

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

В.П. Ерунов

**РАСЧЕТ
КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ
ПОСТОЯННОГО ТОКА
МАЛОЙ МОЩНОСТИ
С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ
ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

Учебное пособие

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 13.03.02, 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Оренбург
2021

УДК 621.313.2(075.8)
ББК 31.261.52 я73
Е79

Рецензент - кандидат технических наук, доцент Э.Л. Греков

Ерунов, В.П.

Е 79

Расчет коллекторного двигателя постоянного тока малой мощности с последовательным возбуждением [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. П. Ерунов; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбург. гос. ун-т". - Оренбург : ОГУ. - 2021. - 173 с-
Загл. с тит. экрана.

ISBN 978-5-7410-2599-4

Пособие предназначено для курсового и дипломного проектирования в области коллекторных двигателей постоянного тока малой мощности с последовательным возбуждением. Приведена методика проектного рас-чета двигателя постоянного тока, содержащая новые методы расчета маг-нитной цепи, расчета полюса и тока возбуждения.

Учебное пособие предназначено для обучающихся по образователь-ным программам высшего образования по направлениям 13.03.02, 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, выполняющих расчеты по машинам постоянного тока малой мощности. Пособие может быть ис-пользовано студентами других направлений подготовки и аспирантами, проводящими научно-исследовательские работы в области двигателей постоянного тока малой мощности, а также может быть полезно инже-нерно-техническим работникам, занимающимся проектированием, иссле-дованием и использованием электрических двигателей постоянного тока.

УДК621.313.2(075.8)
ББК 31.261.5 я73

ISBN 978-5-7410-2599-4

© Ерунов В.П., 2021
© ОГУ, 2021

Содержание

Введение	5
1 Расчет коллекторного двигателя постоянного тока малой мощности с последовательным возбуждением.....	8
1.1 Задание на проектирование электродвигателя и исходные данные	8
1.2 Определение основных размеров двигателя постоянного тока	9
1.3 Обмотка якоря.....	11
1.4 Размеры зубцов, пазов и проводов обмотки якоря	15
1.5 Коллектор и щетки	20
1.6 Проверка коммутации.....	25
1.7 Магнитная система машины.....	27
1.8 Расчет полюса	32
1.9 Потери и коэффициент полезного действия электродвигателя.....	42
1.10 Уточнение расчетных значений физических величин.....	50
1.11 Рабочие характеристики и номинальные данные электродвигателя	51
1.12 Тепловой расчет электродвигателя.....	58
1.13 Элементы конструирования основных деталей двигателя	61
постоянного тока	61
Контрольные вопросы	67
2 Пример расчета двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением	69
2.1 Задание на проектирование электродвигателя и исходные данные	69
2.2 Определение основных размеров двигателя постоянного тока	70
2.3 Обмотка якоря.....	73
2.4 Размеры зубцов, пазов и проводов обмотки якоря	77
2.5 Коллектор и щетки	82
2.6 Проверка коммутации.....	86

2.7 Магнитная система машины.....	88
2.8 Расчет полюса	92
2.9 Потери и коэффициент полезного действия электродвигателя.....	106
2.10 Уточнение расчетных значений физических величин.....	114
2.11 Рабочие характеристики и номинальные данные электродвигателя	116
2.12 Тепловой расчет электродвигателя.....	120
2.13 Паспортные данные спроектированного двигателя постоянного тока ...	123
Перечень условных буквенных обозначений физических величин.....	127
Список использованных источников.....	135
Приложение А (справочное) Номинальные диаметры и длины в машиностроении по ГОСТ 6636 – 69.....	137
Приложение Б (справочное) Обмоточные провода	140
Приложение В (справочное) Коэффициент заполнения пакета сталью ...	144
Приложение Г (справочное) Кривые намагничивания сталей	147
Приложение Д (справочное) Щетки для электродвигателей.....	160
Приложение Е (справочное) Коэффициенты аппроксимации основных кривых намагничивания электротехнических сталей и СтЗ	164
Приложение Ж (справочное) Удельные потери в листовой электротехнической стали при $B = 1 \text{ Тл}$ и $f = 50 \text{ Гц}$	165
Приложение И (справочное) Общий вид двигателя постоянного тока ...	166
Приложение К (справочное) Изолирование пазов	169
Приложение Л (справочное) Концы валов цилиндрические электрических машин по ГОСТ 12080-66.....	171
Приложение М (справочное) Подшипники шариковые радиальные однорядные по ГОСТ 8338-75	172

