее с учетом эффекта вытеснения тока для принятых значений скольжения (для пяти-шести точек характеристики). Для учета влияния насыщения в формулы подставляют сопротивления $x_{1\xi_{нас}}$ и $x_{2\xi_{нас}}$ найденные для каждого из назначенных скольжений методом последовательных приближений.

Первоначально рассчитывают пусковые токи при $s=1$ для значений c_{1n} , x_1 и $x_{2\xi}'$, полученных без учета насыщения. Далее задают коэффициент увеличения тока от насыщения зубцовой зоны полями рассеяния $k_{нас}$ и определяют токи при насыщении $I_{1нас} = k_{нас}I_1$. Для значений токов $I_{1нас}$ и $I_{2нас}'$ рассчитывают $x_{1нас}$, $x_{2\Sigma нас}'$ и $c_{1н,нас}$ и повторяют расчет токов, вводя полученные значения в расчетные формулы. Если расхождение полученных значений токов и принятых первоначально не превышает 10—15%, то расчет для $s=1$ считают законченным. При больших расхождениях расчет повторяют, соответствующим образом скорректировав коэффициент $k_{нас}$.

Далее оценивают критическое скольжение

$$s_{кр} \approx \frac{r_2'}{x_1/c_1 + x_2'}$$

и для значения $s=s_{кр}$ по формуляру расчета пусковых характеристик рассчитывают I_1 и I_2' . Принимают, что при этом скольжении влияние насыщения сказывается мало и $k_{нас}=1,1 \div 1,2$, а изменение $k_{нас}$; от $s=1$ до $s_{кр}$ происходит по линейному закону. Далее для каждого из назначенных скольжений находят приближенное значение $k_{нас}$ и проводят расчет сопротивлений и токов так же, как при $s=1$. Такой метод позволяет правильно учесть влияние насыщения с первого или со второго приближения. Значение $s_{кр}$ уточняют после расчета зависимости $M_* = f(s)$ по значениям параметров с учетом насыщения.

Таблица 26

Формуляр расчета пусковых характеристик двигателей с короткозамкнутым ротором

№ п/п	Расчетный параметр	Единица	Скольжение		
			1	0,8	0,5...
1	ξ	—			
2	φ	—			
3	h_r	м			
4	b_r	м			
5	$q_r \cdot 10^{-3}$	м ²			
6	k_r	—			
7	K_R	—			
8	$r_{2\xi}'$	Ом			
9	$k_d = \varphi'$	—			
10	$\lambda_{n2\xi}$	—			
11	K_x	—			
12	$x'_{2\xi}$	Ом			
13	I_2'	А			
14	x_δ	—			
15	c_l	—			
16	$\Delta \lambda_{n1нас}$	—			

17	$\lambda_{n1нас}$	—			
18	$\lambda_{\theta 1нас}$	—			
19	$X_{1нас}$	ОМ			
20	C_2	—			
21	$\Delta\lambda_{n2нас}$	—			
22	$\lambda_{n2\xiнас}$	—			
23	$\lambda_{\theta 2нас}$	—			
24	$X_{2нас}$	ОМ			
25	X_{12n}	ОМ			
26	$C_{1пнас}$	—			
27	$a_{п}$	ОМ			
28	$b_{п}$	ОМ			
29	I_2	A			
30	I_1	A			
31	I_1^*	—			
32	M^*	—			

Приложение: пример расчета

Пример содержит два варианта расчета асинхронного двигателя, отличающихся по основным исходным характеристикам. В пояснительную записку не включаются варианты разработки, «тупиковые» пути и неверно выбранные параметры. То есть, если характеристики двигателя приходилось корректировать по ходу расчета (это бывает практически во всех вариантах), в итоговую записку это не включается. Готовая пояснительная записка содержит только один полный расчет, завершающийся правильным результатом. Обозначения из формул не расшифровываются, смотрите текст учебного пособия. Данные сведены в таблицу для точности, в таблицах приводятся все подставляемые в формулы цифры и результат расчета — две строчки цифр на два варианта. При округлении оставляем, как правило, 4 значащие цифры. Если величина представляет собой размеры, округляем до десятых долей миллиметра.

1. Техническое задание

Номинальные параметры:

P_2 , Вт	n_1 , об/мин	$U_{1нф}$, В	η	m	f_1 , Гц	$\cos\varphi$
10000	1000	220	0,89	3	50	0,88
1500	3000	220	0,8	3	50	0,7

Конструктивное исполнение IM1001; исполнение по способу защиты от воздействия окружающей среды IP44; категория климатического исполнения У3.

2.1. Выбор главных размеров

Число пар полюсов: $p = \frac{60 \cdot f_1}{n_1}$.

p	f_1 , Гц	n_1 , об/мин
3	50	1000
1	50	3000

Высоту оси вращения $h_{пр}$ предварительно определяем по рис. 3, далее находим стандартную по табл. 2.

$h_{np}, \text{ м}$	$h_{ст}, \text{ м}$	$D_{a}, \text{ м}$
0,154	0,160	0,272
0,088	0,090	0,149

Внутренний диаметр статора $D = k_D \cdot D_a$, где k_D определяем по табл. 3.

$D, \text{ м}$	k_D	$D_a, \text{ м}$
0,193	0,710	0,272
0,082	0,550	0,149

$$\text{Полусное деление } \tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p}$$

$\tau, \text{ м}$	$D, \text{ м}$	p
0,101	0,193	3
0,129	0,082	1

Расчетная мощность $P' = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi}$, где k_E — отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, которое предварительно принимаем по рис. 4.

$P', \text{ Вт}$	$P_2, \text{ Вт}$	η	$\cos \varphi$	k_E
12321,25	10000	0,89	0,88	0,965
2625,00	1500	0,8	0,7	0,980

Электромагнитные нагрузки: A — линейная нагрузка и B_δ — индукция в воздушном зазоре выбираем по рис. 6.

$A, \text{ А/м}$	$B_\delta, \text{ Тл}$
30600	0,789
21675	0,703

$$\text{Синхронная угловая скорость вала двигателя } \Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60}$$

$\Omega, \text{ рад/с}$	$n_1, \text{ об/мин}$
104,72	1000
314,16	3000

Расчетная длина воздушного зазора

$$l_{\delta} = \frac{P'}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot k_{\text{об1}} \cdot A \cdot B_{\delta}}$$

Предварительное значение обмоточного коэффициента $k_{\text{об1}}=0,96$.

l_{δ} , м	P' , Вт	k_B	D , м	Ω , рад/с	$k_{\text{об1}}$	A , А/м	B , Тл
0,123	12321,25	1,11	0,193	104,72	0,96	30600	0,789
0,077	2625,00	1,11	0,082	314,16	0,96	21675	0,703

Отношение длины воздушного зазора к полюсному делению

$$\lambda = \frac{l_{\delta}}{\tau}$$

λ	l_{δ} , м	τ , м
1,22	0,123	0,101
0,60	0,077	0,129

Данное отношение находится в пределах, показанных на рис. 7 для принятого исполнения машины.

2.2. Определение числа пазов статора Z_1 , числа витков в фазе обмотки статора ω_1 и сечения провода обмотки статора

Диапазон возможных значений зубцового деления статора принимаем по рис. 8.

$t_{1\text{max}}$, м	$t_{1\text{min}}$, м
0,012	0,010
0,012	0,010

Предварительные числа пазов статора, соответствующие выбранному диапазону t_1 :

$$Z_{1\text{min}} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\text{max}}}, \quad Z_{1\text{max}} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\text{min}}}$$

Полученные значения округляем до целых.

$Z_{1\text{min}}$	$Z_{1\text{max}}$	D , м	$t_{1\text{max}}$	$t_{1\text{min}}$
51	61	0,193	0,012	0,010
21	26	0,082	0,012	0,010

Выбираем Z_1 в полученных пределах с учетом условий, налагаемых требованиями симметрии обмотки (табл. 12). Рассчитываем число пазов на полюс и фазу $q = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m}$ (оно является целым).

q	Z_1	p	m
3	54	3	3
4	24	1	3

Окончательное значение зубцового деления статора

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m \cdot q}.$$

$t_1, \text{ м}$	$D, \text{ м}$	p	m	q
0,0112	0,193	3	3	3
0,0107	0,082	1	3	4

Номинальный ток обмотки статора $I_{1н} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1нф} \cdot \cos \varphi \cdot \eta}$.

$I_{1н}, \text{ А}$	$P_2, \text{ Вт}$	$U_{1нф}, \text{ В}$	m	$\cos \varphi$	η
19,35	10000	220	3	0,88	0,89
4,06	1500	220	3	0,7	0,8

Предварительное число эффективных проводников в пазу

$$u'_n = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1н} \cdot Z_1}.$$

u'_n	$D, \text{ м}$	$A, \text{ А/м}$	$I_{1н}, \text{ А}$	Z_1
17,77	0,193	30600	19,35	54
57,29	0,082	21675	4,06	24

Полученное число u_n округляем до ближайшего целого числа.

u_n	u'_n
18	17,77
57	57,29

Окончательные значения витков в фазе обмотки $W_1 = \frac{u_n \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m}$.

Принимаем число параллельных ветвей $a = 1$.

W_1	u_n	Z_1	a	m
162	18	54	1	3
228	57	24	1	3

Окончательные значения линейной нагрузки $A = \frac{2 \cdot I_{1н} \cdot W_1 \cdot m}{\pi \cdot D}$.

$A, A/m$	W_1	Z_1	m	$I_{1н}, A$	$D, м$
30994	162	54	3	19,35	0,193
21565	228	24	3	4,06	0,082

Магнитный поток $\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1нф}}{4 \cdot k_g \cdot W_1 \cdot k_{об1} \cdot f_1}$.

$\Phi, Вб$	$k_{об1}$	k_E	$U_{1нф}, В$	k_B	W_1	$f_1, Гц$
0,006	0,96	0,965	220	1,11	162	50
0,004	0,96	0,980	220	1,11	228	50

Индукция в воздушном зазоре $B_\delta = \frac{\rho \cdot \Phi}{l_\delta \cdot D}$.

$B_\delta, Тл$	ρ	$\Phi, Вб$	$D, м$	$l_\delta, м$
0,777	3	0,006	0,193	0,123
0,705	1	0,004	0,082	0,077

Для нахождения сечения эффективных проводников необходимо определить плотность тока $J_1 = \frac{AJ_1}{A}$, где значение AJ_1 выбираем по рис. 9.

$J_1, A/m^2$	$A, A/m$	$AJ_1, A^2/m^3$
6,130E+6	30994	190
6,260E+6	21565	135

Сечение эффективного проводника $q_{эф}$ определяем, исходя из тока одной параллельной ветви и допустимой плотности тока в обмотке (предварительно): $q_{эф} = \frac{I_{1н}}{a \cdot J_1}$

$q_{\text{эф}}, \text{ м}^2$	$I_{1н}, \text{ А}$	a	$J_1, \text{ А/м}^2$
3,156E-6	19,35	1	6,130E+6
6,483E-7	4,06	1	6,260E+6

На это сечение выбираем обмоточный провод по табл. 5. (поскольку для двигателя 1,5 кВт укладка предполагается механизированная, диаметр изолированного провода не более 1,4 мм, а $n_{\text{эл}}$ — не более 3; для двигателя 10 кВт укладка предполагается ручная, диаметр изолированного провода не более 1,7 мм, а $n_{\text{эл}}$ — не более 6).

(10 кВт) Принимаем: $n_{\text{эл}}=2$, тогда $q_{\text{эл}} = \frac{q_{\text{эф}}}{n_{\text{эл}}} = 1,578\text{E-}6 \text{ м}^2$.

Обмоточный провод ПЭТВ (по табл. 5): $d_{\text{эл}}=1,500\text{E-}3 \text{ м}$; $q_{\text{эл}}=1,767\text{E-}6 \text{ м}^2$; $q_{\text{эф}} = q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}=3,534\text{E-}6 \text{ м}^2$; диаметр изолированного обмоточного провода: $d_{\text{из}}=1,585\text{E-}3 \text{ м}$.

(1,5 кВт) Принимаем: $n_{\text{эл}}=1$, тогда $q_{\text{эл}} = q_{\text{эф}} = 6,483\text{E-}7 \text{ м}^2$.

