

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

В.П. Ерунов

РАСЧЕТ КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Рекомендовано Ученым советом государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по специальности «Электромеханика»

Оренбург 2006

УДК 621.313.2(07)
ББК 31.261.52 я7
Е 79

Рецензенты

доктор технических наук, заведующий кафедрой электромеханики

Н.Г. Никиян

доцент кафедры автоматизированного электропривода

В.Б. Фатеев

Ерунов В.П.

Е 79

Расчет коллекторного двигателя постоянного тока малой мощности с постоянными магнитами: учебное пособие / В.П. Ерунов – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2006. – 146 с.

ISBN

Пособие является теоретическим и практическим дополнением к учебному пособию Н.П. Ермолина «Расчет коллекторных машин малой мощности» Л.: Энергия, 1973.

Пособие предназначено для курсового и дипломного проектирования в области коллекторных двигателей постоянного тока малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов. Приведена методика проектного расчета двигателя постоянного тока, содержащая новые методы расчета магнитной цепи с возбуждением высококоэрцитивными постоянными магнитами, расчета и выбора постоянных магнитов и определения реакции якоря.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по специальности «Электромеханика», выполняющих расчеты по двигателям постоянного тока малой мощности. Пособие может быть использовано студентами других специальностей и аспирантами, проводящими научно-исследовательские работы в области двигателей постоянного тока малой мощности.

Е $\frac{2202070100}{6Л9 - 02}$

ББК 31.261.5 Я7

© Ерунов В.П., 2006
© ГОУ ОГУ, 2006

ISBN

Введение

Электродвигатели постоянного тока широко применяются в различных отраслях промышленности. Их значительное распространение объясняется преимуществами характеристик: высокий пусковой и перегрузочный момент, высокое быстродействие, широкий диапазон плавного регулирования частоты вращения.

Двигатели постоянного тока мощностью от десятка до сотен ватт имеют широкое применение в электроприводах гибких производственных систем, промышленных роботов, систем автоматики и транспортных средств.

По способу возбуждения двигатели постоянного тока (ДПТ) делятся на двигатели с электромагнитным возбуждением и с магнитоэлектрическим возбуждением (с возбуждением от постоянных магнитов). Двигатели с возбуждением от постоянных магнитов наиболее перспективны вследствие малой их инерционности. К преимуществам этих двигателей следует также отнести высокий КПД, стабильность магнитного потока возбуждения при изменении температуры окружающей среды, высокую надежность и технологичность конструкции индуктора. Необходимое регулирование частоты вращения якоря двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов осуществляется изменением напряжения питания, при этом поток возбуждения остается постоянным при различных частотах вращения, что создает благоприятные условия для коммутации и устойчивой работы.

Увеличение быстродействия коллекторных двигателей малой мощности ограничивается допустимыми электромагнитными нагрузками, моментом инерции и перегрузочной способностью, определяемой условием коммутации, насыщением зубцовой зоны якоря. Для достижения предельного быстродействия у двигателей необходимо уменьшать момент инерции и увеличивать магнитный поток в воздушном зазоре, что увеличивает магнитодвижущую силу возбуждения, габариты и массу индуктора, поэтому получение высоких динамических и удельных электромеханических параметров в одном типе двигателя практически невозможно. В связи с этим проведена дифференциация технических требований к ДПТ малой мощности в зависимости от их функциональных назначений, имеющих следующую классификацию [1];

- силовые двигатели, предназначенные для продолжительного режима работы, для которых основными параметрами являются максимальный КПД и ресурс при лимитированных массе и объеме;
- силовые двигатели, предназначенные для кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы, для которых основными параметрами являются минимальная масса на единицу полезной мощности, лимитируемые предельно допустимой температурой обмоток двигателя;
- управляемые двигатели, основными параметрами которых являются минимальные электромеханическая и электромагнитная постоянные времени при лимитированных массе и объеме.

В зависимости от функционального назначения двигателя, условий, в которых он должен работать, требований к его эксплуатационным характеристикам и конструктивному исполнению, проектирование его имеет некоторые особенности.

В данном учебном пособии дана методика расчета двигателей постоянного тока малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов для первых двух функциональных классов мощностью до 200 Вт, с напряжением 12 – 110 В, с частотой вращения 1000 – 6000 об/мин. В соответствующих разделах пособия приводятся необходимые рекомендации по выбору электромагнитных параметров, материалов, конструктивных размеров, а также приведены необходимые для проведения расчета справочные данные по магнитным материалам, проводам для обмотки якоря, маркам постоянных магнитов, щеткам и подшипникам.

В пособии приведена методика аналитического расчета коллекторного двигателя постоянного тока с возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов (то есть магнитов, имеющих прямолинейную кривую размагничивания на рабочем участке), позволяющая получить заданные технические параметры при лимитированном габарите и заданном тепловом режиме электродвигателя. В методике используются основные базовые понятия, зависимости и рекомендации, приведенные в литературе [2].

1 Расчет коллекторного двигателя постоянного тока малой мощности с постоянными магнитами

1.1 Задание на проект и исходные данные

Рассчитать и разработать конструкцию двигателя постоянного тока со следующими данными.

Номинальная мощность двигателя $P_{\text{н}}$. Номинальное напряжение $U_{\text{н}}$. Номинальная частота вращения $n_{\text{н}}$. Наружный диаметр корпуса $D_{\text{в}}$. Возбуждение от постоянных высококоэрцитивных магнитов. Режим работы (S1, S2, S3). Класс нагревостойкости изоляции. Исполнение по степени защиты IP 44, по способу охлаждения IC 0040.

Конструкция двигателя должна соответствовать требованиям стандарта на установочные размеры и размеры выступающего конца вала (ГОСТ 12080 – 66), а также общим техническим требованиям на машины электрические (ГОСТ 183 – 74).

За основу конструкции принимается электродвигатель с радиальными постоянными магнитами на статоре и зубцовым якорем.

1.2 Определение основных размеров двигателя постоянного тока

Основными размерами двигателя постоянного тока принято называть диаметр якоря D и расчетную длину якоря l_{δ} . Эти размеры, а также число полюсов $2p$, определяют остальные размеры и вес двигателя. Для определения основных размеров необходимо определить по номинальным данным двигателя электромагнитную мощность $P_{\text{эм}}$, выбрать электромагнитные нагрузки: токовую линейную нагрузку A и индукцию в воздушном зазоре B_{δ} ; выбрать коэффициенты α_{δ} и λ , характеризующие относительную геометрию двигателя. Выбор электромагнитных нагрузок и относительной геометрии проводится на основании анализа технического задания на проектирование двигателя и свойств материалов, выбранных для использования в двигателе.

Выбор индукции в воздушном зазоре B_{δ} предопределяет значение индукции в зубцах и ярме якоря и, в значительной мере, размеры магнитной цепи статора. Кроме того, величина B_{δ} определяет эксплуатационные характеристики, инерционность и перегрузочную способность двигателя. Увеличение индукции в воздушном зазоре B_{δ} приводит к уменьшению числа проводов обмотки якоря, уменьшению сопротивления обмотки якоря и улучшению коммутации вследствие уменьшения реактивной ЭДС в короткозамкнутой секции обмотки якоря. Уменьшение сопротивления якоря приводит к уменьшению электрических потерь и повышению «жесткости» механической характеристики двигателя.

В ДПТ с возбуждением от постоянных магнитов величина индукции в воздушном зазоре B_{δ} ограничивается магнитными характеристиками применяемых постоянных магнитов при использовании конструкции индуктора без концентрации магнитного потока, а также ограничивается насыщением магнитной

системы двигателя и в первую очередь сердечника якоря, размеры которого с увеличением индукции B_δ уменьшаются, а магнитный поток увеличивается. Увеличение насыщения магнитной цепи приводит к увеличению требуемой для намагничивания магнитной цепи двигателя магнитной энергии магнитов, что приводит к увеличению объема постоянных магнитов и, соответственно, к увеличению стоимости электродвигателя.

В магнитных системах ДПТ малой мощности с малой длиной магнитов и существенными размагничивающими полями якоря необходимо применять высококоэрцитивные постоянные магниты, полученные из магнитотвердых материалов на основе ферритобариевых сплавов, интерметаллического соединения кобальта с редкоземельными элементами и сплавов «Неомакс».

Промышленностью в больших объемах выпускаются феррит-бариевые магниты, которые имеют самую низкую стоимость единицы магнитной энергии. Формирование структурной анизотропии при изготовлении этих магнитов существенно повысило их свойства: $(B \cdot H)_{max}$ до 32 кДж/м³ при $H_{св} = 240$ кА/м по сравнению с $(B \cdot H)_{max} = 6$ кДж/м³ и $H_{св} = 125$ кА/м у изотропных феррит-бариевых магнитов. Магниты изготавливают методом порошковой металлургии с применением как одноосного прессования в магнитном поле, так и объемного гидростатического обжатия с последующей термообработкой при температуре 1160 – 1200 °С, в результате которой образуется одноосная магнитная анизотропия. Основным недостатком феррит-бариевых магнитов является большая температурная нестабильность, обусловленная низкой температурой Кюри (450 °С). Характеристики изотропных и анизотропных феррит-бариевых магнитов приведены в литературе [3] и в приложении Ж данного пособия.

Магнитотвердые материалы на основе интерметаллического соединения кобальта с редкоземельными элементами имеют коэрцитивную силу по индукции на порядок выше литых кобальтовых с кристаллической анизотропией, так для SmCo_5 $H_{св} = 800$ кА/м при $B_r = 0,8 - 0,9$ Тл, при этом максимальная энергия $(BH)_{max} = 150 - 160$ кДж/м³. Редкоземельные постоянные магниты имеют высокую стоимость и высокую температурную стабильность ($T_k = 750$ °С). Магнитные характеристики редкоземельных постоянных магнитов типа КС37, КСП37 приведены в литературе [3] и в приложении Ж данного пособия.

Перспективным магнитотвердым материалом, с точки зрения применения в магнитных системах электрических машин малой мощности, является сплав «Неомакс», который представляет собой новый материал в виде сплава железо-неодим-бор с тетрагональной решеткой, обладающий высокой константой кристаллографической анизотропии, не содержащий остродефицитных материалов (самария и кобальта) и имеющий магнитную энергию в 1,5 раза большую, чем соединение SmCo_5 , и в шесть раз дешевле него. Технология изготовления этих магнитов достаточно проста: изготовление сплава – размол – сухое прессование в магнитном поле – спекание и термообработка. При этом достигнуты следующие магнитные параметры: $B_r > 1,2$ Тл, $H_{св} > 900$ кА/м, $(BH)_{max}$ до 360 кДж/м³. «Неомакс» имеет механическую прочность в два раза большую (1250 Мпа), чем сплав SmCo_5 . Основной недостаток этого магнита – температурная нестабильность, она в четыре раза хуже, чем у SmCo_5 .

С учетом вышеизложенного, индукцию в воздушном зазоре B_δ выбирают равной индукции магнита B_d в оптимальной рабочей точке кривой размагничивания предварительно выбранной марки магнита, для высококоэрцитивных магнитов диапазон выбора индукции B_δ лежит в пределах 0,1 – 0,8 Тл.

Величина токовой линейной нагрузки A существенным образом влияет на все характеристики двигателя. На выбор токовой линейной нагрузки оказывает влияние режим работы двигателя (S1, S2, S3), мощность двигателя и условия охлаждения. Только при совокупном учете этих факторов осуществляют выбор значения токовой линейной нагрузки.

Выбор больших значений токовой линейной нагрузки A приводит к уменьшению основных размеров двигателя, увеличению сопротивления обмотки якоря. Последнее приводит к снижению «жесткости» механической характеристики двигателя. Кроме того, увеличение сопротивления обмотки якоря ведет к увеличению удельных потерь с единицы поверхности якоря и, соответственно, приводит к повышению температуры нагрева обмотки якоря. Увеличение токовой линейной нагрузки A приводит к ухудшению коммутации за счет роста реактивной ЭДС в короткозамкнутой секции обмотки якоря. Ухудшение коммутации приводит к искрению под щетками, увеличивается нагрев щеток, падение напряжения на щетках, увеличивается коэффициент трения щеток о коллектор, что в свою очередь приводит к повышенному износу щеток, увеличению потерь на коллекторе и увеличению нагрева коллектора.

Увеличение токовой линейной нагрузки сопровождается увеличением влияния поперечной реакции якоря на поле возбуждения и искажением его. Искажение поля приводит к неравномерному распределению электрического потенциала на коллекторе. Кроме того, искажение поля приводит к увеличению индукции в зубцах якоря под набегающим краем полюса, в соответствии с чем увеличиваются потери в стали зубцов. С увеличением токовой линейной нагрузки растет размагничивающее действие поперечной реакции якоря, что увеличивает требуемую для намагничивания магнитной цепи двигателя величину магнитной энергии постоянных магнитов и приводит к увеличению их размеров.

С увеличением токовой линейной нагрузки возрастает число проводников в обмотке якоря N и витков в секции ω_c , что приводит к увеличению коэффициента заполнения паза k_z и вызывает затруднения в размещении обмотки с большим числом проводников в пазе при малом диаметре якоря.

Поэтому целесообразно выбирать меньшее значение токовой линейной нагрузки A , которая компенсируется выбором большей плотности тока в обмотке якоря, что обеспечивает требуемый тепловой режим двигателя.

Коэффициент полюсного перекрытия α_δ характеризует относительную ширину дуги магнита, так как полюсные наконечники в магнитных системах с высококоэрцитивными магнитами, как правило, не применяются, и определяет расстояние между краями полюсов (магнитов). Выбор большего значения коэффициента полюсного перекрытия α_δ приводит к уменьшению размера якоря за счет увеличения магнитного потока и уменьшения числа проводов обмотки якоря. Последнее приводит к уменьшению сопротивления обмотки якоря и, со-

ответственно, к уменьшению электрических потерь и снижению нагрева машины. Увеличение α_δ приводит к сближению полюсов и увеличению потока рассеяния, а также приводит к увеличению индукции в зоне коммутации от поля поперечной реакции якоря и увеличению ЭДС в короткозамкнутой секции обмотки якоря, что приводит к ухудшению коммутации. Увеличение длины полюсной дуги приводит к увеличению размагничивающего действия реакции якоря на основное поле двигателя, что приводит к необходимости увеличения намагничивающей силы постоянных магнитов.

Величина α_δ выбирается бóльшей для двухполюсных конструкций двигателя.

Относительная длина якоря λ оказывает заметное влияние на весовые и эксплуатационные характеристики двигателя. Выбор бóльшего значения λ приводит к уменьшению диаметра якоря и увеличению длины якоря, к увеличению значения реактивной ЭДС в коммутируемой секции обмотки якоря и ухудшению условий коммутации, а также к ухудшению условий охлаждения двигателя и увеличению прогиба вала. Последнее требует увеличения воздушного зазора. Для каждой машины существует свое оптимальное значение λ , при котором характеристики двигателя наилучшим образом соответствуют техническому заданию.

Выбор числа полюсов $2p$ не оказывает влияние на объем якоря, зато влияет на весовые и эксплуатационные характеристики двигателя. При увеличении числа полюсов $2p$ уменьшается полюсное деление τ , уменьшается магнитный поток полюса и возрастают потоки рассеяния. Увеличение числа полюсов увеличивает число постоянных магнитов, щеток и щеткодержателей, что усложняет конструкцию и увеличивает стоимость двигателя. В двигателях с петлевой обмоткой увеличение числа полюсов приводит к увеличению проводников обмотки якоря.

Уменьшение полюсного деления τ приводит к уменьшению вылета лобовых частей обмотки якоря и уменьшению средней длины витка обмотки якоря. Это ведет к уменьшению расхода обмоточной меди, уменьшению сопротивления обмотки якоря, соответственно и электрических потерь в ней, и уменьшению температуры нагрева обмотки якоря. Кроме того, уменьшение полюсного деления приводит к уменьшению напряженности поперечного поля якоря, что приводит к уменьшению размагничивающего действия поперечной реакции якоря.

1.2.1 Ток якоря при нагрузке машины

Ток якоря в двигателе с возбуждением постоянными магнитами одновременно является током двигателя

$$I_a = I = \frac{P_{i\dot{i}}}{\eta \cdot U_{i\dot{i}}},$$

где η – предварительное значение КПД электродвигателя, его значения

выбирают из диапазона от 0,6 до 0,75.

1.2.2 Электромагнитная мощность машины

$$P_{y\dot{i}} = \frac{1 + 3\eta}{4 \cdot \eta} \cdot P_{i\dot{i}} .$$

1.2.3 Диаметр якоря

$$D = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot P_{y\dot{i}}}{\alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot A' \cdot n_{i\dot{i}} \cdot \lambda}} ,$$

где α_{δ} – коэффициент полюсного перекрытия, его значение выбирают из диапазона 0,6 – 0,75;

$B_{\delta} = B_d$ – магнитная индукция в воздушном зазоре, принимается равной индукции магнита в оптимальной рабочей точке кривой размагничивания предварительно выбранной марки магнита (для феррит бариевых магнитов выбирают из диапазона 0,1 – 0,24 Тл, для редкоземельных магнитов из диапазона 0,3 – 0,7 Тл);

A' – предварительное значение токовой линейной нагрузки, её значение выбирают из диапазона $(40 - 120) \cdot 10^2$ А/м при продолжительном режиме работы и в диапазоне $(70 - 200) \cdot 10^2$ А/м при кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы двигателя (бóльшие значения соответствуют бóльшей мощности);

λ – отношение длины магнитопровода якоря к его диаметру, это значение выбирают из диапазона 0,5 – 1,8.

Полученное значение диаметра якоря округляют до тысячных долей метра и выбирают ближайшее стандартное его значение по приложению VIII [2] или по приложению А данного пособия.

1.2.4 Расчетная длина якоря

$$l_{\delta} = \lambda \cdot D .$$

1.2.5 Окружная скорость вращения якоря

$$V_a = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{i\dot{i}}}{60} .$$

1.2.6 Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p},$$

принимают $2p = 2$ при $P_{i\dot{i}\dot{i}} \leq 100$ Вт;
 $2p = 4$ при $P_{i\dot{i}\dot{i}} > 100$ Вт.

1.2.7 Расчетная ширина полюсного наконечника (магнита)

$$b_{\delta} = \alpha_{\delta} \cdot \tau.$$

1.2.8 Частота перемагничивания стали якоря

$$f_2 = \frac{p \cdot n_{i\dot{i}\dot{i}}}{60}.$$

1.3 Обмотка якоря

Обмотка якоря двигателя постоянного тока является замкнутой. Конструктивно обмотка якоря выполняется барабанной и двухслойной. Двухслойная обмотка обеспечивает большой выбор укорочения шага обмотки и дает меньший вылет лобовых частей. Обмотка якоря состоит из секций. Секцией обмотки называется часть обмотки, заключенная между двумя смежными по обходу коллекторными пластинами. Каждая секция состоит из одного или нескольких последовательно соединенных витков. Число секций и витков определяются мощностью машины, напряжением, частотой вращения и условиями работы.

Проводники обмотки якоря укладывают в пазы якоря. В зависимости от параметров двигателя в каждом пазу размещается одна или несколько секций. В одном пазу может быть число секций, равное отношению числа коллекторных пластин k к числу пазов якоря z . Число секций, приходящихся на один паз, является важным параметром обмотки якоря, определяющим коммутационные, конструктивные и технологические свойства обмотки.

В ДПТ малой мощности применяются в основном простые петлевые и волновые обмотки якоря, поэтому в пособии приводится расчет только простых петлевых и волновых обмоток.

Порядок соединения секций в обмотку определяется шагом обмотки. Шаги обмотки могут выражаться в секционных сторонах, пазах и в зубцовых делениях. Наиболее распространенным является выражение шагов в пазах. Порядок подсоединения секций к коллектору определяется коллекторным шагом. На рисунках 1.1 и 1.2 приведены схемы соединения секций простой петлевой обмотки и простой волновой обмотки.

Расстояние между сторонами одной и той же секции называется первым частичным шагом обмотки y_1 . Первый частичный шаг y_1 характеризует ширину секции. Для того чтобы ЭДС сторон секций суммировались, необходимо, чтобы стороны секций находились под разноименными полюсами. Расстояние между концом одной секции и началом следующей называют вторым частичным шагом y_2 обмотки. Расстояние между двумя смежными секциями называют результирующим шагом y . Расстояние между двумя коллекторными пластинами, к которым присоединены начало и конец секции, называют коллекторным шагом y_k . Обмоточные шаги y_1 , y_2 , y и коллекторный шаг y_k должны быть целыми числами.

Петлевая и волновая обмотки различаются способом соединения секционных сторон со стороны коллектора и числом параллельных ветвей a : простая петлевая обмотка имеет $2a = 2p$, а простая волновая обмотка $2a = 2$.

Применение укорочения в петлевых обмотках приводит к уменьшению длины и вылета лобовых частей обмотки, уменьшению сопротивления и веса обмотки якоря. Поэтому чаще применяют петлевую обмотку с укорочением шага, то есть хордовую обмотку. В простых волновых обмотках укорочение шага никакого выигрыша не дает, так как на сколько уменьшается первый частичный шаг, на столько увеличивается второй частичный шаг обмотки. В зависимости от расположения концов смежных секций обмотки могут быть неперекрещивающиеся и перекрещивающиеся. Неперекрещивающаяся обмотка имеет меньший вылет со стороны коллектора, поэтому будет иметь меньшее сопротивление и вес обмотки якоря.

Для получения неперекрещивающейся простой петлевой обмотки необходимо выбирать $y_2 < y_1$, а для получения неперекрещивающейся простой волновой обмотки необходимо в выражении для определения результирующего шага y брать единицу со знаком минус. Шаг по пазам y_n берут в виде целого числа, так как в этом случае получают более технологичную равносекционную обмотку. Для того чтобы обмотку считать равносекционной, необходимо, чтобы одинаковой была и геометрическая ширина всех секций, тогда левые и правые стороны всех секций будут укладываться одинаковым образом в одинаково отстоящие пазы – если левая сторона некоторой секции занимает крайнее левое положение в верхнем слое, то и ее правая сторона занимает крайнее левое положение в нижнем слое.

Для полной симметричности обмотки необходимо, чтобы число пазов якоря z , число пластин коллектора k и число полюсов $2p$ были кратны числу параллельных ветвей $2a$, то есть чтобы

$$\frac{z}{2a} = \text{целое число}; \quad \frac{k}{2a} = \text{целое число}; \quad \frac{2p}{2a} = \text{целое число}.$$

Волновая обмотка имеет меньшее число витков в секции при одном и том же числе коллекторных пластин, что уменьшает значение реактивной ЭДС в коммутируемой секции и улучшает коммутацию.

Меньшее число проводников волновой обмотки, но большего сечения, приводит к упрощению технологии изготовления обмотки. Простая волновая обмотка имеет только две параллельные ветви, поэтому при волновой обмотке можно в двигателе устанавливать всего два щеточных узла, то есть щетки устанавливают только под двумя смежными полюсами при любом числе полюсов. Для уменьшения длины коллектора и разгрузки щеток в двигателе можно устанавливать число щеточных узлов, равное числу полюсов.

В двухполюсных двигателях и волновая и петлевая обмотки имеют одно и то же число параллельных ветвей, поэтому по электрическим характеристикам они одинаковы. Имеются только технологические отличия: в петлевой обмотке лобовые части со стороны коллектора и со стороны выходного конца вала лежат по одну сторону от плоскости витка, а в волновой обмотке – по разные стороны.

Поэтому в ДПТ малой мощности при двухполюсном исполнении магнитной системы целесообразно применять простую петлевую обмотку, при четырехполюсном исполнении – простую волновую обмотку якоря.

1.3.1 Предварительное общее число эффективных проводников обмотки якоря

$$N' = \frac{\pi \cdot D \cdot A' \cdot 2a}{I},$$

где $2a$ – число параллельных ветвей обмотки якоря: для простой петлевой обмотки $2a = 2p$, для простой волновой обмотки $2a = 2$.

1.3.2 Число пазов якоря

$$z = (3 - 4) \cdot D \cdot 100.$$

Выбирают целое нечетное число пазов якоря.

1.3.3 Число коллекторных пластин

$$k = (1 - 3) \cdot z,$$

принимают $k = 2 \cdot z$ при $2p = 2$,
 $k = z$ или $k = 3 \cdot z$ при $2p = 4$.

1.3.4 Предварительное число витков в секции обмотки якоря

$$\omega'_c = \frac{N'}{2 \cdot k}.$$

Полученное значение числа витков в секции ω'_c округляют до целого числа витков в секции обмотки якоря ω_c .

1.3.5 Уточненное число проводников обмотки якоря

$$N = \omega_c \cdot 2 \cdot k.$$

1.3.6 Число проводников обмотки якоря в пазу якоря

$$N_i = \frac{N}{z}.$$

1.3.7 Уточненное значение токовой линейной нагрузки

$$A = \frac{N \cdot I}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot D},$$

при этом должно выполняться условие

$$\left| \frac{A' - A}{A'} \right| \leq 0,1.$$

1.3.8 Шаги обмотки якоря

а) Для простой петлевой обмотки якоря:

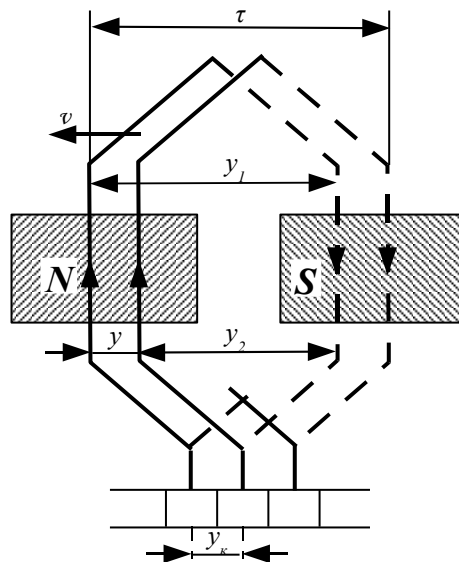


Рисунок 1.1 – Схема соединения секций петлевой обмотки

первый частичный шаг

$$y_1 = \frac{k}{2p} - \varepsilon_k,$$

результующий шаг и шаг по коллектору

$$y = 1; y_k = 1,$$

второй частичный шаг

$$y_2 = y - y_1 = y_1 - 1.$$

б) Для простой волновой обмотки:

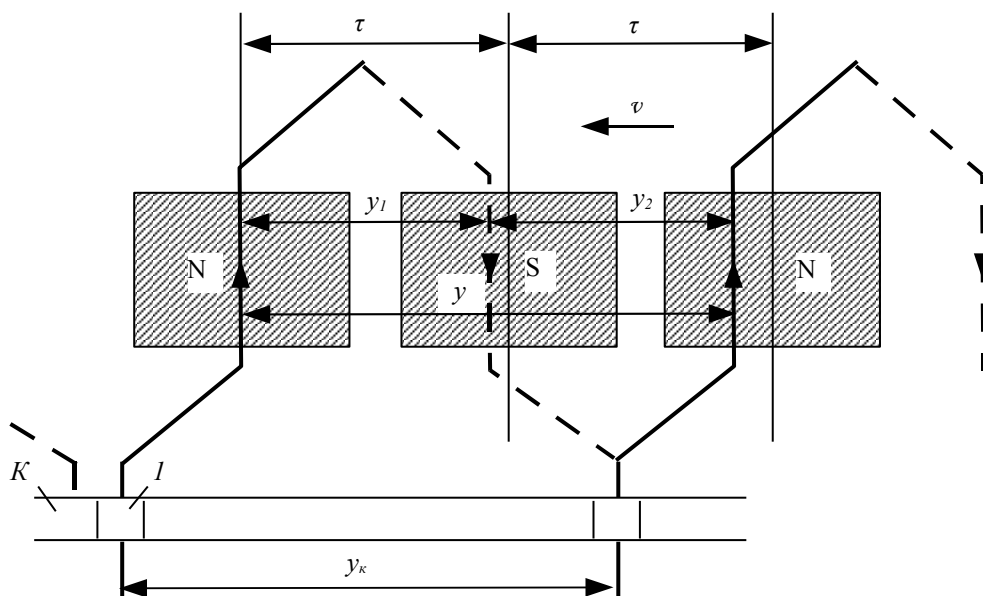


Рисунок 1.2 – Схема соединений секций волновой обмотки

первый частичный шаг

$$y_1 = \frac{k}{2p} - \varepsilon_k,$$

результующий шаг и шаг по коллектору

$$y = y_k = \frac{k \pm 1}{p},$$

второй частичный шаг

$$y_2 = y - y_1.$$

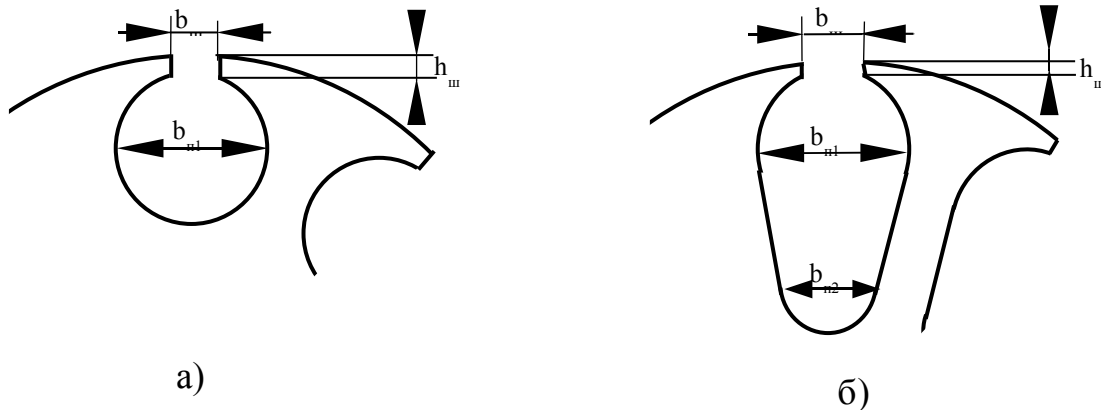
Шаг петлевой и волновой обмоток по пазам

$$y_n = \frac{z}{2p} - \varepsilon .$$

Обмоточные шаги y_1, y_2, y, y_k, y_n должны быть целыми числами. Укорочение шага ε_k и ε ($\varepsilon_k > 0; \varepsilon > 0$) выбирают такими, чтобы шаги обмоток были целыми числами. Применение укорочения шага ($\varepsilon_k > 0$) в петлевых обмотках приводит к уменьшению длины и вылета лобовых частей, к уменьшению сопротивления и массы обмотки якоря. В волновых обмотках укорочение шага выигрыша не дает, так как на сколько уменьшается первый шаг, на столько же увеличивается второй частичный шаг.

1.4 Размеры зубцов, пазов и проводов обмотки якоря

В двигателях малой мощности применяют полузакрытые пазы якоря круглой или овальной формы, формы пазов приведены на рисунке 1.3



а – круглый паз;
б – овальный паз

Рисунок 1.3 – Пазы якоря

Обмотку якоря электродвигателя постоянного тока малой мощности выполняют из круглого медного обмоточного провода с эмалевой изоляцией класса нагревостойкости "В" и "F" (марку провода выбирают из приложения Б) и укладывают в изолированные пазы якоря. Способы изоляции пазов приведены в приложении Л.

1.4.1 Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря

Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря выбирают из диапазона $(2,5 - 10) \cdot 10^6$ А/м² при продолжительном режиме работы S1 и из диапазона $(5 - 20) \cdot 10^6$ А/м² при кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы S2, S3. Большие значения плотности тока соответствуют большим мощностям электродвигателя.

1.4.2 Сечение и диаметр провода обмотки якоря

Предварительное значение сечения провода обмотки якоря

$$g' = \frac{I}{2a \cdot j'}$$

Окончательное значение сечения g и диаметров провода (диаметр неизолированного провода d и диаметр изолированного провода $d_{из}$) выбирают из приложения Б, таблица Б.2 или из приложения 3 [4].

1.4.3 Окончательная плотность тока в проводнике обмотки якоря

$$j = \frac{I}{2a \cdot g}$$

1.4.4 Большой диаметр овального и диаметр круглого паза якоря [5, 6]

$$b_{i1} = \frac{k_c \cdot B_z \cdot z \cdot D' \cdot \sin \frac{\alpha'}{2} - \pi \cdot D \cdot B_\delta}{k_c \cdot B_z \cdot z \cdot \left(1 + \sin \frac{\alpha'}{2}\right)},$$

где k_c – коэффициент заполнения пакета сталью, его значение выбирают по таблице 2.1 [7] или по таблице В.1 данного пособия для выбранной марки стали сердечника якоря и способа изолировки листов;

$$\alpha' = \frac{2\pi}{z} \text{ – центральный угол на один паз;}$$

$$D' = D - 2 \cdot h_\phi \text{ ;}$$

$$h_\phi = 0,5 \text{ мм – высота шлица паза якоря;}$$

$$B_z \text{ – магнитная индукция в зубце, выбирают из диапазона (0,5–1,9)Тл.}$$

1.4.5 Меньший диаметр овального паза принимается равным

$$b_{n2} \geq 0,002 \text{ м,}$$

при этом необходимо, чтобы $b_{n2} < b_{n1}$.

1.4.6 Периметр паза

а) овального паза

$$\check{I}_i = b_{n1} \left(\frac{\pi + \alpha'}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha'}{2} \right) - \frac{b_{n2} \left(1 - \operatorname{Sin} \frac{\alpha'}{2} \right)}{\operatorname{Sin} \frac{\alpha'}{2}} ;$$

б) круглого паза

$$\check{I}_i = \pi \cdot b_{n1} .$$

1.4.7 Высота паза якоря рассчитывается, исходя из условия обеспечения параллельности стенок зубца

а) овального паза

$$h_n = b_{n1} \left(\frac{1 + \operatorname{Sin} \frac{\alpha'}{2}}{2 \cdot \operatorname{Sin} \frac{\alpha'}{2}} \right) - \frac{b_{n2} \left(1 - \operatorname{Sin} \frac{\alpha'}{2} \right)}{2 \cdot \operatorname{Sin} \frac{\alpha'}{2}} + h_\emptyset ;$$

б) круглого паза

$$h_i = b_{n1} + h_\emptyset .$$

1.4.8 Площадь паза якоря

а) овального паза

$$S_n = \left[\frac{(b_{n1})^2}{4} \cdot \left(\frac{\pi + \alpha'}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha'}{2} \right) - \frac{(b_{n2})^2}{4 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha'}{2}} \right] \cdot k_{\check{n}\check{e}} ,$$

где $k_{\check{n}\check{e}} = \frac{l_\delta}{\sqrt{t_z^2 + l_\delta^2}}$ – при скосе пазов якоря на одно зубцовое деление;

$t_z = \frac{\pi \cdot D}{z}$ – зубцовое деление.

б) круглого паза

$$S_n = \pi \cdot \frac{b_{n1}^2}{4} \cdot k_{\tilde{n}\tilde{e}}.$$

Если на якоре скос пазов не выполняют, то принимают $k_{\tilde{n}\tilde{e}} = 1$.

1.4.9 Площадь поперечного сечения паза, заполненного обмоткой

$$S_{no} = S_n - S_{\tilde{e}\zeta} - S_{\tilde{e}\tilde{e}},$$

где $S_{\tilde{e}\zeta} = b_{\tilde{e}\zeta} \cdot \tilde{I}_i$ – площадь сечения пазовой изоляции;

$b_{\tilde{e}\zeta}$ – толщина пазовой изоляции, выбирается из приложения Л;

$S_{\tilde{e}\tilde{e}} = b_{\tilde{e}\tilde{e}} \cdot h_{\tilde{e}\tilde{e}}$ – площадь сечения пазового клина;

$b_{\tilde{e}\tilde{e}} = (0,5 - 0,6) \cdot b_{n1}$ – ширина клина;

$h_{\tilde{e}\tilde{e}} = (0,5 - 1,5) \cdot 10^{-3}$ м – высота клина.

1.4.10 Коэффициент заполнения паза изолированными проводниками

$$k_{\zeta} = \frac{N_n \cdot d_{\tilde{e}\zeta}^2}{S_{no}}.$$

Для автоматизированной укладки обмотки в пазы якоря необходимо, чтобы $0,68 \leq k_{\zeta} \leq 0,72$.

При ручной укладке обмотки якоря допускается получение коэффициента заполнения паза в диапазоне $0,75 \geq k_{\zeta} > 0,72$.

1.4.11 Ширина зубца якоря

$$b_z = \frac{B_{\delta} \cdot t_z}{k_c \cdot B_z},$$

необходимо, чтобы выполнялось условие $b_z \geq 0,002$ м.