Введение

Двигатели постоянного тока (ДПТ) широко применяются в различных отраслях промышленности. Их значительное распространение объясняется преимуществами выходных характеристик: они имеют высокий пусковой и перегрузочный момент, высокое быстродействие, широкий диапазон плавного регулирования частоты вращения.

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

По способу возбуждения двигатели постоянного тока делят на машины с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением. Двигатели с независимым возбуждением могут иметь электромагнитное или магнитоэлектрическое возбуждение (с возбуждением от постоянных магнитов). К преимуществам машин с магнитоэлектрическим возбуждением следует отнести высокий коэффициент полезного действия (КПД), стабильность магнитного потока возбуждения при изменении температуры окружающей среды, высокую надежность и технологичность конструкции индуктора, регулирование частоты вращения вала осуществляется изменением напряжения питания.

ДПТ с электромагнитным возбуждением имеют широкий диапазон регулирования частоты вращения вала за счет изменения потока возбуждения, регулируемого током возбуждения.

Увеличение быстродействия коллекторных двигателей малой мощности ограничивается допустимыми электромагнитными нагрузками, моментом инерции и перегрузочной способностью, определяемой условием коммутации и 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 дина-

мических 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 ($S1$), для которых основными параметрами являются максимальный КПД и ресурс при лимитированных массе и объеме;
- силовые двигатели, предназначенные для кратковременного ($S2$) и повторно-кратковременного ($S3$) 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 последовательным возбуждением первых двух функциональных классов мощностью до 1000 Вт , с напряжением от 12 В до 220 В , с частотой вращения от 1000 об/мин до 6000 об/мин . В соответствующих разделах пособия приводятся необходимые рекомендации по выбору электромагнитных нагрузок, материалов, размеров конструкции, в приложении приведены необходимые для проведения расчета справочные данные по магнитным материалам, проводам для обмотки якоря и обмотки возбуждения, щеткам и подшипникам.

В пособии приведена методика аналитического расчета коллекторного двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, позволяющая

получить заданные технические параметры при лимитированном габарите и заданном тепловом режиме электродвигателя. В методике используются основные базовые понятия, некоторые зависимости и рекомендации, приведенные в литературе [2, 3].

1 Расчет коллекторного двигателя постоянного тока малой мощности с последовательным возбуждением

1.1 Задание на проектирование электродвигателя и исходные данные

Рассчитать и разработать конструкцию коллекторного двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением со следующими данными:

- а) номинальная мощность двигателя ($P_{ном}$);
- б) номинальное напряжение ($U_{ном}$);
- в) номинальная частота вращения ($n_{ном}$);
- г) наружный диаметр корпуса ($D_{корп}$);
- д) возбуждение последовательное;
- е) режим работы $S1, S2, S3$;
- ж) класс нагревостойкости изоляции B, F, H ;
- и) исполнение по степени защиты $IP 44, IP 23$;
- к) по способу охлаждения $IC 0040$.

Конструкция разработанного электродвигателя 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 проектируемого электродвигателя постоянного тока с последовательным возбуждением принимаем цилиндрическую конструкцию электродвигателя с явнополюсным статором, без добавочных полюсов, зубчатым якорем и цилиндрическим коллектором.