Обмоточный провод ПЭТВ (по табл. 5): $d_{\text{эл}}=9,500\text{E-}4 \text{ м}$; $q_{\text{эл}}=7,090\text{E-}7 \text{ м}^2$; $q_{\text{эф}} = q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}=7,090\text{E-}7 \text{ м}^2$; диаметр изолированного обмоточного провода: $d_{\text{из}}=1,015\text{E-}3 \text{ м}$.

Плотность тока в обмотке $J_1 = \frac{I_{1н}}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}}$.

$J_1, \text{ А/м}^2$	$I_{1н}, \text{ А}$	$q_{\text{эл}}, \text{ м}^2$	a	$n_{\text{эл}}$
5,474E+6	19,35	1,767E-6	1	2
5,724E+6	4,06	7,090E-7	1	1

2.3. Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

Определим полную конструктивную длину сердечника статора и длину стали сердечника статора (l_1 и $l_{\text{ст1}}$) и ротора (l_2 и $l_{\text{ст2}}$). В асинхронных двигателях, длина сердечников которых не превышает 250—300 мм принимаем $l_1 = l_2 = l_{\delta} = l_{\text{ст1}} = l_{\text{ст2}}$.

Допустимая индукция B_{z1} в сечении зубца статора и значение допустимой индукции в ярме статора B_a принимается по табл. 6.

$B_{z1}, \text{ Тл}$	$B_a, \text{ Тл}$
1,75	1,50
1,75	1,50

Минимальная ширина зубца $b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{B_{z1} \cdot l_{cm1} \cdot k_c}$, где k_c — коэффициент заполнения стальной магнитопровода статора для окисированных листов стали по табл. 7.

b_{z1} , м	B_{δ} , Тл	t_1 , м	l_{δ} , м	B_{z1} , Тл	l_{cr1} , м	k_c
5,141E-3	0,777	0,0112	0,123	1,75	0,123	0,97
4,454E-3	0,705	0,0107	0,077	1,75	0,077	0,97

$$\text{Высота яра статора } h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot l_{cm1} \cdot k_c}.$$

h_a , м	Φ , Вб	B_a , Тл	l_{cr1} , м	k_c
1,718E-2	0,006	1,50	0,123	0,97
1,985E-2	0,004	1,50	0,077	0,97

Высота и ширина шлица паза (по табл. 10).

$h_{ш1}$, м	$b_{ш1}$, м
1,0E-3	3,7E-3
5,0E-4	3,0E-3

$$\text{Размеры паза в штампе } h_{n1} = \frac{D_a - D}{2} - h_a.$$

h_{n1} , м	D_a , м	D , м	h_a , м
2,2E-2	0,272	0,193	1,718E-2
1,4E-2	0,149	0,082	1,985E-2

$$b_{1c} = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{n1})}{Z_1} - b_{z1}.$$

b_{1c} , м	D , м	h_{n1} , м	Z_1	b_{z1} , м
8,7E-3	0,193	2,2E-2	54	5,141E-3
9,9E-3	0,082	1,4E-2	24	4,454E-3

$$b_{2c} = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{ш1} - b_{ш1}) - Z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \pi};$$

b_{2c} , м	D , м	$h_{ш1}$, м	$b_{ш1}$, м	Z_1	b_{z1} , м
6,4E-3	0,193	1,0E-3	3,7E-3	54	5,141E-3
6,9E-3	0,082	5,0E-4	3,0E-3	24	4,454E-3

$$h_{1c} = h_{n1} - \left(h_{u1} + \frac{b_{2c} - b_{u1}}{2} \right).$$

$h_{1c}, \text{ м}$	$h_{n1}, \text{ м}$	$h_{ш1}, \text{ м}$	$b_{2c}, \text{ м}$	$b_{ш1}, \text{ м}$
2,0E-2	2,2E-2	1,0E-3	6,4E-3	3,7E-3
1,1E-2	1,4E-2	5,0E-4	6,9E-3	3,0E-3

Размеры паза в свету с учетом припусков на сборку и шихтовку сердечников $b'_1 = b_{1c} - \Delta b_n$, $b'_2 = b_{2c} - \Delta b_n$, $h'_{1c} = h_{1c} - \Delta h_n$, где Δb_n и Δh_n — припуски по ширине и высоте паза выбираем из табл. 8.

$\Delta b_n, \text{ м}$	$\Delta h_n, \text{ м}$	$b'_1, \text{ м}$	$b_{1c}, \text{ м}$	$b'_2, \text{ м}$	$b_{2c}, \text{ м}$	$h'_{1c}, \text{ м}$	$h_{1c}, \text{ м}$
2,0E-4	2,0E-4	8,5E-3	8,7E-3	6,2E-3	6,4E-3	1,97E-2	2,0E-2
1,0E-4	1,0E-4	9,8E-3	9,9E-3	6,8E-3	6,9E-3	1,09E-2	1,1E-2

При однослойной обмотке площадь прокладок в пазу $S_{np} = 0$.

Площадь корпусной изоляции в пазу

$$S_{из} = b_{из} \cdot (2 \cdot h_{n1} + b_{1c} + b_{2c}),$$

где $b_{из}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу выбираем из табл. 9.

$S_{из}, \text{ м}^2$	$b_{из}, \text{ м}$	$h_{n1}, \text{ м}$	$b_{1c}, \text{ м}$	$b_{2c}, \text{ м}$
2,383E-5	4,000E-4	2,2E-2	8,7E-3	6,4E-3
1,103E-5	2,500E-4	1,4E-2	9,9E-3	6,9E-3

Площадь поперечного сечения паза, остающаяся для размещения проводников $S'_n = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_{1c} - S_{из} - S_{np}$;

$S'_n, \text{ м}^2$	$b'_1, \text{ м}$	$b'_2, \text{ м}$	$h'_{1c}, \text{ м}$	$S_{из}, \text{ м}^2$	$S_{np}, \text{ м}^2$
1,206E-4	8,5E-3	6,2E-3	1,97E-2	2,383E-5	0
8,107E-5	9,8E-3	6,8E-3	1,09E-2	1,103E-5	0

$$\text{Коэффициент заполнения паза } k_3 = \frac{d_{из}^2 \cdot u_n \cdot n_{эл}}{S'_n}.$$

k_3	$d_{из}, \text{ м}$	u_n	$n_{эл}$	$S'_n, \text{ м}^2$
7,496E-1	1,585E-3	18	2	1,206E-4
7,244E-1	1,015E-3	57	1	8,107E-5

Коэффициент заполнения паза находится в пределах 0,70—0,75.

2.4. Схема обмотки статора

Принимаем однослойную обмотку статора и строим ее схему как схему шаблонной обмотки с равными лобовыми частями по принятым характеристикам.

$P=10$ кВт, $a=1$, $q=3$, $p=3$, $Z_1=54$.

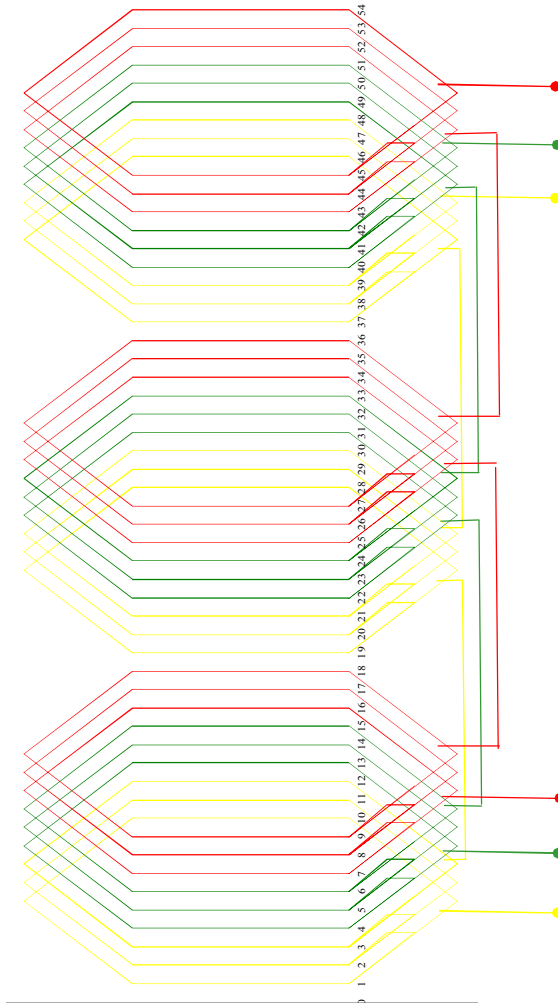


Рис. П1. Схема обмотки двигателя 10 кВт

$P=1,5 \text{ кВт}$, $a=1$, $q=4$, $p=1$, $Z_1=24$.

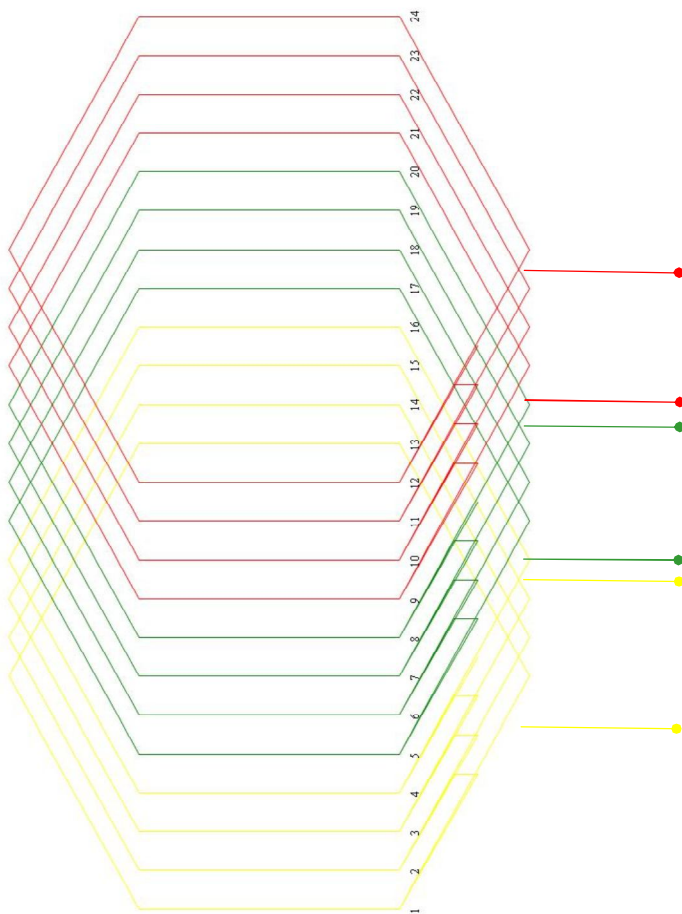


Рис. П2. Схема обмотки двигателя 1,5 кВт

2.5. Расчет ротора

Воздушный зазор (рис. 20) и число пазов ротора (табл. 12).

δ , м	Z_2
4,5000E-4	42
4,0000E-4	18

Внешний диаметр $D_2 = D - 2 \cdot \delta$.

D_2 , м	D_1 , м	δ , м
0,192	0,193	4,5000E-4
0,081	0,082	4,0000E-4

Конструктивная длина сердечника ротора равна длине сердечника статора $l_2 = l_3$.

l_2 , м
0,123
0,077

Зубцовое деление $t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2}$.

t_2 , м	D_2 , м	Z_2
0,014	0,192	42
0,014	0,081	18

Внутренний диаметр сердечника ротора при непосредственной посадке на вал равен диаметру вала и может быть определен:

$D_j = k_b \cdot D_a$ (значение коэффициента k_b принимаем по табл. 13).

D_j , м	k_b	D_a , м
0,063	0,23	0,272
0,034	0,23	0,149

Коэффициент приведения токов $v_i = \frac{2 \cdot m \cdot \omega_1 \cdot k_{об1}}{Z_2}$.

v_i	m	ω_1	$k_{об1}$	Z_2
22,212	3	162	0,96	42
72,782	3	228	0,96	18

Предварительное значение тока в стержне ротора $I_2 = k_i \cdot I_{1н} \cdot v_i$, где k_i определяем из рис. 34:

I_2 , А	k_i	$I_{1н}$, А	v_i
391,039	0,91	19,35	22,212
224,491	0,76	4,06	72,782

Площадь поперечного сечения стержня $q_c = \frac{I_2}{J_2}$, где J_2 выбираем $(3,0 \times 10^6) \text{ А/м}^2$.