1.4.12 Средняя длина полувитка секции обмотки якоря

а) если якорь выполнен без скоса пазов

$$l_{a\text{cp}} = l_{\delta} + l_{i\tilde{e}} + \frac{y_n}{z} \cdot \pi (D - h_n),$$

где $l_{i\tilde{e}} = (2 - 3) \cdot 10^{-3}$ м – прямолинейный отрезок лобовой части обмотки;

б) если якорь выполнен со скосом пазов

$$l_{a\text{cp}} = \frac{l_{\delta}}{k_{\tilde{n}\tilde{e}}} + l_{i\tilde{e}} + \frac{y_n}{z} \cdot \pi \cdot (D - h_n).$$

1.4.13 Сопротивление обмотки якоря при расчетной рабочей температуре

$$R_a = k_{\theta} \cdot R_{a20},$$

где $k_{\theta} = 1 + 0,004 \cdot \vartheta$;

ϑ – расчетная температура.

Согласно ГОСТ 183-74 для обмоток, соответствующих классу нагревостойкости В, расчетная температура принимается равной 75 °С, для обмоток, соответствующих классам нагревостойкости F и H, расчетная температура принимается равной 115 °С. Температура окружающей среды при эксплуатации двигателя принимается равной 20 °С.

$$R_{a20} = \frac{N \cdot l_{a\text{cp}}}{57(2a)^2 \cdot g} \cdot 10^{-6} \text{ – сопротивление обмотки якоря при температуре } 20 \text{ °С.}$$

1.5 Коллектор и щетки

В электродвигателях постоянного тока малой мощности, как правило, применяют коллектор на пластмассе. Коллекторные пластины коллектора изготавливают из твердотянутой меди и изолируют их друг от друга и от вала якоря пластмассой. Конструкция коллектора представлена на рисунке 1.4. Конструкция щеткодержателя должна обеспечить правильное положение щеток на коллекторе (рисунок 1.5). Щетка должна выступать из втулки щеткодержателя на 1-2 мм.

В низковольтных электродвигателях преимущественно применяют медно-графитовые щетки, в высоковольтных находят применение и другие сорта щеток, например электрографитированные.

Предварительное значение наружного диаметра коллектора

$$D'_k = (0,65 - 0,8) \cdot D.$$

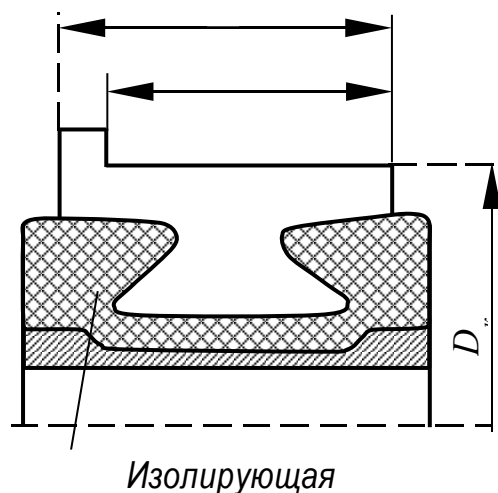
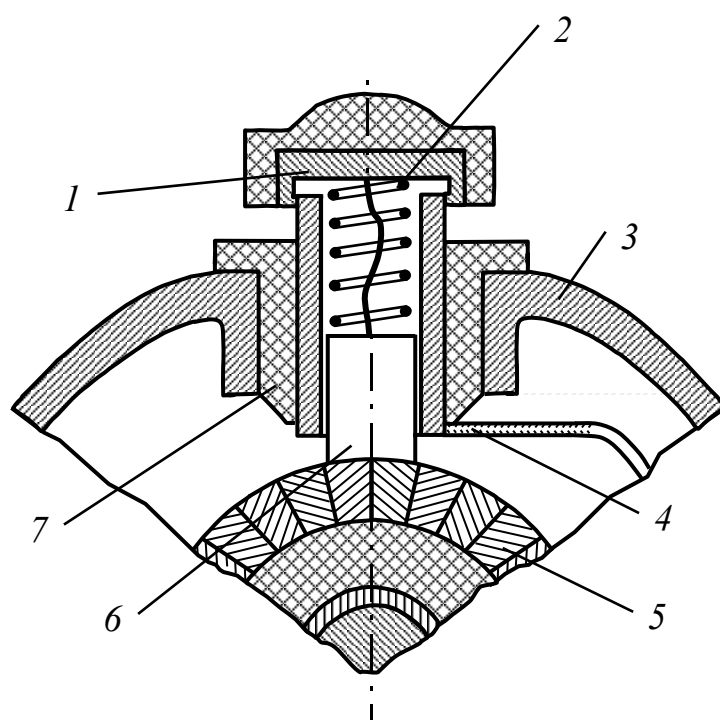


Рисунок 1.4 – Коллектор малых машин с втулкой из пластмассы



1 – металлическая втулка; 2 – пружина; 3 – подшипниковый щит;
4 – зажим; 5 – коллектор; 6 – щетка; 7 – изолирующая втулка;

Рисунок 1.5 – Щеткодержатель малых машин трубчатый

1.5.1 Относительное коллекторное деление

а) для простой волновой обмотки

1) если Y – четное число

$$t_{\dot{e}}^* < \frac{0,8 \cdot \pi \cdot (1 - \alpha_{\delta})}{\left(\gamma + \frac{k}{z} - \frac{1}{2p} \right) \cdot 2p},$$

где $\gamma = 2 - 4$ – число перекрываемых щеткой коллекторных пластин;

2) если Y – нечетное число

$$t_{\dot{e}}^* < \frac{0,8 \cdot \pi \cdot (1 - \alpha_{\delta})}{\left(\gamma + \frac{k}{z} - \frac{1-p}{2p} \right) \cdot 2p}.$$

б) для простой петлевой обмотки

$$t_{\dot{e}}^* < \frac{0,8 \cdot \pi \cdot (1 - \alpha_{\delta})}{\left(\frac{2 \cdot k}{z} - 0,5 \right) \cdot 2p}.$$

Выбирают значение относительного коллекторного деления $t_{\dot{e}}^*$.

1.5.2 Коллекторное деление

$$t_{\dot{e}} = t_{\dot{e}}^* \cdot D'_{\dot{e}}.$$

1.5.3 Ширина коллекторной пластины

$$\beta_{\dot{e}} = t_{\dot{e}} - \beta_{\dot{e}},$$

где $\beta_{\dot{e}} = (0,4 - 0,6) \cdot 10^{-3}$ м при $U_{i\dot{i}\dot{i}} \leq 30$ В,

$\beta_{\dot{e}} = (0,6 - 0,8) \cdot 10^{-3}$ м при $U_{i\dot{i}\dot{i}} > 30$ В.

По технологическим требованиям необходимо, чтобы $\beta_{\kappa} \geq 1,5$ мм.

1.5.4 Окончательный диаметр коллектора

$$D_{\dot{e}} = \frac{k(\beta_{\dot{e}} + \beta_{\dot{e}})}{\pi}.$$

1.5.5 Окружная скорость коллектора

$$V_{\hat{e}} = \frac{\pi \cdot D_{\hat{e}} \cdot n_{i\hat{i}\hat{i}}}{60}.$$

1.5.6 Площадь поперечного сечения щетки

Выбирают марку щетки и плотность тока $J_{\hat{i}\hat{a}}$ по таблице П 4.2 [4] или по таблице Д.1 приложения Д.

$$S_{\hat{u}} = \frac{I}{\delta \cdot J_{\hat{i}\hat{a}}},$$

где $J_{\hat{i}\hat{a}}$ – допустимая плотность тока для выбранной марки щетки.

1.5.7 Размеры щетки

а) предварительная ширина щетки

$$b'_{\hat{u}} = (1,3 - 2,0) \cdot t_{\hat{e}},$$

б) предварительная длина щетки по оси коллектора

$$a'_{\hat{u}} = \frac{S_{\hat{u}}}{b'_{\hat{u}}}.$$

По таблице П 4.1 [4] или по таблице Д.2 приложения Д выбирают стандартные значения $b_{\hat{u}}$ и $a_{\hat{u}}$.

в) высота щетки определяется из условия

$$h_{\hat{u}} = (1,5 - 2,0) \cdot a_{\hat{u}}.$$

1.5.8 Окончательная плотность тока под щетками

$$j_{\hat{u}} = \frac{I}{p \cdot a_{\hat{u}} \cdot b_{\hat{u}}}.$$

1.5.9 Длина коллектора

а) активная длина коллектора по оси вала

$$l'_{\hat{e}} = (1,5 - 2,0) \cdot a_{\hat{u}};$$

б) полная длина коллектора по оси вала

$$l_{\hat{e}} = l'_{\hat{e}} + (3 - 5) \cdot d .$$

1.5.10 Проверка величины электродвижущей силы обмотки якоря

$$E = U_{i\ddot{i}} - I \cdot R_a - \Delta U_{\dot{i}} ,$$

где $\Delta U_{\dot{i}} = \Delta U_{i\ddot{i}} \cdot \frac{J_{\dot{i}}}{J_{\dot{i}\ddot{a}}}$ – падение напряжения на щетках;

$\Delta U_{i\ddot{i}n}$ – переходное падение напряжения на пару щеток при плотности тока $J_{\dot{i}\ddot{a}}$, берется из таблицы Д.1 приложения Д.

При этом должно выполняться условие:

$$\left| \frac{E - E'}{E} \right| \leq 0,03 ,$$

где $E' = \frac{p \cdot N \cdot \hat{O}_{\delta} \cdot n_{i\ddot{i}}}{\dot{a} \cdot 60}$,

$\hat{O}_{\delta} = \hat{A}_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot b_{\delta}$ – магнитный поток в воздушном зазоре под одним полюсом.

1.6 Проверка коммутации

Так как в электродвигателе постоянного тока малой мощности добавочные полюсы не устанавливаются, а щетки на коллекторе обычно располагают на геометрической нейтрали, то процесс коммутации тока в короткозамкнутой секции обмотки якоря получается замедленным из-за наличия в них реактивной ЭДС e_p и ЭДС поля якоря e_a . Эти ЭДС суммируются и вызывают в цепи короткозамкнутой секции добавочный ток, увеличивающий плотность тока на сбегающем крае щетки. В момент размыкания коммутируемой секции между краем щетки и сбегающей коллекторной пластиной возникает искрение. Интенсивность этого искрения зависит от величины результирующей ЭДС в короткозамкнутой секции. Во избежание недопустимого искрения под щетками величина результирующей ЭДС в секции не должна превышать определенного значения. Коммутация тока в секции может также ухудшиться вследствие влияния поля полюсов, если ширина коммутационной зоны будет близка по значению к расстоянию между краями наконечников двух соседних полюсов.

1.6.1 Ширина коммутационной зоны

$$b_{зк} = b_{щ} \cdot \frac{D}{D_k} + t_k \left(\frac{k}{z} + \left| \frac{k}{2p} - y_1 \right| - \frac{a}{p} \right) \cdot \frac{D}{D_k} .$$

Для благоприятной коммутации необходимо соблюдать соотношение

$$b_{зк} < 0,8(\tau - b_\delta) .$$

1.6.2 Среднее значение реактивной ЭДС в короткозамкнутой секции якоря

$$e_p = 2 \cdot \omega_c \cdot \lambda_n \cdot l_\delta \cdot A \cdot V_a ,$$

где $\lambda_n = \left[0,6 \frac{2 \cdot h_n}{b_{n1} + b_{n2}} + \frac{l_{\bar{e}}}{l_\delta} + 0,92 \lg \left(\frac{\pi \cdot t_z}{b_\sigma} \right) \right] \cdot 10^{-6}$ – магнитная проводимость пазового рассеяния для овального паза ;

$\lambda_n = \left[0,6 \frac{h_n}{b_{n1}} + \frac{l_{\bar{e}}}{l_\delta} + 0,92 \lg \left(\frac{\pi \cdot t_z}{b_\sigma} \right) \right] \cdot 10^{-6}$ – магнитная проводимость пазового рассеяния для круглого паза ;

$$l_{\bar{e}} = l_{аср} - l_\delta ;$$

$$b_\sigma = (2 - 8) \cdot d_{\dot{e}c} .$$

Ширина шлица $b_{щ}$ паза определяет эксплуатационные и технологические характеристики двигателя. Чем больше ширина шлица $b_{щ}$, тем проще изготовление обмотки якоря, тем меньше магнитная проводимость пазового рассеяния и лучше коммутация, меньше индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря. Но увеличение ширины шлица $b_{щ}$ увеличивает МДС воздушного зазора, что требует увеличения магнитной энергии постоянных магнитов.

Поэтому ширина шлица $b_{щ}$ выбирается минимально возможной по условию укладки обмотки в пазы. При автоматизированной укладке обмотки в пазы берется большее значение, при ручной укладке нужно брать меньшее значение ширины шлица.

При выборе ширины шлица $b_{щ}$ необходимо соблюдать условие $b_{щ} < b_{кл}$.

1.6.3 Среднее значение ЭДС поля якоря

$$e_a = \frac{0,8 \cdot \pi \cdot \omega_c \cdot A \cdot \tau \cdot l_\delta \cdot V_a}{\tau - b_\delta} \cdot 10^{-6} .$$

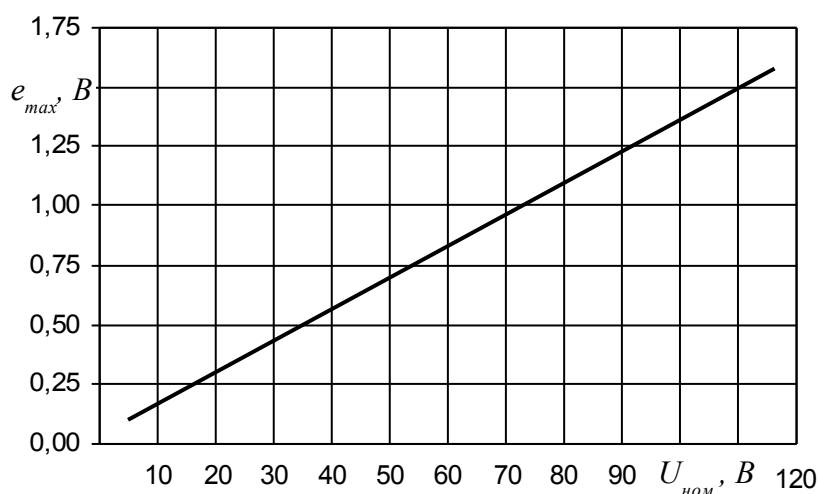
1.6.4 Среднее значение результирующей ЭДС в короткозамкнутой секции обмотки якоря

$$e = e_p + e_a .$$

Для благоприятной коммутации необходимо, чтобы значение результирующей ЭДС в секции обмотки якоря удовлетворяло условию:

$$e \leq e_{max} ,$$

где e_{max} для соответствующего $U_{ном}$ определяется из графика $e_{max} = f(U_{ном})$.



1.7 Магнитная система машины

Как известно, в электродвигателе происходит преобразование электрической энергии в механическую. Необходимым условием такого преобразования является наличие магнитного поля возбуждения. Магнитный поток возбуждения замыкается по магнитной цепи. Начальной стадией расчета магнитной цепи электродвигателя является определение и выбор размеров отдельных элементов магнитной цепи и выбор материалов для их изготовления. Решение данной задачи облегчается тем, что согласно ТЗ диаметр корпуса электродвигателя задан, поэтому основные затруднения связаны с выбором марки постоянных магнитов и определения их размеров.

В электродвигателях постоянного тока малой мощности наибольшее распространение получила система возбуждения с радиальным расположением магнитов постоянного сечения, представляющая собой внешнее ярмо, к которому крепятся дугообразные постоянные магниты (рисунок 1.6). На поверхности магнита, обращенной к воздушному зазору, могут располагаться магнитомягкие полюсные наконечники, выполняющие роль концентраторов магнитного потока, и предназначенные одновременно для шунтирования потока поперечной реакции якоря.

Так как в машине планируют использовать высококоэрцитивные магниты (магниты из феррита бария или из редкоземельных металлов), то необходимость в применении полюсных наконечников отпадает, что упрощает конструкцию статора двигателя.

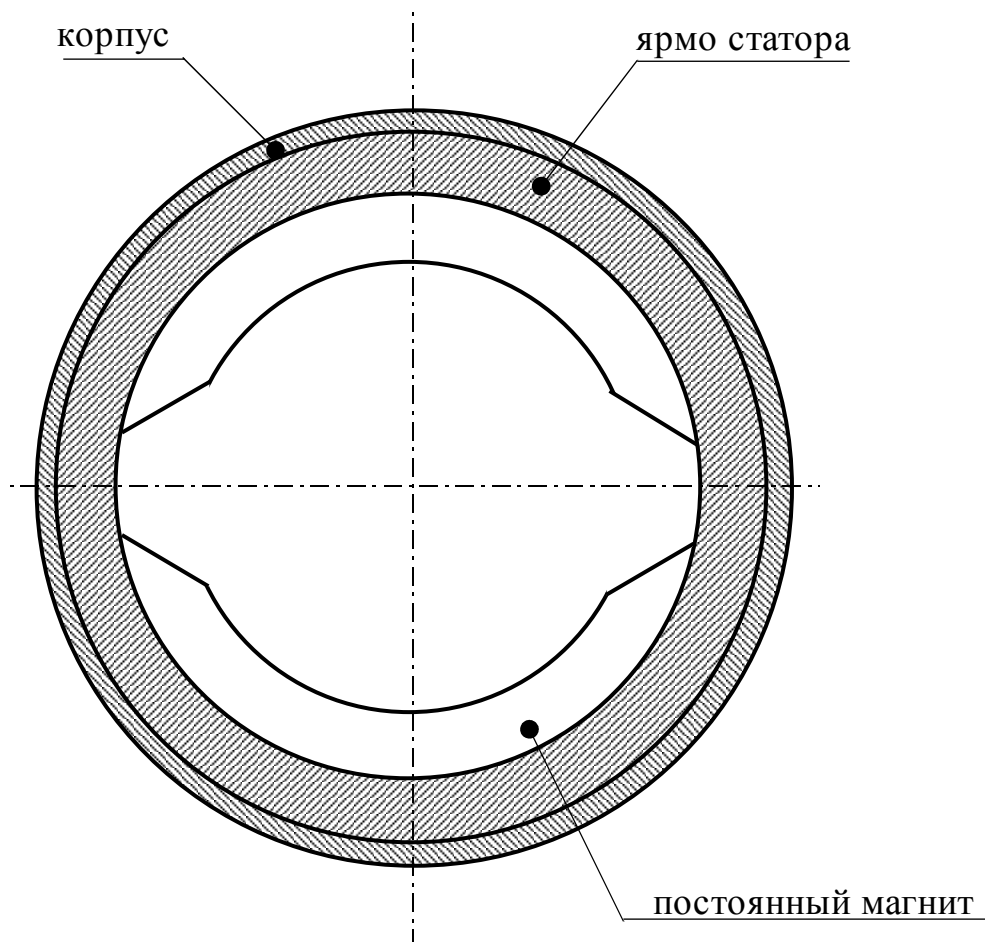


Рисунок 1.6 – Эскиз магнитной системы статора с радиальным расположением магнитов

Магнитную цепь двигателя постоянного тока можно разбить на ряд участков с приблизительно одинаковой индукцией на каждом участке. Принципиальная схема магнитной цепи двухполюсного двигателя приведена на рисунке 1.7. Для магнитной системы с радиальным расположением магнитов таких участков пять: ярмо статора (станина), воздушный зазор, зубцы якоря, ярмо якоря, технологический зазор между ярмом статора и постоянными магнитами.

Определение сечения участков магнитной цепи, кроме воздушного зазора, проводится исходя из допустимых для данных участков магнитных индукций, определяемых выбранным материалом магнитопровода. Рассматриваемая конструкция магнитной системы имеет осевую симметрию, поэтому для опре-

деления размеров магнитов достаточно определить требуемую магнитную энергию на один полюс.

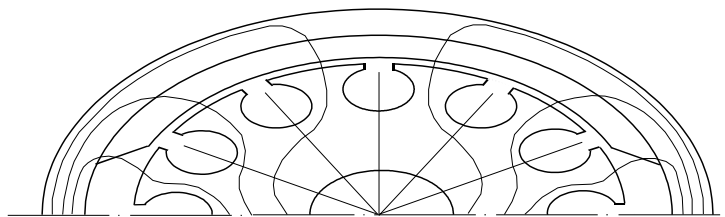


Рисунок 1.7 – Магнитная цепь электродвигателя

В данном пособии приведена методика расчета магнитной системы двигателя с радиальным расположением магнитов без полюсных наконечников.

Приняты следующие допущения:

- 1) зубчатая поверхность якоря заменена гладкой поверхностью и эффективная длина воздушного зазора определяется с помощью коэффициента Картера k_δ ;
- 2) щетки расположены на геометрической нейтрали;
- 3) потоки рассеяния постоянного магнита учитываются коэффициентом рассеяния магнитной системы.

1.7.1 Длина воздушного зазора под полюсом

Величина воздушного зазора между якорем и полюсом во многом определяет эксплуатационные и весовые характеристики двигателя. При выборе величины воздушного зазора необходимо обеспечить минимальное искажение и разброс характеристик, минимальный вес двигателя, высокую технологичность изготовления машины и механическую надежность. С точки зрения минимума веса машины целесообразно выбирать минимально возможный воздушный зазор. У двигателей кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы искажения характеристик незначительны, так как они имеют повышенные линейные нагрузки, поэтому для этих двигателей в целях снижения массы воздушный зазор выбирают в основном по условиям изготовления. С технологической точки зрения воздушный зазор желательно брать бóльшим, поскольку это позволяет увеличить допуски на изготовление якоря и полюса, тем самым упрощая и удешевляя технологию их изготовления. Условия технологии являются основным ограничивающим фактором, препятствующим уменьшению воздушного зазора. Поэтому воздушный зазор в рассматриваемой машине выбирается

минимально возможным по условиям изготовления и проверяется по условиям опрокидывания магнитного поля.

а) при продолжительном режиме работы

$$\delta_{\bar{a}} \geq 0,25 \frac{\tau \cdot A}{B_{\delta}} \cdot 10^{-6} ;$$

б) при кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы

$$\delta_{\bar{a}} \geq 0,15 \frac{\tau \cdot A}{B_{\delta}} \cdot 10^{-6} .$$

Принимают $\delta \geq \delta_{\bar{a}}$.

1.7.2 Высота ярма якоря

$$h_j = \frac{D - (2 \cdot h_n + D_0)}{2} ,$$

где $D_0 = (0,18 - 0,24) \cdot D$ – диаметр вала якоря.

1.7.3 Индукция в ярме якоря

$$B_j = \frac{\hat{O}_{\delta}}{2 \cdot k_c \cdot h_j \cdot l_{\delta}} .$$

Необходимо, чтобы выполнялось условие $B_j \leq 1,9$ Тл .

1.7.4 Размеры станины

а) площадь поперечного сечения станины

$$S_c = \frac{\hat{O}_{\delta} \cdot \sigma}{2 \cdot B_c} ,$$

где $\sigma = 1,08 - 1,12$ – коэффициент рассеяния магнитной системы;

B_c – индукция в станине, её значение выбирают в диапазоне от 0,5 до 1,6 Тл .

б) осевая длина станины

$$l_c = l_{\delta} + 0,2 \cdot D ,$$

в) высота станины

$$h_c = \frac{S_c}{k_c \cdot l_c},$$

где $k_c = 1$, если станина выполняется сплошной.

1.7.5 Предварительные размеры магнита при радиальном его расположении в магнитной системе

а) длина магнита

$$l'_i = 0,5(D_{\text{эиди}} - 2 \cdot h_{\text{эиди}} - 2 \cdot h_c - D - 2 \cdot \delta),$$

где $D_{\text{эиди}}$ – диаметр корпуса двигателя;

$h_{\text{эиди}} = (3 - 5) \cdot 10^{-3}$ м – толщина корпуса;

б) высота магнита

$$h_i = l_\delta,$$

допускается принимать $h_i = l_c$;

в) ширина магнита

$$b_i = b_\delta.$$

1.8 Выбор и расчет постоянных магнитов

Постоянные магниты характеризуются не только видом размагничивающей части гистерезисной кривой и значениями B_r и H_c , но и магнитной энергией, которая может быть получена в воздушном зазоре магнитной системы. Магнитотвердые материалы содержат дефицитные и дорогостоящие металлы, поэтому при проектировании ДПТ с постоянными магнитами необходимо выбирать форму магнита и условия его работы такими, чтобы заданные магнитные величины в воздушном зазоре были достигнуты при наименьшем объеме магнита или при наименьшей стоимости с непременным снижением расхода дефицитных материалов. При этом совсем не обязательно стремиться к применению магнитов с максимальной энергией, более целесообразным бывает применение простых магнитов, дающих требуемую энергию и имеющих более низкую стоимость.

Для оптимального использования объема магнита необходимо обеспечить его работу в точке с максимально отдаваемой энергией, то есть в точке с координатами B_d и H_d на кривой размагничивания. В свою очередь, эта энергия определяется произведением индукции и свободной напряженности поля, соот-

ветствующих нейтральному сечению постоянного магнита, и величиной коэффициента рассеяния магнитной системы. Значение этого коэффициента зависит от размеров и формы постоянного магнита и от размеров всей магнитной системы. Он может быть определен с большей точностью только после того, как будут известны все размеры деталей, образующих магнитную систему, то есть только при поверочном расчете. Поэтому вначале величину этого коэффициента задают исходя из рекомендаций по проектированию магнитной системы с постоянными магнитами.

Расчет постоянных магнитов осуществляют по методике [5], базирующейся на законе сохранения энергии. Суть методики в том, что сумма магнитной энергии, запасенной на каждом участке магнитной системы с учетом коэффициента её рассеяния, равна энергии, отдаваемой магнитом во внешнюю цепь.

Для упрощения процесса расчета целесообразно кривые намагничивания отдельных участков магнитной системы электродвигателя иметь в аналитической форме. Хорошее совпадение с экспериментальной кривой намагничивания дает аппроксимация кривой намагничивания выражением [5, 6]:

$$H = (A_c \cdot B_i^2 + D_c \cdot B_i + C_c) \cdot sh(\beta_c \cdot B_i) ,$$

где B_i – значение индукции на i -том участке;

A_c, D_c, C_c, β_c – коэффициенты, их величина определяется для каждой кривой намагничивания стали;

$$sh(\beta_c \cdot B_i) = \frac{e^{(\beta_c \cdot B_i)} - e^{-(\beta_c \cdot B_i)}}{2} \text{ – гиперболический синус.}$$

Величины коэффициентов A, D, C, β для основных кривых намагничивания некоторых сталей приведены в приложении Е.

1.8.1 Удельная магнитная энергия ярма статора

$$W_{c \text{ óä}} = \left(\frac{A_c \cdot B_c^2 + D_c \cdot B_c + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_c) - sh(\beta_c \cdot B_c) \cdot \frac{2A_c \cdot B_c + D_c}{\beta_c^2} ,$$

где $ch(\beta_c \cdot B_c) = \frac{e^{(\beta_c \cdot B_c)} + e^{-(\beta_c \cdot B_c)}}{2}$ – гиперболический косинус.

1.8.2 Удельная магнитная энергия зубцов якоря

$$W_{z \acute{o} \ddot{a}} = \left(\frac{A_c \cdot B_z^2 + D_c \cdot B_z + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_z) - sh(\beta_c \cdot B_z) \cdot \frac{2A_c \cdot B_z + D_c}{\beta_c^2} .$$

1.8.3 Удельная магнитная энергия ярма якоря

$$W_{j \acute{o} \ddot{a}} = \left(\frac{A_c \cdot B_j^2 + D_c \cdot B_j + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_j) - sh(\beta_c \cdot B_j) \cdot \frac{2A_c \cdot B_j + D_c}{\beta_c^2} .$$

1.8.4 Удельная магнитная энергия воздушного зазора

$$W_{\delta \acute{o} \ddot{a}} = \frac{1}{2\mu_0} \cdot B_{\delta}^2 ,$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

1.8.5 Удельная магнитная энергия для зазора стыка

$$W_{\delta c \acute{o} \ddot{a}} = \frac{1}{2\mu_0} \cdot B_{cm}^2 ,$$

для конструкции статора с радиальными магнитами $B_{cm} = B_{\delta}$.

1.8.6 Объем ярма статора на один полюс

$$V_c = \frac{\pi \cdot (D_{\acute{e}i\delta\acute{r}} - 2 \cdot h_{\acute{e}i\delta\acute{r}} - h_c)}{2p} \cdot h_c \cdot l_c .$$

1.8.7 Объем зубцовой зоны якоря на один полюс

$$V_z = \frac{\alpha_{\delta}}{2p} \cdot h_n \cdot b_z \cdot l_{\delta} \cdot z .$$

1.8.8 Объем ярма якоря на один полюс

$$V_j = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h_i - h_j)}{2p} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{\delta}}{2} \right) \cdot h_j \cdot l_{\delta} .$$

1.8.9 Объем воздушного зазора на один полюс

$$V_{\delta} = k_{\delta} \cdot \delta \cdot l_{\delta} \cdot b_{\delta} ,$$

где $k_{\delta} = \frac{t_z + 10 \cdot \delta}{t_z - b_{\phi} + 10 \cdot \delta} .$

1.8.10 Объем воздушного зазора стыка на один полюс

$$V_{\delta c} = \delta_{cm} \cdot l_{\delta} \cdot b_{\delta} ,$$

где δ_{cm} — длина воздушного зазора стыка, его величина зависит от чистоты обработки поверхностей стыкуемых деталей (например, для восьмого качества $\delta_{cm} = (0,035 - 0,045) \cdot 10^{-3}$ м).

1.8.11 Магнитная энергия, запасенная на участках магнитной цепи

$$W_c = W_{c \text{ óä}} \cdot V_c ;$$

$$W_z = W_{z \text{ óä}} \cdot V_z ;$$

$$W_j = W_{j \text{ óä}} \cdot V_j ;$$

$$W_{\delta} = W_{\delta \text{ óä}} \cdot V_{\delta} ;$$

$$W_{\delta c} = W_{\delta c \text{ óä}} \cdot V_{\delta c} .$$

1.8.12 Полная магнитная энергия магнитной цепи электродвигателя

$$W = W_c + W_z + W_j + W_{\delta} + W_{\delta c} .$$

1.8.13 Предварительный объем магнита на один полюс

$$V'_i = l'_i \cdot b_i \cdot h_i .$$

1.8.14 Удельная магнитная энергия, отдаваемая постоянным магнитом объемом V'_m в магнитную цепь электродвигателя

$$(B \cdot H) = \frac{W \cdot \sigma}{V'_i} .$$

1.8.15 Значение координаты рабочей точки постоянного магнита по напряженности магнитного поля

$$H'_d = \frac{(B \cdot H)}{B'_d},$$

где $B'_d = B_\delta$.

По величине $B_i = B_\delta$ и полученному значению H'_d выбирают марку магнита по литературе [3] или по приложению Ж и выписывают следующие параметры магнита H_d , B_d , B_r .

При несовпадении расчетных величин и имеющихся каталожных параметров магнитотвердых материалов отдают предпочтение материалу с бóльшим значением энергии, чем расчетное, что позволяет с помощью корректировки при его намагничивании и стабилизации добиться расчетных параметров.

1.8.16 Уточненное значение напряженности магнитного поля выбранного постоянного магнита в рабочей точке

$$H_i = \frac{(B_r - B_i)}{(B_r - B_d)} \cdot H_d,$$

где B_d , H_d – координаты оптимальной рабочей точки магнита;

B_r – остаточная индукция;

$B_i = B_\delta$ – индукция магнита в рабочей точке.

1.8.17 Размагничивающее действие поля якоря

В двигателе постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов магнитное поле якоря всегда направлено перпендикулярно полю полюса (постоянного магнита). Под сбегаящим краем полюса поле якоря направлено в воздушном зазоре навстречу магнитному потоку постоянного магнита и ослабляет его, уменьшая индукцию под этим краем полюса. Под другим краем полюса, набегающим, поле якоря совпадает по направлению с магнитным потоком постоянного магнита и усиливает его, увеличивая индукцию под этим краем полюса.

Если кривая размагничивания выбранной марки магнита является линейной зависимостью и магнитная цепь переходного слоя не насыщена, то увеличение магнитного потока под одним краем полюса приблизительно равно уменьшению потока под другим краем полюса.

Если магнитная цепь переходного слоя находится в области насыщения, то увеличение магнитного потока под набегающим краем полюса будет меньше, чем уменьшение магнитного потока под сбегаящим краем полюса. И чтобы обеспечить заданный магнитный поток при нагрузке, необходимо восстановить уменьшенный полем якоря магнитный поток постоянного магнита путем

увеличения энергии магнита на величину размагничивающего действия поперечного поля якоря.

Определение размагничивающего действия поперечной реакции якоря осуществляют аналитическим методом на основе изменения магнитной энергии в воздушном зазоре при переходе двигателя из режима холостого хода в режим нагрузки [5].

На сбегавшем краю полюса вектор индукции магнитного поля якоря направлен навстречу вектору индукции магнитного поля постоянного магнита, что уменьшает магнитный поток в воздушном зазоре.

При этом напряженность магнитного поля в рабочей точке магнита будет равна

$$H'_i = H_i + I'_{ag} ,$$

где $H'_{ag} = \frac{b_\delta \cdot A}{2 \cdot l'_i}$ – напряженность поперечной составляющей поля якоря.

На другом, набегающем конце полюса, векторы индукций магнитных полей магнита и якоря совпадают, что увеличивает магнитный поток в воздушном зазоре.

При этом напряженность магнитного поля в рабочей точке магнита под этим краем полюса будет равна

$$H''_i = I_i - I'_{ag} .$$

По кривой размагничивания магнита определяют значения индукций магнита в рабочих точках под сбегавшим и набегающим краями полюса

$$B'_i = B_r - \frac{(B_r - B_d)}{H_d} \cdot H'_i ,$$

$$B''_i = B_r - \frac{(B_r - B_d)}{H_d} \cdot H''_i .$$

1.8.18 Удельная магнитная энергия участков магнитной цепи переходного слоя под сбегавшим и набегающим краями полюса

$$W'_{\delta \text{ } \acute{o}\ddot{a}} = \frac{1}{2\mu_0} \cdot (B'_\delta)^2 ,$$

где $B'_\delta = B'_i$;

$$W''_{\delta \text{ } \acute{o}\ddot{a}} = \frac{1}{2\mu_0} \cdot (B''_\delta)^2 ,$$

где $B''_{\delta} = B'_i$;

$$W'_{z \acute{o} \ddot{a}} = \left(\frac{A_c \cdot (B'_z)^2 + D_c \cdot B'_z + C_c + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3}}{\beta_c} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B'_z) - \\ - sh(\beta_c \cdot B'_z) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B'_z + D_c}{\beta_c^2} ,$$

где $B'_z = \frac{B'_\delta \cdot t_z}{k_c \cdot b_z}$;

$$W''_{z \acute{o} \ddot{a}} = \left(\frac{A_c \cdot (B''_z)^2 + D_c \cdot B''_z + C_c + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3}}{\beta_c} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B''_z) - \\ - sh(\beta_c \cdot B''_z) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B''_z + D_c}{\beta_c^2} ,$$

где $B''_z = \frac{B''_\delta \cdot t_z}{k_c \cdot b_z}$;

$$W'_{j \acute{o} \ddot{a}} = \left(\frac{A_c \cdot (B'_j)^2 + D_c \cdot B'_j + C_c + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3}}{\beta_c} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B'_j) - \\ - sh(\beta_c \cdot B'_j) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B'_j + D_c}{\beta_c^2} ,$$

где $B'_j = \frac{B'_\delta \cdot h_i \cdot b_i}{2 \cdot k_c \cdot h_j \cdot l_\delta}$;

$$W''_{j \acute{o} \ddot{a}} = \left(\frac{A_c \cdot (B''_j)^2 + D_c \cdot B''_j + C_c + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3}}{\beta_c} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B''_j) - \\ - sh(\beta_c \cdot B''_j) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B''_j + D_c}{\beta_c^2} ,$$

где $B''_j = \frac{B''_\delta \cdot h_i \cdot b_i}{2 \cdot k_c \cdot h_j \cdot l_\delta}$.

1.8.19 Магнитная энергия переходного слоя магнитной цепи при размагничивающем действии поля якоря

$$W_{\delta z j} = 0,5 \cdot [(W'_{\delta \acute{o}\ddot{a}} + W''_{\delta \acute{o}\ddot{a}}) \cdot V_{\delta} + (W'_{z \acute{o}\ddot{a}} + W''_{z \acute{o}\ddot{a}}) \cdot V_z + (W'_{j \acute{o}\ddot{a}} + W''_{j \acute{o}\ddot{a}}) \cdot V_j] .$$

1.8.20 Увеличение магнитной энергии переходного слоя от действия поля якоря

$$\Delta W = W_{\delta z j} - W_{\delta} - W_z - W_j .$$

1.8.21 Требуемый объем магнита, обеспечивающий заданный магнитный поток при нагрузке

$$V_i = \frac{(W + \Delta W)}{B_i \cdot H_i} \cdot \sigma .$$

1.8.22 Уточненное значение длины магнита

$$l_i = \frac{V_i}{b_i \cdot h_i} .$$

Если размер магнита l_i значительно отличается от предварительно определенного размера l'_i (более чем на 5%), то проводят повторный расчет магнитной цепи исходя из уточненных размеров магнита и магнитной цепи.