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 и число полюсов ($2p$) определяют остальные размеры двигателя и его вес. Для определения основных размеров двигателя необходимо определить по номинальным данным двигателя электромагнитную мощность ($P_{эм}$), выбрать электромагнитные нагрузки: токовую линейную нагрузку (A) и магнитную индукцию в воздушном зазоре (B_δ); выбрать коэффициенты α_δ и λ , характеризующие относительную геометрию двигателя.

Ток якоря в двигателе с последовательным возбуждением одновременно является током двигателя и током возбуждения ($I_a = I = I_\delta$).

1.2.1 Предварительное значение тока якоря при номинальной нагрузке электродвигателя

$$I'_a = I' = I'_\delta = \frac{P_{ном}}{\eta' \cdot U_{ном}}, \quad (1.1)$$

где η' - предварительное значение коэффициента полезного действия электродвигателя, его значение выбирают из диапазона от 0,6 до 0,75;

$P_{ном}$ - номинальная мощность двигателя (эта величина указана в техническом задании на проектирование);

$U_{ном}$ - номинальное напряжение (эта величина указана в техническом задании на проектирование).

1.2.2 Электромагнитная мощность электродвигателя [4]

$$P'_{эм} = \frac{1+3 \cdot \eta'}{4 \cdot \eta'} \cdot P_{ном} \text{ - при кратковременном режиме работы; } \quad (1.2)$$

$$P'_{эм} = \frac{1+2 \cdot \eta'}{3 \cdot \eta'} \cdot P_{ном} \text{ - при продолжительном режиме работы.} \quad (1.3)$$

1.2.3 Диаметр якоря

$$D_n = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot P'_{эм}}{\alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot A'' \cdot n_{ном} \cdot \lambda}}, \quad (1.4)$$

где D_n - предварительное значение диаметра якоря;

α_{δ} - коэффициент полюсного перекрытия, его значение выбирают из диапазона от 0,6 до 0,75;

B_{δ} - магнитная индукция в воздушном зазоре, ее значение выбирают из диапазона от 0,1 Тл до 0,7 Тл;

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

$n_{ном}$ - номинальная частота вращения вала (эта величина указана в техническом задании на проектирование);

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

По предварительно полученному значению диаметра якоря (D_n) выбирают ближайшее стандартное значение диаметра якоря (D) из приложения VIII [2] или из приложения А данного пособия.

1.2.4 Расчетная длина якоря

$$l_{\delta} = \lambda \cdot D. \quad (1.5)$$

1.2.5 Окружная скорость вращения якоря

$$V_a = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{ном}}{60}. \quad (1.6)$$

1.2.6 Полусное деление

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p}, \quad (1.7)$$

принимают $2p = 2$ при $P_{ном} \leq 100 \text{ Вт}$;

$2p = 4$ при $P_{ном} > 100 \text{ Вт}$.

1.2.7 Расчетная ширина полюсного наконечника

$$b_{\delta} = \alpha_{\delta} \cdot \tau. \quad (1.8)$$

1.2.8 Частота перемагничивания стали якоря

$$f_2 = \frac{P \cdot n_{ном}}{60}. \quad (1.9)$$

1.3 Обмотка якоря

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 число эффективных проводников обмотки якоря

$$N' = \frac{\pi \cdot D \cdot A'' \cdot 2a}{I'_a}, \quad (1.10)$$

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 [5]

$$z' = 3 \cdot D \cdot 100 \text{ при } D < 0,05 \text{ м}; \quad (1.11)$$

$$z' = 4 \cdot D \cdot 100 \text{ при } D \geq 0,05 \text{ м}. \quad (1.12)$$

Выбирают целое нечетное число пазов якоря (z) так, чтобы (z/a) было целым числом.