$q_c, \text{ м}^2$	$I_2, \text{ А}$	$J_2, \text{ А/м}^2$
1,30E-4	391,039	3,0E+6
7,48E-5	224,491	3,0E+6

Размеры шлица и высота перемычки над пазом выбираем соответствии с указаниями к рис. 25: для двигателя 1,5 кВт пазы (рис. 25, а) имеют узкую прорезь со следующими размерами: $b_{ш}=1,0 \text{ мм}$ и $h_{ш}=0,5 \text{ мм}$; в двигателе 10 кВт выполняют грушевидные закрытые пазы (рис. 25, б) с размерами шлица $b_{ш}=1,5 \text{ мм}$ и $h_{ш}=0,7 \text{ мм}$, высота перемычки над пазом — $0,3 \text{ мм}$.

$b_{ш2}, \text{ м}$	$h_{ш2}, \text{ м}$	$h'_{ш2}, \text{ м}$
1,5E-3	7,0E-4	3,0E-4
1,0E-3	5,0E-4	0,0E+0

Допустимая ширина зубцов ротора определяется по допустимой индукции B_{z2} (табл. 6): $b_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{B_{z2} \cdot l_{cm2} \cdot k_c}$,

$b_{z2}, \text{ м}$	$B_{z2}, \text{ Тл}$	$B_{\delta}, \text{ Тл}$	$t_2, \text{ м}$	$l_{\delta}, \text{ м}$	$l_{cm2}, \text{ м}$	k_c
6,40E-3	1,80	0,777	0,014	0,123	0,123	0,97
5,72E-3	1,80	0,705	0,014	0,077	0,077	0,97

Размеры паза b_{1p} , b_{2p} и h_{1p} рассчитываем, исходя из сечения стержня q_c и из условия постоянства ширины зубцов ротора:

$$b_{1p} = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{ш2} - 2 \cdot h'_{ш2}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Z_2}.$$

$b_{1p}, \text{ м}$	$D_2, \text{ м}$	$h_{ш2}, \text{ м}$	$h'_{ш2}, \text{ м}$	Z_2	$b_{z2}, \text{ м}$
7,29E-3	0,192	7,0E-4	3,0E-4	42	6,40E-3
7,04E-3	0,081	5,0E-4	0,0E+0	18	5,72E-3

$$b_{2p} = \sqrt{\frac{b_{1p}^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot q_c}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}};$$

$b_{2p}, \text{ м}$	$b_{1p}, \text{ м}$	Z_2	$q_c, \text{ м}^2$
4,80E-3	7,29E-3	42	1,30E-4
3,88E-3	7,04E-3	18	7,48E-5

$$h_{1p} = (b_{1p} - b_{2p}) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi};$$

$h_{1p}, \text{ м}$	$b_{2p}, \text{ м}$	$b_{1p}, \text{ м}$	Z_2
1,66E-2	4,80E-3	7,29E-3	42
9,05E-3	3,88E-3	7,04E-3	18

Полная высота паза h_{n2} :

$$h_{n2} = h'_{u2} + h_{u2} + \frac{b_{1p}}{2} + h_{1p} + \frac{b_{2p}}{2}.$$

$h_{n2}, \text{ м}$	$h'_{u2}, \text{ м}$	$h_{u2}, \text{ м}$	$b_{1p}, \text{ м}$	$b_{2p}, \text{ м}$	$h_{1p}, \text{ м}$
2,36E-2	3,0E-4	7,0E-4	7,29E-3	4,80E-3	1,66E-2
1,51E-2	0,0E+0	5,0E-4	7,04E-3	3,88E-3	9,05E-3

Уточняем площадь сечения стержня q_c :

$$q_c = \frac{\pi}{8} \cdot (b_{1p}^2 + b_{2p}^2) + \frac{1}{2} \cdot (b_{1p} + b_{2p}) \cdot h_{1p};$$

$q_c, \text{ м}^2$	$b_{1p}, \text{ м}$	$b_{2p}, \text{ м}$	$h_{1p}, \text{ м}$
1,30E-4	7,29E-3	4,80E-3	1,66E-2
7,48E-5	7,04E-3	3,88E-3	9,05E-3

Плотность тока в стержне $J_2 = \frac{I_2}{q_c}$.

$J_2, \text{ А/м}^2$	$I_2, \text{ А}$	$q_c, \text{ м}^2$
3,00E+6	391,039	1,30E-4
3,00E+6	224,491	7,48E-5

Ток в замыкающих кольцах $I_{кл}$ короткозамкнутых роторов $I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta}$, где $\Delta = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2}\right)$.

$I_{кл}, A$	I_2, A	Δ	p	Z_2
8,79E+2	391,039	0,4450	3	42
6,46E+2	224,491	0,3473	1	18

Плотность тока в замыкающих кольцах $J_{кл}$ выбираем на 15% меньше, чем в стержнях — $J_{кл} = 0,85 \cdot J_2$.

$J_{кл}, A/M^2$	$J_2, A/M^2$
2,55E+6	3,00E+6
2,55E+6	3,00E+6

Площадь поперечного сечения замыкающих колец $q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}}$.

$q_{кл}, M^2$	$I_{кл}, A$	$J_{кл}, A/M^2$
3,45E-4	8,79E+2	2,55E+6
2,53E-4	6,46E+2	2,55E+6

Размеры замыкающих колец: $b_{кл} = 1,2 \cdot h_{п2}$.

$b_{кл}, M$	$h_{п2}, M$
0,0296	2,36E-2
0,0188	1,51E-2

$$a_{кл} = \frac{q_{кл}}{b_{кл}}$$

$a_{кл}, M$	$q_{кл}, M^2$	$b_{кл}, M$
0,0117	3,45E-4	0,0296
0,0135	2,53E-4	0,0188

Средний диаметр замыкающих колец $D_{кл.ср} = D_2 - b_{кл}$.

$D_{кл.ср}, M$	D_2, M	$b_{кл}, M$
0,1627	0,192	0,0296
0,0623	0,081	0,0188

2.6. Расчет намагничивающего тока

$$\text{Индукция в зубцах статора } B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{z1} \cdot l_{cm1} \cdot k_c}.$$

B_{z1} , Тл	B_{δ} , Тл	t_1 , м	l_{δ} , м	b_{z1} , м	l_{cm1} , м	k_c
1,75	0,777	0,0112	0,123	5,141E-3	0,123	0,97
1,75	0,705	0,0107	0,077	4,454E-3	0,077	0,97

$$\text{Индукция в зубцах ротора } B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{b_{z2} \cdot l_{cm2} \cdot k_c}.$$

B_{z2} , Тл	B_{δ} , Тл	t_2 , м	l_{δ} , м	b_{z2} , м	l_{cm2} , м	k_c
1,8	0,777	0,014	0,123	6,40E-3	0,123	0,97
1,8	0,705	0,014	0,077	5,72E-3	0,077	0,97

$$\text{Индукция в ярме статора } B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot l_{cm1} \cdot k_c};$$

B_a , Тл	Φ , Вб	h_a , м	l_{cm1} , м	k_c
1,5	0,006	1,718E-2	0,123	0,97
1,5	0,004	1,985E-2	0,077	0,97

Расчетная высота ярма ротора h'_j при посадке сердечника непосредственно на вал: $h'_j = \frac{D_2}{2} - h_{n2}$.

h'_j , м	D_2 , м	p	h_{n2} , м
0,0725	0,192	3	2,36E-2
0,0255	0,081	1	1,51E-2

$$\text{Индукция в ярме ротора } B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_j \cdot l_{cm2} \cdot k_c},$$

B_j , Тл	Φ , Вб	h'_j , м	l_{cm2} , м	k_c
0,3557	0,006	0,0725	0,123	0,97
1,1665	0,004	0,0255	0,077	0,97

Коэффициент воздушного зазора $k_\delta = \frac{t_1}{t_1 - \gamma \cdot \delta}$, где γ рассчиты-

вается по следующей формуле: $\gamma = \frac{\left(\frac{b_{\text{ш1}}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{\text{ш1}}}{\delta}}$.

γ	$b_{\text{ш1}}, \text{ м}$	$\delta, \text{ м}$
5,113	3,7E-3	4,50E-4
4,500	3,0E-3	4,00E-4

k_δ	$t_1, \text{ м}$	γ	$\delta, \text{ м}$
1,2575	0,0112	5,1130	4,5000E-4
1,2016	0,0107	4,5000	4,0000E-4

Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_\delta = 1,59 \cdot 10^6 \cdot B_\delta \cdot k_\delta \cdot \delta.$$

$F_\delta, \text{ А}$	k_δ	$\delta, \text{ м}$	$B_\delta, \text{ Тл}$
698,9	1,2575	4,5000E-4	0,777
538,7	1,2016	4,0000E-4	0,705

Значения напряженности поля в зубцах, определено в соответствии с индукциями B_z , по кривой намагничивания для зубцов для принятой марки стали 2013 (табл. 15).

$H_{z1}, \text{ А/м}$	$B_{z1}, \text{ Тл}$	$H_{z2}, \text{ А/м}$	$B_{z2}, \text{ Тл}$
1330	1,75	1520	1,80
1330	1,75	1520	1,80

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора F_{z1} и ротора F_{z2} : $F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1}$, $F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2}$;

$F_{z1}, \text{ А}$	$h_{z1}, \text{ м}$	$H_{z1}, \text{ А/м}$	$F_{z2}, \text{ А}$	$h_{z2}, \text{ м}$	$H_{z2}, \text{ А/м}$
59,203	0,0223	1330	70,437	0,0232	1520
36,375	0,0137	1330	44,566	0,0147	1520

Коэффициент насыщения зубцовой зоны $k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta}$.

k_z	F _{z1} , А	F _{z2} , А	F _δ , А
1,19	59,203	70,437	698,9058
1,15	36,375	44,566	538,6874

Значения напряженности поля в ярме Н_ј определяем в соответствии с индукциями В_ј для принятой марки стали 2013 по табл. 14.

H_a, А/м	B _a , Тл	H_ј, А/м	B _ј , Тл
520	1,5000	48	0,3557
520	1,5000	248	1,1665

$$\text{Длина средней магнитной линии ярма статора } L_a = \frac{\pi \cdot (D_a - h_a)}{2 \cdot p}.$$

L_a, м	D _a , м	h _a , м	p
0,133	0,272	1,718E-2	3
0,203	0,149	1,985E-2	1

$$\text{Высота спинки ротора } h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{n2}.$$

h_ј, м	D ₂ , м	D _ј , м	h _{n2} , м
0,041	0,192	0,063	2,36E-2
0,008	0,081	0,034	1,51E-2

Длина средней магнитной линии потока в ярме ротора

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

L_ј, м	D _ј , м	h _ј , м	p
0,054	0,063	0,041	3
0,017	0,034	0,008	1

Магнитное напряжение ярма статора F_a и ярма ротора F_ј:
F_a=L_a·H_a, F_ј=L_ј·H_ј;

F_a, А	L _a , м	H _a , А/м	F_ј, А	L _ј , м	H _ј , А/м
69,379	0,133	520	2,607	0,054	48
105,491	0,203	520	4,161	0,017	248

Суммарное магнитное напряжение магнитной цепи машины (на пару полюсов): F_ц= F_δ+ F_{z1}+ F_{z2}+ F_a+ F_ј;

$F_{ц}, A$	F_{δ}, A	F_{z1}, A	F_{z2}, A	F_{δ}, A	F_{j}, A
900,53	698,9058	59,203	70,437	69,379	2,607
729,28	538,6874	36,375	44,566	105,491	4,161

Коэффициент насыщения магнитной цепи $k_{\mu} = \frac{F_{ц}}{F_{\delta}}$.

k_{μ}	$F_{ц}, A$	F_{δ}, A
1,29	900,53	698,9058
1,35	729,28	538,6874

Намагничивающий ток $I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{ц}}{0,9 \cdot m \cdot W_1 \cdot k_{об1}}$.

I_{μ}, A	p	$F_{ц}, A$	m	W_1	$k_{об1}$
6,435	3	900,53	3	162	0,96
1,237	1	729,28	3	228	0,96

Относительное значение намагничивающего тока $I'_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_{1н}}$.

I'_{μ}	$I_{ц}, A$	$I_{1н}, A$
0,333	6,435	19,35
0,305	1,237	4,06

2.7. Геометрические размеры

Для наглядного представления о конструкции спроектированного двигателя построим его эскизы по рассчитанным размерам (в масштабе).