1.9 Потери и коэффициент полезного действия электродвигателя

1.9.1 Электрические потери в обмотке якоря

$$P_{y\acute{a}} = I^2 \cdot R_a .$$

1.9.2 Электрические потери в щетках

$$P_{y\grave{u}} = I \cdot \Delta U_{\grave{u}} \cdot \rho .$$

1.9.3 Масса стали ярма якоря

$$m_j = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h_n)^2}{4} \cdot k_c \cdot l_{\delta} .$$

1.9.4 Масса стали зубцов якоря

$$m_z = 7,8 \cdot 10^3 \cdot k_c \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 - S_n \cdot z \right) \cdot l_\delta - m_j .$$

1.9.5 Магнитные потери в ярме якоря

$$P_j = m_j \cdot \rho_j ,$$

где $\rho_j = 2,3 \cdot \rho_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_2}{50} \right)^\beta \cdot B_j^2 ;$

$$\beta = 1,3 - 1,5 ;$$

$\rho_{1,0/50}$ – удельные потери, их значение берут из таблицы П 1.17 [4] или из приложения И данного пособия в соответствии с выбранной маркой стали и толщиной листа.

1.9.6 Магнитные потери в зубцах якоря

$$P_z = m_z \cdot \rho_z ,$$

где $\rho_z = 2,3 \cdot \rho_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_2}{50} \right)^\beta \cdot B_z^2 .$

1.9.7 Потери в стали якоря

$$P_c = P_j + P_z .$$

1.9.8 Механические потери в электродвигателе

а) потери на трение щеток о коллектор

$$P_{\dot{u}} = \mu_m \cdot \rho_{\dot{u}} \cdot \sum S_{\dot{u}} \cdot V_{\dot{e}} ,$$

где $\mu_m, \rho_{\dot{u}}$ – коэффициент трения щеток о коллектор, давление на щетку, их выбирают по таблице 4.2 [4] или по таблице Д.1 приложения Д;

$$\sum S_{\dot{u}} = 2 \delta \cdot S_{\dot{u}} ;$$

б) потери в подшипниках

$$D_{\dot{\tau}} = k_i \cdot \dot{\alpha} \cdot \ddot{\omega} \cdot 10^{-3},$$

где $k_i = 1 - 3$;

$$m_a = m_j + m_z + m_o + m_k;$$

$m_o = 8,9 \cdot 10^3 \cdot N \cdot g \cdot l_{a\text{cp}}$ – масса обмотки якоря;

$$m_k = 8,9 \cdot 10^3 \cdot l_k \left[\frac{\pi}{4} \left(D_k^2 - \left(\frac{D_k - 2D_o}{3} \right)^2 \right) - \beta_e \cdot k \left(\frac{D_k - D_o}{3} \right) \right] -$$

масса коллектора;

в) вентиляционные потери

$$P_{\dot{\alpha}} = 2 \cdot D^3 \cdot n_{\ddot{\omega}}^3 \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-6};$$

г) полные механические потери в машине

$$P_{i\dot{\omega}} = D_{\dot{\alpha}} + D_{\dot{\tau}} + D_{\dot{\alpha}}.$$

1.9.9 Добавочные потери

$$D_{\ddot{\alpha}} = 0,01 \cdot U_{\ddot{\omega}} \cdot I.$$

1.9.10 Сумма потерь

$$\sum D = D_{y\dot{\alpha}} + D_{y\dot{\omega}} + D_{\ddot{\alpha}} + D_{i\dot{\omega}} + D_{\ddot{\alpha}}.$$

1.9.11 Потребляемая электродвигателем мощность

$$D_1 = U_{\ddot{\omega}} \cdot I.$$

1.9.12 Полезная мощность на валу электродвигателя

$$P_2 = P_1 - \sum P.$$

1.9.13 Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%.$$

1.9.14 Рабочие характеристики электродвигателя

Расчет рабочих характеристик целесообразно представить в виде таблицы 1.1 при изменении тока двигателя в диапазоне $(0,25 - 1,2) \cdot I_c$ с обязательным расчетом и внесением в таблицу точки холостого хода. Точка холостого хода является начальной точкой рабочих характеристик электродвигателя. В точке холостого хода $P_2 = 0$, $M = 0$, $\eta = 0$.

Изменение индукции и, соответственно, магнитного потока при изменении нагрузки определяют по кривой размагничивания выбранной марки магнита. Расчетную величину индукции в воздушном зазоре B_δ принимают равной среднему значению индукции в воздушном зазоре $B_{\delta cp} = 0,5(B'_i + B''_i)$, где B'_i и B''_i определяют для каждого значения тока двигателя в указанном диапазоне по вышеприведенной методике.

Если величина магнитной индукции при переходе из режима холостого хода в номинальный изменяется не более чем на 5% ($B_\delta \approx B_{\delta cp}$), то принимают магнитный поток и магнитную индукцию постоянными по величине при расчете рабочих характеристик.

1.9.15 Кратность пускового момента

$$\delta_i = \frac{57 \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{\dot{u}}}{U_{i\dot{i}\dot{i}}}\right) \cdot U_{i\dot{i}\dot{i}} \cdot I_{i\dot{i}\dot{i}} \cdot 10^6}{\pi \cdot D^2 (\lambda + k_p) \cdot A \cdot j},$$

где $\lambda = \frac{l_\delta}{D}$;

$k_p = 1,2$ при $2p = 2$,

$k_p = 0,8$ при $2p = 4$.

1.9.16 Электромеханическая постоянная времени электродвигателя

$$T_i = \frac{J \cdot \dot{i}_{i\dot{i}\dot{i}}^2 \cdot 10^{-2}}{9,2 \cdot \delta_i \cdot D_{i\dot{i}\dot{i}}},$$

где $J = 8 \cdot 10^3 \cdot D^4 \cdot l_\delta$ – момент инерции якоря.

Таблица 1.1

Расчетная величина	Ед. изм. физ. вел.	$0,25 \cdot I$	$0,5 \cdot I$	$0,75 \cdot I$	$0,9 \cdot I$	I	$1,1 \cdot I$	$1,2 \cdot I$
I	А							
$\Delta U_{щ}$	В							
$\Delta U = I \cdot R_a +$ $+ \Delta U_{щ}$	В							
$E = U_{ном} - \Delta U$	В							
B_δ	Тл							
Φ_δ	Вб							
$n = \frac{60 \cdot a \cdot E}{p \cdot N \cdot \Phi_\delta}$	об/ мин							
f_2	Гц							
V_a	м/с							
V_k	м/с							
$P_{\varepsilon a}$	Вт							
$P_{\varepsilon щ}$	Вт							
P_c	Вт							
$P_{мх}$	Вт							
P_δ	Вт							
$\sum P$	Вт							
$P_1 = U_{ном} \cdot I$	Вт							
$P_2 = P_1 - \sum P$	Вт							
$M = 9,57 \cdot \frac{P_2}{n}$	Н·м							
$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100$	%							

По данным, приведенным в таблице 1.1, строят рабочие характеристики $P_1, I, M, n, \eta = f(P_2)$ при $U = U_{i\dot{i}}$. По расчетным данным для заданного значения полезной номинальной мощности определяют номинальные значения $I_{i\dot{i}}, \dot{i}_{i\dot{i}}, \dot{I}_{i\dot{i}}, \eta_{i\dot{i}}$.

1.10 Тепловой расчет электродвигателя

Тепловой расчет состоит в том, чтобы определить среднюю температуру перегрева отдельных частей машины: якоря, коллектора, полюсов, подшипников и т.д.

Здесь приводится упрощенный тепловой расчет электродвигателя, включающий определение перегрева самой нагретой части электродвигателя – якоря.

Превышение температуры якоря должно быть близко к допустимому. Превышение этого значения сокращает срок службы двигателя. Если температура будет ниже допустимой, это свидетельствует о том, что двигатель недоиспользован, электромагнитные нагрузки занижены, а размеры машины завышены.

Тепловой расчет проводится для номинального режима и в нем используют данные, полученные для номинального режима работы двигателя.

1.10.1 Превышение температуры якоря над температурой окружающей среды при продолжительном режиме работы

$$\Delta \vartheta_a = \frac{\left(1 + \alpha_a \cdot b'_z \cdot \frac{\beta_n}{\lambda_1 \cdot \dot{I}_i}\right) \cdot \rho_{y\dot{a}} + \rho_{\dot{n}} + \rho_{\dot{a}}}{\alpha_{\dot{a}} \cdot b'_z},$$

где $\alpha_a = \alpha_1(1 + 0,1 \cdot V_a)$ – результирующий коэффициент теплоотдачи с поверхности якоря;

$$\alpha_1 = 16,7 \frac{\hat{\Delta}\dot{a}}{\dot{I}_i^2 \cdot 0C};$$

$$b'_z = t_z - b_{\theta};$$

$$\lambda_1 = 0,16 \frac{\hat{\Delta}\dot{a}}{\dot{I}_i \cdot 0C} \text{ – коэффициент теплопроводности межвитковой}$$

изоляции;

$$\beta_n = \frac{S_n(1 - k_{\zeta} \cdot k_{ii})}{\dot{I}_i} \text{ – общая толщина эквивалентной изоляции в}$$

пазе;

$$k_{ii} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{d^2}{d_{e\zeta}^2} \text{ – коэффициент заполнения изолированного про-}$$

вода медью;

$$\rho_{y\dot{a}} = \frac{I_{ii}^2 \cdot R_a}{z \cdot l_{a\text{cp}}} \text{ – относительные потери в обмотке;}$$

$$\rho_c = \frac{P_c}{z \cdot l_{\delta}} \text{ – относительные потери в стали;}$$

$$\rho_{\delta a} = \frac{P_{\delta a}}{z \cdot l_{\delta}} - \text{относительные вентиляционные потери.}$$

1.10.2 Превышение температуры якоря над температурой окружающей среды при кратковременном режиме работы

$$\Delta \vartheta_{a \dot{e} \delta} = \Delta \vartheta_a \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_p}} \right),$$

где $T_p = \frac{0,9 \cdot D}{\alpha_a} \cdot 10^6$ – постоянная времени нагревания якоря;

t_p – длительность рабочего периода.

1.10.3 Превышение температуры якоря над температурой окружающей среды при повторно-кратковременном режиме работы

$$\Delta \vartheta_{a n \dot{e} \delta} = \Delta \vartheta_a \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_p}} \right) \cdot \left(1 + e^{-a_1 \frac{t_p}{T_p}} + e^{-2a_1 \frac{t_p}{T_p}} + e^{-(m-1) a_1 \frac{t_p}{T_p}} \right),$$

где m – число циклов;

$$a_1 = \left(1 + \frac{T_p \cdot t_n}{T_n \cdot t_p} \right);$$

$T_n = \frac{0,9 \cdot D}{\alpha_1} \cdot 10^6$ – постоянная времени охлаждения неподвижного

якоря;

t_n – длительность паузы.

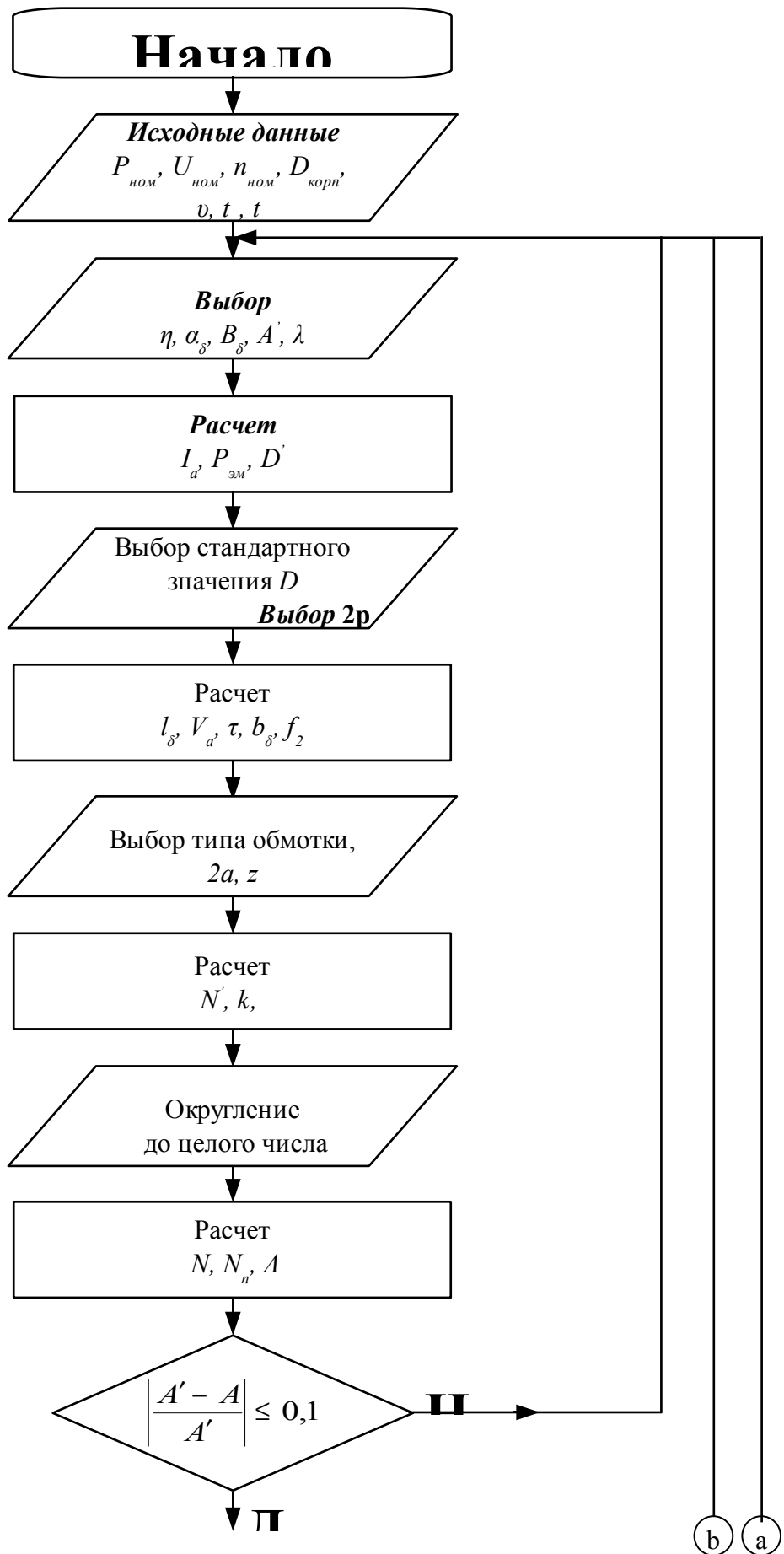
Для заданного режима работы двигателя должно выполняться одно из условий:

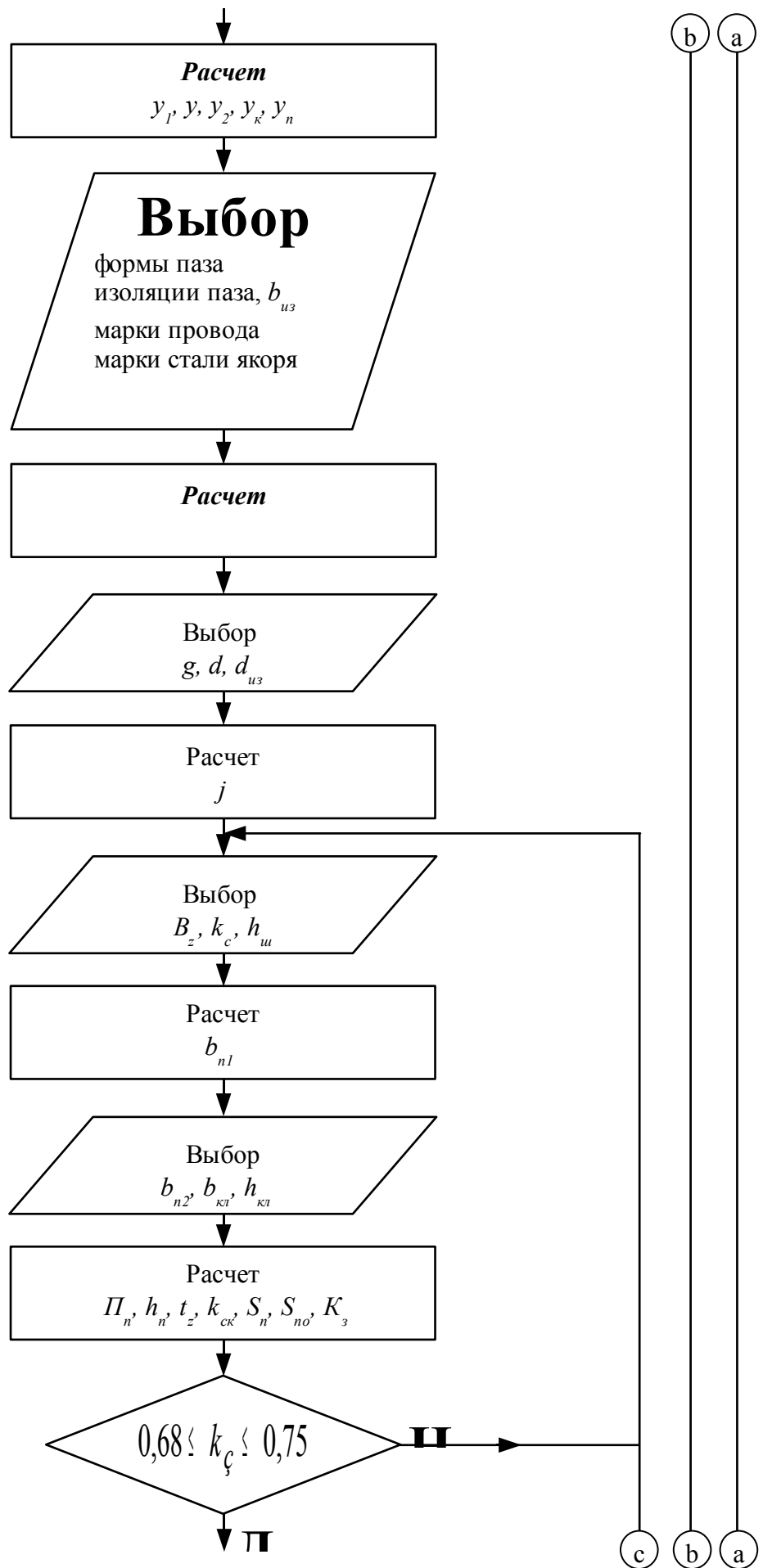
$$\begin{aligned} \Delta \vartheta_a &\leq \Delta \vartheta_{a \ddot{u}}; \\ \Delta \vartheta_{a \dot{e} \delta} &\leq \Delta \vartheta_{a \ddot{u}}; \\ \Delta \vartheta_{a \dot{e} \delta} &\leq \Delta \vartheta_{a \ddot{u}}; \end{aligned}$$

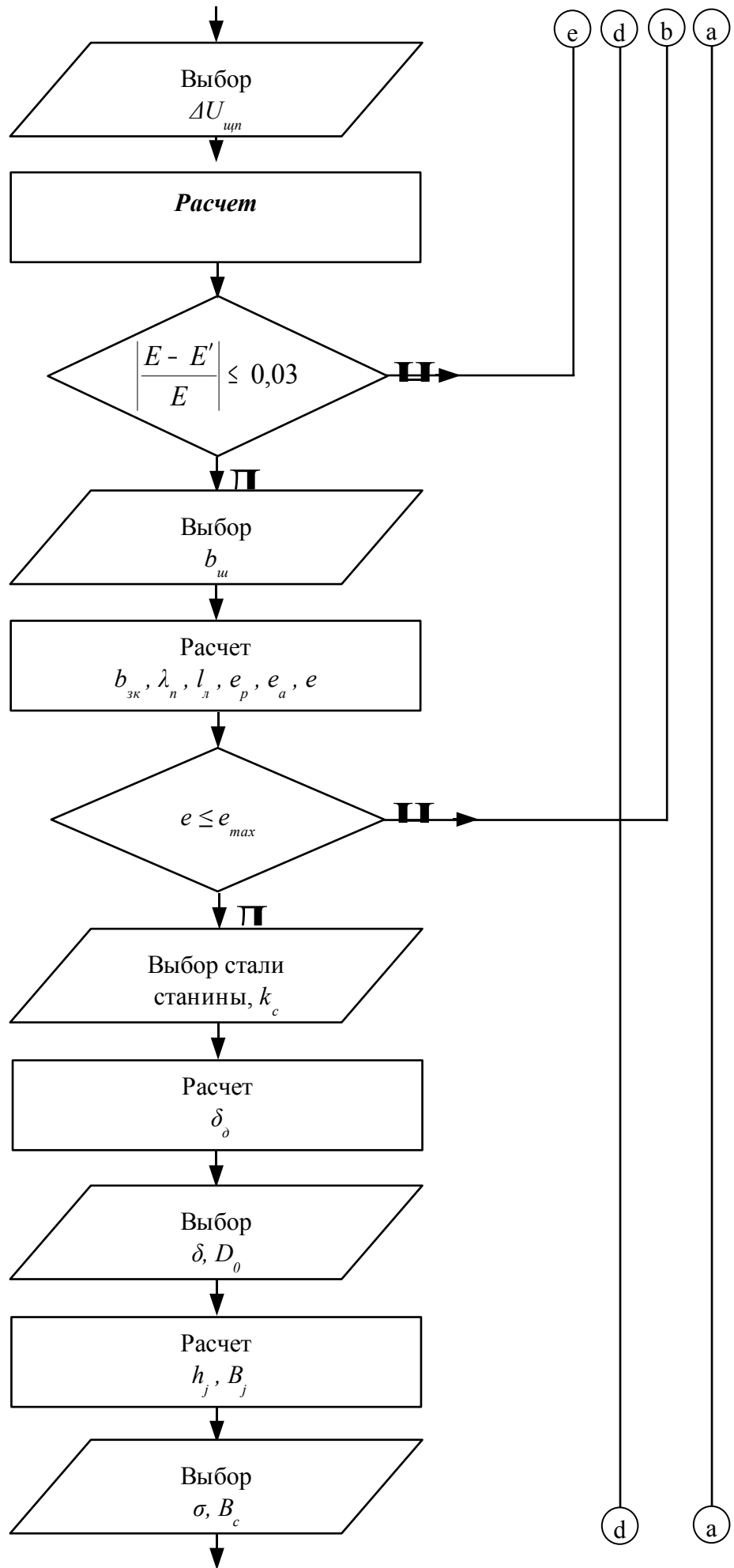
где $\Delta \vartheta_{a \ddot{u}}$ – предельно допустимое превышение температуры обмотки для выбранного класса нагревостойкости изоляции, это значение берут из таблицы 3.2 [8].

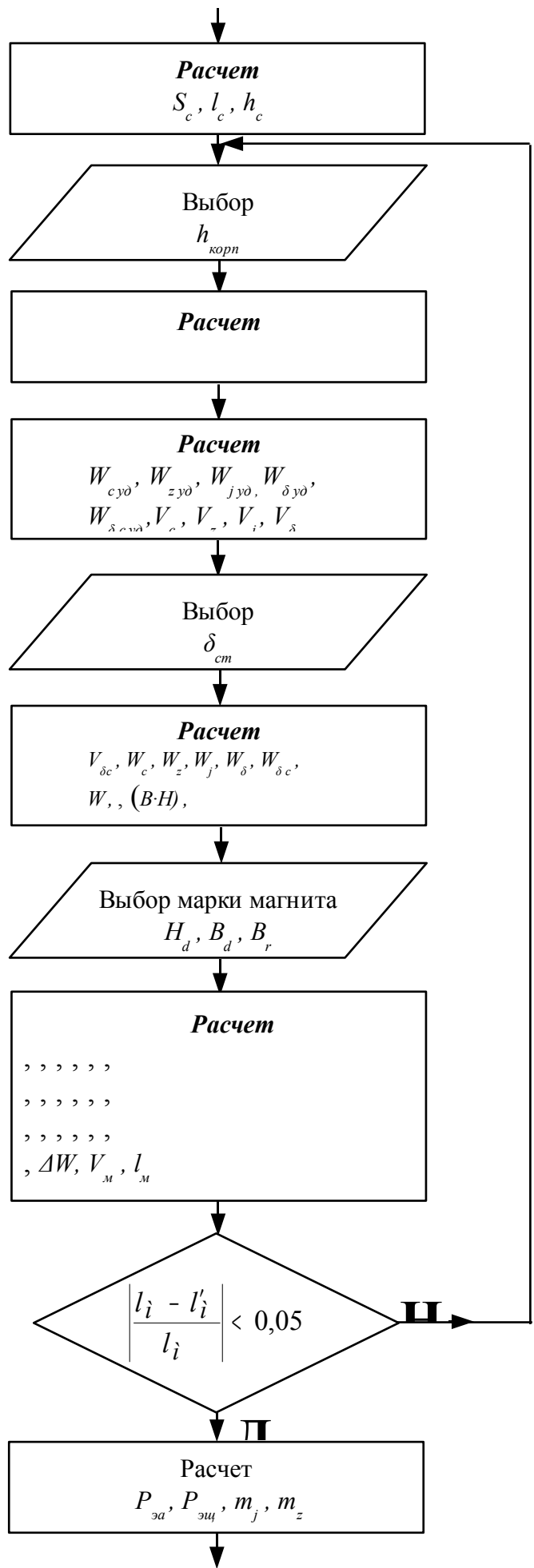
Если превышение температуры якоря ($\Delta \vartheta_a, \Delta \vartheta_{a \hat{e} \delta}, \Delta \vartheta_{a \hat{i} \cdot \hat{e} \delta}$) значительно отличается от величины выбранной расчетной температуры ϑ (отличие более чем на 10%), то проводят уточненный расчет, начиная с п. 1.4.13, приняв полученное превышение температуры якоря за расчетную температуру.

1.11 Алгоритм проектного расчета двигателя постоянного тока малой мощности с постоянными магнитами







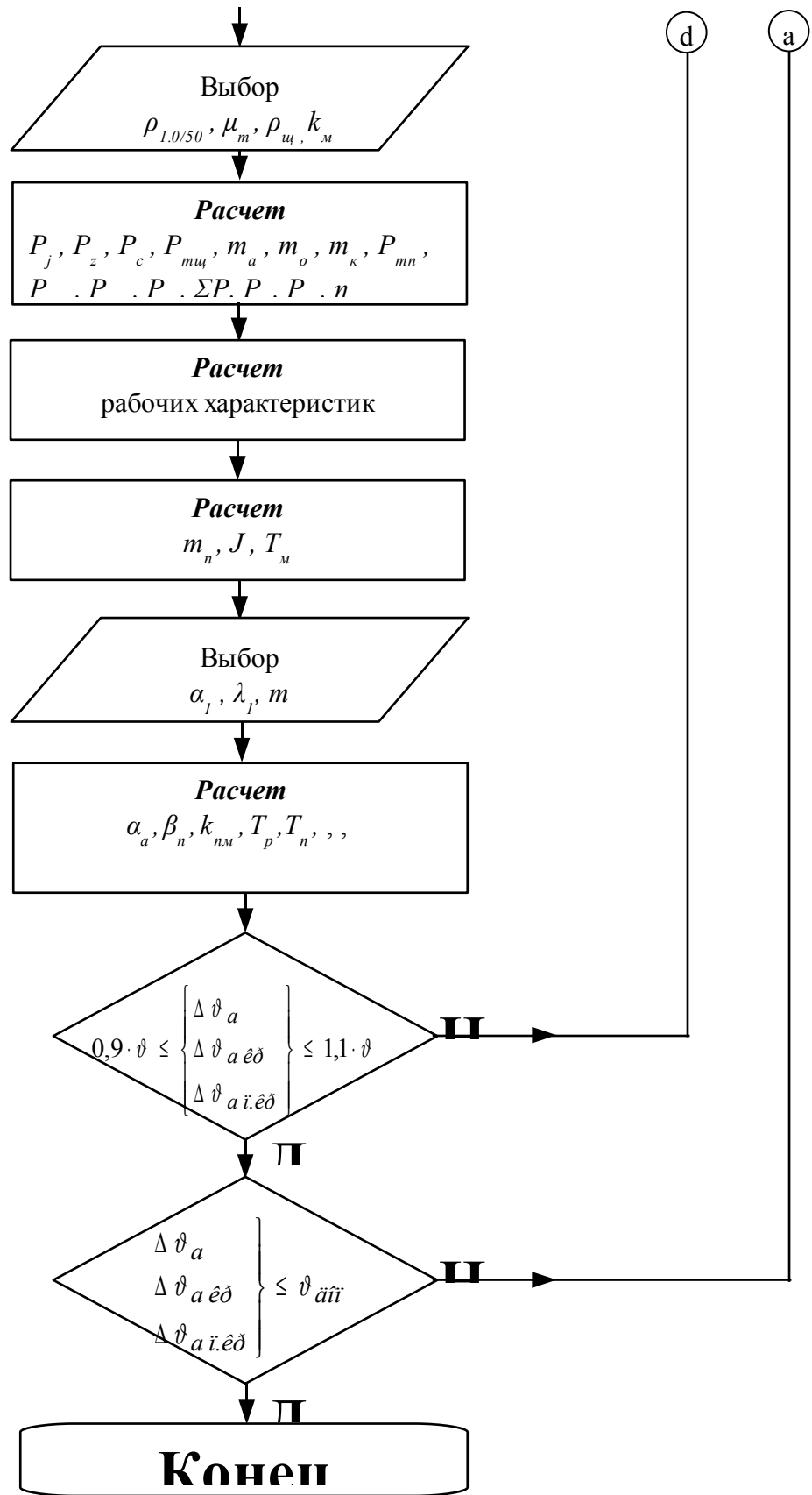


d

a

d

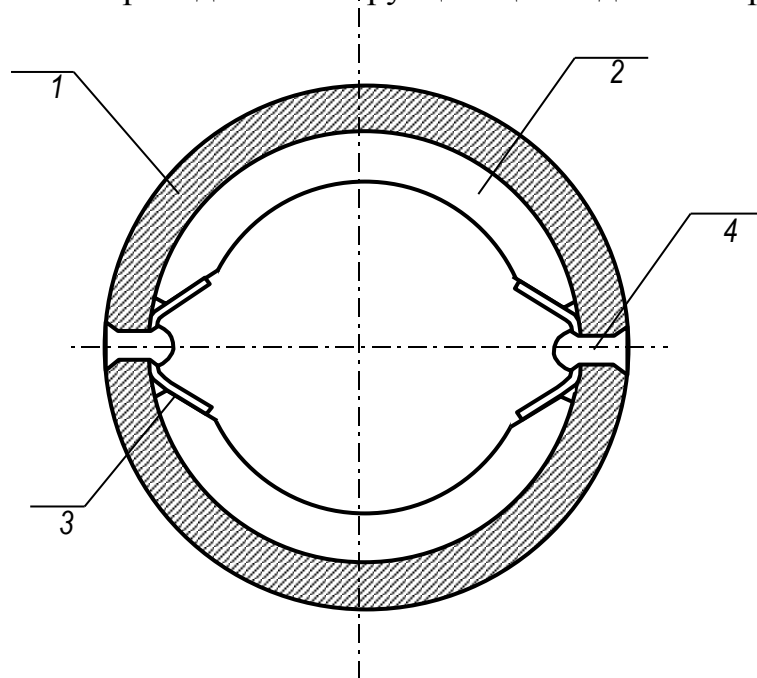
a



1.12 Элементы конструирования основных деталей двигателя постоянного тока

После проведения расчета электродвигателя составляют расчетно-пояснительную записку, на основании которой осуществляют конструирование двигателя.

Магнитная система статора состоит из станины цилиндрической формы, которую выполняют из цельнотянутых труб или шихтованных листов электротехнической стали, и дугообразных постоянных магнитов, которые прикрепляют к станине при помощи крепежных элементов или клея. В качестве примера, на рисунке 1.8 показано крепление дугообразных магнитов к станине с помощью расклинивающих скоб. В маломощных двигателях добавочные полюсы не устанавливают. Сердечник якоря выполняют шихтованным из пластин электротехнической стали толщиной 0,35 мм, 0,5 мм или 1 мм. Сборку пластин в пакет осуществляют или отдельно от вала на специальном кондукторе-оправке или на валу, который должен иметь накатку. Крепление обмотки в пазах якоря осуществляют текстолитовыми или деревянными клиньями. Коллекторы выполняют цилиндрической формы. Коллекторные пластины изготовляют из твердотянутой меди и изолируют друг от друга миканитом или пластмассой (рисунки 1.4 и 1.9). Щеткодержатель выполняют радиальным трубчатого типа (рисунок 1.5). В низковольтных двигателях применяют меднографитовые щетки, в электродвигателях с напряжением 110 В применяют графитовые и электрографитовые щетки. На рисунке 1.10 приведена конструкция щетки для электродвигателя.



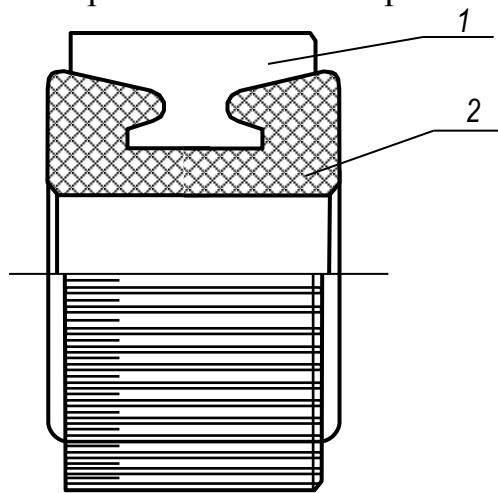
- 1 – Станина
- 2 – Постоянный магнит
- 3 – Расклинивающая скоба
- 4 – Заклепка

Рисунок 1.8

При конструировании двигателя необходимо пользоваться ГОСТами, выбирать стандартизированные размеры и применять стандартные детали.

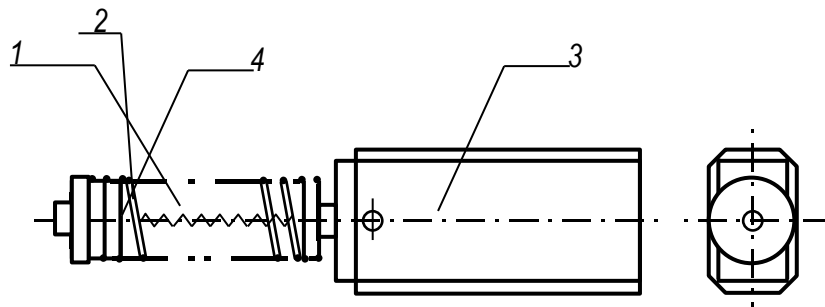
Вначале по данным расчета определяют осевые размеры всех узлов, насаживаемых на вал, что позволяет выявить конструкцию вала и установить длины его участков и общую длину.

Вал в двигателе является важной деталью. Он должен выдерживать нагрузку, равную весу всех его узлов, которые насаживают на него, и все нагрузки, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации двигателя. Он должен быть достаточно прочным и быть настолько жестким, чтобы прогиб его не создавал неравномерности воздушного зазора. Валы изготавливают из углеродистых сталей 30, 35, 40, 45 и легированной стали марки 40Х (ГОСТ 4543-71).



1 – Коллекторная пластина
2 – Пластмасса

Рисунок 1.9 – Коллектор



1 – Упор пружины
2 – Пружина
3 – Щетка
4 – Провод

Рисунок 1.10 – Щетка

Валы диаметром до 0,005 м изготавливают по всей длине одного диаметра без переходов. В качестве заготовки используют стальной прутки, который не требует обработки, кроме шлифовки шейки вала под подшипники и выходного конца вала (рисунок 1.11). В валах диаметром до 0,01 м выполняют небольшие переходы между частями, на которые насаживаются сердечник якоря, коллектор и подшипники. В местах перехода от одного диаметра вала к другому для выхода шлифованного круга делают канавки (рисунок 1.12). Самым ответственным участком вала является его выходной конец, с помощью которого происходит присоединение якоря к рабочему механизму. Для двигателей данного класса используют вал с цилиндрическим концом (рисунок 1.13). Для присоединения с приводом чаще всего применяют муфты полуэластичного типа. Размеры конца вала должны соответствовать ГОСТ 12080-66 (см. приложение М). Для закрепления узлов, насаживаемых на вал, на ступенях вала до 0,01 м закрепление узлов осуществляют посадкой на гладкий вал с натягом. Если используется вал с несколькими ступенями, то проводят механический расчет вала по методике, изложенной в литературе [7].