1.3.3 Число коллекторных пластин

$$k = (1 \div 3) \cdot z, \quad (1.13)$$

принимают $k = 2 \cdot z$ при $2p = 2$;

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

1.3.4 Число витков в секции обмотки якоря

$$\omega'_c = \frac{N'}{2 \cdot k}. \quad (1.14)$$

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

1.3.5 Число проводников обмотки якоря

$$N = \omega_c \cdot 2 \cdot k. \quad (1.15)$$

1.3.6 Число проводников обмотки якоря в пазу якоря

$$N_n = \frac{N}{z}. \quad (1.16)$$

1.3.7 Шаги обмотки якоря в пазах

а) простой петлевой обмотки якоря:

первый частичный шаг

$$y_1 = \frac{z}{2p} - \varepsilon, \quad (1.17)$$

результатирующий шаг и шаг по коллектору

$$y = 1; \quad y_k = 1, \quad (1.18)$$

второй частичный шаг

$$y_2 = y_1 - y = y_1 - 1; \quad (1.19)$$

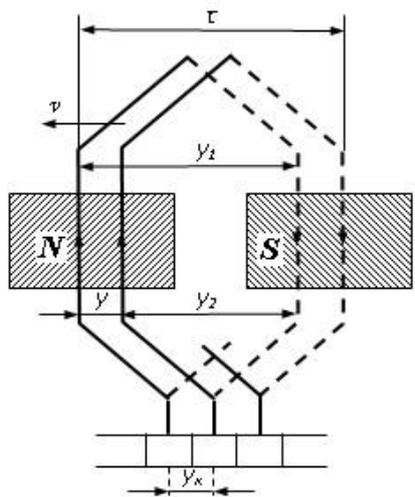


Рисунок 1.1 – Схема соединения секций петлевой обмотки

б) простой волновой обмотки:

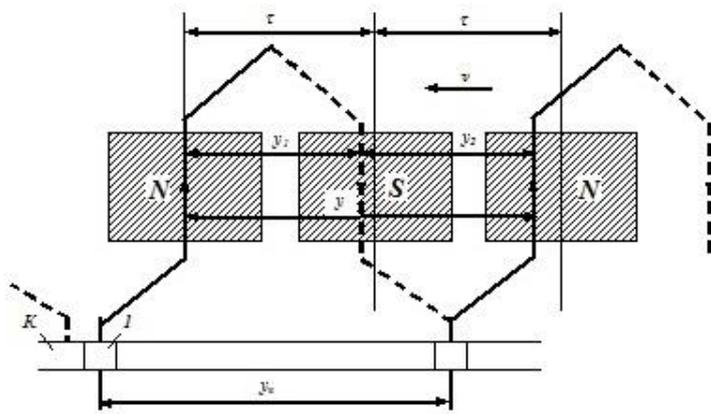


Рисунок 1.2 – Схема соединения секций волновой обмотки

первый частичный шаг

$$y_1 = \frac{z}{2p} - \varepsilon, \quad (1.20)$$

результующий шаг и шаг по коллектору

$$y = y_k = \frac{z \pm 1}{p}, \quad (1.21)$$

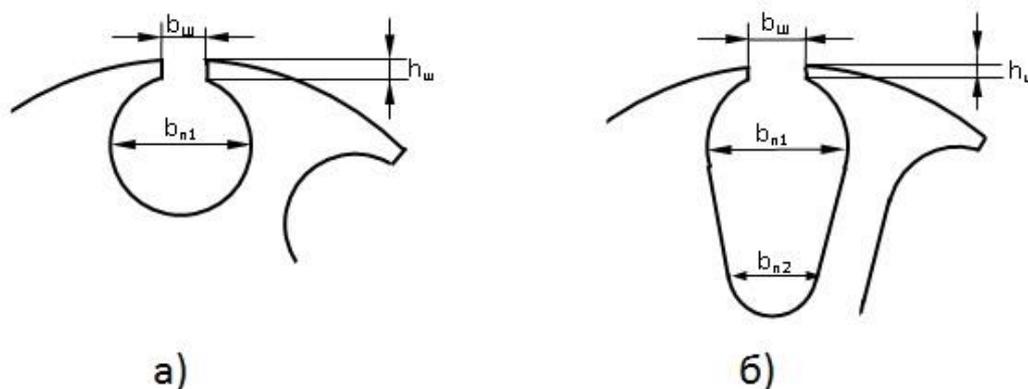
второй частичный шаг

$$y_2 = y - y_1. \quad (1.22)$$

Обмоточные шаги y_1, y_2, y, y_k должны быть целыми числами. Укорочение шага ε ($\varepsilon > 0$) выбирают таким, чтобы шаги обмоток были целыми числами. Применение укорочения шага в петлевых обмотках позволяет уменьшить длину вылета лобовых частей, уменьшить сопротивление и массу 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 якоря приведены на рисунке 1.3.



а – круглый паз; б – овальный паз

Рисунок 1.3 – Пазы якоря

1.4.1 Бóльший диаметр овального и диаметр круглого паза якоря

$$b_{n1} = \frac{k_{c2} \cdot B_z \cdot z \cdot D' \cdot \sin \frac{\alpha'}{2} - \pi \cdot D \cdot B_\delta}{k_{c2} \cdot B_z \cdot z \cdot \left(1 + \sin \frac{\alpha'}{2}\right)}, \quad (1.23)$$

где k_{c2} - коэффициент заполнения пакета якоря сталью, его значение выбирают по таблице 2.1 [6] или по таблице В.1 данного пособия для выбранной марки стали сердечника якоря и способа изолировки листов;

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

$D' = D - 2 \cdot h_{ш}$ - диаметр якоря без учета шлица;

$h_{ш} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - высота шлица паза якоря;

B_z - магнитная индукция в зубце якоря, ее значение выбирают из диапазона от 0,5 Тл до 1,9 Тл.

1.4.2 Меньший диаметр овального паза принимают равным

$$b_{n2} \geq 0,002 \text{ м}. \quad (1.24)$$

При этом необходимо чтобы $b_{n2} < b_{n1}$.

1.4.3 Периметр паза

а) овального паза

$$P_n = b_{n1} \cdot \left(\frac{\pi + \alpha'}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha'}{2} \right) - \frac{b_{n2} \cdot \left(1 - \sin \frac{\alpha'}{2}\right)}{\sin \frac{\alpha'}{2}}; \quad (1.25)$$

б) круглого паза

$$P_n = \pi \cdot b_{n1}. \quad (1.26)$$

1.4.4 Высота паза якоря, ее рассчитывают исходя из условия обеспечения параллельности стенок зубца

а) овального паза

$$h_n = \frac{(b_{n1} - b_{n2})}{2 \cdot \sin \frac{\alpha'}{2}} + \frac{(b_{n1} + b_{n2})}{2} + h_{ш}; \quad (1.27)$$

б) круглого паза

$$h_n = b_{n1} + h_{ш}. \quad (1.28)$$

1.4.5 Площадь паза якоря

а) площадь поперечного сечения овального паза

$$S_n = \left[\frac{(b_{n1})^2}{4} \cdot \left(\frac{\pi + \alpha'}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha'}{2} \right) - \frac{(b_{n2})^2}{4 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha'}{2}} \right] \cdot k_{ск}, \quad (1.29)$$

где $k_{ск} = \frac{l_{\delta}}{\sqrt{(n_z \cdot t_z)^2 + l_{\delta}^2}}$ - коэффициент скоса пазов якоря;

$t_z = \frac{\pi \cdot D}{z}$ - зубцовое деление;

$n_z \cdot t_z$ - величина скоса пазов в зубцовых делениях, при скосе пазов якоря на одно зубцовое деление $n_z = 1$;

б) площадь поперечного сечения круглого паза

$$S_n = \pi \cdot \frac{b_{n1}^2}{4} \cdot k_{ck}. \quad (1.30)$$

Если на якоре скос пазов не выполняют, то принимают $k_{ck} = 1$.

1.4.6 Ширина зубца якоря

$$b_z = \frac{B_\delta \cdot t_z}{k_{c2} \cdot B_z}. \quad (1.31)$$

Для обеспечения механической прочности зубца необходимо, чтобы выполнялось условие $b_z \geq 0,002 \text{ м}$.