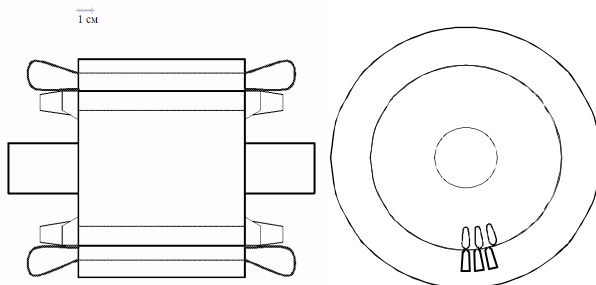


Рис. П. 3. Геометрические размеры активных частей двигателя мощностью 10 кВт

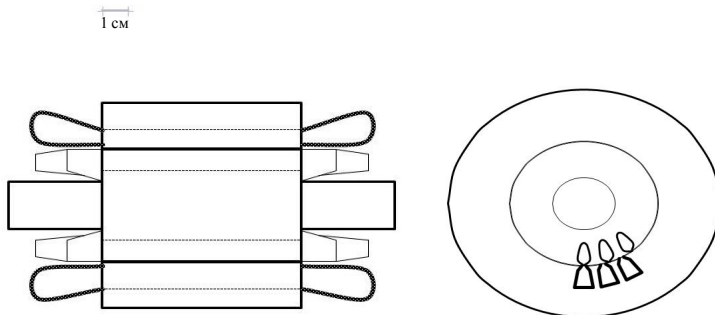


Рис. П. 3. Геометрические размеры активных частей двигателя мощностью 1,5 кВт

2.8. Параметры рабочего режима

Средняя ширина катушки $b_{кт} = \frac{\pi \cdot (D + h_{п1})}{2 \cdot p} \cdot \beta_1$, где β_1 — относительное укорочение шага обмотки статора = 1, т.к. обмотка принимается однослойной.

$b_{кт}$, м	D, м	$h_{п1}$, м	p	β_1
0,113	0,193	2,2E-2	3	1
0,150	0,082	1,4E-2	1	1

Длина вылета лобовой части катушки $l_{\text{выл}} = k_{\text{выл}} \cdot b_{кт} + B$, где $k_{\text{выл}}$ — коэффициент, значение которого взято из табл. 19 для неизолированных лобовых частей. B — длина вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части. Для вспянутой обмотки, укладываемой в пазы до запрессовки сердечника в корпус, принимаем B=0,01 м.

$l_{\text{выл}}$, м	$k_{\text{выл}}$	$b_{кт}$, м	B, м
0,066	0,50	0,113	0,01
0,049	0,26	0,150	0,01

Длина пазовой части $l_{п1}$ равна конструктивной длине сердечников машины: $l_{п1} = l_{ст1}$.

Длина лобовой части $l_{л1} = k_{л1} \cdot b_{кт} + 2 \cdot B$, где $k_{л1}$ — коэффициент, значение которого взято из табл. 19 для неизолированных лобовых частей.

$l_{л1}, \text{ м}$	$k_{л1}$	$b_{кТ}, \text{ м}$	$B, \text{ м}$
0,178	1,40	0,113	0,01
0,200	1,20	0,150	0,01

Средняя длина витка $l_{ср1}=2 \cdot (l_{л1} + l_{л2})$.

$l_{ср1}, \text{ м}$	$l_{л1}, \text{ м}$	$l_{л2}, \text{ м}$
0,602	0,178	0,123
0,554	0,200	0,077

Общая длина проводников фазы обмотки $L_1=l_{ср1} \cdot W_1$;

$L_1, \text{ м}$	$l_{ср1}, \text{ м}$	W_1
97,485	0,602	162
126,425	0,554	228

Для класса нагревостойкости изоляции F расчетная температура $t_{расч}=115^0 \text{ C}$. Для меди удельное сопротивление материала

обмотки при расчетной температуре: $\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{41} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Активное сопротивление фазы обмотки статора

$$r_1 = \rho_{115} \cdot \frac{L_1}{q_{эф} \cdot a}$$

$r_1, \text{ Ом}$	$\rho_{115}, \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$L_1, \text{ м}$	$q_{эф}, \text{ м}^2$	a
0,673	2,4E-8	97,485	3,534E-6	1
4,349	2,4E-8	126,425	7,090E-7	1

Относительное значение $R_1 = r_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1нф}}$.

R_1	$r_1, \text{ Ом}$	$I_{1H}, \text{ А}$	$U_{1нф}, \text{ В}$
0,059	0,673	19,35	220
0,080	4,349	4,06	220

Для литой алюминиевой обмотки ротора удельное сопротивление материала при расчетной температуре $\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{20,5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Сопротивление стержня $r_c = \rho_{115} \cdot \frac{l_{cm2}}{q_c} \cdot k_r$.

r_c , Ом	ρ_{115} , Ом·м	$l_{ст2}$, м	k_r	q_c , м ²
4,60E-5	4,8E-8	0,123	1	1,30E-4
5,02E-5	4,8E-8	0,077	1	7,48E-5

Сопротивление участка замыкающего кольца, заключенного между двумя соседними стержнями $r_{кл} = \rho_{115} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кл.сп}}{Z_2 \cdot q_{кл}}$.

$r_{кл}$, Ом	ρ_{115} , Ом·м	$D_{кл.сп}$, м	Z_2	$q_{кл}$, м ²
1,72E-6	4,8E-8	0,1627	42	3,45E-4
2,09E-6	4,8E-8	0,0623	18	2,53E-4

Активное сопротивление фазы обмотки ротора $r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{кл}}{\Delta^2}$.

r_c , Ом	r_2 , Ом	$r_{кл}$, Ом	Δ
4,60E-5	6,34E-5	1,72E-6	0,4450
5,02E-5	8,49E-5	2,09E-6	0,3473

Сопротивление r_2 для дальнейших расчетов приводится к числу витков первичной обмотки статора: $r'_2 = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (\omega_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2}$.

r'_2 , Ом	r_2 , Ом	m	ω_1	Z_2	$k_{об1}$
0,438	6,34E-5	3	162	42	0,96
2,700	8,49E-5	3	228	18	0,96

Относительное значение $R_2 = r'_2 \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1нф}}$.

R_2 , о.е.	r'_2 , Ом	$I_{1н}$, А	$U_{1нф}$, В
0,039	0,438	19,35	220
0,050	2,700	4,06	220

Для определения индуктивного сопротивления фазы обмотки статора определяем коэффициенты магнитной проводимости.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_{\lambda 1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_{\delta}'} \cdot (l_{\lambda 1} - 0,64 \cdot \beta_1 \cdot \tau).$$

$\lambda_{\lambda 1}$	q	$l_{\lambda 1}$, м	l_{δ}' , м	β_1	τ , м
0,938	3	0,178	0,123	1	0,101
2,082	4	0,200	0,077	1	0,129

Коэффициент ξ для определения магнитной проводимости дифференциального рассеяния при полузакрытых или полукрытых пазах статора с учетом скоса пазов

$$\xi = 2 \cdot k_{\text{ск}}' \cdot k_{\beta} - k_{\text{об1}}^2 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \cdot (1 + \beta_{\text{ск}}^2).$$

ξ	$k_{\text{ск}}'$	k_{β}	$k_{\text{об1}}$	t_2 , м	t_1 , м
1,191	1,35	1	0,96	0,014	0,0112
1,201	1,40	1	0,96	0,014	0,0107

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния для обмоток статора $\lambda_{\delta 1} = \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi$.

$\lambda_{\delta 1}$	ξ	δ , м	k_{δ}	t_1 , м
1,971	1,191	4,5000E-4	1,2575	0,0112
2,234	1,201	4,0000E-4	1,2016	0,0107

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния для обмоток статора $\lambda_{\mu 1}$. Определяется по формулам табл. 20:

$$h_3 = h_{1c}; \quad h_2 = 0; \quad h_1 = \frac{b_{2c} - b_{u1}}{2};$$

$$\lambda_{\mu 1} = 0,4\pi \left(\frac{h_3}{3b_n} k_{\beta} + \left(0,785 - \frac{b_u}{2b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_u}{b_u} \right) k_{\beta}' \right);$$

$\lambda_{\mu 1}$, м	h_3 , м	b_{2c} , м	h_2 , м	$b_{\mu 1}$, м	k_{β}	$h_{\mu 1}$, м	k_{β}'
1,604	2,0E-2	6,4E-3	0	3,7E-3	1	1,0E-3	1
1,162	1,1E-2	6,9E-3	0	3,0E-3	1	5,0E-4	1

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{\omega_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l'_\delta}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{n1} + \lambda_{r1} + \lambda_{\sigma 1}).$$

x_1 , Ом	f_1 , Гц	ω_1	l'_δ , м	p	q	λ_{n1}	λ_{r1}	$\lambda_{\sigma 1}$
1,279	50	162	0,123	3	3	1,604	1,971	0,938
4,331	50	228	0,077	1	4	1,162	2,234	2,082

Относительное значение $x'_1 = x_1 \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1нф}}$.

x'_1	x_1 , Ом	$I_{1н}$, А	$U_{1нф}$, В
0,112	1,279	19,35	220
0,080	4,331	4,06	220

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора λ_{n2} . Для рабочего режима $k_d=1$.

$$\lambda_{n2} = 0,4 \cdot \pi \left(\left[\frac{h_1}{3 \cdot b_{1p}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_{1p}^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{u2}}{2 \cdot b_{1p}} \right] \cdot k_\delta + \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \right),$$

где $h_1 = h_{n2} - h_{u2} - h'_{u2} + 0,2 \cdot b_{2p}$.

λ_{n2}	h_{n2} , м	h_{u2} , м	h'_{u2} , м	b_{2p} , м	b_{u2} , м	b_{1p} , м	q_c	I_2 , А
2,242	2,36E-2	7,0E-4	3,0E-4	4,80E-3	1,5E-3	7,29E-3	1,30E-4	391,039
1,874	1,51E-2	5,0E-4	0,0E+0	3,88E-3	1,0E-3	7,04E-3	7,48E-5	224,491

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора

$$\lambda_{r2} = \frac{2,3 \cdot D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot l'_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \log \left(\frac{4,7 \cdot D_{кл.ср}}{2 \cdot a_{кл} + b_{кл}} \right).$$

λ_{r2}	$D_{кл.ср}$, м	Z_2	l'_δ , м	Δ	$a_{кл}$, м	$b_{кл}$, м
2,242	0,1627	42	0,123	0,4450	0,0117	0,0296
1,874	0,0623	18	0,077	0,3473	0,0135	0,0188

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора $\lambda_{л2}$. Находим с учетом

$$\text{коэффициента } \xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 + \left(\frac{p}{Z_2} \right)^2}, \Delta_z \text{ — находим по}$$

кривым рис. 34.

ξ	p	Z_2	Δ_z
0,980	3	42	0,03
0,986	1	18	0,02

$$\lambda_{\lambda 2} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi.$$

$\lambda_{\lambda 2}$	ξ	$t_2, \text{ м}$	$\delta, \text{ м}$	k_δ
2,075	0,980	0,014	4,5000E-4	1,2575
2,422	0,986	0,014	4,0000E-4	1,2016

Суммарное значение коэффициентов магнитной проводимости обмоток и короткозамкнутого ротора $\Sigma \lambda_2 = \lambda_{\lambda 2} + \lambda_{\lambda 2} + \lambda_{\lambda 2}$.

$\Sigma \lambda_2$	$\lambda_{\lambda 2}$	$\lambda_{\lambda 2}$	$\lambda_{\lambda 2}$
4,741	2,242	2,075	0,424
4,987	1,874	2,422	0,692

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора $x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l'_\delta \cdot \Sigma \lambda_2 \cdot 10^{-6}$.

$x_2, \text{ Ом}$	$\Sigma \lambda_2$	$f_1, \text{ Гц}$	l'_δ
2,303E-4	4,741	50	0,123
1,517E-4	4,987	50	0,077

Сопротивление x_2 для дальнейших расчетов приводим к числу витков первичной обмотки статора $x'_2 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (\omega_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2}$.

$x'_2, \text{ Ом}$	$x_2, \text{ Ом}$	Z_2	m	ω_1	$k_{об1}$
1,591	2,303E-4	42	3	162	0,96
4,821	1,517E-4	18	3	228	0,96

Относительное значение $X_2 = x'_2 \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1нф}}$.