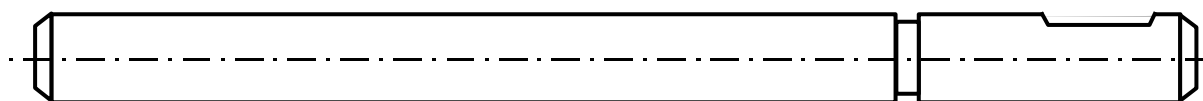


Рисунок 1.11

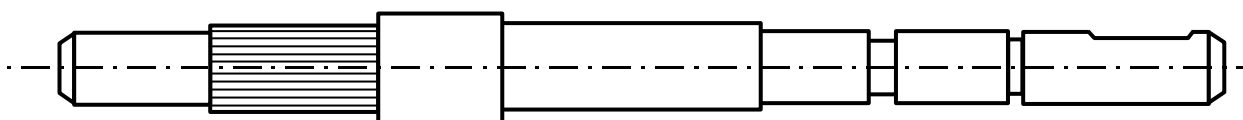


Рисунок 1.12

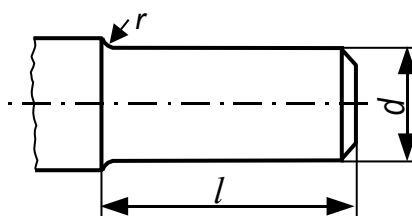


Рисунок 1.13

В машинах малой мощности широко используют подшипники качения. В машине с горизонтальным валом при отсутствии больших осевых нагрузок применяют радиальные однорядные шарикоподшипники легкой серии (см. приложение Н). При необходимости проводят их расчет по методике, изложенной в литературе [7].

В машинах малой мощности подшипники размещают в подшипниковых щитах (крышках), которые располагаются по торцам машины. Подшипниковые щиты выполняют, как правило, литыми, в средней части щитов выполняют цилиндрический паз для подшипников (рисунки 1.14 и 1.15). Для центровки относительно станины в верхней торцевой или боковой части щита делают кольцевой буртик. Если буртик щита входит в расточку корпуса, то такое сочленение образует внутренний замок.

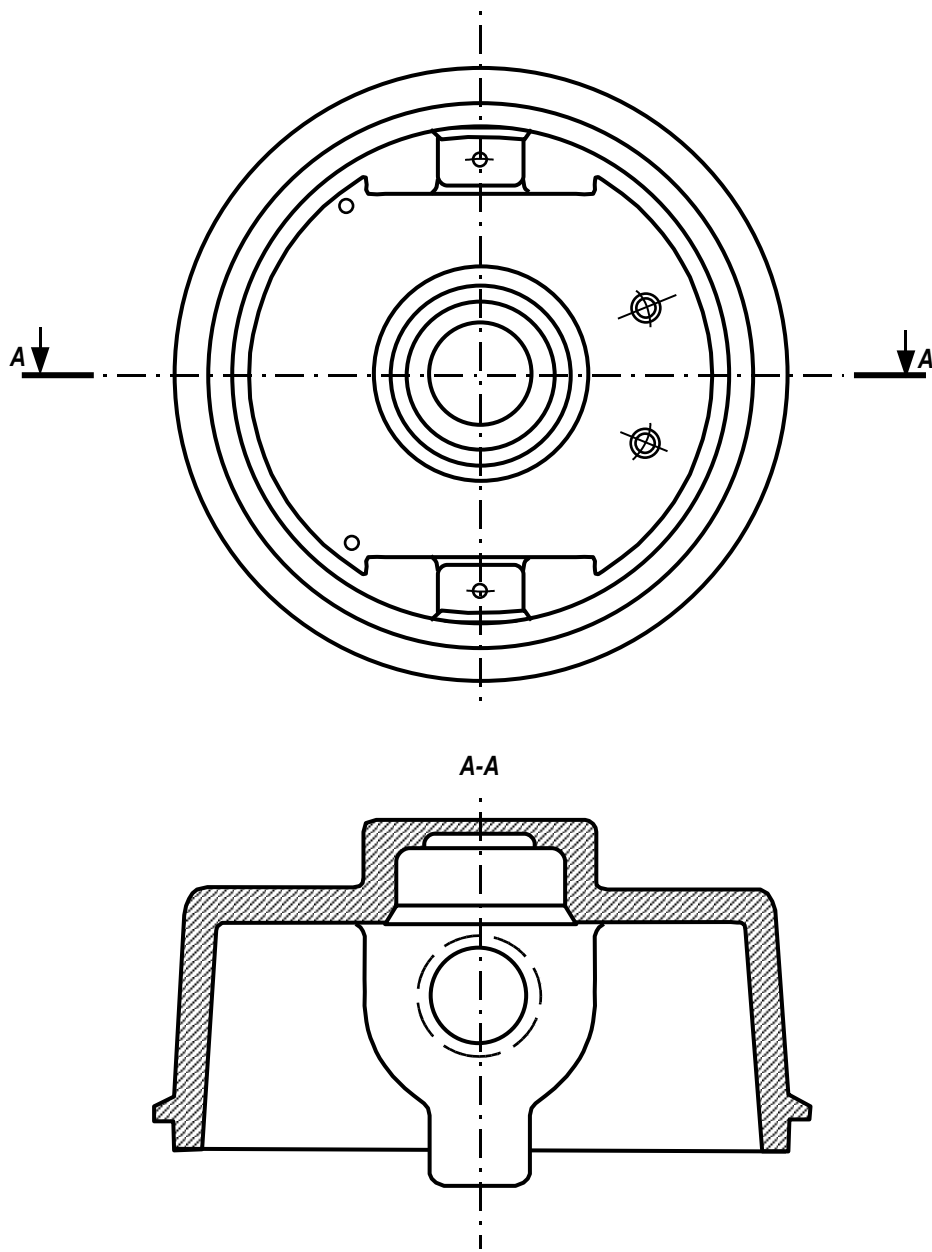


Рисунок 1.14 – Крышка передняя

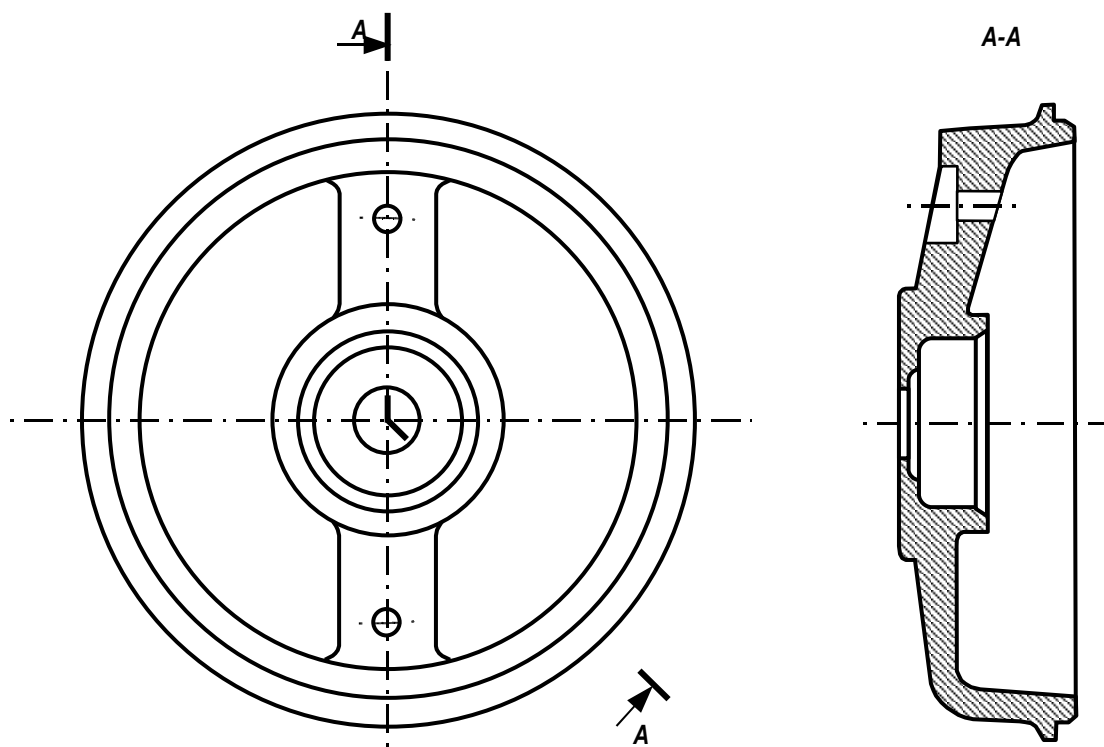


Рисунок 1.15 – Крышка задняя

Контрольные вопросы

- Что относится к основным размерам ДПТ и на какие эксплуатационные характеристики двигателя они влияют?
- Что необходимо учитывать при выборе индукции в воздушном зазоре и токовой линейной нагрузки?
- Какие типы обмоток применяют для якорных обмоток ДПТ малой мощности и их отличительные особенности?
- Что учитывают при выборе марки провода?
- Какие формы паза якоря целесообразно выбирать для двигателей малой мощности?
- С учетом чего выбирают материал для сердечника якоря?
- Для чего выполняют скос пазов на якоре?
- Если коэффициент заполнения паза якоря изолированными проводами больше рекомендуемого значения, что необходимо предпринять, чтобы его уменьшить?
- Если коэффициент заполнения паза якоря изолированными проводами меньше рекомендуемого значения, что необходимо предпринять, чтобы его значение увеличить?
- Как влияет величина сопротивления обмотки якоря на механическую характеристику ДПТ?
- Если толщина зубца меньше рекомендуемого значения, то что необходимо предпринять, чтобы ее увеличить?
- С учетом чего выбирают марку щетки?
- Что надо учитывать при выборе ширины шлица паза якоря?
- Если в результате расчета получено, что коммутация неблагоприятная, то что необходимо предпринять, чтобы это устранить?
- С учетом чего выбирают материал для станины?
- На что влияет величина воздушного зазора и чем обосновывается его выбор?
- Как осуществляется выбор материала постоянных магнитов?
- Как установить, что в двигателе отсутствует «опрокидывание поля»?
- Какое воздействие на основной поток оказывает поле якоря и как оно учитывается?
- При каком условии в расчете рабочих характеристик принимают магнитный поток в воздушном зазоре постоянным?
- Как из данных расчета рабочих характеристик выделить номинальные данные двигателя?
- Как из данных расчета рабочих характеристик выделить данные режима холостого хода?
- Что определяет быстродействие двигателя и что необходимо сделать, чтобы его повысить?
- На основе чего делают вывод о перегреве двигателя и что необходимо предпринять, чтобы это устранить?

2 Пример расчета коллекторного двигателя постоянного тока малой мощности с постоянными магнитами

2.1 Задание на проект и исходные данные

Рассчитать и разработать конструкцию двигателя постоянного тока малой мощности со следующими данными.

Полезная мощность $P_{i\dot{i}\dot{i}} = 70$ Вт. Номинальное напряжение сети $U_{i\dot{i}\dot{i}} = 110$ В. Номинальная частота вращения вала $\dot{i}_{i\dot{i}\dot{i}} = 5500$ об/мин. Диаметр корпуса $D_{корп} = 0,06$ м. Возбуждение от постоянных магнитов типа феррит бария. Исполнение по степени защиты IP 44, по способу охлаждения IC 0040 – с естественным охлаждением без внешнего вентилятора. Режим работы – кратковременный S2–20. Изоляция класса нагревостойкости В.

2.2 Основные размеры двигателя

За основу конструкции электродвигателя принимаем конструкцию, приведенную в приложении К.

2.2.1 Ток якоря при нагрузке машины

$$I_a = I = \frac{P_{i\dot{i}\dot{i}}}{\eta \cdot U_{i\dot{i}\dot{i}}} = \frac{70}{0,646 \cdot 110} = 0,985 \text{ А} ,$$

где значение КПД принимаем равным 64,6%, т.е. $\eta = 0,646$.

2.2.2 Электромагнитная мощность двигателя

$$P_{y\dot{i}} = \frac{1 + 3 \cdot \eta}{4 \cdot \eta} \cdot P_{i\dot{i}\dot{i}} = \frac{1 + 3 \cdot 0,646}{4 \cdot 0,646} \cdot 70 = 79,59 \text{ Вт} .$$

2.2.3 Диаметр якоря

$$D = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot P_{y\dot{i}}}{\alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot A' \cdot n_{i\dot{i}\dot{i}} \cdot \lambda}} = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot 79,59}{0,7 \cdot 0,24 \cdot 6,5 \cdot 10^3 \cdot 5500 \cdot 1,6}} = 0,038 \text{ м} ,$$

где $\alpha_{\delta} = 0,7$;

$B_{\delta} = 0,24$ Тл;

$A' = 6,5 \cdot 10^3 \frac{\text{А}}{\text{м}}$;

$\lambda = 1,6$.

По приложению А из стандартного ряда размеров выбираем диаметр якоря $D = 0,038$ м.

2.2.4 Расчетная длина якоря

$$l_{\delta} = \lambda \cdot D = 1,6 \cdot 0,038 = 0,061 \text{ м.}$$

2.2.5 Окружная скорость вращения якоря

$$V_a = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{iii}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,038 \cdot 5500}{60} = 10,94 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

2.2.6 Полусное деление

Выбираем двухполюсную конструкцию двигателя, $2p = 2$

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,038}{2} = 0,06 \text{ м.}$$

2.2.7 Расчетная ширина полюса (ширина магнита)

Выбираем конструкцию полюса без полюсного наконечника

$$b_{\delta} = b_i = \alpha_{\delta} \cdot \tau = 0,7 \cdot 0,06 = 0,042 \text{ м.}$$

2.2.8 Частота перемагничивания стали якоря

$$f_2 = \frac{p \cdot n_{iii}}{60} = \frac{1 \cdot 5500}{60} = 91,67 \text{ Гц.}$$

2.3 Обмотка якоря

Для двухполюсной конструкции двигателя выбираем петлевую обмотку с числом параллельных ветвей $2a = 2p$.

2.3.1 Предварительное общее число эффективных проводников обмотки якоря

$$N' = \frac{\pi \cdot D \cdot A' \cdot 2 \cdot a}{I} = \frac{\pi \cdot 0,038 \cdot 6,5 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 1}{0,985} = 1574,38 ,$$

принимаяем $N' = 1575$.

2.3.2 Число пазов якоря

$$z = (3 - 4) \cdot D \cdot 100 = (3 - 4) \cdot 0,038 \cdot 100 = 11,4 - 15,2,$$

принимаем $z = 15$.

2.3.3 Число коллекторных пластин

$$k = 2 \cdot z = 2 \cdot 15 = 30.$$

2.3.4 Предварительное число витков в секции обмотки якоря

$$\omega'_c = \frac{N'}{2 \cdot k} = \frac{1575}{2 \cdot 30} = 26,3,$$

принимаем число витков в секции обмотки якоря равным округленному значению, то есть $\omega_c = 26$.

2.3.5 Уточненное число проводников обмотки якоря

$$N = \omega_c \cdot 2 \cdot k = 26 \cdot 2 \cdot 30 = 1560.$$

2.3.6 Число проводников обмотки якоря в пазу якоря

$$N_i = \frac{N}{z} = \frac{1560}{15} = 104.$$

2.3.7 Уточненное значение токовой линейной нагрузки

$$A = \frac{N \cdot I}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot D} = \frac{1560 \cdot 0,985}{2 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,038} = 6439 \frac{\text{А}}{\text{м}},$$

при этом должно выполняться условие

$$\left| \frac{A' - A}{A'} \right| \leq 0,1 \quad \left| \frac{6500 - 6439}{6500} \right| = 0,009.$$

Условие выполняется.

2.3.8 Шаги обмотки якоря

Выбираем простую петлевую обмотку

а) первый частичный шаг

$$y_1 = \frac{k}{2p} - \varepsilon_k = \frac{30}{2} - 0 = 15,$$

где $\varepsilon_k = 0$;

б) результирующий шаг

$$y = 1 ;$$

в) шаг по коллектору

$$y_k = 1 ;$$

г) второй частичный шаг

$$y_2 = y_1 - y = 15 - 1 = 14 ;$$

д) шаг обмотки по пазам

$$y_n = \frac{z}{2p} - \varepsilon = \frac{15}{2} - 0,5 = 7,$$

где $\varepsilon_k = 0$.

Используя литературу [9], вычерчивают схему обмотки якоря.

Схема простой петлевой обмотки, рассчитанная для электродвигателя, приведена на рисунке 2.1.

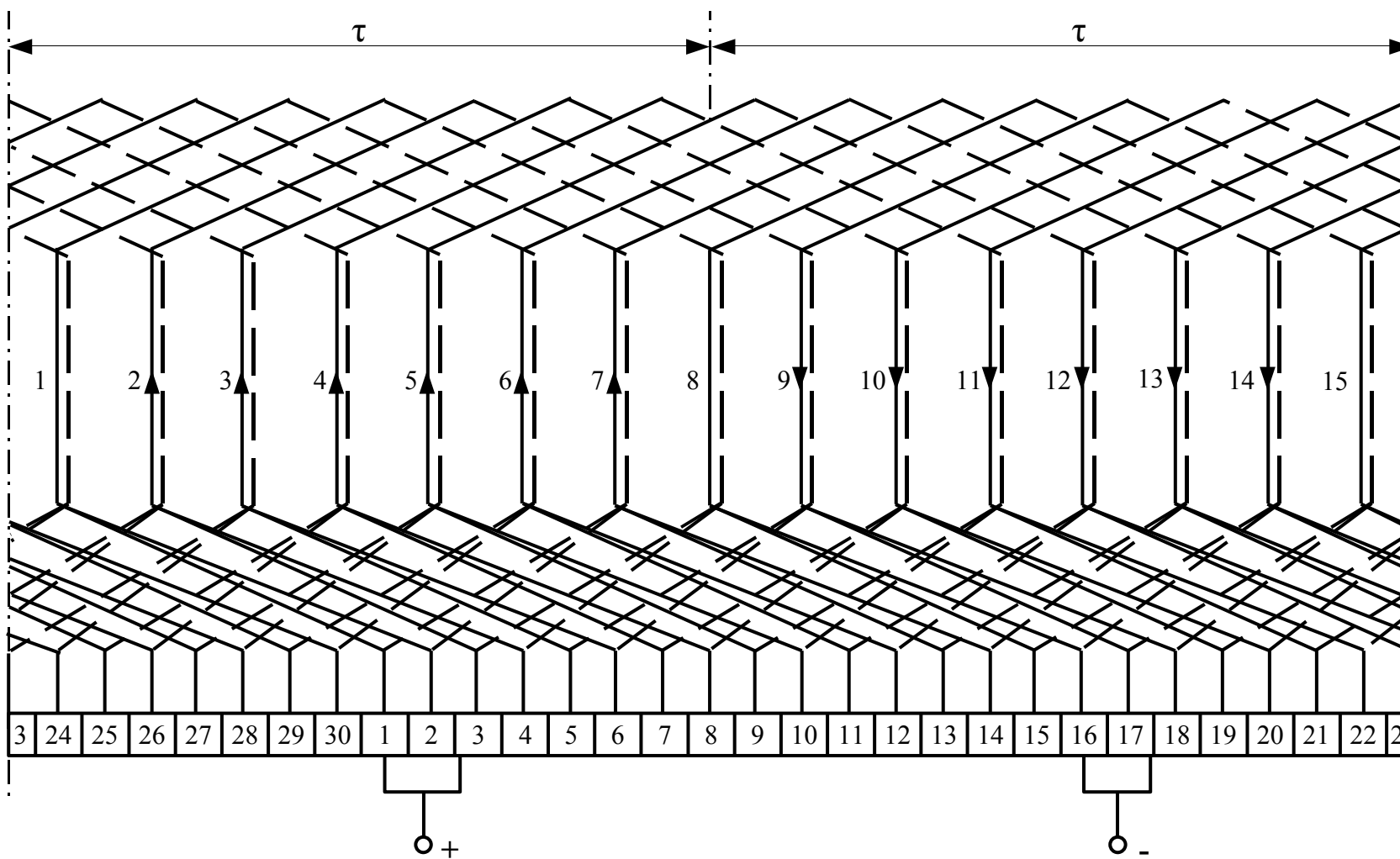


Рисунок 2.1 – Схема простой петлевой обмотки якоря
 ($2p = 2, z = 15, k = 30, y_1 = 15, y_2 = 14, y_n = 7$)

2.4 Размеры зубцов, пазов и проводников обмотки якоря

Выбираем для зубцового якоря проектируемого двигателя овальную форму паза. Якорь выбираем со скосом пазов. Пазовая изоляция – эмалевая на эпоксидной основе, нанесенная методом напыления толщиной $0,15 \cdot 10^{-3}$ м, то есть $b_{из} = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м.

Принимаем всыпную обмотку с круглыми проводами с эмалевой изоляцией класса нагревостойкости В. Выбираем марку провода ПЭТВ ОСТ 160.505.001-74. Сердечник якоря выполняется шихтованным из листов электротехнической стали 1211 ГОСТ 21427.2-83 толщиной 0,5 мм.

2.4.1 Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря

Для кратковременного режима работы ($S2$) принимаем $j' = 10 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$.

2.4.2 Сечение и диаметр провода обмотки якоря

а) предварительное значение площади поперечного сечения неизолированного провода

$$g' = \frac{I}{2a \cdot j'} = \frac{0,985}{2 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 10^6} = 0,04925 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

б) окончательное значение площади поперечного сечения g , диаметр неизолированного провода d и диаметр изолированного провода $d_{из}$ выбираем из таблицы Б.2 приложения Б

$$g = 0,0491 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2, \quad d = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad d_{э\zeta} = 0,285 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

2.4.3 Окончательная плотность тока в проводнике обмотки якоря

$$j = \frac{I}{2a \cdot g} = \frac{0,985}{2 \cdot 1 \cdot 0,0491 \cdot 10^{-6}} = 10,03 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

2.4.4 Бóльший диаметр овального паза якоря

$$b_{nl} = \frac{k_c \cdot B_z \cdot z \cdot D' \cdot \sin \frac{\alpha'}{2} - \pi \cdot D \cdot B_\delta}{k_c \cdot B_z \cdot z \cdot \left(1 + \sin \frac{\alpha'}{2} \right)} =$$

$$= \frac{0,95 \cdot 0,95 \cdot 15 \cdot 0,037 \cdot \sin 0,2095 - \pi \cdot 0,038 \cdot 0,24}{0,95 \cdot 0,95 \cdot 15 \cdot (1 + \sin 0,2095)} = 0,0046 \text{ м},$$

где $k_c = 0,95$ – выбираем по таблице В.1 приложения В ;

принимаяем $B_z = 0,95$ Тл ;

$$h_o = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$D' = D - 2 \cdot h_o = 0,038 - 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,037 \text{ м};$$

$$\alpha' = \frac{2\pi}{z} = \frac{2 \cdot \pi}{15} = 0,419 \text{ рад.}$$

Принимаем $b_{n1} = 0,0046$ м.

2.4.5 Меньший диаметр овального паза принимаем равным

$$b_{n2} = 0,0039 \text{ м.}$$

2.4.6 Периметр овального паза

$$\begin{aligned} \check{I}_i &= b_{n1} \left(\frac{\pi + \alpha'}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha'}{2} \right) - \frac{b_{n2} \left(1 - \sin \frac{\alpha'}{2} \right)}{\sin \frac{\alpha'}{2}} = \\ &= 0,0046 \left(\frac{\pi + 0,419}{2} + \operatorname{ctg} 0,2095 \right) - \frac{0,0039 \cdot (1 - \sin 0,2095)}{\sin 0,2095} = 0,0143 \text{ м.} \end{aligned}$$

2.4.7 Высота паза якоря

$$\begin{aligned} h_n &= b_{n1} \frac{\left(1 + \sin \frac{\alpha'}{2} \right)}{2 \cdot \sin \frac{\alpha'}{2}} - \frac{b_{n2} \cdot \left(1 - \sin \frac{\alpha'}{2} \right)}{2 \cdot \sin \frac{\alpha'}{2}} + h_o = \\ &= 0,0046 \cdot \frac{(1 + \sin 0,2095)}{2 \cdot \sin 0,2095} - \frac{0,0039 \cdot (1 - \sin 0,2095)}{2 \cdot \sin 0,2095} + 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,0064 \text{ м.} \end{aligned}$$

2.4.8 Площадь сечения овального паза якоря

$$S_n = \left[\frac{(b_{n1})^2}{4} \cdot \left(\frac{\pi + \alpha'}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha'}{2} \right) - \frac{(b_{n2})^2}{4 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha'}{2}} \right] \cdot k_{\check{n}\check{e}} =$$

$$= \left[\frac{0,0046^2}{4} \cdot \left(\frac{\pi + 0,419}{2} + ctg 0,2095 \right) - \frac{0,0039^2}{4 \cdot tg 0,2095} \right] \cdot 0,99 = 1,625 \cdot 10^{-5} \text{ м},$$

$$\text{где } k_{\tilde{n}\tilde{e}} = \frac{l_{\delta}}{\sqrt{t_z^2 + l_{\delta}^2}} = \frac{0,061}{\sqrt{0,008^2 + 0,061^2}} = 0,99,$$

$$t_z = \frac{\pi D}{z} = \frac{\pi \cdot 0,039}{15} = 0,008 \text{ м}.$$

2.4.9 Площадь поперечного сечения паза, заполненного обмоткой

а) площадь сечения пазовой изоляции

$$S_{\tilde{e}\tilde{c}} = b_{\tilde{e}\tilde{c}} \cdot \tilde{I}_{\tilde{c}} = 0,15 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0143 = 2,145 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

б) площадь сечения пазового клина

$$S_{\tilde{e}\tilde{e}} = b_{\tilde{e}\tilde{e}} \cdot h_{\tilde{e}\tilde{e}} = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

где $b_{\tilde{e}\tilde{e}} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

$h_{\tilde{e}\tilde{e}} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

в) площадь сечения паза без изоляции паза и клина

$$S_{no} = S_n - S_{\tilde{e}\tilde{c}} - S_{\tilde{e}\tilde{e}} = 1,625 \cdot 10^{-5} - 2,145 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-6} = 1,211 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

2.4.10 Коэффициент заполнения паза изолированными проводками

$$k_{\tilde{c}} = \frac{d_{\tilde{e}\tilde{c}}^2 \cdot N_n}{S_{no}} = \frac{0,285^2 \cdot 10^{-6} \cdot 104}{1,211 \cdot 10^{-5}} = 0,7.$$

Выбираем автоматизированную укладку обмотки в пазы якоря, так как $k_{\tilde{c}} = 0,7$.

2.4.11 Проверка ширины зубца якоря

Так как пазы выполнены овальными с параллельными стенками, то ширина зубца постоянна по высоте зубца

$$b_z = \frac{B_{\delta} \cdot t_z}{k_c \cdot B_z} = \frac{0,24 \cdot 0,008}{0,95 \cdot 0,95} = 0,0021 \text{ м}.$$

На рисунке 2.2 приведен эскиз паза якоря.

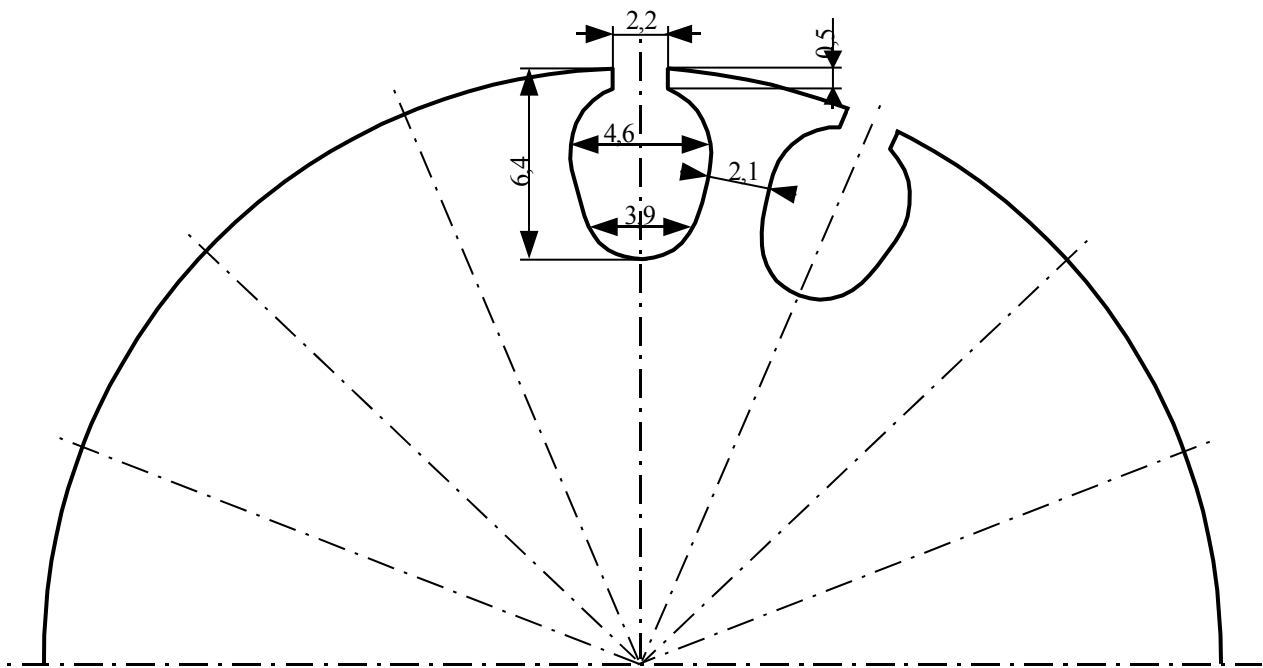


Рисунок 2.2 – Эскиз паза якоря

2.4.12 Средняя длина полувитка секции обмотки якоря

$$\begin{aligned}
 l_{a\text{cp}} &= \frac{l_{\delta}}{k_{c\hat{e}}} + l_{i\ddot{e}} + \frac{y_n}{z} \cdot \pi (D - h_n) = \\
 &= \frac{0,061}{0,99} + 0,003 + \frac{7}{15} \cdot \pi \cdot (0,038 - 0,0064) = 0,1111 \text{ м} .
 \end{aligned}$$

2.4.13 Сопротивление обмотки якоря при расчетной температуре якоря

$$R_a = k_{\theta} \cdot R_{a20} = 1,24 \cdot 15,47 = 19,18 \text{ Ом},$$

где $k_{\theta} = 1 + 0,004 \cdot \vartheta = 1 + 0,004 \cdot 60 = 1,24$;

ϑ – расчетная температура для изоляции класса В принимаем равной 60°C ;

$$R_{a20} = \frac{N \cdot l_{a\text{cp}}}{57(2a)^2 \cdot g} \cdot 10^{-6} = \frac{1560 \cdot 0,111 \cdot 10^{-6}}{57 \cdot 4 \cdot 0,0491 \cdot 10^{-6}} = 15,47 \text{ Ом} .$$

2.5 Коллектор и щетки

Для проектируемого электродвигателя выбираем коллектор на пластмассе.
Предварительный диаметр коллектора:

$$D'_e = 0,8 \cdot D = 0,8 \cdot 0,038 = 0,03 \text{ м.}$$

2.5.1 Относительное коллекторное деление для простой петлевой обмотки

$$t_e^* < \frac{0,8 \cdot \pi \cdot (1 - \alpha_\delta)}{\left(\frac{2 \cdot k}{z} - 0,5\right) \cdot 2p} = \frac{0,8 \cdot \pi \cdot (1 - 0,7)}{\left(\frac{2 \cdot 30}{15} - 0,5\right) \cdot 2} = 0,108$$

Принимаем $t_k^* = 0,1$.

2.5.2 Коллекторное деление

$$t_e = t_e^* \cdot D'_e = 0,1 \cdot 0,03 = 0,003 \text{ м.}$$

2.5.3 Ширина коллекторной пластины

$$\beta_e = t_e - \beta_{e'} = 0,003 - 0,0007 = 0,0023 \text{ м,}$$

где $\beta_{e'} = 0,0007 \text{ м.}$

2.5.4 Окончательный диаметр коллектора

$$D_e = \frac{k \cdot (\beta_{e'} + \beta_e)}{\pi} = \frac{30 \cdot (0,0007 + 0,0023)}{\pi} = 0,029 \text{ м.}$$

2.5.5 Окружная скорость коллектора

$$V_e = \frac{\pi \cdot D_e \cdot n_{\text{шт}}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,029 \cdot 5500}{60} = 8,35 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

2.5.6 Площадь поперечного сечения щетки

Выбираем марку щетки ЭГ2А: $\Delta U_{\text{шт}} = 2,6 \text{ В}$; $j_{\text{шт}} = 10 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$;

$$\mu_m = 0,25 ; \rho_{\text{шт}} = 2,5 \cdot 10^4 \frac{\text{Ом}}{\text{см}}$$

$$S_{\dot{u}} = \frac{I}{\delta \cdot j_{\dot{u}\ddot{a}}} = \frac{0,985}{1 \cdot 10 \cdot 10^4} = 9,85 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

2.5.7 Размеры щетки

Предварительные размеры щетки

$$b'_{\dot{u}} = 1,3 \cdot t_{\dot{e}} = 1,3 \cdot 0,003 = 0,0039 \text{ м},$$

$$a'_{\dot{u}} = \frac{S_{\dot{u}}}{b_{\dot{u}}} = \frac{9,85 \cdot 10^{-6}}{0,0039} = 0,0025 \text{ м}.$$

Уточняем размеры щеток, выбирая стандартные размеры щетки по таблице Д.2 приложения Д: $b_{\dot{u}} = 0,004 \text{ м}$; $a_{\dot{u}} = 0,005 \text{ м}$; $h_{\dot{u}} = 2 \cdot a_{\dot{u}} = 0,010 \text{ м}$.

2.5.8 Окончательная плотность тока под щетками

$$j_{\dot{u}} = \frac{I}{p \cdot a_{\dot{u}} \cdot b_{\dot{u}}} = \frac{0,985}{1 \cdot 0,005 \cdot 0,004} = 4,9 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

2.5.9 Длина коллектора

а) активная длина коллектора по оси вала

$$l'_{\dot{e}} = 1,8 \cdot a_{\dot{u}} = 1,8 \cdot 0,005 = 0,009 \text{ м};$$

б) полная длина коллектора по оси вала

$$l_{\dot{e}} = l'_{\dot{e}} + 4 \cdot d = 0,009 + 4 \cdot 0,0025 = 0,01 \text{ м}.$$

2.5.10 Проверка величины ЭДС

$$E = U_{i\ddot{u}} - I \cdot R_a - \Delta U_{\dot{u}} = 110 - 0,985 \cdot 19,18 - 1,27 = 89,84 \text{ В},$$

$$\text{где } \Delta U_{\dot{u}} = \Delta U_{i\ddot{u}} \cdot \frac{j_{\dot{u}}}{j_{\dot{u}\ddot{a}}} = 2,6 \cdot \frac{4,9 \cdot 10^4}{10 \cdot 10^4} = 1,27 \text{ В}.$$

При этом должно выполняться условие:

$$\left| \frac{E - E'}{E} \right| \leq 0,03,$$

$$\text{где } E' = \frac{p \cdot N \cdot \hat{O}_{\delta} \cdot n_{i\ddot{u}}}{a \cdot 60} = \frac{1 \cdot 1560 \cdot 6,15 \cdot 10^{-4} \cdot 5500}{1 \cdot 60} = 87,94 \text{ В},$$

$$\hat{O}_\delta = \hat{A}_\delta \cdot l_\delta \cdot b_\delta = 0,24 \cdot 0,061 \cdot 0,042 = 6,15 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

$$\left| \frac{89,84 - 87,94}{89,84} \right| = 0,021 < 0,03 \text{ – условие выполняется.}$$

2.6 Коммутационные параметры

2.6.1 Ширина коммутационной зоны

$$\begin{aligned} b_{\zeta\hat{e}} &= b_{\hat{u}} \cdot \frac{D}{D_{\hat{e}}} + t_{\hat{e}} \left(\frac{k}{z} + \left| \frac{k}{2p} - y_1 \right| - \frac{a}{p} \right) \cdot \frac{D}{D_{\hat{e}}} = \\ &= 0,004 \frac{0,038}{0,029} + 0,003 \left(\frac{30}{15} + \left| \frac{30}{2} - 15 \right| - \frac{1}{1} \right) \cdot \frac{0,038}{0,029} = 0,013 \text{ м.} \end{aligned}$$

Для благоприятной коммутации необходимо выполнение соотношения

$$b_{\text{зк}} < 0,8 \cdot (\tau - b_\delta) ;$$

$$0,013 < 0,8 \cdot (0,06 - 0,042) \text{ или } 0,011 < 0,014 ,$$

условие выполняется.

2.6.2 Удельная магнитная проводимость пазового рассеяния овального паза

$$\begin{aligned} \lambda_n &= \left[0,6 \frac{2 \cdot h_n}{b_{n1} + b_{n2}} + \frac{l_{\hat{e}}}{l_\delta} + 0,92 \lg \left(\frac{\pi \cdot t_z}{b_\sigma} \right) \right] \cdot 10^{-6} = \\ &= \left[0,6 \cdot \frac{2 \cdot 0,0064}{0,0046 + 0,0039} + \frac{0,05}{0,061} + 0,92 \lg \left(\frac{\pi \cdot 0,008}{0,0022} \right) \right] \cdot 10^{-6} = \\ &= 2,69 \cdot 10^{-6} \frac{\hat{\text{А}}\hat{\text{а}}}{\hat{\text{А}} \cdot \hat{\text{и}}}, \end{aligned}$$

$$\text{где } l_{\hat{e}} = l_{\text{аср}} - l_\delta = 0,111 - 0,061 = 0,05 \text{ м ;}$$

$$b_\sigma = 8 \cdot d_{\hat{e}\zeta} = 8 \cdot 0,285 \cdot 10^{-3} = 0,0022 \text{ м.}$$

2.6.3 Среднее значение реактивной ЭДС в короткозамкнутой секции якоря

$$e_p = 2 \cdot \omega_c \cdot \lambda_n \cdot l_\delta \cdot A \cdot V_a = 2 \cdot 26 \cdot 2,69 \cdot 10^{-6} \cdot 0,061 \cdot 6439 \cdot 10,94 = 0,6 \text{ В.}$$

2.6.4 Среднее значение ЭДС поля якоря

$$e_a = \frac{0,8 \cdot \pi \cdot \omega_c \cdot A \cdot \tau \cdot l_\delta \cdot V_a}{\tau - b_\delta} \cdot 10^{-6} =$$

$$= \frac{0,8 \cdot \pi \cdot 26 \cdot 6439 \cdot 0,06 \cdot 0,061 \cdot 10,94}{0,06 - 0,042} \cdot 10^{-6} = 0,93 \text{ В.}$$

2.6.5 Среднее значение результирующей ЭДС в короткозамкнутой секции обмотки якоря

$$e = e_p + e_a = 0,6 + 0,93 = 1,53 \text{ В.}$$

Коммутация благоприятная.

2.7 Магнитная система машины

Принимаем конструкцию магнитной системы проектируемого двигателя с отъемными полюсами, представляющую собой внешнее сплошное ярмо, выполненное из Ст 3, к которому крепятся постоянные магниты в виде скоб с радиальной намагниченностью без полюсных наконечников; сердечник якоря выбран зубцовым и набран из пластин электротехнической стали 1211 ГОСТ 21427.2 – 83 толщиной 0,5 мм с оксидированным изоляционным слоем.

2.7.1 Длина воздушного зазора под полюсом

$$\delta_{\bar{a}} \geq 0,15 \frac{\tau \cdot A}{B_\delta} \cdot 10^{-6} = 0,15 \frac{0,06 \cdot 6439}{0,24} \cdot 10^{-6} = 0,00024 \text{ м.}$$

Принимаем $\delta = 0,001 \text{ м.}$

2.7.2 Высота ярма якоря

$$h_j = \frac{D - (2 \cdot h_n + D_0)}{2} = \frac{0,038 - (2 \cdot 0,0064 + 0,007)}{2} = 0,0091 \text{ м,}$$

где $D_0 = (0,18 - 0,24) \cdot D = (6,84 - 9,12) \cdot 10^{-3} \text{ м};$
принимаем $D_0 = 0,007 \text{ м.}$

2.7.3 Индукция в ярме якоря

$$B_j = \frac{\hat{O}_\delta}{2 \cdot k_c \cdot h_j \cdot l_\delta} = \frac{6,15 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,95 \cdot 0,0091 \cdot 0,061} = 0,58 \text{ Тл.}$$

2.7.4 Размеры станины

а) площадь поперечного сечения станины

$$S_c = \frac{\hat{O}_\delta \cdot \sigma}{2 \cdot B_c} = \frac{6,15 \cdot 10^{-4} \cdot 1,12}{2 \cdot 1,6} = 2,15 \cdot 10^{-4} \text{ м},$$

где $\sigma = 1,12$ – коэффициент рассеяния магнитной системы;
 $B_c = 1,6$ Тл ,

б) осевая длина станины

$$l_c = l_\delta + 0,2 \cdot D = 0,061 + 0,2 \cdot 0,038 = 0,068 \text{ м},$$

в) высота станины

$$h_c = \frac{S_c}{k_c \cdot l_c} = \frac{2,15 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 0,068} = 0,0031 \text{ м},$$

где для сплошной станины $k_c = 1$.

2.7.5 Предварительные размеры магнита при радиальном расположении в магнитной системе

а) длина магнита

$$\begin{aligned} l'_i &= 0,5(D_{\hat{e}i\delta\bar{i}} - 2 \cdot h_{\hat{e}i\delta\bar{i}} - 2 \cdot h_c - D - 2 \cdot \delta) = \\ &= 0,5(0,06 - 2 \cdot 0,0035 - 2 \cdot 0,0031 - 0,038 - 2 \cdot 0,001) = 0,0034 \text{ м}, \end{aligned}$$

здесь принимаем $h_{\hat{e}i\delta\bar{i}} = 0,0035$ м – толщина корпуса;

б) высота магнита

$$h_i = l_\delta = 0,061 \text{ м},$$

в) ширина магнита

$$b_i = b_\delta = 0,042 \text{ м}.$$

Эскиз дугообразного постоянного магнита приведен на рисунке 2.3.

Магнитную цепь двигателя можно разбить на пять участков с приблизительно постоянной индукцией на каждом участке: ярмо статора, зубцы якоря, ярмо якоря, воздушный зазор, технологический зазор между ярмом статора и постоянным магнитом.

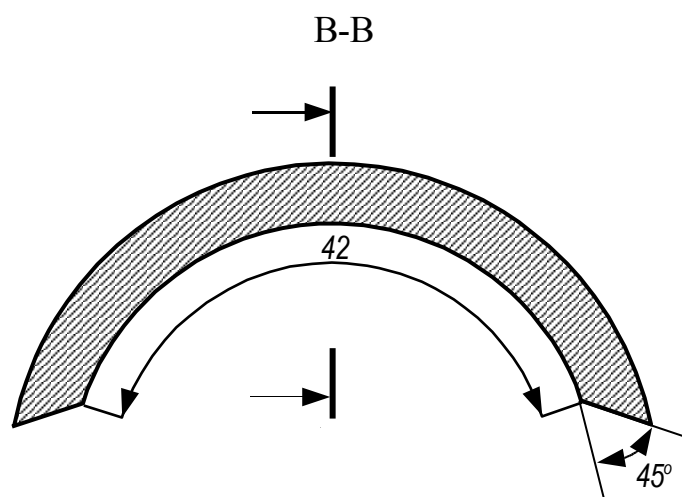
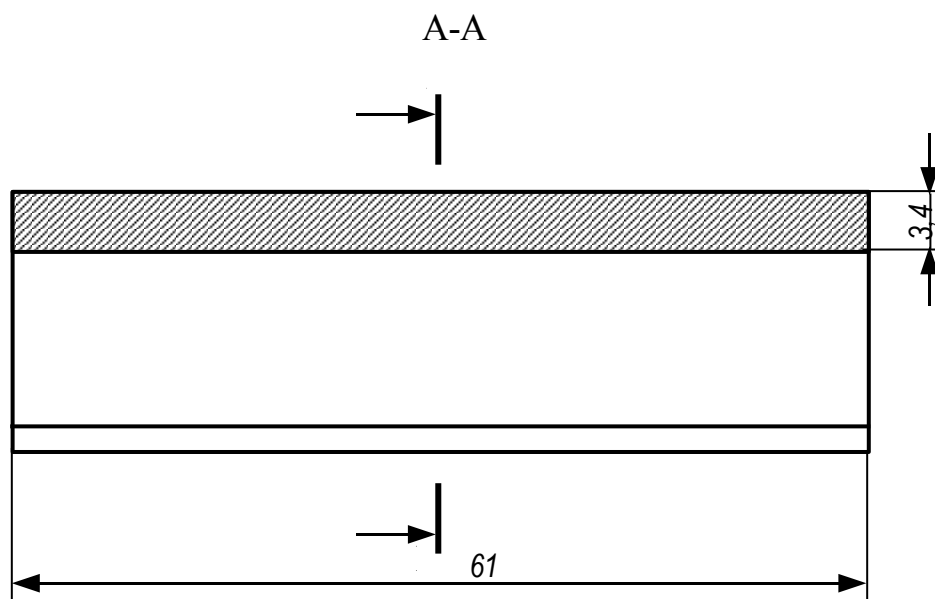


Рисунок 2.3 – Эскиз магнита

2.8 Выбор и расчет постоянных магнитов

Для расчета постоянных магнитов необходимо кривые намагничивания Ст 3 и электротехнической стали 1211 иметь в аналитической форме. Хорошее совпадение расчетной кривой и справочной кривой намагничивания дает аппроксимация кривой намагничивания выражением

$$H = (A_c \cdot B_i^2 + D_c \cdot B_i + C_c) \cdot sh(\beta_c \cdot B_i) ,$$

где B_i – значение индукции на соответствующем участке магнитной цепи;

A_c, D_c, C_c, β_c – коэффициенты, их величина определяется для каждой кривой намагничивания.

Для упрощения расчетов принимаем, что все участки магнитной системы двигателя намагничиваются по основной кривой намагничивания Ст 3 и 1211.

Для основной кривой намагничивания Ст 3 коэффициенты имеют следующие значения:

$$A_c = 10,718 ; D_c = -6,931 ; C_c = 610,718 ; \beta_c = 1,205 .$$

Для кривой намагничивания электротехнической стали 1211 коэффициенты аппроксимирующего выражения имеют следующие значения:

$$A_c = 0,05 ; D_c = 0,01 ; C_c = 7,5 ; \beta_c = 4,5 .$$

2.8.1 Удельная магнитная энергия ярма статора

$$\begin{aligned} W_{c \text{ óä}} &= \left(\frac{A_c \cdot B_c^2 + D_c \cdot B_c + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_c) - \\ &- sh(\beta_c \cdot B_c) \cdot \frac{2A_c \cdot B_c + D_c}{\beta_c^2} = \\ &= \left(\frac{10,718 \cdot 1,6^2 - 6,931 \cdot 1,6 + 610,718}{1,205} + \frac{2 \cdot 10,718}{1,205^3} \right) \times \\ &\times ch(1,205 \cdot 1,6) - sh(1,205 \cdot 1,6) \cdot \frac{2 \cdot 10,718 \cdot 1,6 - 6,931}{1,205^2} = \\ &= 1805,45 \frac{\text{Äæ}}{\text{ì}^3} . \end{aligned}$$

2.8.2 Удельная магнитная энергия зубцов якоря

$$\begin{aligned}
W_{z \text{ óä}} &= \left(\frac{A_c \cdot B_z^2 + D_c \cdot B_z + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_z) - \\
&- sh(\beta_c \cdot B_z) \cdot \frac{2A_c \cdot B_z + D_c}{\beta_c^2} = \\
&= \left(\frac{0,05 \cdot 0,95^2 + 0,01 \cdot 0,95 + 7,5}{4,5} + \frac{2 \cdot 0,05}{4,5^3} \right) \times \\
&\times ch(4,5 \cdot 0,95) - sh(4,5 \cdot 0,95) \cdot \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 0,95 + 0,01}{4,5^2} = \\
&= 60,20 \frac{\ddot{A}\text{æ}}{\text{ì}^3}.
\end{aligned}$$

2.8.3 Удельная магнитная энергия ярма якоря

$$\begin{aligned}
W_{j \text{ óä}} &= \left(\frac{A_c \cdot B_j^2 + D_c \cdot B_j + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_j) - \\
&- sh(\beta_c \cdot B_j) \cdot \left(\frac{2A_c \cdot B_j + D_c}{\beta_c^2} \right) = \\
&= \left(\frac{0,05 \cdot 0,58^2 + 0,01 \cdot 0,58 + 7,5}{4,5} + \frac{2 \cdot 0,05}{4,5^3} \right) \times \\
&\times ch(4,5 \cdot 0,58) - sh(4,5 \cdot 0,58) \cdot \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 0,58 + 0,01}{4,5^2} = \\
&= 11,41 \frac{\ddot{A}\text{æ}}{\text{ì}^3}.
\end{aligned}$$

2.8.4 Удельная магнитная энергия воздушного зазора

$$W_{\delta \text{ óä}} = \frac{1}{2\mu_0} \cdot B_{\delta}^2 = \frac{1}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,24^2 = 22930 \frac{\ddot{A}\text{æ}}{\text{ì}^3},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\ddot{A}\text{ì}}{\text{ì}}$.

2.8.5 Удельная магнитная энергия воздушного зазора стыка между станиной и магнитом

$$W_{\delta_c \text{ óä}} = \frac{1}{2\mu_0} \cdot B_{cm}^2 = \frac{1}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,24^2 = 22930 \frac{\ddot{A}\text{æ}}{\text{ì}^3},$$

где $B_{cm} = B_{\delta} = 0,24$ Тл.

2.8.6 Объем ярма статора на один полюс

$$\begin{aligned} V_c &= \frac{\pi \cdot (D_{\hat{e}i\delta i} - 2 \cdot h_{\hat{e}i\delta i} - h_c)}{2p} \cdot h_c \cdot l_c = \\ &= \frac{\pi \cdot (0,06 - 2 \cdot 0,0035 - 0,0031)}{2} \cdot 0,0031 \cdot 0,068 = \\ &= 1,651 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3, \end{aligned}$$

где $h_{\hat{e}i\delta i} = 0,0035$ м.

2.8.7 Объем зубцовой зоны якоря на один полюс

$$\begin{aligned} V_z &= \frac{\alpha_{\delta}}{2p} \cdot h_n \cdot b_z \cdot l_{\delta} \cdot z = \\ &= \frac{0,7}{2} \cdot 0,0064 \cdot 0,0021 \cdot 0,061 \cdot 15 = 4,304 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3. \end{aligned}$$

2.8.8 Объем ярма якоря на один полюс

$$\begin{aligned} V_j &= \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h_i - h_j)}{2p} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{\delta}}{2}\right) \cdot h_j \cdot l_{\delta} = \\ &= \frac{\pi \cdot (0,038 - 2 \cdot 0,0064 - 0,0091)}{2} \cdot \left(1 - \frac{0,7}{2}\right) \cdot 0,0091 \cdot 0,061 = \\ &= 9,120 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3. \end{aligned}$$

2.8.9 Объем воздушного зазора на один полюс

$$V_{\delta} = k_{\delta} \cdot \delta \cdot l_{\delta} \cdot b_{\delta} = 1,139 \cdot 0,001 \cdot 0,061 \cdot 0,042 = 2,918 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3,$$

$$\text{где } k_{\delta} = \frac{t_z + 10 \cdot \delta}{t_z - b_{\theta} + 10 \cdot \delta} = \frac{0,008 - 10 \cdot 0,001}{0,008 - 0,0022 + 0,01} = 1,139.$$

2.8.10 Объем воздушного зазора стыка на один полюс

$$V_{\delta c} = \delta_{cm} \cdot l_{\delta} \cdot b_{\delta} = 0,00004 \cdot 0,061 \cdot 0,042 = 10,25 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3,$$

где $\delta_{cm} = 0,04 \cdot 10^{-3}$ м – для восьмого квалитета.

2.8.11 Магнитная энергия, запасенная на участках магнитной цепи

$$W_c = W_{c \acute{o} \ddot{a}} \cdot V_c = 1806,45 \cdot 1,651 \cdot 10^{-5} = 0,02982 \text{ \AA}\ddot{\text{a}};$$

$$W_z = W_{z \acute{o} \ddot{a}} \cdot V_z = 60,2 \cdot 4,304 \cdot 10^{-6} = 2,591 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}\ddot{\text{a}};$$

$$W_j = W_{j \acute{o} \ddot{a}} \cdot V_j = 11,41 \cdot 9,12 \cdot 10^{-6} = 1,041 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}\ddot{\text{a}};$$

$$W_\delta = W_{\delta \acute{o} \ddot{a}} \cdot V_\delta = 22930 \cdot 2,918 \cdot 10^{-6} = 0,06691 \text{ \AA}\ddot{\text{a}};$$

$$W_{\delta c} = W_{\delta c \acute{o} \ddot{a}} \cdot V_{\delta c} = 22930 \cdot 10,25 \cdot 10^{-8} = 0,00235 \text{ \AA}\ddot{\text{a}}.$$

2.8.12 Полная магнитная энергия магнитной цепи электродвигателя

$$\begin{aligned} W &= W_c + W_z + W_j + W_\delta + W_{\delta c} = \\ &= 0,02982 + 2,591 \cdot 10^{-4} + 1,041 \cdot 10^{-4} + 0,06691 + 0,00235 = \\ &= 0,09944 \text{ \AA}\ddot{\text{a}}. \end{aligned}$$

2.8.13 Предварительный объем магнита на один полюс

$$V'_i = l'_i \cdot b_i \cdot h_i = 0,0034 \cdot 0,042 \cdot 0,061 = 8,71 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

2.8.14 Удельная магнитная энергия, отдаваемая постоянным магнитом объемом V'_m во внешнюю цепь электродвигателя

$$(B \cdot H) = \frac{W \cdot \sigma}{V'_i} = \frac{0,09944 \cdot 1,12}{8,71 \cdot 10^{-6}} = 12,87 \frac{\text{ê}\ddot{\text{A}}}{\text{ì}^3}.$$

2.8.15 Значение координаты рабочей точки постоянного магнита по напряженности магнитного поля

$$H'_d = \frac{(B \cdot H)}{B'_d} = \frac{12,87}{0,24} = 53,62 \frac{\text{ê}\ddot{\text{A}}}{\text{ì}},$$

где $B'_d = B_\delta = 0,24$ Тл.

По величине $B_i = B_\delta = 0,24$ Тл и полученному значению $H'_d = 53,62 \frac{\hat{A}}{i}$ выбираем по справочным данным приложения Ж марку магнита 18БА300 ГОСТ 24063 – 80 с параметрами: $H_d = 110 \frac{\hat{A}}{i}$; $B_d = 0,16$ Тл; $B_r = 0,32$ Тл.

2.8.16 Уточненное значение напряженности магнитного поля постоянного магнита в рабочей точке

$$H_i = \frac{(B_r - B_i)}{(B_r - B_d)} \cdot H_d = \frac{(0,32 - 0,24)}{(0,32 - 0,16)} \cdot 110 = 55 \frac{\hat{A}}{i}.$$

На рисунке 2.4 приведена кривая размагничивания выбранной марки магнита 18БА300.

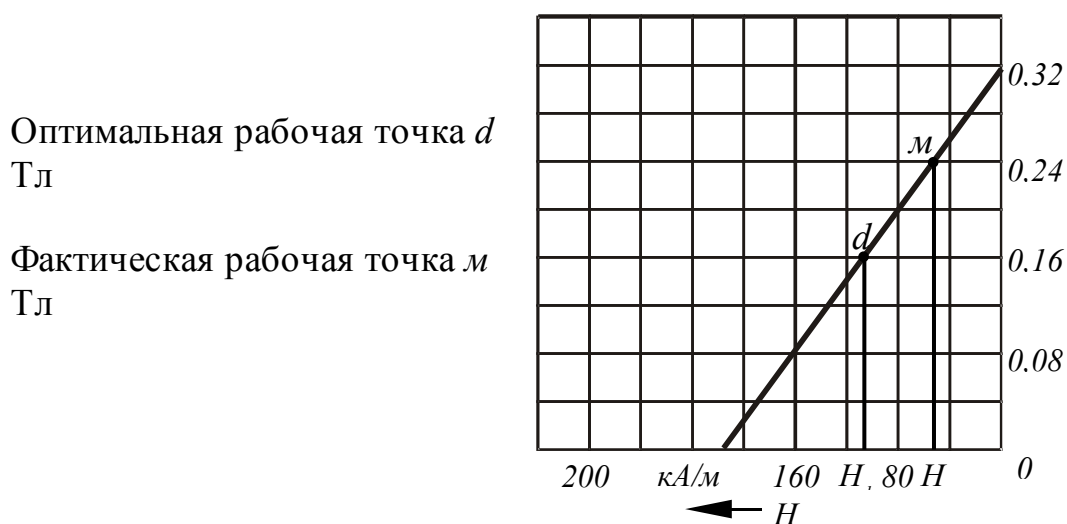


Рисунок 2.4 – Кривая размагничивания феррит бариевого магнита 18БА300

2.8.17 Размагничивающее действие поля якоря

Определим действие поля якоря на положение рабочей точки магнита (m) при прямолинейной коммутации и когда щетки находятся на геометрической нейтрали.

а) напряженность магнитного поля и индукции в рабочей точке магнита на сбегавшем краю полюса

$$H'_i = H_i + I_{ag} = 55 + 39,77 = 94,77 \frac{\hat{A}}{i},$$

где $H_{ag} = \frac{b_{\delta} \cdot A}{2 \cdot l'_i} = \frac{0,042 \cdot 6439}{2 \cdot 0,0034} = 39,77 \frac{\hat{e}A}{i}$;

$$B'_i = B_r - \frac{(B_r - B_d)}{H_d} \cdot H'_i = 0,32 - \frac{(0,32 - 0,16)}{110} \cdot 94,77 = 0,182 \text{ Тл},$$

б) напряженность магнитного поля и индукция в рабочей точке магнита на набегающем краю полюса

$$H''_i = I_i - I_{ag} = 55 - 39,77 = 15,23 \frac{\hat{e}A}{i},$$

$$B''_i = B_r - \frac{(B_r - B_d)}{H_d} \cdot H''_i = 0,32 - \frac{(0,32 - 0,16)}{110} \cdot 15,23 = 0,298 \text{ Тл}.$$

2.8.18 Удельная магнитная энергия участков магнитной цепи переходного слоя под сбегающим и набегающим краями полюса

$$W'_{\delta \text{ } \acute{o} \acute{a}} = \frac{1}{2\mu_0} \cdot (B'_\delta)^2 = \frac{1}{2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,182^2 = 13186,3 \frac{\text{Äæ}}{i^3},$$

где $B'_\delta = B'_i = 0,182 \text{ Тл};$

$$W''_{\delta \text{ } \acute{o} \acute{a}} = \frac{1}{2\mu_0} \cdot (B''_\delta)^2 = \frac{1}{2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,298^2 = 35352 \frac{\text{Äæ}}{i^3},$$

где $B''_\delta = B''_i = 0,298 \text{ Тл};$

$$\begin{aligned} W'_{z \text{ } \acute{o} \acute{a}} &= \left(\frac{A_c \cdot (B'_z)^2 + D_c \cdot B'_z + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B'_z) - \\ &- sh(\beta_c \cdot B'_z) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B'_z + D_c}{\beta_c^2} = \\ &= \left(\frac{0,05 \cdot 0,73^2 + 0,01 \cdot 0,73 + 7,5}{4,5} + \frac{2 \cdot 0,05}{4,5^3} \right) \tilde{n}h(4,5 \cdot 0,73) - \\ &- sh(4,5 \cdot 0,73) \cdot \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 0,73 + 0,01}{4,5^2} = 22,34 \frac{\text{Äæ}}{i^3}, \end{aligned}$$

где $B'_z = \frac{B'_\delta \cdot t_z}{k_c \cdot b_z} = \frac{0,182 \cdot 0,008}{0,95 \cdot 0,0021} = 0,73 \text{ Тл};$

$$\begin{aligned}
W''_{z \acute{o} \ddot{a}} &= \left(\frac{A_c \cdot (B''_z)^2 + D_c \cdot B''_z + C_c + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3}}{\beta_c} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B''_z) - \\
&- sh(\beta_c \cdot B''_z) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B''_z + D_c}{\beta_c^2} = \\
&= \left(\frac{0,05 \cdot 1,19^2 + 0,01 \cdot 1,19 + 7,5 + \frac{2 \cdot 0,05}{4,5^3}}{4,5} \right) \cdot ch(4,5 \cdot 1,19) - \\
&- sh(4,5 \cdot 1,19) \cdot \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 1,19 + 0,01}{4,5^2} = 177,78 \frac{\ddot{A} \ddot{x}}{i^3},
\end{aligned}$$

где $B''_z = \frac{B''_\delta \cdot t_z}{k_c \cdot b_z} = \frac{0,298 \cdot 0,008}{0,95 \cdot 0,0021} = 1,19$ ТЛ;

$$\begin{aligned}
W'_{j \acute{o} \ddot{a}} &= \left(\frac{A_c \cdot (B'_j)^2 + D_c \cdot B'_j + C_c + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3}}{\beta_c} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B'_j) - \\
&- sh(\beta_c \cdot B'_j) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B'_j + D_c}{\beta_c^2} = \\
&= \left(\frac{0,05 \cdot 0,44^2 + 0,01 \cdot 0,44 + 7,5 + \frac{2 \cdot 0,05}{4,5^3}}{4,5} \right) ch(4,5 \cdot 0,44) - \\
&- sh(4,5 \cdot 0,44) \cdot \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 0,44 + 0,01}{4,5^2} = 6,16 \frac{\ddot{A} \ddot{x}}{i^3},
\end{aligned}$$

где $B'_j = \frac{B'_\delta \cdot h_i \cdot b_i}{2 \cdot k_c \cdot h_j \cdot l_\delta} = \frac{0,182 \cdot 0,061 \cdot 0,042}{2 \cdot 0,95 \cdot 0,0091 \cdot 0,061} = 0,44$ ТЛ;

$$\begin{aligned}
W''_{j \acute{o} \ddot{a}} &= \left(\frac{A_c \cdot (B''_j)^2 + D_c \cdot B''_j + C_c + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3}}{\beta_c} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B''_j) - \\
&- sh(\beta_c \cdot B''_j) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B''_j + D_c}{\beta_c^2} = \\
&= \left(\frac{0,05 \cdot 0,72^2 + 0,01 \cdot 0,72 + 7,5 + \frac{2 \cdot 0,05}{4,5^3}}{4,5} \right) ch(4,5 \cdot 0,72) - \\
&- sh(4,5 \cdot 0,72) \cdot \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 0,72 + 0,01}{4,5^2} = 21,37 \frac{\ddot{A} \ddot{x}}{i^3},
\end{aligned}$$

где $B''_j = \frac{B''_\delta \cdot h_i \cdot b_i}{2 \cdot k_c \cdot h_j \cdot l_\delta} = \frac{0,298 \cdot 0,061 \cdot 0,042}{2 \cdot 0,95 \cdot 0,0091 \cdot 0,061} = 0,72$ ТЛ.

2.8.19 Магнитная энергия переходного слоя магнитной цепи при размагничивающем действии поля якоря

$$\begin{aligned} W_{\delta \ z j} &= 0,5 \cdot [(W'_{\delta \ \acute{o}\ddot{a}} + W''_{\delta \ \acute{o}\ddot{a}}) \cdot V_{\delta} + (W'_{z \ \acute{o}\ddot{a}} + W''_{z \ \acute{o}\ddot{a}}) \cdot V_z + \\ &+ (W'_{j \ \acute{o}\ddot{a}} + W''_{j \ \acute{o}\ddot{a}}) \cdot V_j] = 0,5[(13186,3 + 35352) \cdot 2,918 \cdot 10^{-6} + \\ &+ (22,34 + 177,78) \cdot 4,304 \cdot 10^{-6} + (6,16 + 21,37) \cdot 9,12 \cdot 10^{-6}] = \\ &= 0,0713 \text{ \AA}\ddot{\text{a}}. \end{aligned}$$

2.8.20 Увеличение магнитной энергии переходного слоя от действия поля якоря

$$\begin{aligned} \Delta W &= W_{\delta \ z j} - W_{\delta} - W_z - W_j = \\ &= 0,0713 - 0,06691 - 2,591 \cdot 10^{-4} - 1,041 \cdot 10^{-4} = 0,0041 \text{ \AA}\ddot{\text{a}}. \end{aligned}$$

2.8.21 Требуемый объем магнита, обеспечивающий заданный магнитный поток при нагрузке

$$V_i = \frac{(W + \Delta W)}{B_i \cdot H_i} \cdot \sigma = \frac{(0,09944 + 0,0041)}{0,24 \cdot 55000} \cdot 1,12 = 8,785 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

2.8.22 Уточненное значение длины магнита

$$l_i = \frac{V_i}{b_i \cdot h_i} = \frac{8,785 \cdot 10^{-6}}{0,042 \cdot 0,061} = 0,00343 \text{ м}.$$

Отличие размера составляет $\left| \frac{l_i - l'_i}{l_i} \right| = \left| \frac{0,00343 - 0,0034}{0,00343} \right| = 0,009$ или

0,9%, что допустимо. Принимаем $l_i = 0,0034 \text{ м}$.

2.9 Потери и коэффициент полезного действия

2.9.1 Электрические потери в обмотке якоря

$$P_{y\dot{a}} = I^2 \cdot R_a = 0,985^2 \cdot 19,18 = 18,6 \text{ Вт}.$$

2.9.2 Электрические потери в щетках

$$P_{y\dot{u}} = I \cdot \Delta U_{\dot{u}} \cdot \delta = 0,985 \cdot 1,27 \cdot 1 = 1,25 \text{ Вт}.$$

2.9.3 Масса стали ярма якоря

$$\begin{aligned} m_j &= 7,8 \cdot 10^3 \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h_n)^2}{4} \cdot k_c \cdot l_\delta = \\ &= 7,8 \cdot 10^3 \frac{\pi \cdot (0,038 - 2 \cdot 0,0064)^2}{4} \cdot 0,95 \cdot 0,061 = 0,23 \text{ кг} . \end{aligned}$$

2.9.4 Масса стали зубцов якоря

$$\begin{aligned} m_z &= 7,8 \cdot 10^3 \cdot k_c \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 - S_n \cdot z \right) \cdot l_\delta - m_j = \\ &= 7,8 \cdot 10^3 \cdot 0,95 \left(\frac{1}{4} \pi \cdot 0,038^2 - 1,625 \cdot 10^{-5} \cdot 15 \right) \cdot 0,061 - 0,23 = 0,17 \text{ кг} . \end{aligned}$$

2.9.5 Магнитные потери в ярме якоря

$$P_j = m_j \cdot \rho_j = 0,23 \cdot 5,61 = 1,29 \text{ Вт},$$

где $\rho_j = 2,3 \cdot 3,3 \left(\frac{91,67}{50} \right)^{1,3} \cdot 0,58^2 = 5,61 \frac{\text{А} \cdot \text{д}}{\text{е} \cdot \text{а}}$;
 $\beta = 1,3$;
 $\rho_{1,0/50} = 3,3 \frac{\text{А} \cdot \text{д}}{\text{е} \cdot \text{а}}$ – удельные потери, их значение берут из приложения И.

2.9.6 Магнитные потери в зубцах якоря

$$P_z = m_z \cdot \rho_z = 0,17 \cdot 15,06 = 2,56 \text{ Вт},$$

где $\rho_z = 2,3 \cdot 3,3 \left(\frac{91,67}{50} \right)^{1,3} \cdot 0,95^2 = 15,06 \frac{\text{А} \cdot \text{д}}{\text{е} \cdot \text{а}}$.

2.9.7 Потери в стали якоря

$$P_c = P_j + P_z = 1,29 + 2,56 = 3,85 \text{ Вт}.$$

2.9.8 Механические потери в электродвигателе

а) потери на трение щеток о коллектор

$$P_{\dot{o} \dot{u}} = \mu_m \cdot \rho_{\dot{u}} \cdot \sum S_{\dot{u}} \cdot V_{\dot{e}} = 0,25 \cdot 2,5 \cdot 10^4 \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot 8,35 = 2,1 \text{ Вт} ,$$

где для щетки марки ЭГ2А $\mu_m = 0,25$; $\rho_{\dot{u}} = 2,5 \cdot 10^4 \frac{\text{I}}{\text{i}^2}$,

б) потери в подшипниках

$$D_{\dot{o} \dot{i}} = k_i \cdot \dot{o}_{\dot{a}} \cdot \dot{i}_{\dot{iii}} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 0,52 \cdot 5500 \cdot 10^{-3} = 8,6 \text{ Вт},$$

где $k_i = 3$;

$$m_o = 8,9 \cdot 10^3 \cdot N \cdot g \cdot l_{a \text{cp}} = 8,9 \cdot 10^3 \cdot 1560 \cdot 0,0491 \cdot 10^{-6} \cdot 0,111 = 0,077 \text{ кг};$$

$$\begin{aligned} m_k &= 8,9 \cdot 10^3 \cdot l_k \left[\frac{\pi}{4} \left(D_k^2 - \left(\frac{D_k - 2D_o}{3} \right)^2 \right) - \beta_{\dot{e}} \cdot k \left(\frac{D_k - D_o}{3} \right) \right] = \\ &= 8,9 \cdot 10^3 \cdot 0,01 \cdot \left[\frac{\pi}{4} \cdot \left(0,029^2 - \left(\frac{0,029 - 2 \cdot 0,007}{3} \right)^2 \right) - \right. \\ &\quad \left. - 0,0007 \cdot 30 \cdot \left(\frac{0,029 - 0,007}{3} \right) \right] = 0,043 \text{ кг}; \end{aligned}$$

$$m_a = m_j + m_z + m_o + m_k = 0,23 + 0,17 + 0,077 + 0,043 = 0,52 \text{ кг};$$

в) вентиляционные потери

$$P_{\dot{o} \dot{a}} = 2 \cdot D^3 \cdot n_{\dot{iii}}^3 \cdot l_{\dot{\delta}} \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 0,038^3 \cdot 5500^3 \cdot 0,061 \cdot 10^{-6} = 1,1 \text{ Вт}.$$

Полные механические потери в машине

$$P_{i\dot{o}} = D_{\dot{o} \dot{u}} + D_{\dot{o} \dot{i}} + D_{\dot{o} \dot{a}} = 2,1 + 8,6 + 1,1 = 11,8 \text{ Вт}.$$

2.9.9 Добавочные потери

$$D_{\dot{a}} = 0,01 \cdot U_{\dot{iii}} \cdot I = 0,01 \cdot 110 \cdot 0,985 = 1,1 \text{ Вт}.$$

2.9.10 Сумма потерь

$$\sum D = D_{\dot{y} \dot{a}} + D_{\dot{y} \dot{u}} + D_{\dot{n}} + D_{i\dot{o}} + D_{\dot{a}} = 18,6 + 1,25 + 3,85 + 11,8 + 1,1 = 36,6 \text{ Вт}.$$

2.9.11 Потребляемая двигателем мощность

$$D_1 = U_{\dot{iii}} \cdot I = 110 \cdot 0,985 = 108,35 \text{ Вт}.$$

2.9.12 Полезная мощность на валу электродвигателя

$$P_2 = P_1 - \sum P = 108,35 - 36,6 = 71,75 \text{ Вт.}$$

2.9.13 Коэффициент полезного действия электродвигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \% = \frac{71,75}{108,35} \cdot 100 = 66,2 \% .$$

2.9.14 Рабочие характеристики электродвигателя

Магнитный поток и магнитная индукция в воздушном зазоре при расчете рабочих характеристик по величине принимаются постоянными, так как

$$\frac{B'_i + B''_i}{2} = \frac{0,182 + 0,298}{2} = 0,24 \text{ Тл,}$$

то есть размагничивающее действие реакции якоря при номинальной нагрузке незначительное.

Результаты расчета рабочих характеристик электродвигателя приведены в таблице 2.1.

В режиме холостого хода

$$\begin{aligned} P_2 &= 0; \quad M = 0; \quad \eta = 0; \\ n_0 &= 6636 \frac{\hat{a}}{\hat{e}i}; \quad I_0 = 0,19 \text{ А}; \\ P_0 &= 20,7 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Рабочие характеристики электродвигателя приведены на рисунке 2.5.