X₂, Ом	x'₂, Ом	I _{лн} , А	U _{лнф} , В
0,140	1,591	19,35	220
0,089	4,821	4,06	220

2.9. Расчет потерь

Масса стали ярма статора $m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_{cm1} \cdot k_c \cdot \gamma_c$,

где γ_c — удельная масса стали (принимаяем $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³).

m_a, кг	D _a , м	h _a , м	l _{ст1} , м	k _c	γ _c , кг/м ³
12,801	0,272	1,718E-2	0,123	0,97	7,8E-3
4,692	0,149	1,985E-2	0,077	0,97	7,8E-3

Масса стали зубцов статора $m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Z_1 \cdot l_{cm1} \cdot k_c \cdot \gamma_c$.

m_{z1}, кг	h _{z1} , м	b _{z1} , м	Z ₁	l _{ст1} , м	k _c	γ _c , кг/м ³
5,750	0,0223	5,141E-3	54	0,123	0,97	7,8E-3
0,852	0,0137	4,454E-3	24	0,077	0,97	7,8E-3

Потери в стали основные

$$P_{ст.осн} = p_{1.0/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (k_{da} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{dz} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}),$$

где: $p_{1.0/50}$ — удельные потери и β — показатель степени по табл. 22, k_{da} и k_{dz} — коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов приближенно принимаем $k_{da} = 1,6$ и $k_{dz} = 1,8$.

P_{ст.осн}, Вт	p _{1.0.50}	β	f ₁ , Гц	k _{да}	k _{дз}	B _a , Тл	B _{z1} , Тл	m _a , кг	m _{z1} , кг
202,237	2,6	1,5	50	1,6	1,8	1,5000	1,7500	12,801	5,750
56,125	2,6	1,5	50	1,6	1,8	1,5000	1,7500	4,692	0,852

Для определения поверхностных потерь вначале находим амплитуду пульсации индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов ротора $B_{02} = \beta_{02} \cdot k_\delta \cdot B_\delta$, где β_{02} определено по рис. 36.

B₀₂, Тл	β ₀₂	k _δ	B _δ , Тл
0,361	0,37	1,2575	0,777
0,305	0,36	1,2016	0,705

Удельные поверхностные потери $p_{пов2}$ рассчитывают по B_{02} и частоте пульсаций индукции над зубцами:

$$P_{\text{пов2}} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_1 \cdot 10^3)^2,$$

где k_{02} — коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности головки зубцов ротора на удельные потери, принимаем равным 1,5.

$P_{\text{пов2}}, \text{Вт/м}^2$	k_{02}	Z_1	$n_1, \text{об/мин}$	$B_{02}, \text{Тл}$	$t_1, \text{м}$
155,182	1,5	54	1000	0,361	0,0112
155,024	1,5	24	3000	0,305	0,0107

Полные поверхностные потери в роторе

$$P_{\text{пов2}} = p_{\text{пов2}} \cdot (t_2 - b_{\text{ш2}}) \cdot Z_2 \cdot l_{\text{стг}}.$$

$P_{\text{пов2}}, \text{Вт}$	$p_{\text{пов2}}, \text{Вт/м}^2$	Z_2	$b_{\text{ш2}}$	$l_{\text{стг}}, \text{м}$	$t_2, \text{м}$
10,324	155,182	42	1,5E-3	0,123	0,014
2,828	155,024	18	1,0E-3	0,077	0,014

Для определения пульсационных потерь вначале находим амплитуду пульсации индукции в среднем сечении зубцов ротора:

$$B_{\text{пуль2}} = \frac{\gamma \cdot \delta}{2 \cdot t_2} \cdot B_{Z2}.$$

$B_{\text{пуль2}}, \text{Тл}$	γ	$\delta, \text{м}$	$B_{Z2}, \text{Тл}$	$t_2, \text{м}$
0,144	5,1130	4,5000E-4	1,8000	0,014
0,114	4,5000	4,0000E-4	1,8000	0,014

Масса стали зубцов ротора $m_{z2} = Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot l_{\text{см2}} \cdot k_c \cdot \gamma_c$.

$m_{z2}, \text{кг}$	$h_{z2}, \text{м}$	$b_{z2}, \text{м}$	Z_2	$l_{\text{стг}}, \text{м}$	k_c	$\gamma_c, \text{кг/м}^3$
5,793	0,0232	6,40E-3	42	0,123	0,97	7,8E-3
0,879	0,0147	5,72E-3	18	0,077	0,97	7,8E-3

Пульсационные потери в зубцах ротора

$$P_{\text{пуль2}} = 0,11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{1000} \cdot B_{\text{пуль2}} \right)^2 \cdot m_{z2}.$$

$P_{\text{пуль2}}, \text{Вт}$	Z_1	$n_1, \text{об/мин}$	$B_{\text{пуль2}}, \text{Тл}$	$m_{z2}, \text{кг}$
38,542	54	1000	0,144	5,793
6,558	24	3000	0,114	0,879

Сумма добавочных потерь в стали $P_{ст.доб} = P_{пов2} + P_{пул2}$.

$P_{ст.доб}, \text{Вт}$	$P_{пов2}, \text{Вт}$	$P_{пул2}, \text{Вт}$
48,866	10,324	38,542
9,386	2,828	6,558

Полные потери в стали $P_{ст} = P_{ст,осн} + P_{ст.доб}$.

$P_{ст}, \text{Вт}$	$P_{ст.доб}, \text{Вт}$	$P_{ст.осн}, \text{Вт}$
251,1	48,866	202,237
65,51	9,386	56,125

Механические потери $P_{мех} = k_T \cdot \left(\frac{n_1}{10}\right)^2 \cdot D_a^4$, в нашем случае коэффициент $k_T=0,95$.

$P_{мех}, \text{Вт}$	K_T	$n_1, \text{об/мин}$	$D_a, \text{м}$
51,802	0,946	1000	0,272
44,360	1,000	3000	0,149

Добавочные потери при номинальной нагрузке

$$P_{доб.н} = 0,005 \cdot \frac{P_2}{\eta}$$

$P_{доб.н}, \text{Вт}$	$P_2, \text{Вт}$	η
56,180	10000	0,89
9,375	1500	0,8

Холостой ход двигателя $P_{э1хх} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1$

$P_{э1хх}, \text{Вт}$	$I_{\mu}, \text{А}$	$r_1, \text{Ом}$
83,586	6,435	0,673
19,966	1,237	4,349

Активная составляющая тока холостого хода

$$I_{хха} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{э1хх}}{m \cdot U_{1нф}}$$

$I_{хха}, \text{А}$	$P_{ст}, \text{Вт}$	$P_{мех}, \text{Вт}$	$P_{э1хх}, \text{Вт}$	m	$U_{1нф}, \text{В}$
0,586	251,103	51,802	83,586	3	220
0,197	65,511	44,360	19,966	3	220

Реактивная составляющая тока холостого хода, равна намагничивающему току I_{μ} .

$$\text{Холостой ход двигателя } I_{xx} = \sqrt{I_{xxa}^2 + I_{\mu}^2}.$$

$I_{xxa}, \text{ A}$	$I_{\mu}, \text{ A}$	$I_{xx}, \text{ A}$
0,586	6,435	6,462
0,108	0,849	0,856

$$\text{Коэффициент мощности при холостом ходе } \cos\varphi = \frac{I_{xxa}}{I_{xx}}.$$

$\cos\varphi_{xx}$	$I_{xxa}, \text{ A}$	$I_{xx}, \text{ A}$
0,091	0,586	6,462
1,237	0,197	1,253

2.10. Расчет рабочих характеристик

Сопротивление r_{12} и x_{12} с достаточной для обычных расчетов точностью определяют по следующим формулам:

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

$r_{12}, \text{ Ом}$	$P_{ст.очн}, \text{ Вт}$	m	$I_{\mu}, \text{ A}$
1,628	202,24	3	6,435
12,225	56,13	3	1,237

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

$r_{12}, \text{ Ом}$	$U_{1нф}, \text{ В}$	$x_1, \text{ Ом}$	$I_{\mu}, \text{ A}$
1,628	220	1,279	6,435
12,23	220	4,331	1,237

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}}.$$

c_1	$x_{12}, \text{ Ом}$	$x_1, \text{ Ом}$
1,039	32,91	1,279
1,025	173,5	4,331

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

γ , рад	x_{12} , Ом	x_1 , Ом	r_{12} , Ом	r_1 , Ом
0,018	32,91	1,279	1,628	0,673
0,023	173,5	4,331	12,23	4,349

Активную составляющую тока синхронного холостого хода определяют из выражения $I_{oa} = \frac{P_{ст.очн} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_{1нф}}$.

I_{oa} , А	$P_{ст.очн}$, Вт	I_{μ} , А	r_1 , Ом	$U_{1нф}$, В
0,433	202,2	6,435	0,673	220
0,115	56,13	1,237	4,349	220

Реактивную составляющую тока синхронного холостого хода принимаем равной току намагничивания $I_{оп} = I_{\mu}$.

Так как $[\gamma] \leq 1$ и мы используем приближенный метод, то в этом случае необходимо ввести дополнительные расчетные величины: $a' = c_1^2$; $a = c_1 r_1$; $b' = 0$; $b = c_1(x_1 + c_1 x_2)$

a'	a , Ом	b'	b , Ом	r_1 , Ом	x_1	x_2'	c_1
1,079	0,699	0,0	0,9481	0,673	1,279	1,591	1,039
1,051	4,458	0,0	0,9786	4,349	4,331	4,821	1,025

В данном случае постоянные потери (не меняются при изменении скольжения): $\Sigma P = P_{ст} + P_{мех} = 476,492$ Вт.

ΣP , Вт	$P_{ст}$, Вт	$P_{мех}$, Вт
302,9	251,1	51,80
109,9	65,51	44,36

Принимаем $s_H = R_2$

R_2 , о.е.
0,039
0,050

Рассчитаем рабочие характеристики, задаваясь скольжением.

Таблица П.1

Рабочие характеристики двигателя мощностью 10 кВт

s	0,002	0,008	0,020	0,035	0,039	0,043	0,051	0,059
$a' r_2' / s$	242,36	60,59	24,24	13,46	12,12	11,02	9,32	8,08
$b' r_2' / s$	0	0	0	0	0	0	0	0
R	243,06	61,29	24,94	14,16	12,82	11,72	10,02	8,78
X	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Z	243,06	61,30	24,95	14,20	12,85	11,75	10,07	8,83
I_2''	0,91	3,59	8,82	15,50	17,12	18,72	21,86	24,92
$\cos \varphi_2'$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99
$\sin \varphi_2'$	0,00	0,02	0,04	0,07	0,07	0,08	0,09	0,11
I_{1a}	1,34	4,02	9,24	15,90	17,50	19,09	22,19	25,21
I_{1p}	6,44	6,49	6,77	7,47	7,70	7,94	8,49	9,11
I_l	6,58	7,64	11,46	17,56	19,12	20,68	23,76	26,80
I_2'	0,94	3,73	9,16	16,10	17,79	19,45	22,71	25,89
P_1	0,88	2,65	6,10	10,49	11,55	12,60	14,65	16,64
$P_{\Sigma 1}$	0,09	0,12	0,27	0,62	0,74	0,86	1,14	1,45
$P_{\Sigma 2}$	0,00	0,02	0,11	0,34	0,42	0,50	0,68	0,88
$P_{\text{доб}}$	0,01	0,01	0,02	0,05	0,05	0,06	0,08	0,11
$\sum P$	0,40	0,45	0,70	1,31	1,51	1,73	2,21	2,74
P_2	0,49	2,21	5,40	9,18	10,04	10,87	12,44	13,89
КПД	0,55	0,83	0,89	0,87	0,87	0,86	0,85	0,84
$\cos \varphi$	0,20	0,53	0,81	0,91	0,92	0,92	0,93	0,94

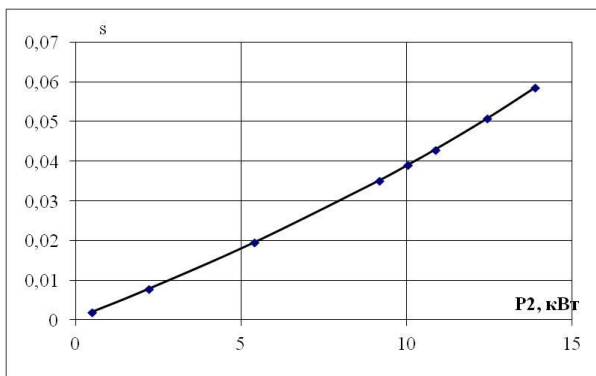


Рис. П.5. Рабочие характеристики — скольжение ($P_n=10$ кВт)