2.9.15 Кратность пускового момента

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \frac{57 \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{\dot{u}}}{U_{\dot{m}}}\right) \cdot U_{\dot{m}} \cdot I_{\dot{m}} \cdot 10^6}{\pi \cdot D^2 (\lambda + k_p) \cdot A \cdot j} = \\ &= \frac{57 \cdot \left(1 - \frac{1,25}{110}\right) \cdot 110 \cdot 0,97 \cdot 10^6}{\pi \cdot 0,038^2 (1,6 + 1,2) \cdot 6439 \cdot 10,03 \cdot 10^6} = 7,3 \cdot \end{aligned}$$

2.9.16 Электромеханическая постоянная времени электродвигателя

$$T_i = \frac{J \cdot \ddot{i}_{i\ddot{i}}^2 \cdot 10^{-2}}{9,2 \cdot \delta \cdot \dot{i} \cdot D_{i\ddot{i}}} = \frac{1,02 \cdot 10^{-3} \cdot 5640^2 \cdot 10^{-2}}{9,2 \cdot 7,3 \cdot 70} = 0,07 \text{ с,}$$

где $J = 8 \cdot 10^3 \cdot D^4 \cdot l_\delta = 8 \cdot 10^3 \cdot 0,038^4 \cdot 0,061 = 1,02 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Таблица 2.1

Расчетная величина	Ед.изм. физ. вел.	$0,2 \cdot I$	$0,3 \cdot I$	$0,6 \cdot I$	$0,8 \cdot I$	$0,98 \cdot I$	I	$1,1 \cdot I$
I	А	0,19	0,31	0,62	0,83	0,97	0,985	1,1
$\Delta U_{\dot{i}}$	В	0,245	0,4	0,8	1,07	1,25	1,27	1,42
$\Delta U = I \cdot R_a + \Delta U_{\dot{i}}$	В	3,89	6,35	12,69	16,99	19,85	20,16	22,52
$E = U_{i\ddot{i}} - \Delta U$	В	106,11	103,65	97,31	93,01	90,15	89,84	87,48
B_δ	Тл	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
\hat{O}_δ	Вб $\cdot 10^{-4}$	6,15	6,15	6,15	6,15	6,15	6,15	6,15
$n = \frac{60 \cdot a \cdot E}{p \cdot N \cdot \hat{O}_\delta}$	об/мин	6636	6482	6086	5817	5638	5619	5471
f_2	Гц	110,6	108	101,4	96,95	94	93,6	91,2
V_a	м/с	13,2	12,9	12,1	11,6	11,21	11,17	10,9
V_k	м/с	10,1	9,8	9,2	8,8	8,6	8,53	8,3
$P_{\dot{y}\dot{a}}$	Вт	0,69	1,84	7,37	13,21	18,05	18,6	23,21
$P_{\dot{y}\dot{i}}$	Вт	0,05	0,12	0,5	0,89	1,21	1,25	1,56
$D_{\dot{n}}$	Вт	4,92	4,77	4,39	4,14	3,98	3,95	3,82
$D_{i\delta}$	Вт	14,87	14,41	13,34	12,63	12,17	12,13	11,75
$D_{\dot{a}}$	Вт	0,21	0,34	0,68	0,91	1,07	1,1	1,21
$\sum P$	Вт	20,73	21,48	26,28	31,78	36,48	37,03	41,55
$P_1 = U_{i\ddot{i}} \cdot I$	Вт	20,9	34,1	68,2	91,3	106,7	108,35	121
$P_2 = P_1 - \sum P$	Вт	0	12,62	41,92	59,52	70,2	71,32	79,45
$M = 9,57 \cdot \frac{P_2}{n}$	Н·м	0	0,019	0,066	0,098	0,119	0,121	0,139
$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100$	%	0	37	61,5	65,2	65,8	65,8	65,7

По данным, приведенным в таблице 2.1, строим при $U = U_{i\ddot{i}}$ рабочие характеристики, которые приведены на рисунке 2.1 и для заданного значения полезной номинальной мощности $P_{ном} = 70$ Вт определяем номинальные данные: $I_{i\ddot{i}} = 0,97 \text{ А}$; $M_{i\ddot{i}} = 0,12 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $n_{i\ddot{i}} = 5640 \text{ об/мин}$; $\eta_{i\ddot{i}} = 66\%$.

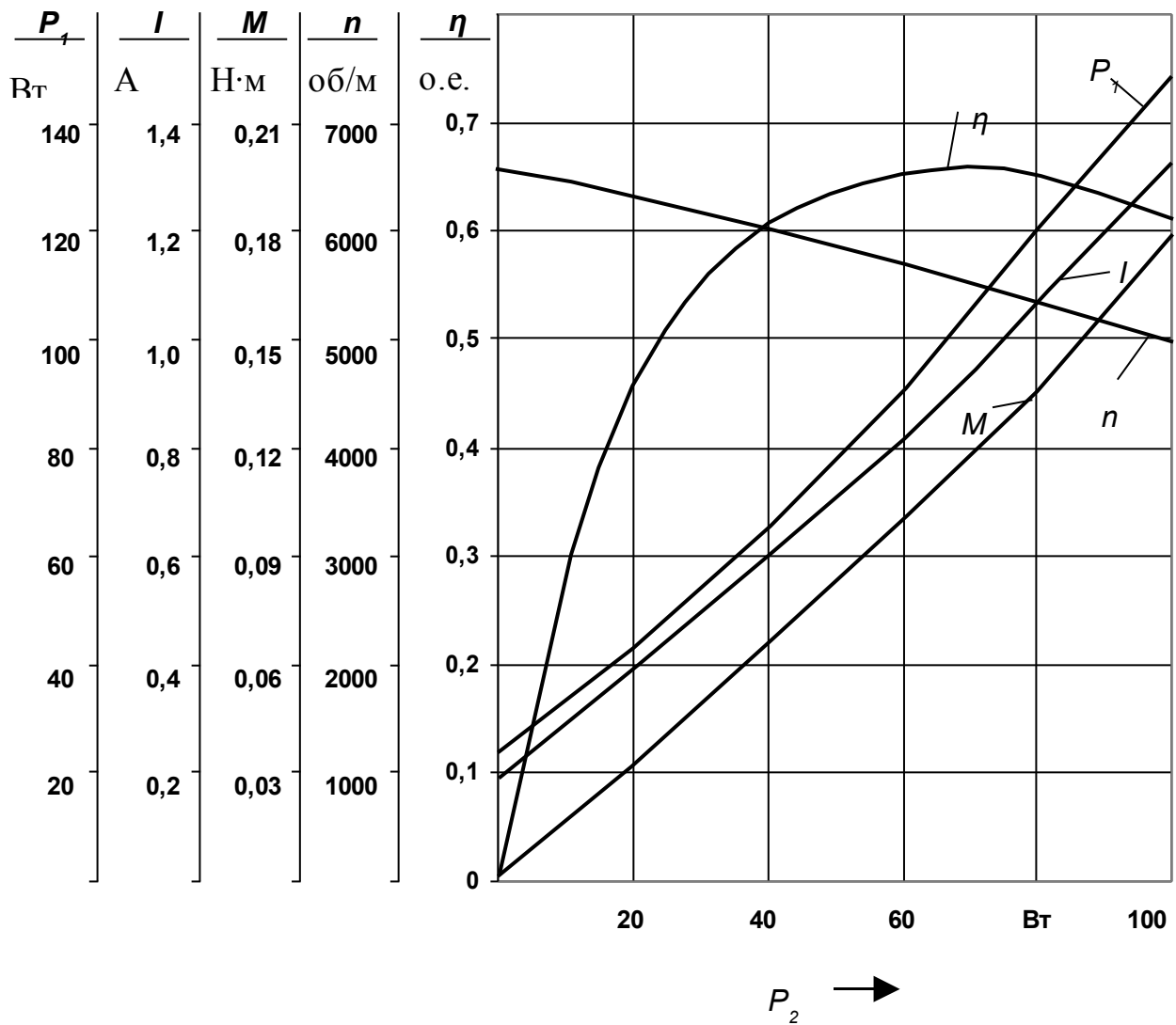


Рисунок 2.5 – Рабочие характеристики электродвигателя постоянного тока

2.10 Тепловой расчет электродвигателя

2.10.1 Превышение температуры якоря над температурой окружающей среды при кратковременном режиме работы электродвигателя

,

где

;

;

М ;

;

М ;

;

;

;

.

с ;

с .

Условие выполняется,

так как .

Таким образом, превышение температуры обмотки якоря ниже предельно допустимого значения температуры для класса изоляции “В”.

2.11 Данные спроектированного двигателя постоянного тока малой мощности

Исполнение по степени защиты	– IP
Исполнение по способу охлаждения	– IC 0040
Режим работы	– S2 – 20
Способ возбуждения	– от постоянных магнитов
Класс изоляции	– В

Диаметр корпуса

– 0,06 м

Номинальные данные	Условное обозначение	Един. измер.	Численное значение
Мощность	$P_{ном}$	Вт	70
Частота вращения	$n_{ном}$	об/мин	5640
Напряжение	$U_{ном}$	В	110
Ток	$I_{ном}$	А	0,97
Момент	$M_{ном}$	Н·м	0,12
КПД	$\eta_{ном}$	%	66
Размеры якоря			
Диаметр якоря	D	м	0,038
Расчетная длина якоря	l_{δ}	м	0,061
Диаметр вала	D_0	м	0,007
Отношение длины якоря к его диаметру	λ	–	1,6
Число пазов	z	–	15
Большой диаметр паза	b_{n1}	мм	4,6
Меньший диаметр паза	b_{n2}	мм	3,9
Высота паза	h_n	мм	6,4
Высота шлица	$h_{ш}$	мм	0,5

Ширина шлица	$b_{ш}$	мм	2,2
Ширина зубца	b_z	мм	2,1
Толщина листа якоря	–	мм	0,5
Марка стали	1211	–	
Размеры станины			
Внешний диаметр станины	D_c	м	0,053
Внутренний диаметр станины	d_c	м	0,0468
Длина станины	l_c	м	0,068
Высота станины	h_c	м	0,0031
Марка стали	Ст3	–	

Размеры магнита и зазора			
Длина магнита	l_m	<i>м</i>	0,0034
Высота магнита	h_m	<i>м</i>	0,0061
Ширина магнита	b_m	<i>м</i>	0,042
Полюсное деление	τ	<i>м</i>	0,06
Коэффициент полюсного перекрытия	α_δ	–	0,7
Число полюсов	$2p$	–	2
Длина воздушного зазора	δ	<i>мм</i>	1
Марка магнита	<i>18БА300</i>		
Размеры коллектора и щетки			
Диаметр коллектора	D_k	<i>м</i>	0,029
Число коллекторных пластин	k	–	30
Длина коллектора	l_k	<i>м</i>	0,01
Ширина коллекторной пластины	β_k	<i>мм</i>	2,3
Ширина изоляционной пластины	β_u	<i>мм</i>	0,7
Длина щетки	$a_{щ}$	<i>мм</i>	5
Ширина щетки	$b_{щ}$	<i>мм</i>	4
Марка щетки	<i>ЭГ2А</i>		

Обмотка якоря			
Тип обмотки	<i>петлевая</i>	–	
Число параллельных ветвей	$2a$	–	2
Число проводников обмотки	N	–	1560
Число витков в секции	ω_c	–	26
Диаметр неизолированного провода	d	<i>мм</i>	0,25
Диаметр изолированного провода	$d_{из}$	<i>мм</i>	0,285
Сечение провода обмотки якоря	g	<i>мм²</i>	0,0491
Средняя длина витка	$2l_{a\text{cp}}$	<i>м</i>	0,222
Сопротивление обмотки якоря при 20 °С	R_{a20}	<i>Ом</i>	15,47
Марка провода	<i>ПЭТВ</i>		
Электромагнитные нагрузки			
Индукция в воздушном зазоре	B_δ	<i>Тл</i>	0,24
Магнитный поток под полюсом	Φ_δ	<i>Вб</i>	$6,15 \cdot 10^{-4}$
Индукция в ярме якоря	B_j	<i>Тл</i>	0,58
Индукция в зубце якоря	B_z	<i>Тл</i>	0,95
Индукция в станине	B_c	<i>Тл</i>	1,6
Магнитная энергия магнита	W	<i>Дж</i>	0,1035
Токовая линейная нагрузка	A	<i>А/м</i>	6439

Плотность тока в обмотке якоря	j	A/m^2	$10,03 \cdot 10^{-6}$
Плотность тока для щетки	$j_{щ}$	A/m^2	$4,9 \cdot 10^4$
Превышение температуры обмотки якоря	$\Delta \vartheta_{акр}$	$^{\circ}C$	59,1
Электромеханическая постоянная времени	T_m	c	0,07

Масса якоря, коллектора и станины			
Масса обмотки якоря	m_o	кг	0,077
Масса коллектора	m_k	кг	0,043
Масса якоря	m_a	кг	0,52
Масса магнитов	m_m	кг	0,088
Масса станины	m_c	кг	0,26
Масса статора	$m_{ст}$	кг	0,35
Габаритные и установочные размеры двигателя			
Осевой габаритный размер	B	мм	142
Радиальный габаритный размер	G	мм	78
Длина посадочной поверхности двигателя	C	мм	70
Диаметр выходного конца вала	d_o	мм	6
Длина выходного конца вала	l_o	мм	16

На рисунках 2.6 – 2.8 приведены общий вид двигателя постоянного тока: продольный и поперечный разрезы двигателя и спецификация.

A–A

5

11

Рисунок 2.7 – Общий вид двигателя постоянного тока (поперечный разрез)

16

12

Формат	Фона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				<u>Документация</u>		
A1				Сборочный чертеж		
				<u>Сборочные единицы</u>		
A1		1		Якорь	1	
A1		2		Коллектор	1	
A1		3		Щёточный узел	2	
A1		4		Клемма	2	
				<u>Детали</u>		
A1		5		Постоянный магнит	2	
A1		6		Станина	1	
A1		7		Корпус	1	
A1		8		Крышка передняя	1	
A1		9		Крышка задняя	1	
A1		10		Вал	1	
A1		11		Скоба	2	
A1		12		Клин	15	

					<i>Сборочный чертёж</i>	<i>Листы</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ до- кум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		2

Рисунок 2.8 – Спецификация (второй лист)

Перечень условных буквенных обозначений физических величин

- ток якоря, А ;
- ток двигателя, А ;
- номинальная мощность электродвигателя, Вт ;
- коэффициент полезного действия двигателя;
- номинальное напряжение электродвигателя, В ;
- электромагнитная мощность, Вт ;
- диаметр якоря, м ;
- коэффициент полюсного перекрытия;
- индукция в воздушном зазоре, Тл ;
- индукция магнита в оптимальной рабочей точке, Тл;
- предварительное значение токовой линейной нагрузки, А/м ;
- номинальная частота вращения вала, об/мин ;
- коэффициент, отношение длины магнитопровода якоря к его диаметру;
- расчетная длина якоря, м ;
- окружная скорость вращения якоря, м/с ;
- полюсное деление, м ;
- число полюсов;
- расчетная ширина полюсного наконечника, м ;
- частота перемагничивания стали, Гц ;
- число пар полюсов;
- предварительное число проводников обмотки якоря;
- число параллельных ветвей обмотки якоря;
- число пазов якоря;
- число коллекторных пластин;
- предварительное число витков в секции обмотки якоря;
- число витков в секции обмотки якоря;
- число проводников обмотки якоря;
- число проводников в пазу якоря;
- токовая линейная нагрузка А/м;
- первый частичный шаг;
- укорочение шага обмотки;

- результирующий шаг;
- шаг обмотки по коллектору;
- второй частичный шаг;
- шаг обмотки по пазам;
- укорочение шага обмотки по пазам;
- предварительное значение плотности тока в обмотке якоря, A/m^2 ;
- плотность тока в обмотке якоря, A/m^2 ;
- сечение провода обмотки якоря, m^2 ;
- диаметр неизолированного провода обмотки якоря, м ;
- диаметр изолированного провода обмотки якоря, м ;
- бóльший диаметр паза якоря, м ;
- коэффициент заполнения пакета якоря сталью;
- индукция в зубце якоря, Тл ;
- центральный угол на один паз, рад ;
- высота шлица паза якоря, м ;
- меньший диаметр паза якоря, м ;
- периметр паза, м ;
- высота паза якоря, м ;
- площадь паза якоря в свету, m^2 ;
- коэффициент скоса пазов якоря;
- зубцовое деление якоря, м ;
- площадь сечения пазовой изоляции, m^2 ;
- толщина пазовой изоляции, м ;
- ширина клина, м ;
- высота клина, м ;
- площадь сечения клина, m^2 ;
- площадь сечения паза, заполненного обмоткой, m^2 ;
- коэффициент заполнения паза проводниками;
- ширина зубца якоря, м ;
- средняя длина полувитка секции обмотки якоря, м ;
- прямолинейный отрезок лобовой части обмотки якоря, м ;
- сопротивление обмотки якоря при расчетной температуре, Ом ;
- коэффициент увеличения сопротивления обмотки якоря при увеличении температуры;
- сопротивление обмотки якоря при температуре $20^0 C$;

- расчетная температура обмотки якоря, $^{\circ}\text{C}$;
- предварительный диаметр коллектора, м ;
- относительное коллекторное деление;
- число перекрываемых щеткой коллекторных пластин;
- коллекторное деление, м ;
- ширина коллекторной пластины, м ;
- ширина изоляционной пластины коллектора, м ;
- окружная скорость коллектора, м/с ;
- площадь сечения щетки, м^2 .
- плотность тока для щетки, $\text{А}/\text{м}^2$;
- предварительная ширина щетки, м ;
- предварительная длина щетки, м ;
- ширина щетки, м ;
- длина щетки, м ;
- высота щетки, м ;
- активная длина коллектора, м ;
- полная длина коллектора, м ;
- ЭДС обмотки якоря, В ;
- падение напряжения на щетках, В ;
- магнитный поток в воздушном зазоре под одним полюсом, Вб ;
- ширина коммутационной зоны, м ;
- магнитная проводимость пазового рассеяния, $\text{Вб}/\text{А}\cdot\text{м}$;
- длина лобовых частей обмотки якоря, м ;
- ширина шлица паза якоря, м ;
- реактивная ЭДС в короткозамкнутой секции, В ;
- ЭДС поля в короткозамкнутой секции, В ;
- результирующая ЭДС в секции обмотки якоря, В ;
- допустимая минимальная величина воздушного зазора под полюсом, м ;
- длина воздушного зазора под полюсом, м ;
- высота ярма якоря, м ;
- диаметр вала якоря, м ;
- индукция в ярме якоря, Тл ;
- площадь сечения станины, м^2 ;
- коэффициент рассеяния;

- индукция в станине, Тл ;
- длина станины, м ;
- высота станины, м ;
- внешний диаметр корпуса электродвигателя, м ;
- односторонняя толщина корпуса, м ;
- предварительная длина магнита, м ;
- высота магнита, м ;
- ширина магнита, м ;
- напряженность магнитного поля, А/м ;
- коэффициент;
- коэффициент;
- коэффициент;
- коэффициент;
- удельная магнитная энергия ярма статора, Дж/м³ ;
- удельная магнитная энергия зубцов якоря, Дж/м³ ;
- удельная магнитная энергия ярма якоря, Дж/м³ ;
- удельная магнитная энергия воздушного зазора, Дж/м³ ;
- удельная магнитная энергия для зазора стыка, Дж/м³ ;
- магнитная постоянная, Гн/м ;
- магнитная индукция в зазоре стыка, Тл ;
- объем ярма статора, м³ ;
- объем зубцовой зоны якоря, м³ ;
- объем ярма якоря, м³ ;
- объем воздушного зазора, м³ ;
- коэффициент Картера;
- объем воздушного зазора стыка, м³ ;
- магнитная энергия статора, Дж ;
- магнитная энергия зубцов якоря, Дж ;
- магнитная энергия ярма якоря, Дж ;
- магнитная энергия воздушного зазора, Дж ;
- магнитная энергия зазора стыка, Дж ;
- магнитная энергия магнитной цепи, Дж ;
- предварительный объем магнита, м³ ;
- удельная магнитная энергия магнита, Дж/м³ ;
- индукция на поверхности магнита, Тл ;

- напряженность магнитного поля магнита, А/м ;
- остаточная индукция магнита, Тл ;
- напряженность магнитного поля магнита в оптимальной рабочей точке, А/м ;
- напряженность поперечной составляющей поля якоря, А/м ;
- магнитная энергия переходного слоя магнитной цепи, Дж ;
- изменение магнитной энергии переходного слоя магнитной цепи, Дж ;
- объем магнита, м³ ;
- длина магнита, м ;
- электрические потери в обмотке якоря, Вт ;
- электрические потери в щетках, Вт ;
- масса стали ярма якоря, кг ;
- масса стали зубцов якоря, кг ;
- магнитные потери в ярме якоря, Вт ;
- удельные потери стали ярма якоря, Вт/кг ;
- коэффициент ;
- магнитные потери в зубцах якоря, Вт ;
- удельные потери стали зубцов якоря, Вт/кг ;
- потери в стали якоря, Вт ;
- потери на трение щеток, Вт ;
- коэффициент трения;
- удельное нажатие щетки, Н/м² ;
- потери в подшипниках, Вт ;
- коэффициент;
- масса якоря, кг ;
- масса обмотки якоря, кг ;
- масса коллектора, кг ;
- вентиляционные потери, Вт ;
- добавочные потери, Вт ;
- сумма потерь, Вт ;
- потребляемая мощность, Вт ;
- полезная мощность, Вт ;
- потери холостого хода, Вт ;
- ток холостого хода двигателя, А ;

- частота вращения при холостом ходе, об/мин ;
- ЭДС обмотки якоря при холостом ходе, В ;
- индукция в воздушном зазоре при холостом ходе, Тл ;
- магнитный поток в режиме холостого хода, Вб ;
- момент на валу двигателя, Н·м ;
- номинальный ток двигателя, А ;
- номинальный момент на валу двигателя, Н·м ;
- номинальный КПД двигателя ;
- кратность пускового момента;
- коэффициент;
- электромеханическая постоянная времени, с ;
- момент инерции якоря, кг·м² ;
- превышение температуры якоря над температурой окружающей среды при продолжительном режиме работы, °С ;
- коэффициент теплоотдачи с поверхности вращающегося якоря, Вт/м²·°С ;
- коэффициент теплоотдачи с поверхности неподвижного якоря, Вт/м²·°С ;
- максимальная ширина зубца якоря, м ;
- коэффициент теплопроводности межвитковой и пазовой изоляции, Вт/м·°С ;
- общая толщина эквивалентной изоляции в пазе, м ;
- коэффициент заполнения изолированного провода медью ;
- относительные потери в обмотке якоря, Вт/м ;
- относительные потери в стали якоря, Вт/м ;
- относительные вентиляционные потери, Вт/м ;
- превышение температуры якоря над температурой окружающей среды при кратковременном режиме работы, °С ;
- длительность рабочего периода, с ;
- постоянная времени нагревания якоря, с ;
- превышение температуры якоря над температурой окружающей среды при повторно-кратковременном режиме работы, °С ;
- коэффициент;
- число циклов;
- длительность паузы, с ;
- постоянная времени охлаждения неподвижного якоря, с ;

Список использованных источников

- 1 **Шеминов, В. Г. Проектирование коллекторных двигателей постоянного тока малой мощности** / В. Г. Шеминов, Ю. П. Широков, И. А. Цырлин // Электротехника. – М., 1984. - № 9. – С. 42 – 44.
- 2 **Ермолин, Н. П. Расчет коллекторных машин малой мощности** : учеб. пособие / Н. П. Ермолин. – изд. 2-е. – Л.: Энергия, 1973. – 213 с.
- 3 **Постоянные магниты** : справочник / Под ред. Ю. М. Пятина. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1980. – 480 с.
- 4 **Проектирование электрических машин** : учеб. для вузов. – В 2-х кн.: Кн.2 / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 384 с. – ISBN 5 – 283 – 00725 – 1 (кн. 2).
- 5 **Ерунов, В.П. Магнитоэлектрический двигатель с комбинированным магнитопроводом** : дисс. на соиск. уч. степени кандидата техн. наук : шифр 05.09.01 : защищена 13.05.1987; утв. 9.09.1987 / Ерунов Василий Петрович. – Оренбург, 1987.
- 6 **Ерунов, В.П. Расчет коллекторного двигателя постоянного тока малой мощности с возбуждением постоянными магнитами** : учеб. пособие / В. П. Ерунов. – изд. 2-е, перераб. и доп. – Оренбург: ОГУ, 2002. – 109 с. – ISBN 5 – 7410 – 0596 – 9.
- 7 **Проектирование электрических машин** : учеб. для вузов. – В 2-х кн.: Кн. 1 / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев; под ред. И. П. Копылова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 464 с. – ISBN 5 – 283 – 00724 – 3 (кн.1).
- 8 **Справочник по электрическим машинам**: В 2 т. / Под ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат. 1988. – 456 с. – ISBN 5 – 283 – 00531 – 3 (т. 2).
- 9 **Жерве, Г. К. Обмотки электрических машин** / Г. К. Жерве – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 400 с. – ISBN 5 – 283 – 04458 – 0.
- 10 **Осин, И. Л. Устройство и производство электрических машин малой мощности**: учеб. пособие для СПТУ / И. Л. Осин, М. В. Антонов– М.: Высш. шк. 1988. – 215 с.: ил.

Приложение А

(справочное)

Номинальные диаметры и длины в машиностроении

по ГОСТ 6636 – 69

В стандарте установлены следующие предпочтительные ряды размеров:
R5a; *R10a*; *R20a* и *R40a*.

Таблица А.1

Ряд <i>R5a</i>	Ряд <i>R10a</i>	Ряд <i>R20a</i>	Ряд <i>R40a</i>	Ряд <i>R5a</i>	Ряд <i>R10a</i>	Ряд <i>R20a</i>	Ряд <i>R40a</i>	
0,001	0,001	0,001	0,001	0,025	0,025	0,025	0,025	
		0,002	0,002 0,003			0,028	0,028 0,030	
		0,004	0,004 0,005			0,032	0,032 0,034	
	0,004	0,006	0,006 0,007		0,032	0,032	0,036	0,036 0,038

0,008	0,008	0,008	0,008 0,009	0,04	0,040	0,040	0,040 0,042
		0,010	0,010 0,011			0,045	0,045 0,048
	0,012	0,012	0,012 0,013		0,050	0,050	0,050 0,052
		0,014	0,014 0,015			0,056	0,056 0,058
0,016	0,016	0,016	0,016 0,017	0,063	0,063	0,063	0,063 0,065
		0,018	0,018 0,019			0,071	0,071 0,075
	0,020	0,020	0,020 0,021		0,080	0,080	0,080 0,085
		0,022	0,022 0,024			0,090	0,090 0,095
0,10	0,10	0,100	0,100 0,105	0,630	0,630	0,630	0,630 0,650
		0,110	0,110 0,115			0,710	0,710 0,750
	0,12	0,120	0,120 0,130		0,800	0,800	0,800 0,850
		0,140	0,140 0,150			0,900	0,900 0,950

Продолжение таблицы А.1

Ряд <i>R5a</i>	Ряд <i>R10a</i>	Ряд <i>R20a</i>	Ряд <i>R40a</i>	Ряд <i>R5a</i>	Ряд <i>R10a</i>	Ряд <i>R20a</i>	Ряд <i>R40a</i>		
0,16	0,160	0,160	0,160 0,170	1,0	1,0	1,0	1,0 1,05		
		0,180	0,180 0,190			1,1	1,1 1,15		
	0,200	0,200	0,200 0,210		1,2	1,2	1,2 1,3		
		0,220	0,220 0,240			1,4	1,4 1,5		
	0,25	0,250	0,250		0,250 0,260	1,6	1,6	1,6	1,6 1,7
			0,280		0,280 0,300			1,8	1,8 1,9
0,320		0,320	0,320 0,340	2,0	2,0		2,0 2,1		
		0,360	0,360 0,380		2,2		2,2 2,4		

0,4	0,400	0,400	0,400 0,420	2,5	2,5	2,5	2,5 2,6
		0,450	0,450 0,480			2,8	2,8 3,0
	0,500	0,500	0,500 0,520		3,2	3,2	3,2 3,4
		0,560	0,560 0,580			3,6	3,6 3,8
4,0	4,0	4,0	4,0 4,2	25	25	25	25 26
		4,5	4,5 4,8			28	28 30
	5,0	5,0	5,0 5,2		32	32	32 34
		5,6	5,6 5,0			36	36 38
6,3	6,3	6,3	6,3 6,5	40	40	40	40 42
		7,1	7,1 7,5			45	45 48
	8,0	8,0	8,0 8,5		50	50	50 53
		9,0	9 9,5			56	56 60

Продолжение таблицы А.1

Ряд <i>R5a</i>	Ряд <i>R10a</i>	Ряд <i>R20a</i>	Ряд <i>R40a</i>	Ряд <i>R5a</i>	Ряд <i>R10a</i>	Ряд <i>R20a</i>	Ряд <i>R40a</i>		
10	10	10	10 10,5	63	63	63	63 65		
		11	11 11,5			71	71 75		
	12	12	12 13		80	80	80 85		
		14	14 15			90	90 95		
	16	16	16		16 17	100	100	100	100 105
			18		18 19			110	110 120
20		20	20 21	125	125		125 130		
		22	22 24		140		140 150		

Приложение Б

(справочное)

Обмоточные провода

Круглые медные эмалированные провода широко применяют в электромашиностроении. Они имеют небольшую толщину изоляции, в 1,5 – 2,5 раза меньшую, чем провода, покрытые эмалью и хлопчатобумажной или шелковой тканью. Это повышает теплопроводность и улучшает коэффициент заполнения паза.

Свойства изоляции проводов определяются электроизоляционными лаками. Эмали и лаки могут иметь синтетическую или масляно-смоляную основу. Более 95% всех эмалированных проводов изготавливается с применением синтетических лаков, так как лаки на масляно-смоляной основе требуют при изготовлении растительные масла.

Для производства эмалированных проводов классов нагревостойкости В, F и H (температурный индекс (ТИ) 130, 155 и 180) используются лаки на полиэфирной, полиэфироимидной, полиэфирциануратимидной и полиэфирамидной основах. Эта группа лаков является в настоящее время основой при производстве эмалированных проводов.

В таблице Б.1 приведены основные данные медных эмалированных проводов – а в таблице Б.3 – их ассортимент и размеры.

Основными типами высокопрочных эмалированных проводов являются провода ПЭВ-1 и ПЭВ-2, эмалированные винифлексовой изоляцией, и провода повышенной нагревостойкости ПЭТВ.

Круглые медные провода марок ПЭТВ-1 и ПЭТВ-2 являются основными проводами класса нагревостойкости В (ТИ 130).

Для механизированной намотки электродвигателей единых серий применяются провода марки ПЭТВ, которые имеют большую толщину изоляции и лучшие механические свойства. Провода ПЭТВМ выпускаются в диапазоне диаметров 0,25 – 1,40 мм. Несмотря на увеличение толщины изоляции в среднем на 0,01 – 0,02 мм по обе стороны, провода марки ПЭТВМ имеют такую же эластичность, что и провода ПЭТВ.

К проводам класса нагревостойкости F (ТИ 155) относятся провода марок ПЭТ-155, ПЭТП-155, ПЭТМ.

По своим электроизоляционным свойствам провода марки ПЭТ идентичны проводам ПЭТВ, но имеют повышенную стойкость к действию теплового удара.

Провода ПЭТП имеют диапазон сечений 1,6 – 11,2 мм².

Провода для механизированной намотки ПЭТМ выпускаются в диапазоне диаметров 0,8 – 1,32 мм.

Таблица Б.1 – Нагревостойкость, температурный индекс и конструктивные данные основных типов медных эмалированных проводов

Марка провода	Температурный индекс	Класс нагревостойкости	Тип эмаливой изоляции	Номинальные размеры токопроводящей жилы, мм	Двухсторонняя толщина изоляции, мм
ПЭЛ	105	А	Эмаль на масляно-смоляной основе	0,02–2,50	0,010–0,02
ПЭВ-1	105	А	Высокопрочная эмаль на поливинилацетатной основе	0,02–2,50	0,01–0,02 0,02–0,085
ПЭВ-2	105	А	То же с утолщенной изоляцией	0,02–2,50	0,025–0,090
ПЭМ-1	105	А	Высокопрочная эмаль на поливинилацетатной (поливинилформалевой) основе	0,02–2,50	0,02–0,08
ПЭМ-2	105	А	То же с утолщенной	0,06–2,50	0,025–0,085

			изоляция	0,06–0,45	0,033–0,085
ПЭВТЛ-1	120	Е	Высокопрочная эмаль на полиуретановой основе	0,05–1,60	0,015–0,07
ПЭТВЛ-2	120	Е	То же с утолщенной изоляцией	0,05–1,60	0,02–0,08
ПЭВТЛК	120	Е	Двойная эмаль на основе полиуретановых и полиамидных смол	0,05–1,60	0,03–0,05
ПЭТВ-1	130	В	Высокопрочная эмаль на полиэфирной основе (лак ПЭ-943)	0,063–2,50	0,025–0,09
ПЭТВ-2	130	В	То же (лак ПЭ-939)	0,063–2,50	0,025–0,09
ПЭТ-155 и ПЭТВ	155	Ф	Высокопрочная эмаль на полиэфироимидной основе	0,06–2,44	0,025–0,09
ПЭТ-200	200	С	Полиамидные лаки, обеспечивающие высо-	0,05–2,50	0,025–0,06

		кую механическую прочность и нагр- востойкость		
--	--	--	--	--

Таблица Б.2 – Диаметр и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм ²	Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм ²
0,08	0,1	0,00502	(0,53)	0,585	0,221
0,09	0,11	0,00636	0,56	0,615	0,246
0,1	0,122	0,00785	0,6	0,655	0,283
0,112	0,134	0,00985	0,63	0,69	0,312
0,125	0,147	0,01227	(0,67)	0,73	0,353
(0,132)	0,154	0,01368	0,71	0,77	0,396
0,14	0,162	0,01539	0,75	0,815	0,442
0,15	0,18	0,01767	0,8	0,865	0,503
0,16	0,19	0,0201	0,85	0,915	0,567
0,17	0,2	0,0227	0,9	0,965	0,636
0,18	0,21	0,0255	0,95	1,015	0,709
(0,19)	0,22	0,0284	1	1,08	0,785

0,2	0,23	0,0314	1,06	1,14	0,883
(0,212)	0,242	0,0353	1,12	1,2	0,985
0,224	0,259	0,0394	1,18	1,26	1,094
(0,236)	0,271	0,0437	1,25	1,33	1,227
0,25	0,285	0,0491	1,32	1,405	1,368
(0,265)	0,3	0,0552	1,40	1,485	1,539
0,28	0,315	0,0616	1,5	1,585	1,767
(0,3)	0,335	0,0707	1,6	1,685	2,011
0,315	0,35	0,0779	1,7	1,785	2,27
0,335	0,37	0,0881	1,8	1,895	2,54
0,355	0,395	0,099	1,9	1,995	2,83
0,375	0,415	0,1104	2	2,095	3,14
0,4	0,44	0,1257	2,12	2,22	3,53
0,425	0,465	0,1419	2,24	2,34	3,94
0,45	0,49	0,159	2,36	2,46	4,36
(0,475)	0,515	0,1772	2,5	2,6	4,91

0,5	0,545	0,1963			
-----	-------	--------	--	--	--

Примечание – Провода, размеры которых указаны в скобках, следует применять только при обосновании технико-экономической целесообразности.

**Таблица Б.3 – Диаметр и площади поперечного сечения круглых медных
эмалированных проводов марок ПЭЛ, ПЭВ-1, ПЭМ-1,
ПЭЛР-1, ПЭВТЛ-1, ПЭТ-200, ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭЛР-2, ПЭВТЛ-2,
ПНЭТ, ПЭТВ**

Номинальный диаметр голой проволоки, мм	Расчетный наружный диаметр, мм			Номинальный диаметр голой проволоки, мм	Расчетный наружный диаметр, мм		
	ПЭЛ	ПЭВ-1, ПЭМ-1, ПЭЛР-1, ПЭВТЛ-1	ПЭТ-200, ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭЛР-2, ПЭВТЛ-2, ПНЭТ, ПЭТВ		ПЭЛ	ПЭВ-1, ПЭМ-1, ПЭЛР-1, ПЭВТЛ-1	ПЭТ-200, ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭЛР-2, ПЭВТЛ-2, ПНЭТ, ПЭТВ
0,02	0,03	0,03	–	0,425	0,460	0,455	0,465
0,025	0,035	0,035	–	0,45	0,485	0,48	0,49
0,032	0,04	0,042	–	0,475	0,510	0,505	0,515
0,04	0,05	0,052	–	0,50	0,54	0,545	0,555
0,05	0,062	0,07	–	0,53	0,57	0,575	0,585
0,06	0,072	0,083	0,087	0,56	0,60	0,605	0,615
0,07	0,082	0,093	0,097	0,60	0,64	0,645	0,655
0,08	0,092	0,103	0,107	0,63	0,67	0,675	0,685
0,09	0,102	0,113	0,117	0,67	0,71	0,715	0,730
0,10	0,125	0,123	0,127	0,71	0,76	0,755	0,770
0,112	0,135	0,143	0,147	0,75	0,80	0,80	0,815

0,125	0,140	0,148	0,153	0,85	0,90	0,90	0,915
0,132	0,147	0,155	0,159	0,90	0,95	0,95	0,965
0,14	0,155	0,163	0,167	0,95	1,00	1,00	1,015
0,15	0,168	0,177	0,180	1,00	1,06	1,07	1,08
0,16	0,178	0,187	0,190	1,06	1,12	1,13	1,14
0,17	0,188	0,197	0,200	1,12	1,18	1,19	1,20
0,18	0,198	0,207	0,210	1,18	1,24	1,25	1,26
0,19	0,208	0,217	0,220	1,25	1,31	1,32	1,33
0,20	0,222	0,227	0,230	1,32	1,38	1,39	1,40
0,212	0,234	0,239	0,242	1,40	1,465	1,47	1,48
0,224	0,246	0,251	0,254	1,50	1,565	1,57	1,58
0,236	0,258	0,266	0,271	1,60	1,665	1,67	1,68
0,25	0,272	0,28	0,285	1,70	1,765	1,77	1,78
0,265	0,291	0,295	0,30	1,80	1,865	1,875	1,88
0,28	0,306	0,31	0,315	1,90	1,965	1,975	1,98
0,30	0,326	0,33	0,335	2,00	2,065	2,075	2,08
0,315	0,345	0,345	0,350	2,12	2,185	2,205	2,21
0,335	0,365	0,365	0,370	2,24	2,305	2,325	2,33

0,355	0,385	0,385	0,395	2,36	2,425	2,445	2,45
0,375	0,405	0,405	0,415	2,50	2,565	2,585	2,59
0,40	0,435	0,43	0,44				

Приложение В

(справочное)

Коэффициент заполнения пакета сталью

Таблица В.1 – Коэффициент заполнения пакета сталью k_c

Толщина листа, мм	Изоляция листов	
	оксидированных	лакированных
1	0,98	0,97
0,5	0,95	0,93
0,35	0,93	0,91
0,3	0,92	0,89
0,28	0,91	0,88

Для изготовления магнитопроводов электрических машин применяются листовая электротехническая сталь, стальное литье, листовая сталь, чугун и магнито-диэлектрики [8].

Тонколистовая электротехническая сталь по ГОСТ 21427.0-75 разделяется на 38 марок. Она изготавливается в виде рулонов, листов и резаной ленты.

Обозначения марок стали состоят из четырех цифр. Первая обозначает класс по структурному состоянию и виду прокатки, вторая – примерное содержание кремния, третья – группу по основной нормируемой характеристике. Эти три первые цифры в обозначении марки означают тип стали, а четвертая – порядковый номер типа стали.

Сталь подразделяют по структурному состоянию и виду прокатки на 3 класса: 1 – горячекатанную изотропную, 2 – холоднокатанную изотропную, 3 – холоднокатанную анизотропную с ребровой текстурой.

По содержанию кремния сталь подразделяют на 6 групп: 0 – с содержанием кремния, равном 0,4% включительно (нелегированная); 1 – с содержанием кремния от 0,4 до 0,8%; 2 – с содержанием кремния, равным 0,8 – 1,8%; 3 – с 1,8 – 2,8%; 4 – с 2,8 – 3,8%; 5 – с 3,4 – 4,8%.

По ГОСТ 21427.0-75 химический состав стали не нормируется.

По основной нормируемой характеристике стали делятся на 5 групп: 0 – удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($p_{1.7/50}$); 1 – удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц ($p_{1.5/50}$); 2 – удельные потери при магнитной индукции 1,0 Тл и частоте 400 Гц ($p_{1.0/400}$); 6 – магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$); 7 – магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности поля 10 А/м (B_{10}).

Свойства стали зависят от содержания кремния и условий ее изготовления. Сталь с низким содержанием кремния имеет меньшую относительную магнитную проницаемость и большие магнитные потери, а также большую индукцию насыщения. Стали с высоким содержанием кремния имеют меньшие потери на вихревые токи и гистерезис и высокую относительную магнитную проницаемость в слабых и средних полях. Содержание кремния снижает плотность и повышает удельное электрическое сопротивление стали.

В электротехнической промышленности широко применяются анизотропные холоднокатанные стали, имеющие в направлении проката более высокую проницаемость и меньшие потери в слабых полях, чем горячекатанные стали. В анизотропных сталях магнитные свойства вдоль прокатки и направлении, перпендикулярном прокатке, – различные.

В последние годы созданы изотропные холоднокатанные стали с кубической текстурой, имеющие высокие магнитные качества как в направлении проката, так и в перпендикулярном направлении.

Горячекатанная изотропная тонколистовая электротехническая сталь изготавливается в виде листов следующих марок: 1211, 1212, 1213, 1311, 1312, 1313, 1411, 1412, 1413, 1511, 1512, 1513, 1514, 1521, 1561, 1562, 1571 и 1572.

На электротехнические заводы листы поставляются в термически обработанном состоянии. По состоянию поверхности сталь выпускается с травленной (Т) и с нетравленной (НТ) поверхностью. Поверхность листов должна быть гладкой, без ржавчины, отслаивающей окалины, налета порошкообразных веществ, препятствующих нанесению изоляции.

На электротехническую холоднокатанную анизотропную тонколистовую сталь, изготавливаемую в виде рулонов, листов и резаной ленты, распространяется ГОСТ 21427.1-83, соответствующий стандарту СТ СЭВ 102-85. Эта сталь выпускается следующих марок: 3311, 3412, 3413, 3414, 3415, 3416, 3404, 3405 и 3406.

Сталь поставляется в термически обработанном состоянии. Сталь толщиной 0,28; 0,30 и 0,35 мм изготавливают с электроизоляционным термостойким покрытием, а сталь толщиной 0,50 мм – без электроизоляционного термостойкого покрытия или с покрытием, не ухудшающим штампуемость. Магнитные свойства стали приведены в приложении Г.

Тонколистовая холоднокатанная изотропная электротехническая сталь выпускается в виде рулонов, листов и резаной ленты и имеет следующие марки: 2011, 2012, 2013, 2111, 2112, 2211, 2212, 2311, 2312, 2411 и 2412 (ГОСТ 21427.2-83).

По точности прокатки, неплоскостности, коэффициенту заполнения подразделения те же, что и у анизотропной стали. По типу покрытия эти стали выпускаются с термостойким электроизоляционным покрытием (ЭТ), с нетермостойким (Э) и без покрытия (БП). Изотропную рулонную сталь изготавливают толщиной 0,35; 0,5; 0,65 мм и шириной 500, 530, 600, 670, 750, 860 и 1000 мм.

Магнитные свойства сталей характеризуют кривые намагничивания, приведенные в приложении Г. Потери в стали от вихревых токов и гистерезиса определяются удельными потерями, т.е. потерями в 1 кг стали при частоте 50 Гц и синусоидальном напряжении, их значения приведены в приложении И.

Для магнитопроводов, работающих в постоянных магнитных полях, применяются техническое железо с содержанием углерода менее 0,04%, а также углеродистые стали и чугуны.

Для изготовления небольших магнитопроводов используются магнитодиэлектрики – материалы, имеющие высокие магнитные свойства и высокое электрическое сопротивление

Листовая сталь 1211 толщиной 0,5 или 1 мм применяется для изготовления главных полюсов машин постоянного тока. Это ведет к улучшению k_c , который достигает в этом случае значений 0,95 – 0,98.

Листовая сталь и Ст3 в виде проката применяются для станин машин постоянного тока. Толщина листовой стали колеблется от 1,5 до 12 мм. Магнитные свойства такие же, как и у литой стали.

Приложение Г

(справочное)

Кривые намагничивания сталей

В связи с некоторым расхождением магнитных характеристик электротехнических сталей одинаковых марок, выпускаемых различными предприятиями, в таблицах приводятся усредненные цифры, которые могут быть использованы при учебном проектировании. Для поверочных расчетов двигателей рекомендуется пользоваться уточненными кривыми намагничивания конкретной стали, которую предполагается применить для проектируемого двигателя.

Таблица Г.1 – Листовая электротехническая сталь марок 1211, 1212, 1311 (слабо- и среднелегированная)

<i>B</i> , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H</i> , А/м									
0,4	140	143	146	149	152	153	158	161	164	167
0,5	171	175	179	183	187	191	195	199	203	207
0,6	211	216	221	226	231	236	241	246	251	256
0,7	261	266	271	276	281	287	293	299	306	312
0,8	318	324	330	337	344	352	360	369	378	387
0,9	397	407	417	427	437	447	458	469	480	491
1	502	514	527	541	555	570	585	600	615	631
1,1	647	664	682	701	720	739	859	779	800	821
1,2	843	866	891	918	946	976	1 010	1 040	1 070	1 100

1,3	1 140	1 180	1 220	1 260	1 300	1 340	1 380	1 430	1 480	1 530
1,4	1 580	1 640	1 710	1 780	1 860	1 950	2 050	2 150	2 260	2 380
1,5	2 500	2 640	2 790	2 950	3 110	3 280	3 460	3 660	3 880	4 120
1,6	4 370	4 630	4 910	5 220	5 530	5 880	6 230	6 600	6 980	7 370
1,7	7 780	8 200	8 630	9 070	9 630	10 100	10 600	11 100	11 600	12 200
1,8	12 800	13 400	14 200	14 600	15 200	15 900	16 600	17 300	18 000	18 800
1,9	19 700	20 600	21 600	22 600	23 600	24 600	25 600	26 800	28 200	29 600
2	31 000	32 500	34 300	36 500	39 000	42 000	45 500	49 500	54 500	59 500
2,1	65 500	72 500	80 000	88 000	96 000	104 000	112 000	120 000	128 000	136 000
2,2	144 000	152 000	160 000	168 000	176 000	184 000	192 000	200 000	208 000	216 000
2,3	224 000	232 000	240 000	248 000	256 000	264 000	272 000	280 000	288 000	296 000

		000		000	000		000		000	
2,4	304 000	312 000	320 000	328 000	336 000	344 000	352 000	360 000	368 000	276 000
2,5	384 000	392 000	400 000	408 000	416 000	424 000	432 000	440 000	448 000	456 000

Таблица Г.2 – Листовая электротехническая сталь марок 1411, 1412, 1413 (повышеннолегированная)

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H, А/м</i>									
0,2	44	45	47	48	49	50	51	52	54	55
0,3	56	57	58	59	60	61	63	64	65	66
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76

0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0,9	166	170	174	179	184	189	194	199	205	211
1	217	223	230	237	241	252	260	269	278	288
1,1	298	309	320	332	345	359	374	390	407	425
1,2	444	465	487	510	535	562	590	620	652	686
1,3	722	760	800	850	900	960	1 030	1 110	1 200	1 300
1,4	1 410	1 530	1 660	1 810	1 970	2 140	2 320	2 510	2 710	2 920
1,5	3 140	3 370	3 610	3 870	4 140	4 420	4 710	5 010	5 320	5 640
1,6	5 980	6 330	6 700	7 090	7 500	7 930	8 380	8 850	9 340	9 860

1,7	10 100	11 000	11 600	12 300	13 000	13 700	14 500	15 300	16 200	17 100
1,8	18 100	19 100	20 200	21 400	22 700	24 100	25 600	27 200	29 000	31 100
1,9	33 500	36 300	39 700	43 700	48 300	53 700	59 700	66 200	73 200	80 600
2	88 300	96 100	104 000	112 000	120 000	128 000	136 000	144 000	151 000	159 000
2,1	167 000	175 000	183 000	191 000	199 000	207 000	215 000	223 000	231 000	239 000
2,2	246 000	254 000	262 000	270 000	278 000	286 000	294 000	302 000	310 000	318 000
2,3	326 000	334 000	342 000	350 000	358 000	365 000	373 000	381 000	389 000	397 000
2,4	405 000	413 000	421 000	429 000	437 000	445 000	–	–	–	–

Таблица Г.3 – Листовая электротехническая сталь марок 1511, 1512, 1513 (высоколегированная)

В, 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	96	97	98	99	100	102	104	106	108	111
0,5	114	117	120	123	126	129	132	136	140	144
0,6	148	152	156	160	164	168	172	177	182	187
0,7	192	197	202	208	214	220	226	233	240	247
0,8	254	261	268	275	282	289	296	303	310	317
0,9	325	333	341	349	358	367	376	385	394	404
1	414	424	435	446	4458	470	483	496	510	524
1,1	538	553	569	586	604	623	643	664	685	707
1,2	730	754	780	810	840	870	900	940	980	1 030

1,3	1 080	1 140	1 200	1 270	1 340	1 410	1 490	1 590	1 600	1 720
1,4	1 940	2 060	2 200	2 340	2 500	2 700	2 920	3 140	3 370	3 600
1,5	3 850	4 060	4 290	4 520	4 760	5 000	5 300	5 650	6 000	6 350
1,6	6 700	7 100	7 600	8 100	8 650	9 300	10 000	10 700	11 400	12 200
1,7	13 000	14 000	15 000	16 000	17 000	18 000	19 000	20 000	21 000	22 000
1,8	23 000	24 000	25 000	26 000	27 000	28 000	29 000	30 000	31 200	32 500
1,9	34 000	35 500	37 000	38 500	40 500	42 500	45 000	51 000	57 000	63 000
2	70 000	77 000	84 500	92 000	100 000	108 000	116 000	124 000	138 000	140 000
2,1	148 000	156 000	164 000	172 000	180 000	188 000	196 000	204 000	212 000	220 000
2,2	228 000	236 000	244 000	252 000	260 000	268 000	276 000	284 000	292 000	300 000

Примечание – Для индукции свыше 2,06 Тл кривая намагничивания выражается уравнением

Таблица Г.4 – Листовая электротехническая сталь (холоднокатаная) марки 3413

<i>B</i> , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H</i> , А/м									
0,6	81	83	85	87	89	91	93	95	97	99
0,7	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128
0,8	130	132	134	136	138	140	142	144	146	149
0,9	152	155	158	161	164	167	170	173	176	179
1	182	185	188	192	195	198	201	204	207	210
1,1	213	216	219	222	225	228	231	234	237	240

1,2	243	246	249	252	255	258	261	264	267	271
1,3	275	279	283	287	291	295	300	305	310	315
1,4	320	326	332	338	344	350	358	366	374	382
1,5	390	402	414	426	438	450	464	478	492	506
1,6	520	544	566	588	610	632	665	698	732	766
1,7	800	840	890	940	990	1 040	1 132	1 224	1 316	1 408
1,8	1 500	1 542	1 700	1 922	2 144	2 366	2 588	2 820	3 080	3 450
1,9	3 825	4 200	4 600	5 200	5 800	7 000	8 200	9 400	10 900	13 400
2	16 000	20 000	25 000	30 000	–	–	–	–	–	–

Таблица Г.5 – Основная кривая намагничивания (сталь 2013)

<i>B</i> , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H</i> , А/м									
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1	110	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138

1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,5	620	670	780	890	1 000	1 130	1 240	1 350	1 460	1 580
1,6	1 700	1 860	2 020	2 180	2 340	2 500	2 700	2 800	3 000	3 200
1,7	3 400	3 700	4 000	4 300	4 700	5 000	5 400	5 800	6 200	6 600
1,8	7 000	7 500	8 000	8 500	9 200	10 000	10 600	11 200	11 800	12 400
1,9	13 000	13 600	14 200	14 800	15 600	16 500	17 300	18 100	18 900	19 800
2	20 700	22 600	24 400	26 300	28 100	30 000	36 000	42 000	48 000	54 000
2,1	60 000	67 000	74 000	81 000	88 000	95 000	102 000	109 000	116 000	123 000

2,2	130 000	138 000	146 000	154 000	162 000	170 000	178 000	186 000	194 000	202 000
2,3	210 000	218 000	226 000	234 000	242 000	250 000	258 000	266 000	274 000	282 000
2,4	290 000	298 000	306 000	314 000	322 000	330 000	338 000	246 000	354 000	362 000

Таблица Г.6 – Кривая намагничивания для ярма якоря (сталь 2013)

<i>B</i> , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H</i> , А/м									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62

0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1	185	188	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	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1 020	1 070	1 110

1,7	1 150	1 220	1 290	1 360	1 430	1 500	1 600	1 700	1 800	1 900
1,8	2 000	2 160	2 320	2 490	2 650	2 810	2 960	3 110	3 270	3 420
1,9	3 570	3 800	4 030	4 260	4 490	4 720	4 930	5 140	5 350	5 560
2	5 770	6 000	6 300	6 600	7 000	7 400	7 900	8 400	9 000	9 700

Таблица Г.7 – Кривая намагничивания для зубцов якоря (сталь 2013)

<i>B</i> , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H</i> , А/м									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585

1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1 020	1 050	1 080	1 110
1,7	1 150	1 180	1 220	1 250	1 290	1 330	1 360	1 400	1 440	1 480
1,8	1 520	1 570	1 620	1 670	1 720	1 770	1 830	1 890	1 950	2 010
1,9	2 070	2 160	2 250	2 340	2 430	2 520	2 640	2 760	2 890	3 020
2	3 150	3 320	3 500	3 680	3 860	4 040	4 260	4 480	4 700	4 920
2,1	5 140	5 440	5 740	6 050	6 360	6 670	7 120	7 570	8 020	8 470
2,2	8 920	9 430	9 940	10 460	10 980	11 500	12 000	12 600	13 200	13 800
2,3	14 400	15 100	15 800	16 500	17 200	18 000	18 800	19 600	20 500	21 400

Таблица Г.8 – Основная кривая намагничивания (стали 2212, 2214 и 2312)

<i>B</i> , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H</i> , А/м									
0,4	68	69	70	71	72	73	73	74	75	75
0,5	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
0,6	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
0,7	96	99	103	108	113	118	122	126	131	135
0,8	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185
0,9	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235
1	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294

1,1	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
1,2	400	410	420	430	440	460	470	480	500	520
1,3	550	580	610	650	690	730	780	830	880	940
1,4	1 000	1 060	1 120	1 180	1 240	1 300	1 360	1 420	1 480	1 540
1,5	1 600	1 750	1 900	2 050	2 200	2 350	2 500	2 700	2 900	3 100
1,6	3 400	3 600	3 800	4 100	4 400	4 700	5 300	5 900	6 500	7 100
1,7	7 700	8 200	8 900	9 400	10 000	10 600	11 100	11 700	12 200	12 800
1,8	13 400	14 000	14 600	15 200	15 800	16 400	17 000	17 600	18 200	18 800
1,9	19 400	20 000	21 800	23 700	25 700	27 800	30 000	32 200	34 400	36 600
2	38 800	41 000	43 200	45 400	47 600	49 800	52 000	54 500	57 500	60 500
2,1	65 500	72 500	80 000	88 000	96 000	104 000	112 000	120 000	128 000	136 000
2,2	144 000	152 000	160 000	168 000	176 000	184 000	192 000	200 000	208 000	216 000

2,3	224 000	232 000	240 000	248 000	256 000	264 000	272 000	280 000	288 000	296 000
2,4	304 000	312 000	320 000	328 000	336 000	344 000	352 000	360 000	368 000	376 000

Таблица Г.9 – Основная кривая намагничивания (сталь 2412)

<i>B</i> , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H</i> , А/м									
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107

0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	458	162
0,9	166	170	174	179	184	187	194	199	205	211
1	217	223	230	237	244	252	260	269	277	286
1,1	295	304	314	324	334	344	355	366	377	388
1,2	399	411	423	435	447	460	473	486	500	540
1,3	585	630	680	735	795	860	930	1 000	1 070	1 150
1,4	1 230	1 320	1 420	1 520	1 630	1 750	1 870	2 010	2 160	2 320
1,5	2 500	2 680	2 870	3 080	3 300	3 540	3 800	4 090	4 380	4 700
1,6	5 000	5 380	5 760	6 200	6 650	7 120	7 650	8 200	8 800	9 400
1,7	10 000	10 500	11 000	11 500	12 000	12 500	13 100	13 700	14 300	14 900
1,8	15 600	16 200	16 800	17 500	18 300	19 100	20 000	20 900	21 900	22 900

1,9	23 900	25 000	26 200	27 400	28 700	30 000	32 000	36 000	42 000	50 000
2	59 000	68 000	77 000	86 000	95 000	104 000	113 000	122 000	131 000	140 000
2,1	149 000	158 000	167 000	176 000	185 000	194 000	203 000	212 000	221 000	230 000
2,2	239 000	248 000	257 000	266 000	275 000	284 000	293 000	302 000	311 000	320 000
2,3	329 000	333 000	347 000	356 000	365 000	374 000	383 000	392 000	401 000	410 000
2,4	419 000	428 000	437 000	446 000	455 000	464 000	473 000	482 000	491 000	500 000

Таблица Г.10 – Листовая сталь (Ст3) толщиной 1–2 мм (для полюсов)

0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
---	------	------	------	------	------	------	------	------	------

$H, A/M$

100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
140	-	-	-	-	-	-	-	-	-
180	-	-	-	-	-	-	-	-	-
210	-	-	-	-	-	-	-	-	-
250	-	-	-	-	275	-	-	-	-
295	-	-	-	-	320	-	-	-	-
345	-	-	-	-	375	-	-	-	-
405	-	-	-	-	440	-	-	-	-
480	490	495	505	510	520	530	540	550	560
570	582	595	607	615	630	642	655	665	680
690	703	720	731	748	760	775	790	808	825

845	860	880	900	920	940	960	992	1 015	1 045
1 080	1 112	1 145	1 175	1 220	1 260	1 300	1 350	1 393	1 450
1 490	1 530	1 595	1 645	1 700	1 750	1 835	1 920	2 010	2 110
2 270	2 450	2 560	2 710	2 880	3 050	3 200	3 400	3 650	3 750
4 000	4 250	4 500	4 750	5 000	5 250	5 580	5 950	6 230	6 600
7 050	7 530	7 950	8 400	8 850	9 320	9 800	10 300	10 800	11 400
11 900	12 400	13 000	13 500	14 100	14 800	15 600	16 200	17 000	17 800
18 800	19 700	20 700	21 500	22 600	23 500	24 500	25 600	26 500	27 500
29 000	30 200	31 500	32 800	34 200	36 100	38 000	-	-	-

Таблица Г.11 – Листовая сталь, толстые листы (Ст3), поковки

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72
0,1	80	88	96	104	112	120	128	136	144	152
0,2	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232
0,3	240	248	250	264	272	280	288	296	304	312
0,4	320	328	336	344	352	360	368	376	384	392
0,5	400	404	417	426	434	443	452	461	470	479
0,6	488	497	506	516	525	535	544	554	564	574
0,7	584	593	603	613	623	632	642	652	662	672

0,8	682	693	703	724	734	745	755	766	776	787
0,9	798	810	823	835	848	850	873	885	898	911
1	924	938	953	969	986	1 004	1 022	1 039	1 056	1 073
1,1	1 090	1 108	1 127	1 147	1 167	1 187	1 207	1 227	1 248	1 269
1,2	1 290	1 315	1 340	1 370	1 400	1 430	1 460	1 490	1 520	1 555
1,3	1 590	1 630	1 670	1 720	1 760	1 810	1 860	1 920	1 970	2 030
1,4	2 090	2 160	2 230	2 300	2 370	2 440	2 530	2 620	2 710	2 800
1,5	2 890	2 990	3 100	3 210	3 320	3 430	3 560	3 700	3 830	3 960
1,6	4 100	4 250	4 400	4 550	4 700	4 870	5 000	5 150	5 300	5 500

Приложение Д

(справочное)

Щетки для электродвигателей

Таблица Д.1 – Рекомендуемые расчетные параметры и условия работы щеток для электрических машин общего назначения

Обозначения марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток, В	Плотность тока, А/см ²	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
Г-20 Г-21 Г-22	Угольно-графитные	2,9 4,3 2,5	15 5 10	40 30 30	50 15–100 40	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и коллекторные машины переменного тока
Г3 611М 6110М	Графитные	1,9 2 2	11 12 15	25 40 90	20–25 20–25 12–22	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и контактные кольца
ЭГ2А ЭГ2АФ ЭГ4 ЭГ8	Электрографитированные	2,6 2,2 2 2,4	10 15 12 10	45 90 40 40	20–25 15–21 15–20 20–40	Генераторы и двигатели со средними и затрудненными условиями коммутации и контактные кольца
ЭГ14 ЭГ51 ЭГ61 ЭГ71 ЭГ74 ЭГ74АФ ЭГ85	“	2,5 2,2 3 2,2 2,7 2,3 2,3	11 12 13 12 15 15 15	40 60 60 40 50 60 50	20–40 20–25 35–50 20–25 17,5–25 15–21 17,5–35	То же

Продолжение таблицы Д.1

Обозначения марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Плотность тока, А/см ²	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
М1	Металлографитные	1,5	15	25	15–20	Низковольтные генераторы и контактные кольца
М3		1,8	12	20	15–20	
М6		1,5	15	25	15–20	
М20		1,4	12	20	15–20	
МГ	“	0,2	20	20	18–23	То же
МГ2		0,5	20	20	18–23	
МГ4		1,1	15	20	20–25	
МГ64		0,5	25	25	15–20	
МГС0		0,2	20	20	18–23	
МГС5		2	15	35	20–25	

Примечания

1 При работе электрических машин в условиях повышенной вибрации и больших частот вращения коллектора (свыше 1500 об/мин) давление на щетку может быть повышено до 50 кПа.

2 Плотность тока щетки должна выбираться в зависимости от частоты вращения коллектора и условий коммутации каждого конкретного типа электрической машины.

3 Коэффициент трения щеток о коллектор μ_m принимается равным 0,25 для всех марок щеток.

Таблица Д.2 – Шкала размеров электродеток (в миллиметрах),

$$b_{щ} \times a_{щ} \times h_{щ}$$

Тангенци- альный размер $b_{щ}$	Осевой размер $a_{щ}$										
	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
4	10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	12,5	12,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	–	16	16	16	–	–	–	–	–	–	–
	–	–	20	20	20	20	–	–	–	–	–
5	–	12,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	–	16	16	16	–	–	–	–	–	–	–
	–	–	20	20	20	20	–	–	–	–	–
	–	–	25	25	25	25	25	–	–	–	–
	–	–	–	–	32	32	32	–	–	–	–
	–	–	–	–	–	–	40	–	–	–	–
6,3	–	–	20	20	20	–	–	–	–	–	–
	–	–	25	25	25	25	25	–	–	–	–
	–	–	–	32	32	32	32	32	32	–	–
	–	–	–	–	–	–	–	40	40	–	–
8	–	–	–	20	–	–	–	–	–	–	–
	–	–	–	25	25	25	25	25	–	–	–
	–	–	–	32	32	32	32	32	32	–	–
	–	–	–	–	–	–	–	40	40	–	–
	–	–	–	–	–	–	–	50	50	–	–
10	–	–	–	–	25	25	25	–	–	–	–
	–	–	–	–	32	32	32	32	32	–	–
	–	–	–	–	–	–	40	40	40	40	–
	–	–	–	–	–	–	–	50	50	50	–
12,5	–	–	–	–	–	25	–	–	–	–	–
	–	–	–	–	–	32	32	32	32	–	–
	–	–	–	–	–	–	40	40	40	40	–
	–	–	–	–	–	–	–	50	50	50	50
	–	–	–	–	–	–	–	–	–	64	64
16	–	–	–	–	–	–	32	32	32	–	–
	–	–	–	–	–	–	40	40	40	40	–
	–	–	–	–	–	–	50	50	50	50	50
	–	–	–	–	–	–	–	–	–	64	64
20	–	–	–	–	–	–	–	32	32	–	–
	–	–	–	–	–	–	–	40	40	40	–
	–	–	–	–	–	–	–	50	50	50	50
	–	–	–	–	–	–	–	–	–	64	64

Продолжение таблицы Д.2

Тангенци- альный размер $b_{щ}$	Осевой размер $a_{щ}$										
	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
25	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64	64
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64 80
40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100

Примечание – Щетки шириной 25 мм и выше подразделяются на две.

Приложение Е

(справочное)

Коэффициенты аппроксимации основных кривых намагничивания электротехнических сталей и Ст3

Таблица Е.1

Коэффициент аппроксимации	Марка стали					
	1211	1411	2013	2211	2411	Ст3
А	0,05	0,1	0,05	0,1	0,1	10,718
В	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	- 6,931
С	7,5	0,5	10	0,8	0,3	610,718
β	4,5	6	3,7	5,5	6	1,205

Приложение Ж

(справочное)

Характеристики феррит-бариевых и редкоземельных магнитов

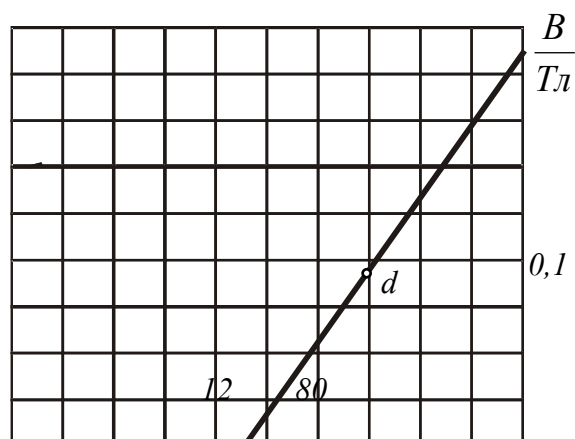


Рисунок Ж.1 – Характеристика
← H
размагничивания феррита

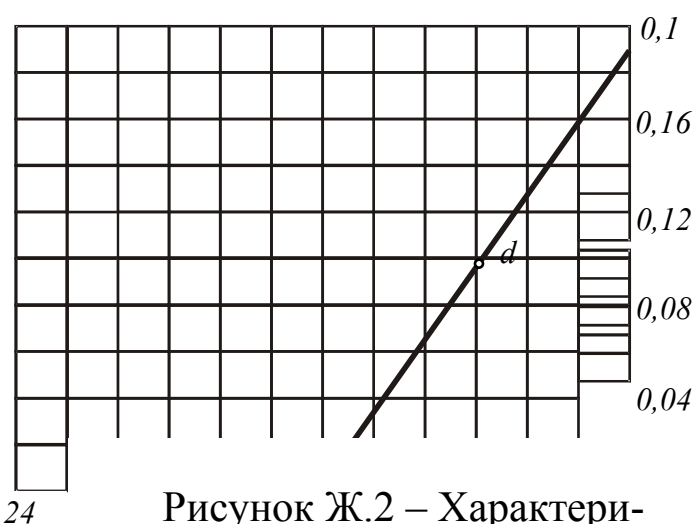


Рисунок Ж.2 – Характеристика
← H
размагничивания феррита

Таблица Ж.1 – Параметры магнита марки 6БИ240

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	Θ_l	K_θ	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
125	62,5	240	3	0,19	0,095	0,84	1,50	1,50

Таблица Ж.2 – Параметры магнита марки 6БИ250

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	Θ_l	K_θ	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
120	59	247	2,8	0,19	0,095	0,78	1,61	1,61

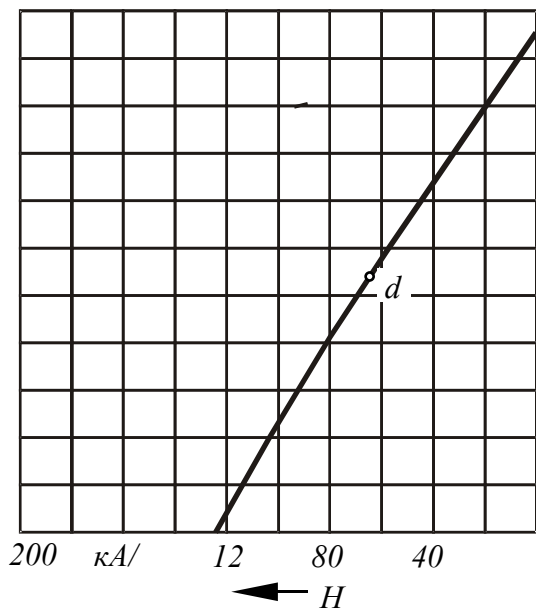


Рисунок Ж.3 – Характеристики размагничивания феррита бария 7БИ215

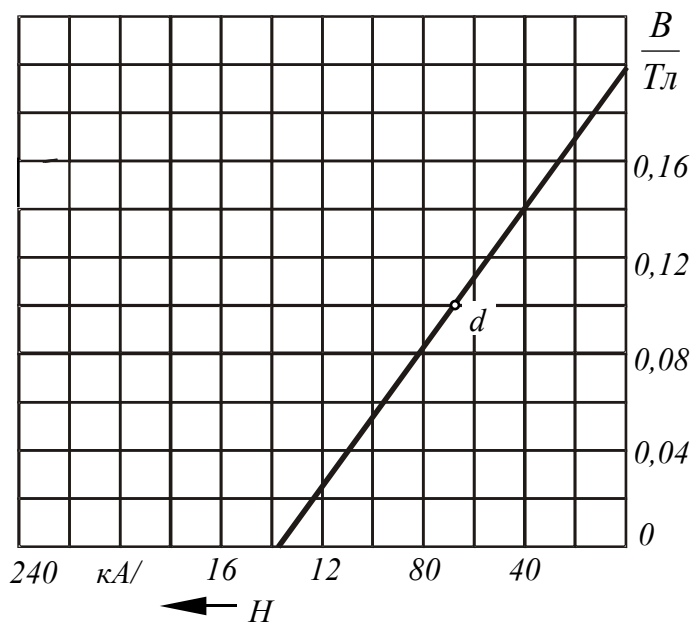


Рисунок Ж.4 – Характеристики размагничивания феррита бария 7БИ300

Таблица Ж.3 – Параметры магнита марки 7БИ215

$H_{сВ}$	H_d	$H_{сМ}$	W	B_r	B_d	Θ_l	K_e	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
125	66,7	215	3,5	0,21	0,105	0,8	1,58	1,58

Таблица Ж.4 – Параметры магнита марки 7БИ300

$H_{сВ}$	H_d	$H_{сМ}$	W	B_r	B_d	Θ_l	K_e	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
140	70	300	3,5	0,2	0,1	0,88	1,43	1,43

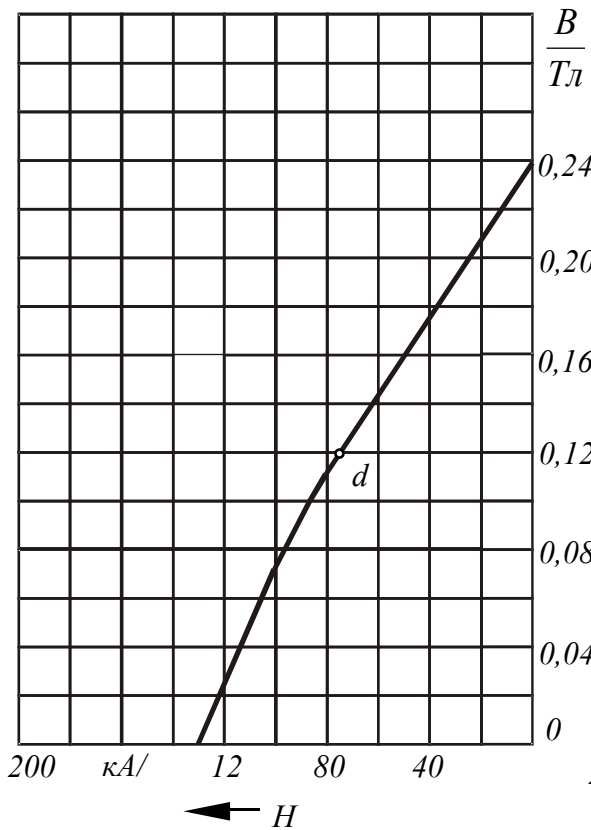


Рисунок Ж.5 – Характеристика размагничивания феррита

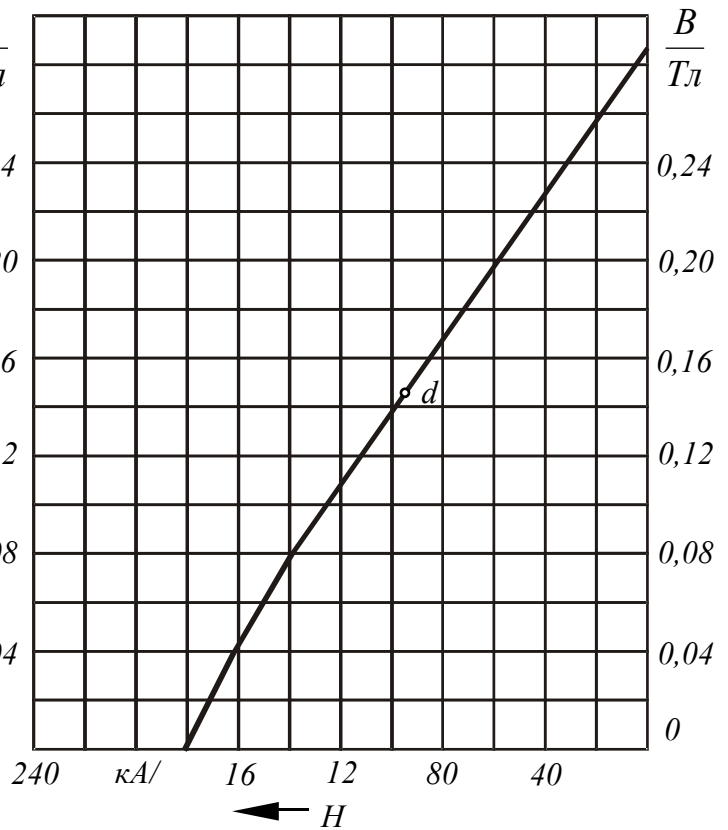


Рисунок Ж.6 – Характеристика размагничивания феррита ба-

Таблица Ж.5 – Параметры магнита марки 9BA205

$H_{сВ}$	H_d	$H_{сМ}$	W	B_r	B_d	Θ_l	K_6	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
135	75	205	4,5	0,24	0,12	0,78	1,6	1,6

Таблица Ж.6 – Параметры магнита марки 14BA255

$H_{сВ}$	H_d	$H_{сМ}$	W	B_r	B_d	Θ_l	K_6	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
185	96,5	255	7	0,29	0,145	0,84	1,5	1,5