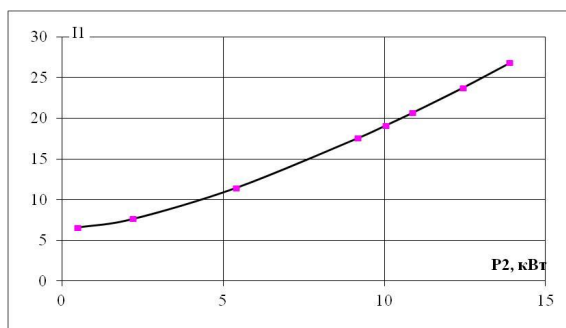


Рис. П.6. Рабочие характеристики — ток статора ($P_n=10$ кВт)

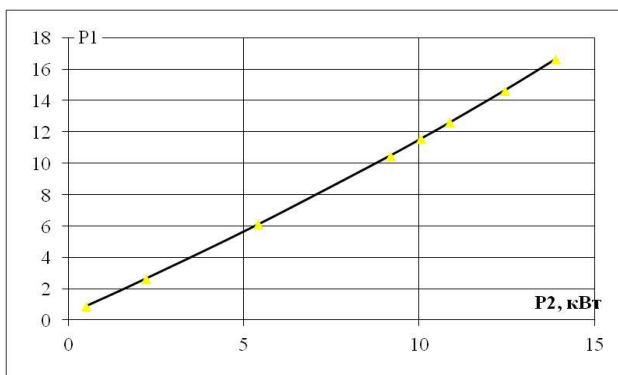


Рис. П.7. Рабочие характеристики — потребляемая мощность ($P_n=10$ кВт)

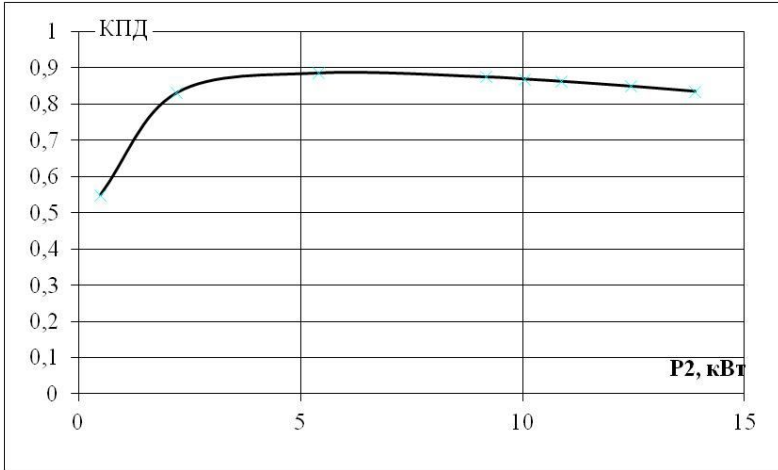


Рис. П.8 Рабочие характеристики — КПД ($P_H=10$ кВт)

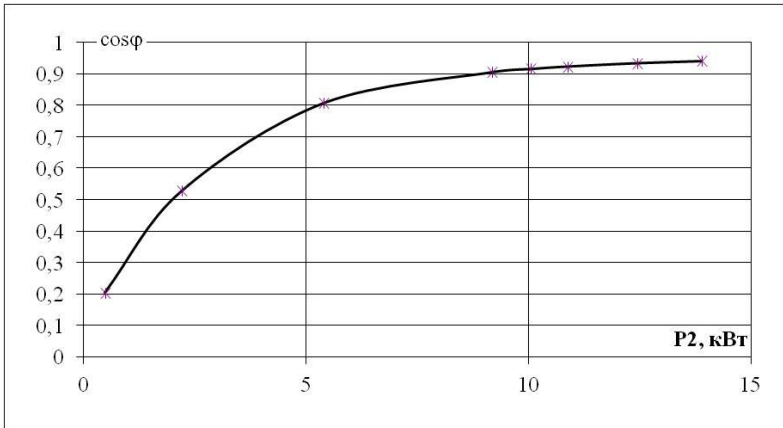


Рис. П.9. Рабочие характеристики — коэффициент активной мощности ($P_H=10$ кВт)

Таблица П.2

Рабочие характеристики двигателя мощностью 1,5 кВт

s	0,003	0,01	0,025	0,045	0,05	0,055	0,065	0,075
$a' r_2' / s$	1135	284	114	63,06	56,75	51,59	43,66	37,84
$b' r_2' / s$	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
R	1140	288	118	67,52	61,21	56,05	48,11	42,29
X	0,979	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Z	1140	288	118	67,53	61,22	56,06	48,12	42,31
I_2''	0,193	0,76	1,86	3,26	3,59	3,92	4,57	5,20
$\cos \varphi_2'$	1	1	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\sin \varphi_2'$	9E-04	0	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
I_{1a}	0,308	0,88	1,98	3,37	3,71	4,04	4,69	5,31
I_{1p}	1,237	1,24	1,25	1,28	1,29	1,31	1,33	1,36
I_l	1,275	1,52	2,34	3,61	3,93	4,24	4,87	5,48
I_2'	0,198	0,78	1,91	3,34	3,68	4,02	4,69	5,33
P_l	0,203	0,58	1,31	2,23	2,45	2,67	3,09	3,51
$P_{\Delta l}$	0,021	0,03	0,07	0,17	0,20	0,24	0,31	0,39
$P_{\Delta 2}$	3E-04	0	0,03	0,09	0,11	0,13	0,18	0,23
$P_{\text{об}}$	9E-04	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
$\sum P$	0,132	0,15	0,21	0,38	0,43	0,49	0,61	0,75
P_2	0,071	0,43	1,092	1,8484	2,018	2,1793	2,481	2,758
КПД	0,349	0,75	0,836	0,8304	0,824	0,8176	0,802	0,786
$\cos \varphi$	0,242	0,58	0,845	0,9345	0,944	0,9515	0,962	0,969

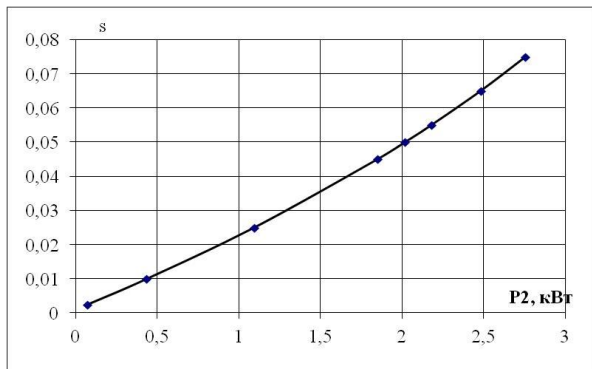


Рис. П.10. Рабочие характеристики — скольжение ($P_n=1,5$ кВт)

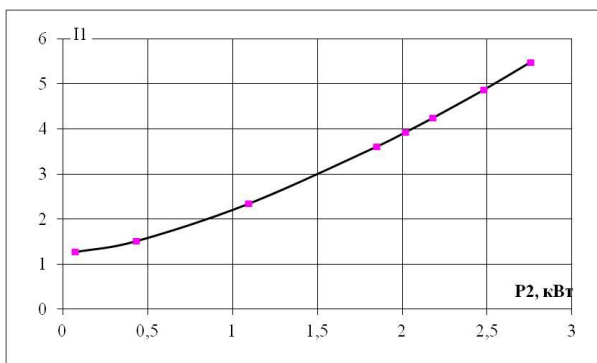


Рис. П.11. Рабочие характеристики — ток статора ($P_n=1,5$ кВт)

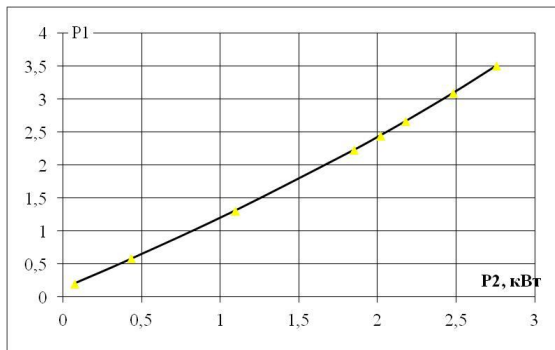


Рис. П.12. Рабочие характеристики — потребляемая мощность ($P_n=1,5$ кВт)

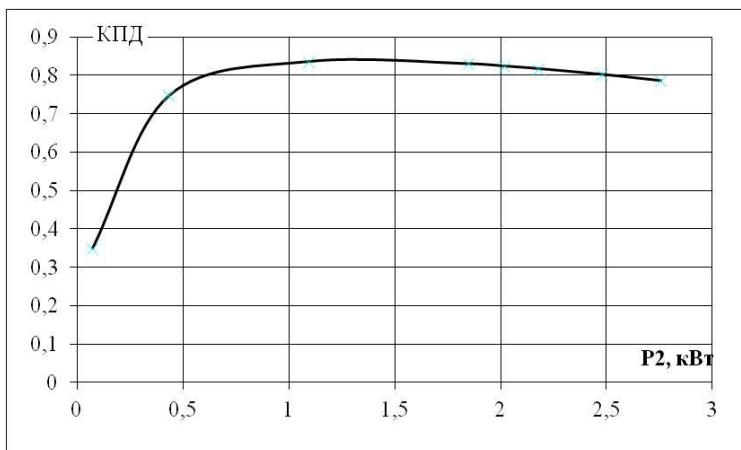


Рис. П.13. Рабочие характеристики — КПД ($P_n=1,5$ кВт)

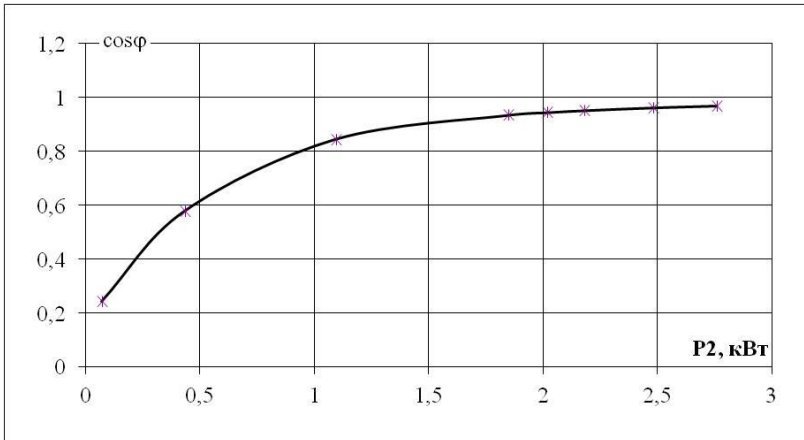


Рис. П.14. Рабочие характеристики — коэффициент активной мощности ($P_n=1,5$ кВт)

2.11 Расчет пусковых характеристик

Данные необходимые для расчета пусковых характеристик.

P_2 , Вт	$U_{1нф}$, В	p	$I_{1н}$, А	x_{12} , Ом	x'_{2} , Ом	x_1 , Ом	r_1 , Ом	r'_{2} , Ом	S_H
10000	220	3	19,35	32,908	1,591	1,279	0,673	0,438	0,039
1500	220	1	4,06	$\frac{173,51}{3}$	4,821	4,331	4,349	2,700	0,050

Рассчитываем пусковые характеристики с учетом вытеснения тока и насыщения при рабочей температуре $\theta=75^{\circ}\text{C}$, для значений скольжения $S=1;0,8;0,5;0,2;0,15;0,1$. Подробный расчет приведен для скольжения $S=1$. Остальные данные расчета сведены в таблицу.

Высота стержня в пазу $h_c = h_{n2} - h'_{u2} - h_{u2}$;

h_c , м	h_{n2} , м	h'_{u2} , м	h_{u2} , м
0,02265	2,36E-2	3,0E-4	7,0E-4
0,01455	1,51E-2	0,0E+0	5,0E-4

По полной высоте стержня и удельному сопротивлению материала стержня (для литой алюминиевой обмотки ротора $\rho_{115}=10^{-6}/20,5$ Ом·м) определяем функцию $\xi = 63,61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s}$

ξ	$h_c, \text{ м}$	s
1,441	0,02265	1
0,929	0,01455	1

В соответствии с функцией ξ находим по кривым рис. 40 и рис. 41 коэффициенты φ и φ'

φ	φ'	ξ
0,2847	0,8939	1,441
0,0953	0,9593	0,929

Глубина проникновения тока в стержень обмотки $h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi}$.