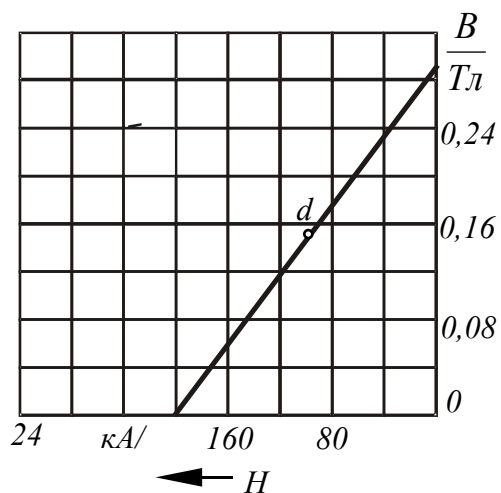


Рисунок Ж.7 – Характеристика намагничивания феррита

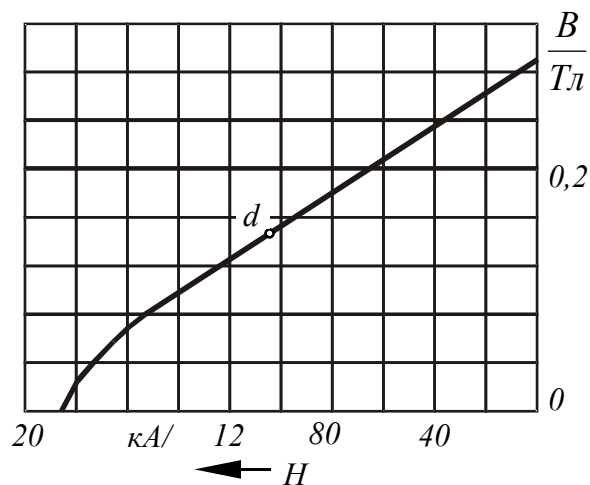


Рисунок Ж.8 – Характеристика намагничивания феррита

Таблица Ж.7 – Параметры магнита марки 15БА300

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	Θ_l	K_ϵ	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
200	100	300	7,5	0,3	0,15	0,84	1,5	1,5

Таблица Ж.8 – Параметры магнита марки 16БА190

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	Θ_l	K_ϵ	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
185	106,6	190	8	0,30	0,15	0,89	1,41	1,41

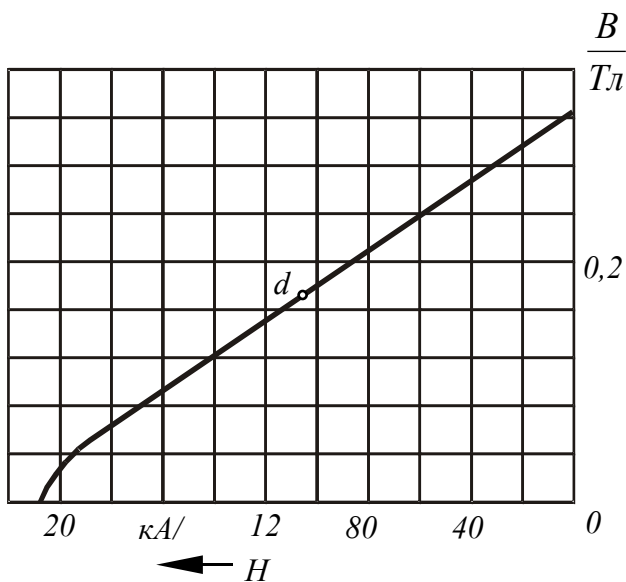


Рисунок Ж.9 – Характеристика размагничивания феррита бария 18БА220

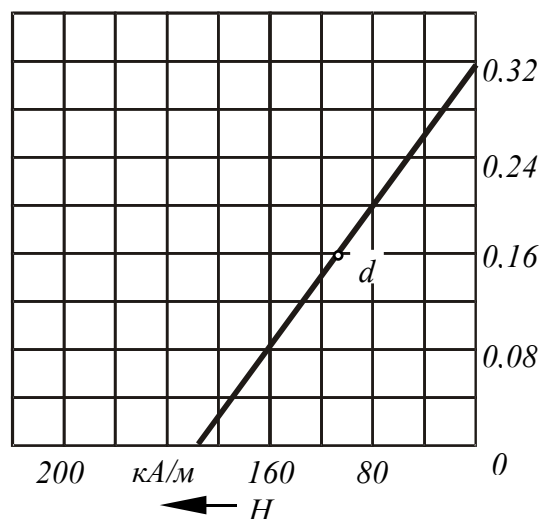


Рисунок Ж.10 – Характеристика размагничивания феррита бария 18БА300

Таблица Ж.9 – Параметры магнита марки 18БА220

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	Θ_l	K_e	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
210	109	220	9	0,33	0,165	0,83	1,51	1,51

Таблица Ж.10 – Параметры магнита марки 18БА300

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	Θ_l	K_e	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
220	110	300	9	0,32	0,16	0,87	1,45	1,45

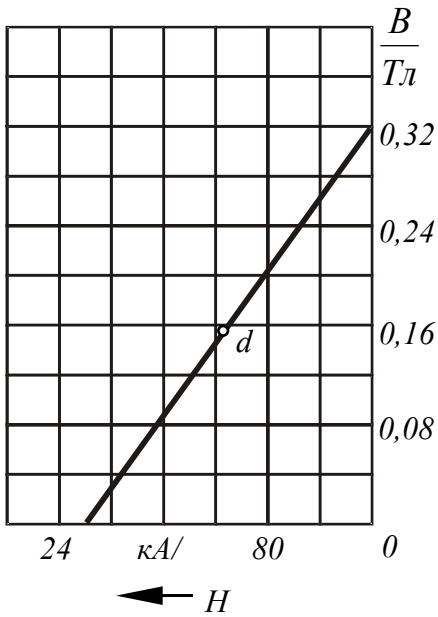


Рисунок Ж.11 – Характеристика размагничивания феррита бария 19БА260

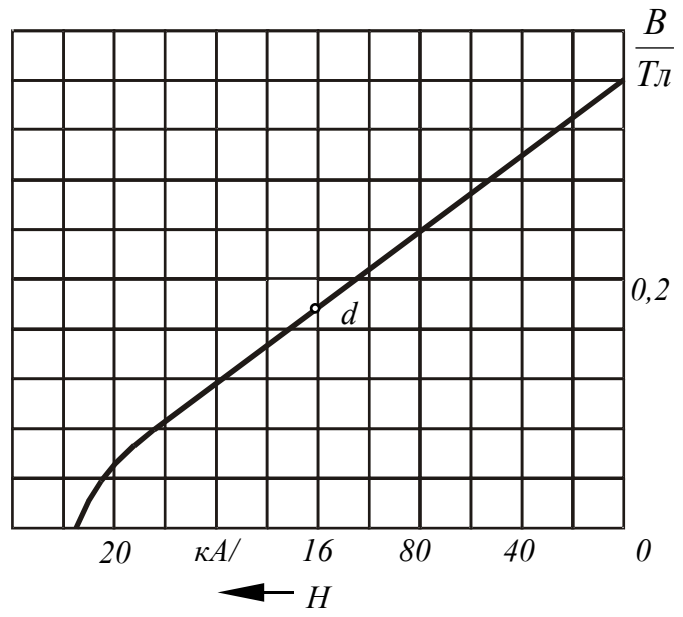


Рисунок Ж.12 – Характеристика размагничивания феррита

Таблица Ж.11 – Параметры магнита марки 19БА260

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	Θ_l	K_e	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
225	115	260	9,5	0,33	0,165	0,87	1,43	1,43

Таблица Ж.12 – Параметры магнита марки 22БА220

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	Θ_l	K_e	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
215	122	220	11	0,36	0,18	0,85	1,48	1,48

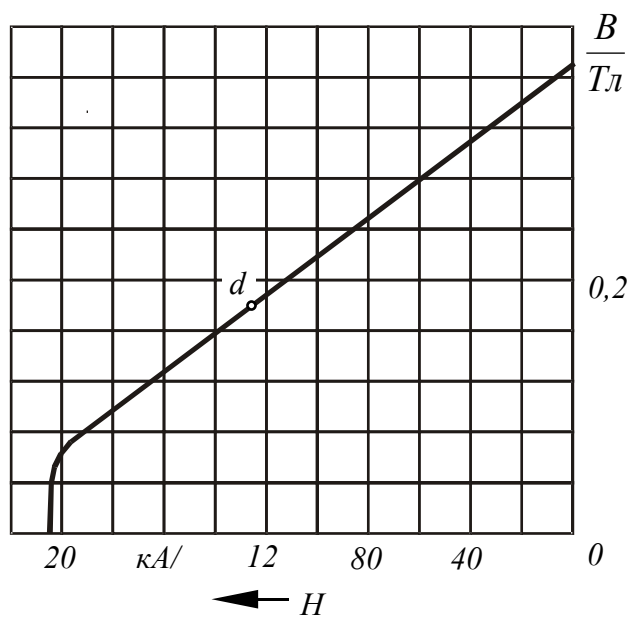


Рисунок Ж.13 – Характеристика размагничивания феррита бария 24БА210

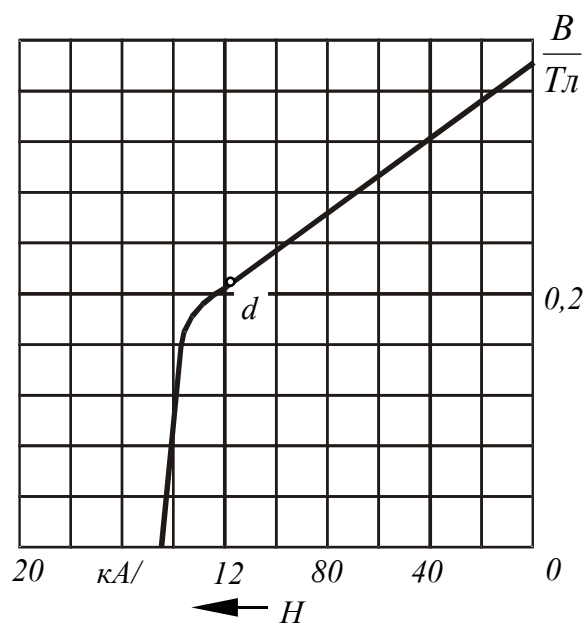


Рисунок Ж.14 – Характеристика размагничивания феррита бария 25БА150

Таблица Ж.13 – Параметры магнита марки 24БА210

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	Θ_l	K_θ	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
205	130	210	12	0,37	0,185	0,88	1,42	1,42

Таблица Ж.14 – Параметры магнита марки 25БА150

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	Θ_l	K_θ	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
145	132	150	12,5	0,38	0,19	0,87	1,44	1,44

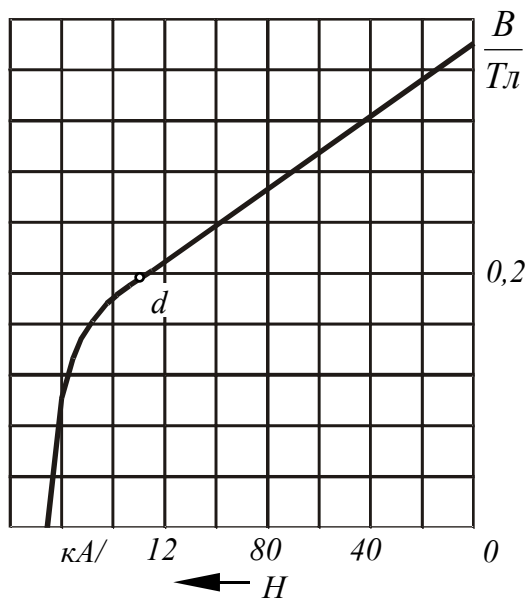


Рисунок Ж.15 – Характеристика размагничивания феррита бария 25БА170

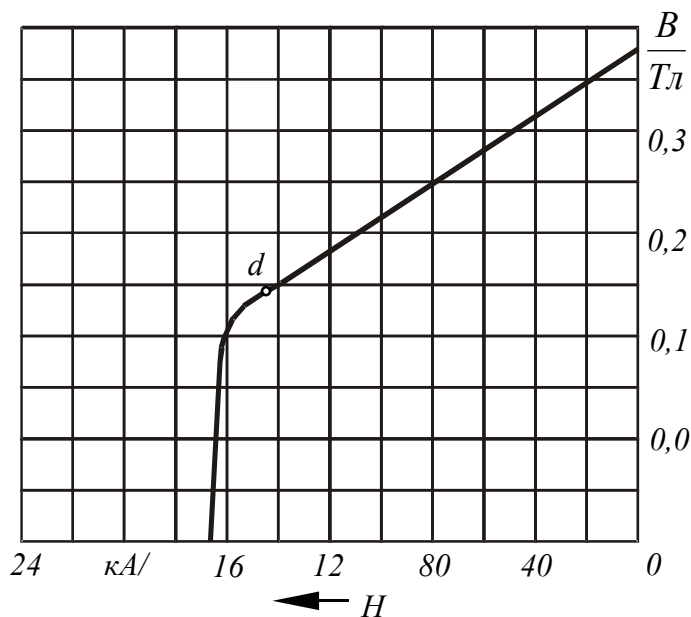


Рисунок Ж.16 – Характеристика размагничивания феррита бария 28БА170

Таблица Ж.15 – Параметры магнита марки 25БА170

$H_{св}$	H_d	$H_{сМ}$	W	B_r	B_d	Θ_l	K_e	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
165	132	170	12,5	0,38	0,19	0,87	1,44	1,44

Таблица Ж.16 – Параметры магнита марки 28БА170

$H_{св}$	H_d	$H_{сМ}$	W	B_r	B_d	Θ_l	K_e	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
165	144	170	14	0,39	0,195	0,93	1,35	1,39

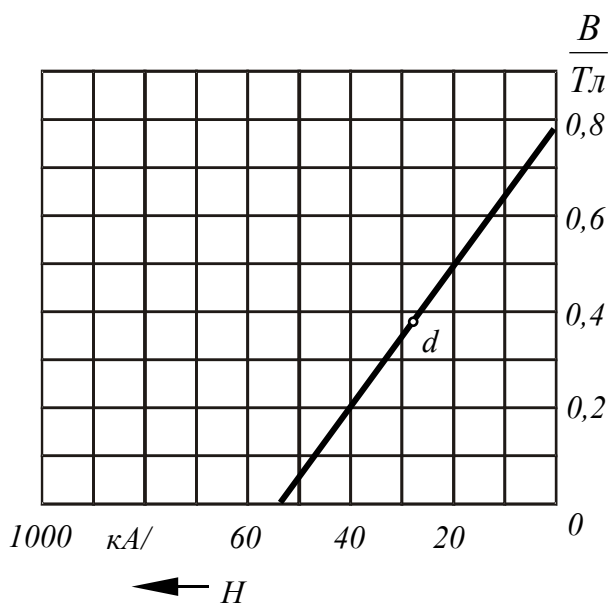


Рисунок Ж.17 – Характеристика размагничивания редкоземельного материала КС37

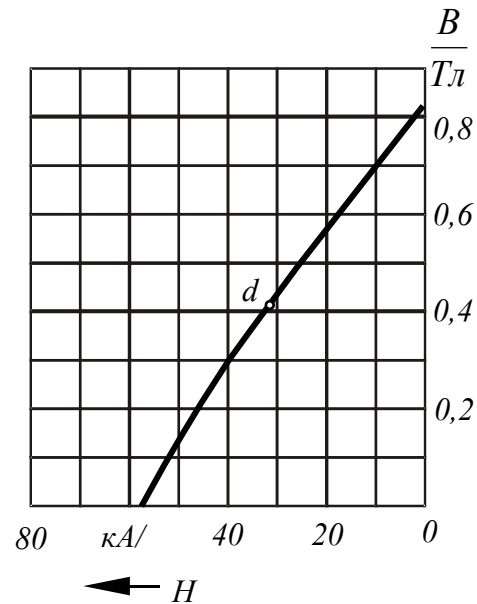


Рисунок Ж.18 – Характеристика размагничивания редкоземельного материала

Таблица Ж.17 – Параметры магнита марки КС37

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	Θ_l	K_e	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
540	286	1300	55	0,77	0,385	0,90	1,35	1,35

Таблица Ж.18 – Параметры магнита марки КС37А

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	Θ_l	K_e	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
560	315	1000	65	0,82	0,41	0,98	1,30	1,30

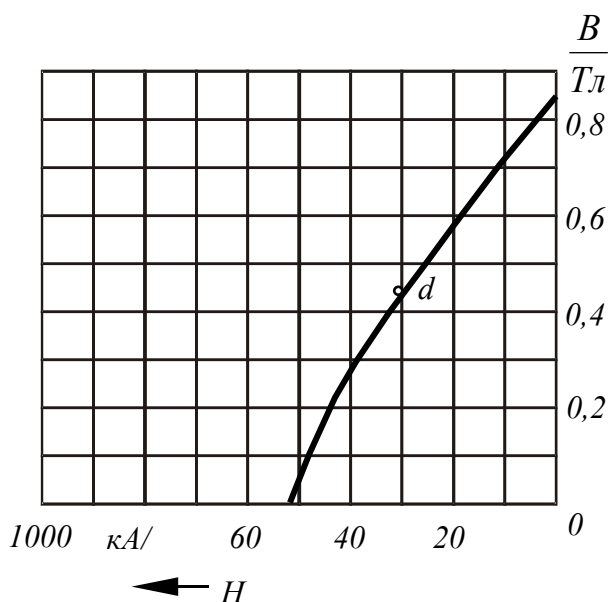


Рисунок Ж.19 – Характеристика размагничивания редкоземельного материала КС-

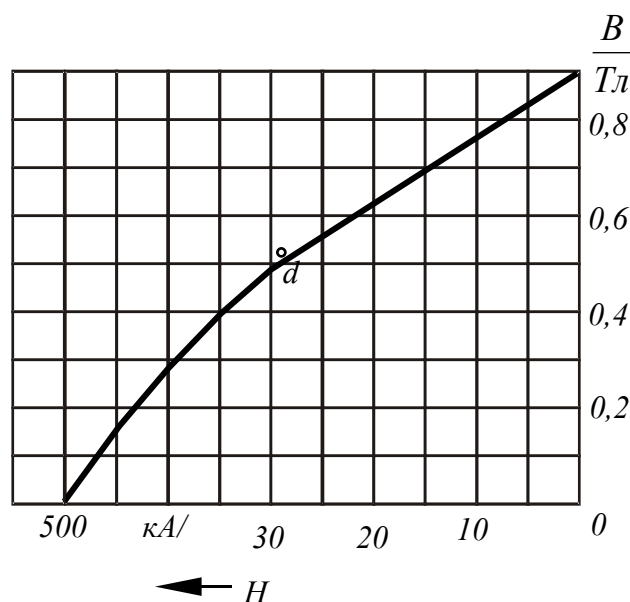


Рисунок Ж.20 – Характеристика размагничивания редкоземельного материала КС-

Таблица Ж.17 – Параметры магнита марки КСП37

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	Θ_l	K_e	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
520	306	800	65	0,85	0,425	0,90	1,39	1,39

Таблица Ж.18 – Параметры магнита марки КСП37А

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	Θ_l	K_e	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м ³	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
500	290	640	72,5	0,9	0,5	0,90	1,38	1,72

Приложение И

(справочное)

Удельные потери в листовой электротехнической стали
при $B = 1$ Тл и $f = 50$ Гц

Таблица И.1

Марка стали	1211		1212		1311		1411		1412		1413		
Толщина, мм	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,35	0,5	0,35	0,5	0,35	0,5	0,35
	5,8	3,3	5,4	3,1	2,5	2	1,6	1,8	1,4	1,55	1,35		
$p_{1, 0/50}$, Вт/кг													

Таблица И.2

Марка стали	1511		1512		1513		3413		2011	
Толщина, мм	0,5	0,35	0,5	0,35	0,5	0,35	0,5	0,35	0,65	0,5
	1,55	1,35	1,4	1,2	1,25	1,05	0,8	0,6	3,8	3,5
$p_{1, 0/50}$, Вт/кг										

Таблица И.3

Марка стали	2012		2013		2212		2214		2312		2412	
Толщина, мм	0,65	0,5	0,65	0,5	0,65	0,5	0,5	0,5	0,65	0,5	0,5	0,35
	3,6	2,9	3,1	2,5	2,6	2,2	2	2	2,4	1,75	1,3	1,15
$p_{1, 0/50}$, Вт/кг												

Приложение К

(справочное)

На рисунках К1 и К2 приведены продольный и поперечный разрезы основного вида двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, имеющего $2p = 4$, $z = 15$, волновую двухслойную обмотку, уложенную в овальные полузакрытые пазы. Якорь выполнен без скоса пазов.

Двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов имеет закрытое исполнение (IP44). Статор электродвигателя состоит из алюминиевого корпуса 1, цилиндрического магнитомягкого ярма 2, по внутренней поверхности которого расположены дугообразные магниты 3 с радиальной намагниченностью. Постоянные магниты крепят к ярму с помощью клея или пружинных скоб 4.

Якорь 5 двигателя постоянного тока состоит из сердечника, обмотки, коллектора 6 и вала 7. Сердечник якоря представляет собой цилиндр, набранный из штампованных изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,35 мм или 0,5 мм. В полузакрытые пазы сердечника ротора укладывают активные стороны секций (катушек) обмотки якоря. Секции выполняют из медного изолированного провода, а их концы припаивают к пластинам коллектора. Обмотку якоря укрепляют в пазах гетинаксовыми клиньями, а на лобовые части накладывают бандажи из стеклоленты или шнура.

К корпусу винтами 8 (шпильками, болтами) прикреплены выполненные из алюминиевого сплава (Ал2, А9) подшипниковые щиты 9 (крышки). Эти щиты заливают на стальные втулки, в которых размещают шарикоподшипники 10. Щеткодержатель 11 закреплен на подшипниковом щите. Щетки устанавливают так, чтобы они замыкали секции, активные стороны которых находятся между полюсами (на геометрической нейтрали).

Напряжение питающей сети подводится к вводным клеммам 12.

На общем виде двигателя постоянного тока (рисунок К1, рисунок К2) указывают габаритные размеры (B , G) и установочно-присоединительные размеры (D , C , E , F), в спецификации указываются основные сборочные узлы, детали и стандартные изделия.

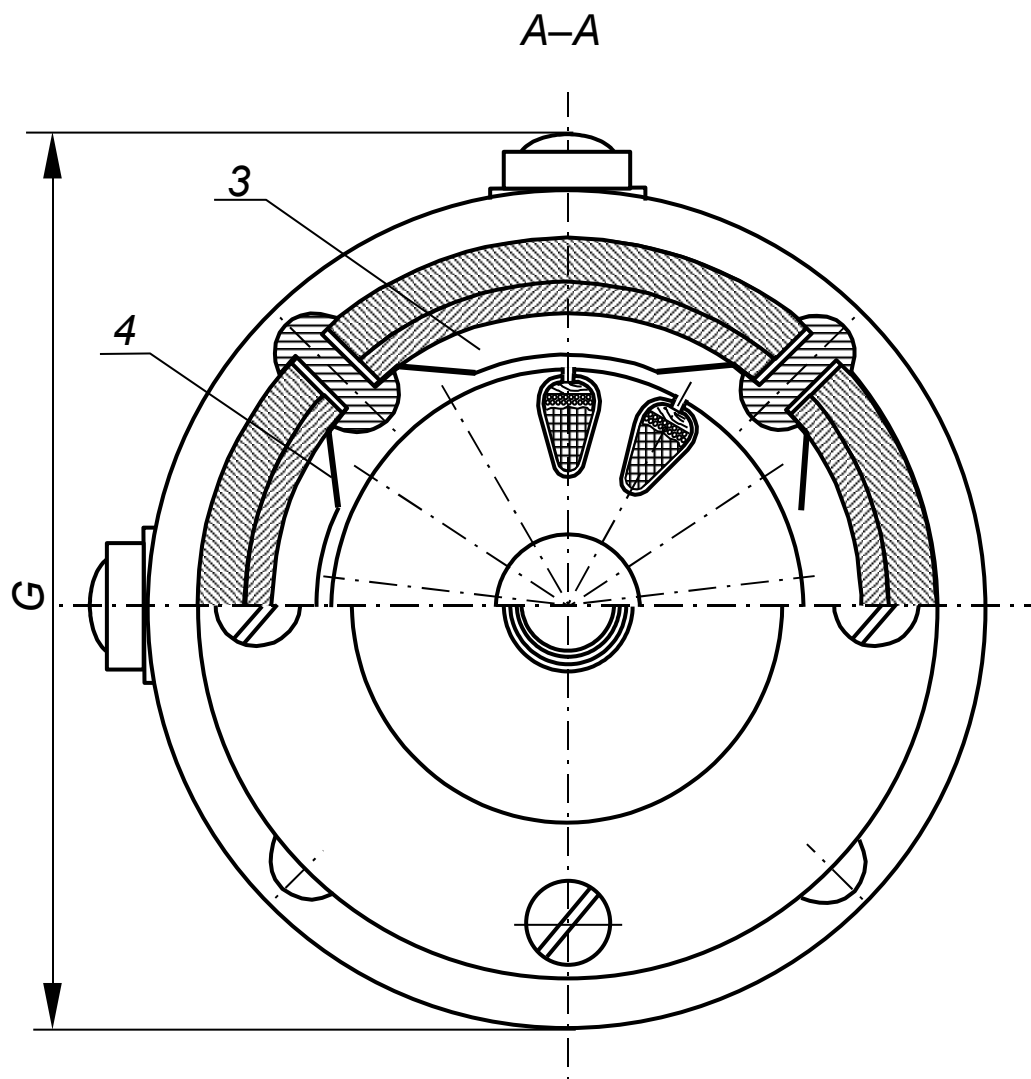


Рисунок К2 – Общий вид двигателя постоянного тока (поперечный разрез)

Приложение Л

(справочное)

Изолирование пазов

Обмотка пазов якорей из круглого провода укладывается, как правило, механизированным способом. Последовательность операций следующая: изолирование пазов; напрессовывание коллектора; намотка обмотки; соединение концов обмотки с коллекторными пластинами; обжатие и пайка обмотки с коллектором; пропитка. В некоторых случаях коллектор напрессовывают до изоляции пазов или после укладки обмотки. Так же могут быть совмещены операции укладки обмотки и соединения ее концов с коллекторными пластинами.

Первой важной операцией является изолирование якоря, от качества которого зависят скорость намотки провода, надежность и долговечность работы машины. Якорь машины работает при высоких частотах вращения, и изоляция подвергается дополнительным механическим воздействиям по сравнению с изоляцией, работающей на неподвижных частях машины.

В якоре обмотка располагается в пазах и касается торца сердечника и части вала около сердечника, поэтому необходимо изолировать пазы 3 (рисунок Л1, торец 2 и участок вала 1).

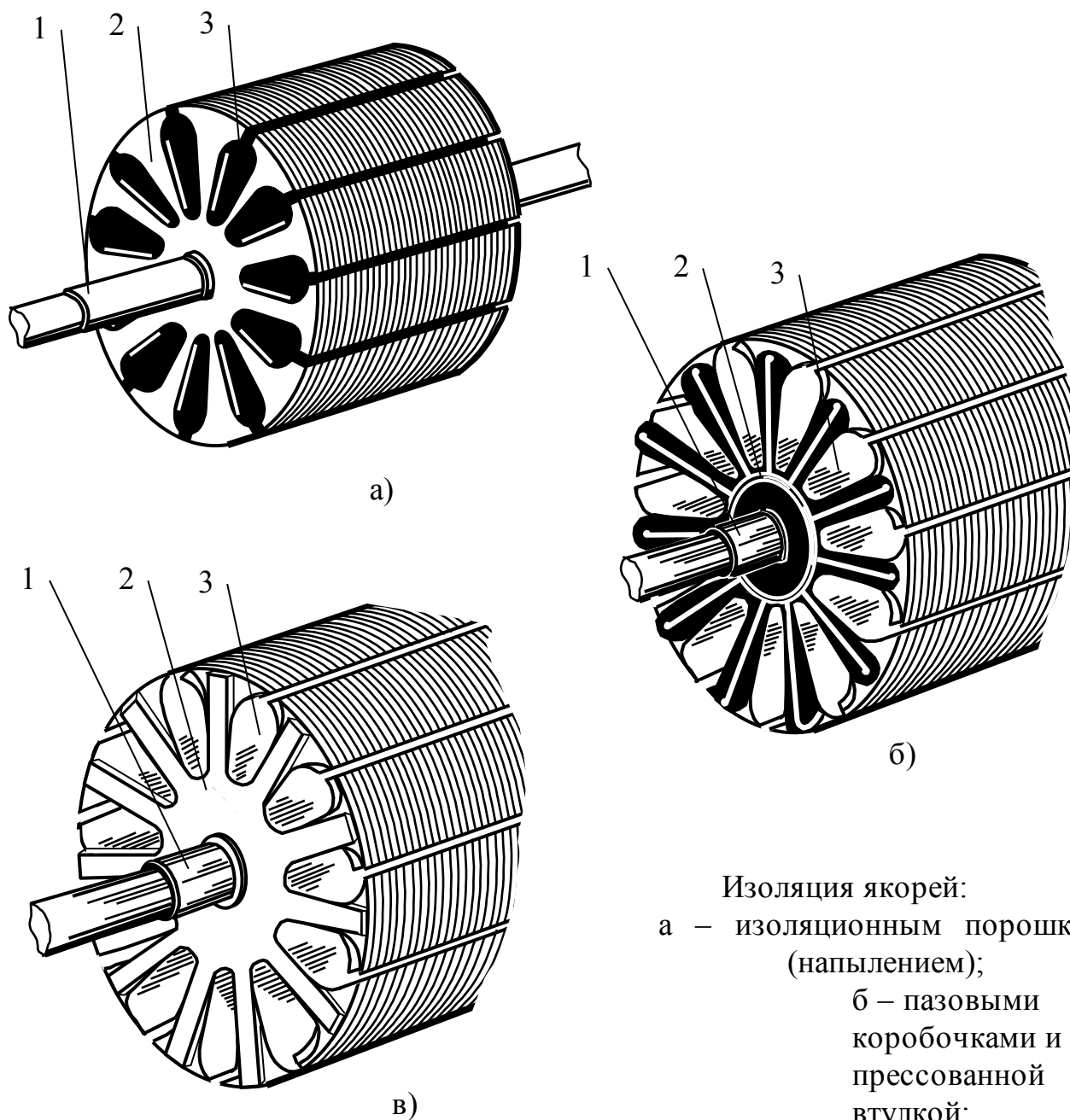
В якорях небольшого диаметра эффективным способом изолирования являются нанесение и последующая запечка изоляционных порошков (рисунок Л1, а). Существует много различных способов нанесения порошков. При изолировании якорей чаще всего используют вихревой способ в псевдооживленном слое порошка. Толщина изоляции, обеспечивающая нормальную работу якоря, составляет 0,2 – 0,5 мм с допуском 0,05 мм. При таком способе изолирования все части якоря, соприкасающиеся с обмоткой, изолированы непрерывным слоем, что позволяет производить намотку при высоких частотах вращения (изоляция не сдвинется от усилий, возникающих при воздействии провода) и исключает опасность попадания отдельных проводников в промежутки, образуемые изоляцией вала и торца.

Нанесение изоляции способом напыления возможно при высоком качестве сердечника якоря. Листы сердечника должны плотно прилегать друг к другу, быть чистыми, не иметь заусенцев и острых краев. Толщина изоляции 0,15 – 0,25 мм.

В якорях большего диаметра пазы изолируют прокладками из изоляционного материала. Отрезается лист нужного размера, формуется и устанавливается в паз. Изоляция торцов и вала возможна различными способами. В некоторых случаях прессуют из термореактивной пластмассы деталь (см. рисунок Л.1, б) которая изолирует участок вала и торцы. Ее устанавливают на клею на якорь и плотно надевают. После намотки и пропитки обмотки лак надежно скрепит ее с остальными деталями якоря и она будет неподвижна во время ра-

боты. В других случаях изоляцию выполняют двумя деталями. Одну деталь, изолирующую торцы 2 (см. рисунок Л.1, в), штампуют из электрокартона тем же штампом, который штампует прямой зубец, надевают на вал и клеем крепят к торцу, а другую деталь (в виде трубки из электрокартона), изолирующую вал, надевают на него, плотно прижимая к торцу [10].

Корпусная изоляция пазовой части катушек обмотки якоря выполнена пазовым коробом из одного или двух слоев изоляционного материала. Для повышения надежности короба в местах выхода его из паза по торцам якоря он завернут в виде манжеты. Прокладки между слоями обмотки в пазу выполнены из того же материала, что и короб. В лобовых частях секции дополнительно не изолируют. Для класса нагревостойкости “В” применяют изофлекс толщиной 0,35 мм, для класса изоляции “F” - имидофлекс толщиной 0,35 мм или пленкосинтокартон (ПСКА-175) толщиной 0,3 мм [7].



Изоляция якорей:

а – изоляционным порошком (напылением);

б – пазовыми коробочками и пресованной втулкой;

Рисунок Л.1 – Изоляция якорей

Приложение М

(справочное)

Концы валов цилиндрические электрических машин по ГОСТ 12080-66

Таблица М.1

Диаметр d_0 , мм	Длина l_0 , мм	Диаметр d_0 , мм	Длина l_0 , мм
0,8 1,0	3	8,0 9,0	20
1,2 1,3	4	10 11	23
1,6	5	12 14	30
1,8 2,0	8	16 18 19	40
2,5 2,8 3,0	10	20 22 24	50
3,8 4,0	12	25 28	60
5,0	14	30 32	80
6,0 7,0	16	36 38	

Приложение Н

(справочное)

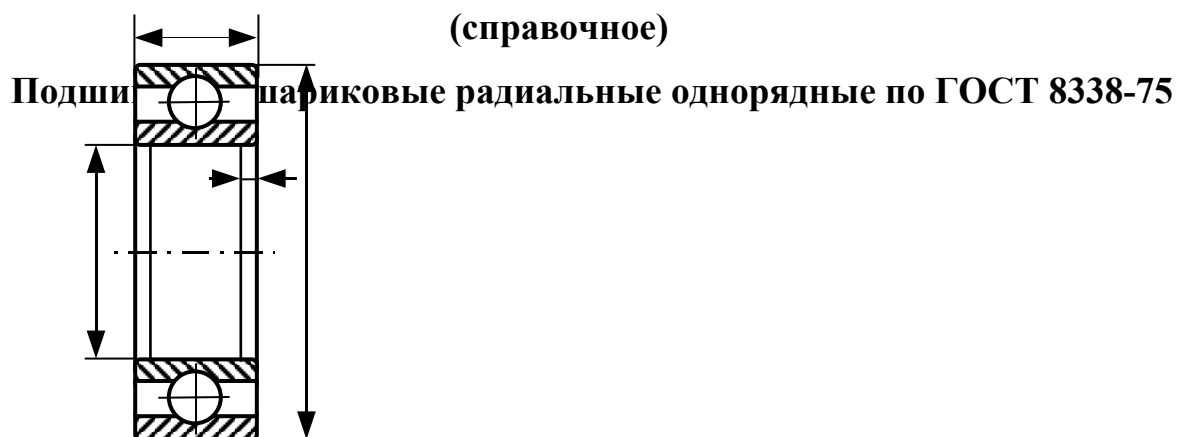


Таблица Н.1

Условное обозначение подшипника	d , мм	D , мм	B , мм	r , мм	C	n , об/мин
Легкая серия						
23	3	10	4	0,3	610	25 000
24	4	13	5	0,4	1 160	25 000
25	5	16	5	0,4	2 000	25 000
26	6	19	6	0,5	3 400	25 000
27	7	22	7	0,5	3 700	25 000
28К	8	24	8	0,5	-	-
29	9	26	8	0,5	5 400	25 000
200	10	30	9	1	7 100	20 000
201	12	32	10	1	7 100	20 000
202	15	35	11	1	8 500	16 000
203	17	40	12	1	11 300	16 000
204	20	47	14	1,5	15 000	16 000
205	25	52	15	1,5	16 000	13 000
206	30	62	16	1,5	22 000	13 000
207	35	72	17	2,0	30 000	10 000
208	40	80	18	2,0	39 000	10 000
209	45	85	19	2,0	39 000	8 000
210	50	90	20	2,0	42 000	8 000

Продолжение таблицы Н.1

Условное обозначение подшипника	d , мм	D , мм	B , мм	r , мм	C	n , об/мин
Средняя серия						
34	4	16	5	0,5	2000	20 000
35	5	19	6	0,5	3460	2 000
300	10	35	11	1,0	12 100	16 000
301	12	37	12	1,5	12 300	16 000
302	15	42	13	1,5	13 500	16 000
303	17	47	14	1,5	17 100	13 000
304	20	52	15	2,0	19 000	13 000
305	25	62	17	2,0	27 000	10 000
306	30	72	19	2,0	33 000	10 000
307	35	80	21	2,5	40 000	8 000
308	40	90	23	2,5	48 000	8 000
309	45	100	25	2,5	57 000	6 000
310	50	110	27	3,0	72 000	6 000