$h_r, \text{ м}$	φ	$h_c, \text{ м}$
0,01763	0,2847	0,02265
0,01333	0,0993	0,01455

В расчете условно принимаем, что при действии эффекта вытеснения, ток ротора распределен равномерно, но не по всему сечению стержня, а лишь по его верхней части, ограниченной высотой h_r , имеющее сечение $q_r = \frac{\pi \cdot b_{1p}^2}{8} + \frac{b_{1p} + b_r}{2} \cdot \left(h_r - \frac{b_{1p}}{2} \right)$, где

$$b_r = b_{1p} - \frac{b_{1p} - b_{2p}}{h_{1p}} \cdot \left(h_r - \frac{b_{1p}}{2} \right),$$

$b_r, \text{ м}$	$b_{1p}, \text{ м}$	$b_{2p}, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$	$h_{1p}, \text{ м}$
0,005194	7,29E-3	4,80E-3	0,01763	1,66E-2
0,00361	7,04E-3	3,88E-3	0,01328	9,05E-3

тогда сечение стержня q_r .

$q_r \cdot 10^{-3}, \text{ м}^2$	$b_{1p}, \text{ м}$	$b_r, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$
0,0001083	7,29E-3	0,005194	0,01763
7,172E-05	7,04E-3	0,003667	0,01328

Коэффициент k_r через отношение площадей всего сечения стержня и сечения, ограниченного высотой h_r : $k_r = \frac{q_c}{q_r}$

k_r	q_r, M^2	q_c, M^2
1,204	0,0001083	1,30E-4
1,043	7,143E-05	7,48E-5

Коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора $K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} \cdot (k_r - 1)$.

K_R	$r_2, \text{Ом}$	k_r	$r_c, \text{Ом}$
1,148	6,34E-5	1,204	4,60E-5
1,025	8,49E-5	1,043	5,02E-5

Приведенное активное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом вытеснения тока $r'_{2\xi} = K_R \cdot r'_2$.

$r'_{2\xi}$	r'_2	K_R
0,5029	0,039	1,148
2,768	2,70	1,025

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учетом действия эффекта вытеснения тока $\lambda_{n2\xi}$ (при $k_d = \varphi'$):

$$\lambda_{n2\xi} = 0,4\pi \cdot \left(\left[\frac{h_1}{3 \cdot b_{1p}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_{1p}^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{u2}}{2 \cdot b_{1p}} \right] \cdot k_o + \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \right)$$

$\lambda_{n2\xi}$	$h_1, \text{м}$	$b_{1p}, \text{м}$	q_c, M^2	$b_{u2}, \text{м}$	$h_{u2}, \text{м}$	k_d
1,936	2,0E-2	7,29E-3	1,30E-4	1,5E-3	7,0E-4	0,8939
1,682	1,1E-2	7,04E-3	7,48E-5	1,0E-3	5,0E-4	0,9593

Изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока $K_x = \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{n2} + \lambda_{o2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{o2}}$.

K_x	$\lambda_{п2\xi}$	$\lambda_{п2}$	$\lambda_{п2}$	$\lambda_{п2}$
0,9360	1,936	0,424	2,075	2,242
0,9615	1,682	0,692	2,422	1,874

Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока $x'_{2\xi} = x'_2 \cdot K_x$.

$x'_{2\xi}$	K_x	x'_2
1,488	0,9360	1,591
4,635	0,9615	4,821

Ток ротора приближенно без учета влияния насыщения:

$$I'_2 = \frac{U_{1нф}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_{2\xi}}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_{2\xi})^2}}$$

I'_2, A	$U_{1нф}, B$	$r_1, Ом$	$r'_{2\xi}, Ом$	$s_{н}$	$x_1, Ом$	$x'_{2\xi}, Ом$
73,20	220	0,673	0,5029	1	1,279	1,168
19,22	220	4,349	2,768	1	4,331	4,635

Учет влияния насыщения на параметры

Средняя МДС обмотки, отнесенная к одному пазу обмотки статора $F_{н.сп} = 0,7 \frac{k_{нас} \cdot I'_2 \cdot u_n}{a} \cdot \left(k'_\beta + k_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right)$.

$F_{н.сп}, A$	I'_2, A	u_n	a	k'_β	$k_{об1}$	Z_1	Z_2
2804	72,20	18	1	1,3	0,96	54	42
2046	19,22	57	1	1,3	0,96	24	18

Коэффициент для определения фиктивной индукции потока рассеяния в воздушном зазоре $C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}}$.

C_N	$\delta, м$	$t_1, м$	$t_2, м$
0,9714	4,5000E-4	0,0112	0,014
0,9569	4,0000E-4	0,0107	0,014

Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{n,cp}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} \cdot 10^{-6}.$$

$B_{\phi\delta}$, Тл	C_N	δ , м	$F_{n,cp}$, А
4,009	0,9714	4,50E-4	2804
3,341	0,9569	4,00E-4	2046

По полученному значению $B_{\phi\delta}$ и по рис. 44 находим отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния не насыщенной машины, характеризуемой коэффициентом x_δ :

$$c_1 = (t_1 - b_{u1}) \cdot (1 - x_\delta).$$

c_1	t_1 , м	b_{u1} , м	x_δ
0,00323	0,0112	3,7E-3	0,569
0,00265	0,0107	3,0E-3	0,656

Вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента проводимости рассеяния полузакрытого паза статора

$$\Delta\lambda_{n1nac} = \frac{h_{u1} + 0,58 \cdot h_1}{b_{u1}} \cdot \frac{c_1}{c_1 + 1,5 \cdot b_{u1}}.$$

$\Delta\lambda_{n1nac}$	c_1	h_1 , м	b_{u1} , м	h_{u1} , м
1,237	0,003246	2,0E-2	3,7E-3	1,0E-3
0,859	0,00265	1,1E-2	3,0E-3	5,0E-4

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора с учетом насыщения: $\lambda_{n1nac} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1nac}$.

λ_{n1nac}	λ_{n1}	$\Delta\lambda_{n1nac}$
0,367	1,604	1,237
0,303	1,162	0,859

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения

$$\lambda_{o1nac} = \lambda_{o1} \cdot x_\delta.$$

$\lambda_{д1нас}$	$\lambda_{д1}$	X_{δ}
1,122	1,971	0,569
1,465	2,234	0,656

где $\lambda_{д1}$ — коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора без учета влияния насыщения.

Индуктивное сопротивление обмотки статора с учетом влияния насыщения $x_{1нас} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{н1нас} + \lambda_{\delta 1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{л1} + \lambda_{н1} + \lambda_{\delta 1}}$.

$X_{1нас}$	X_1	$\lambda_{н1нас}$	$\lambda_{д1нас}$	$\lambda_{н1}$	$\lambda_{д1}$	$\lambda_{л1}$
0,688	1,279	0,367	1,122	1,604	1,971	0,938
3,044	4,331	0,3015	1,465	1,162	2,234	2,082

где $\lambda_{л1}$ — коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния обмотки статора без учета влияния насыщения,

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учетом насыщения $c_2 = (t_2 - b_{w2}) \cdot (1 - x_{\delta})$.

c_2	$t_2, \text{ м}$	$b_{w2}, \text{ м}$	X_{δ}
0,00538	0,014	1,5E-3	0,569
0,00448	0,011	1,0E-3	0,656

Уменьшение коэффициента проводимости рассеяния паза ротора:

$$\Delta\lambda_{н2нас} = \frac{h_{w2}}{b_{w2}} \cdot \frac{c_2}{b_{w2} + c_2}.$$

$\Delta\lambda_{н2нас}$	c_2	$h_{w2}, \text{ м}$	$b_{w2}, \text{ м}$
0,365	0,00538	7,0E-4	1,5E-3
0,409	0,00448	5,0E-4	1,0E-3

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учетом насыщения $\lambda_{н2\xi нас} = \lambda_{н2\xi} - \Delta\lambda_{н2\xi нас}$.

$\lambda_{н2\xi нас}$	$\lambda_{н2\xi}$	$\Delta\lambda_{н2\xi нас}$
1,877	2,242	0,365
1,465	1,874	0,409

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки ротора с учетом влияния насыщения $\lambda_{\delta 2нас} = \lambda_{\delta 2} \cdot x_{\delta}$.

$\lambda_{л2нас}$	$\lambda_{л2}$	x_{δ}
1,182	2,075	0,569
1,588	2,422	0,656

Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом насыщения и вытеснения тока

$$x'_{2\xiнас} = x'_2 \cdot \frac{\lambda_{п2\xiнас} + \lambda_{\delta 2нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{л2} + \lambda_{\delta 2} + \lambda_{п2}}$$

$x'_{2нас}$	x'_2	$\lambda_{п2\xiнас}$	$\lambda_{л2нас}$	$\lambda_{п2}$	$\lambda_{л2}$	$\lambda_{п2}$
1,169	1,591	1,877	1,182	2,242	2,075	0,424
3,619	4,821	1,055	1,588	1,874	2,422	0,692

Сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора в пусковом режиме $x_{12n} = x_{12} \cdot \frac{F_{\psi}}{F_{\delta}}$.

$x_{12п}$, Ом	x_{12} , Ом	F_{ψ} , А	F_{δ} , А
42,40	32,91	900,5	698,9
234,9	173,5	729,3	538,7

Коэффициент $c_{1нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12n}}$.

$c_{1нас}$	$x_{1нас}$	$x_{12п}$
1,016	0,6868	42,40
1,013	3,042	234,9

Активная составляющая сопротивления правой ветви Гобразной схемы замещения $a_n = r_1 + c_{1нас} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s}$.

a_n	$c_{1нас}$	r_1 , Ом	$r'_{2\xi}$	s
1,184	1,016	0,673	0,5029	1
7,153	1,013	4,349	2,775	1

Реактивная составляющая сопротивления правой ветви Г-образной схемы замещения $b_n = x_{1нас} + c_{1пнас} \cdot x'_{2энас}$.

b_n	$c_{1пнас}$	$x_{1нас}, \text{Ом}$	$x'_{2энас}$
1,875	1,016	0,6868	1,169
6,708	1,013	3,042	3,619

Ток в обмотке ротора $I'_{2n} = \frac{U_{1нф}}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}}$.

$I'_{2п}$	$U_{1нф}, \text{Ом}$	a_n	b_n
99,19	220	1,184	1,875
22,43	220	7,153	6,708

Ток в обмотке ротора с учетом коэффициента $c_{1пнас}$

$$I_{1п} = I'_{2п} \cdot \frac{\sqrt{a_n^2 + (b_n + x_{12п})^2}}{c_{1пнас} \cdot x_{12п}}$$

$I_{1п}, \text{А}$	$I'_{2п}, \text{А}$	$x_{12п}$	$c_{1пнас}$	a_n	b_n
102,0	99,27	42,40	1,016	1,183	1,874
22,79	22,43	234,9	1,013	7,160	6,708

Ток в обмотке ротора в относительных единицах $I_{1п*} = \frac{I_{1п}}{I_{1н}}$.

$I_{1п*}$	$I_{1п}, \text{А}$	$I_{1н}, \text{А}$
5,201	102,0	19,60
5,639	22,78	4,041

Относительное значение момента $M_{п*} = \left(\frac{I'_{2п}}{I'_{2н}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{S_H}{s}$.

$M_{п*}$	$I'_{2п}, \text{А}$	$I'_{2н}, \text{А}$	K_R	S_H	s
1,464	99,27	17,35	1,148	0,039	1
1,944	22,43	3,642	1,028	0,050	1

Пусковой момент для двигателя мощностью 10 кВт и 2р=6 в соответствии с ГОСТ 28327-89 (табл. 25) составляет 1,4 о.е., по

расчету значение получилось 1,464 — соответствует. Для двигателя мощностью 1,5 кВт и $2p=2$: 1,8 – 1,944, также соответствует.

Мощность заторможенного ротора для двигателя мощностью 10 кВт в соответствии с ГОСТ 28327-89 составляет 12 кВА/кВт,

по расчету $S_T = \frac{3I_1 \cdot U_{1H}}{P_H} = \frac{3 \cdot 102 \cdot 220}{10000} = 6,73$ кВА/кВт. Значение

соответствует ГОСТу. Для двигателя мощностью 1,5 кВт:

$S_T = \frac{3I_1 \cdot U_{1H}}{P_H} = \frac{3 \cdot 22,79 \cdot 220}{1500} = 10,02$ кВА/кВт соответствует значению по ГОСТ — 13 кВА/кВт.

Далее проводим расчет пусковых характеристик для скольжений $s=1 \dots 0$. Точку $s=0$ принимаем по расчету как идеальный холостой ход. Результат сведем в таблицу.

Таблица ПЗ

Пусковые характеристики двигателя мощностью 10 кВт

Расчетный параметр	Ед. изм.	Скольжение					
		1	0,8	0,5	0,2	0,15	0,1
ξ	—	1,4376	1,2858	1,0165	0,6429	0,5568	0,4546
φ	—	0,28465	0,19433	0,10469	0,07640	0,06981	0,06128
h_r	м	0,01759	0,01892	0,02046	0,02100	0,02113	0,02129
b_r	м	0,005198	0,004998	0,004768	0,004687	0,004668	0,004643
$q_r \cdot 10^{-3}$	м ²	0,000108	0,000115	0,000122	0,000125	0,000125	0,000126
k_T	—	1,204	1,133	1,064	1,042	1,037	1,030
K_R	—	1,148	1,097	1,046	1,030	1,027	1,022
$r'_{2\xi}$	Ом	0,503	0,480	0,458	0,451	0,450	0,448
$k_\phi = \varphi'$	—	0,894	0,917	0,917	0,979	0,981	0,983
$\lambda_{n2\xi}$	—	1,9361	1,9706	1,9706	2,0645	2,0673	2,0701
K_x	—	0,935	0,943	0,943	0,963	0,963	0,964
$x'_{2\xi}$	Ом	1,488	1,500	1,500	1,531	1,532	1,533
I'_2	А	73,1669	71,9717	68,7216	54,1924	47,5794	37,4960
x_δ	—	0,5693	0,5865	0,6412	0,7988	0,8526	0,9143
c_1	—	0,0032	0,0031	0,0027	0,0015	0,0011	0,0006
$\Delta\lambda_{n1нас}$	—	1,237	1,205	1,098	0,718	0,558	0,349
$\lambda_{n1нас}$	—	0,367	0,399	0,506	0,886	1,046	1,255
$\lambda_{\phi1нас}$	—	1,122072	1,155925	1,26377	1,574522	1,680493	1,802096
$x_{1нас}$	Ом	0,6879	0,7065	0,7675	0,9630	1,0384	1,1323
c_2	—	0,005	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001
$\Delta\lambda_{n2нас}$	—	0,365	0,362	0,350	0,292	0,257	0,194
$\lambda_{n2нас}$	—	1,877	1,880	1,892	1,950	1,985	2,048
$\lambda_{\phi2нас}$	—	1,2	1,2	1,3	1,7	1,8	1,9
$x_{2нас}$	Ом	1,169	1,182	1,224	1,353	1,402	1,466
x_{12n}	Ом	42,401	42,401	42,401	42,401	42,401	42,401
$c_{1нас}$	—	1,016	1,017	1,018	1,023	1,024	1,027
a_n	Ом	1,184	1,283	1,606	2,981	3,744	5,269
b_n	Ом	1,875	1,908	2,013	2,347	2,475	2,637
I_2	А	99,190	95,681	85,422	57,993	49,016	37,338
I_1	А	101,960	98,389	87,945	59,976	50,812	38,892
I_1^*	—	5,201	5,019	4,486	3,060	2,592	1,984
M^*	—	1,464	1,626	1,978	2,245	2,131	1,846

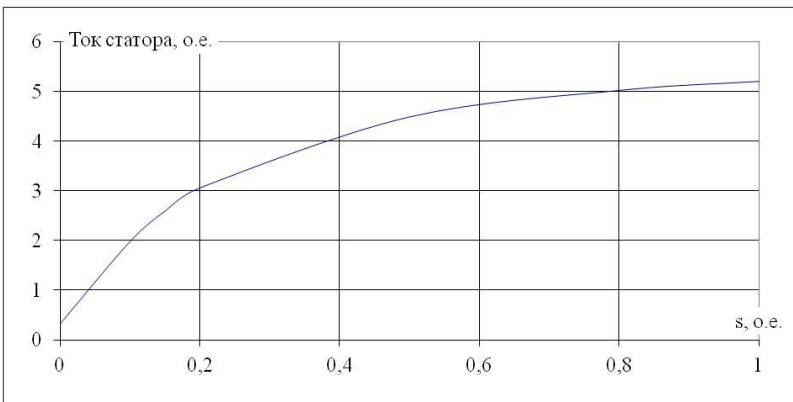


Рис. П.15. Пусковые характеристики — ток статора ($P_n=10$ кВт)

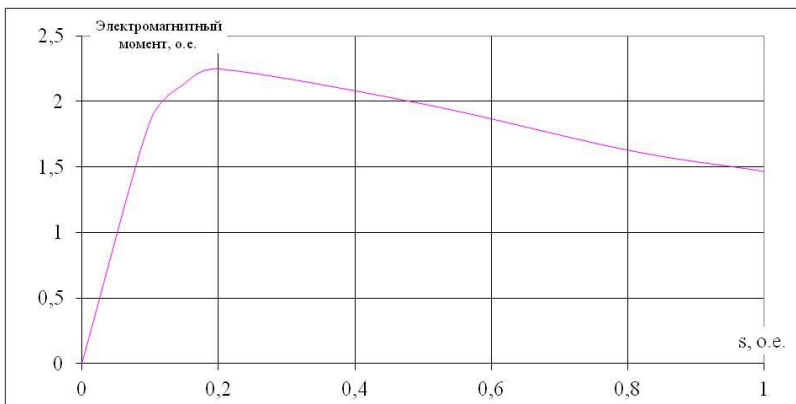


Рис. П.16. Пусковые характеристики — электромагнитный момент ($P_n=10$ кВт)

Таблица П4

Пусковые характеристики двигателя мощностью 1,5 кВт

Расчетный параметр	Ед. изм.	Скольжение					
		1	0,8	0,5	0,2	0,15	0,1
ξ	—	0,9287	0,8307	0,6567	0,4153	0,3597	0,2937
φ	—	0,09527	0,08907	0,07711	0,05781	0,05320	0,04718
h_r	м	0,01333	0,01341	0,01355	0,01380	0,01386	0,01394
b_r	м	0,003615	0,003588	0,003536	0,003450	0,003429	0,003401
$q_r \cdot 10^{-3}$	м ²	7,17E-05	7,2E-05	7,25E-05	7,34E-05	7,36E-05	7,39E-05
K_r	—	1,043	1,039	1,031	1,019	1,016	1,013
K_R	—	1,025	1,023	1,019	1,011	1,010	1,007
$r'_{2\xi}$	Ом	2,768	2,762	2,750	2,731	2,726	2,720
$k_{\phi} = \varphi'$	—	0,9593	0,9715	0,9715	0,9833	0,9843	0,9861
$\lambda_{n2\xi}$	—	1,682	1,695	1,695	1,708	1,709	1,711
K_x	—	0,9615	0,9642	0,9642	0,9668	0,9670	0,9674
$x'_{2\xi}$	Ом	4,635	4,648	4,648	4,661	4,662	4,664
I'_2	А	19,217	18,495	16,507	10,933	9,072	6,706
x_{δ}	—	0,6556	0,6819	0,7500	0,8977	0,9363	0,9802
c_1	—	0,002652	0,002449	0,001925	0,000788	0,000491	0,000152
$\Delta\lambda_{n1нас}$	—	0,8589	0,8164	0,6940	0,3452	0,2278	0,0758
$\lambda_{n1нас}$	—	0,3031	0,3456	0,4680	0,8168	0,9342	1,0862
$\lambda_{\phi1нас}$	—	1,465	1,523	1,676	2,005	2,092	2,190
$x_{1нас}$	Ом	3,044	3,124	3,341	3,877	4,038	4,236
c_2	—	0,004477	0,004135	0,00325	0,00133	0,000829	0,000257
$\Delta\lambda_{n2нас}$	—	0,4087	0,4026	0,3823	0,2854	0,2266	0,1022
$\lambda_{n2\xiнас}$	—	1,465	1,471	1,492	1,589	1,647	1,772
$\lambda_{\phi2нас}$	—	1,588	1,652	1,817	2,174	2,268	2,374
$x_{2нас}$	Ом	3,620	3,687	3,866	4,306	4,453	4,676
x_{12n}	Ом	234,9	234,9	234,9	234,9	234,9	234,9
$c_{1нас}$	—	1,013	1,013	1,014	1,017	1,017	1,018
a_n	Ом	7,153	7,848	9,927	18,228	22,835	32,040
b_n	Ом	6,710	6,860	7,262	8,254	8,568	8,996
I_2	А	22,430	21,107	17,886	10,995	9,020	6,611
I_1	А	22,786	21,449	18,196	11,228	9,232	6,800
I_{1*}	—	5,639	5,308	4,503	2,778	2,284	1,683
M^*	—	1,944	2,147	2,456	2,304	2,064	1,659

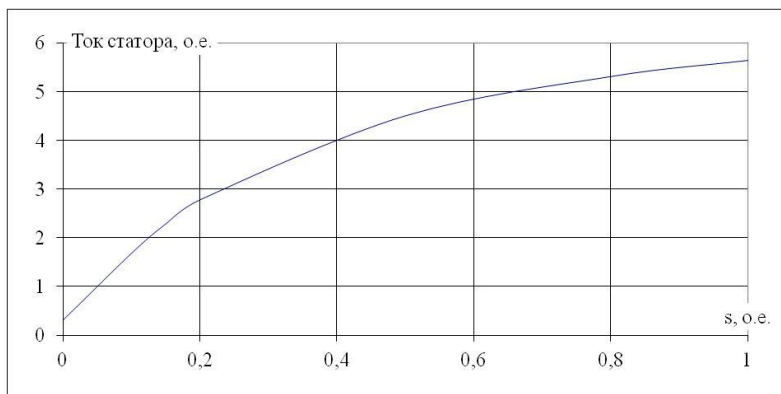


Рис. П.17 Пусковые характеристики — ток статора ($P_n=1,5$ кВт)

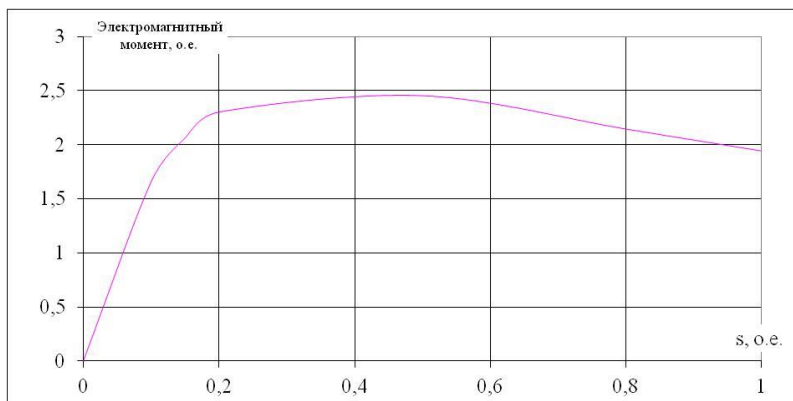


Рис. П. 18. Пусковые характеристики — электромагнитный момент ($P_n=1,5$ кВт)

Список литературы

1. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1980.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины: Учебное пособие для ВУЗов. М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Беспалов В.Я. Электрические машины: Учебное пособие для вузов / В.Я.Беспалов, Н.Ф.Котеленец. М.: Академия, 2006.
4. Вольдек А.И. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов / А.И.Вольдек, В.В.Попов. СПб.: Питер, 2007.

Изд. лиц. ЛР № 020742. Подписано в печать 28.12.2012
Формат 60×84 1/16. Бумага для множительных аппаратов
Гарнитура Times. Усл. печ. листов 9,75
Тираж 300 экз. Заказ № 1381

*Отпечатано в Издательстве
Нижевартковского государственного гуманитарного университета
628615, Тюменская область, г.Нижевартовск, ул.Дзержинского, 11
Тел./факс: (3466) 43-75-73, E-mail: izdatelstvo@nggu.ru*