1.4.7 Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря

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

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

1.4.8 Сечение и диаметр провода обмотки якоря

Предварительное значение сечения провода обмотки якоря

$$g' = \frac{I'_a}{2a \cdot j'} \quad (1.32)$$

Окончательные значения сечения (g) и диаметров провода: диаметр неизолированного провода (d) и диаметр изолированного провода ($d_{из}$), выбирают из приложения Б по таблице Б.2 или из приложения 3 [7].

1.4.9 Площадь поперечного сечения паза якоря, заполненного обмоткой

$$S_{no} = S_n - S_{из} - S_{кл}, \quad (1.33)$$

где $S_{из} = b_{из} \cdot \Pi_n$ - площадь поперечного сечения пазовой изоляции;

$b_{из}$ - толщина пазовой изоляции, ее значение выбирают из приложения К;

$S_{кл} = \frac{\pi}{8} \cdot b_{кл}^2 + b_{кл} \cdot h_{кл}$ - площадь поперечного сечения прямоугольного

пазового клина;

$b_{кл} = (0,3 \div 0,6) \cdot b_{n1}$ - ширина клина;

$h_{кл} = (0,5 \div 1,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - высота клина;

$S_{кл} = \frac{\pi}{8} \cdot b_{кл}^2$ - площадь поперечного сечения пазового клина, если

клин имеет форму, копирующую форму верхней части паза.

1.4.10 Коэффициент заполнения паза якоря изолированными проводниками

$$k_3 = \frac{N_n \cdot d_{из}^2}{S_{no}} \quad (1.34)$$

Для автоматизированной укладки обмотки в пазы якоря необходимо, чтобы $0,68 \leq k_3 \leq 0,72$.

При ручной укладке обмотки якоря в пазы допускается получение коэффициента заполнения паза в диапазоне $0,75 \geq k_3 > 0,72$.

1.4.11 Средняя длина полувитка секции обмотки якоря

а) петлевой обмотки

$$l_{a\text{cp}} = \frac{l_\delta}{k_{\text{СК}}} + l_{\text{нл}} + \frac{y_1}{z} \cdot \pi \cdot (D - h_n); \quad (1.35)$$

б) волновой обмотки

$$l_{a\text{cp}} = \frac{l_\delta}{k_{\text{СК}}} + l_{\text{нл}} + \frac{y_1 + y_2}{2 \cdot z} \cdot \pi \cdot (D - h_n), \quad (1.36)$$

где $l_{\text{нл}} = (2 \div 3) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - прямолинейный отрезок лобовой части обмотки.

1.4.12 Сопротивление обмотки якоря при температуре 20°C

$$R_a = \frac{N \cdot l_{a\text{cp}}}{57 \cdot (2a)^2 \cdot g} \cdot 10^{-6}. \quad (1.37)$$

1.5 Коллектор и щетки

В электродвигателях постоянного тока малой мощности, как правило, применяют коллектор на пластмассе. Коллекторные пластины изготавливают из

твeрдотянутой меди и изолируют их друг от друга и от вала якоря пластмассой. Конструкция такого коллектора представлена на рисунке 1.4.

Конструкция щеткодержателя должна обеспечить правильное положение щеток на коллекторе. В машинах малой мощности широко используется трубчатый щеткодержатель (рисунок 1.5).

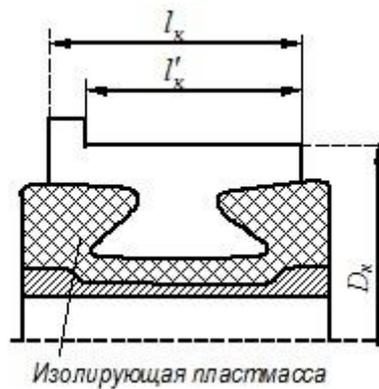
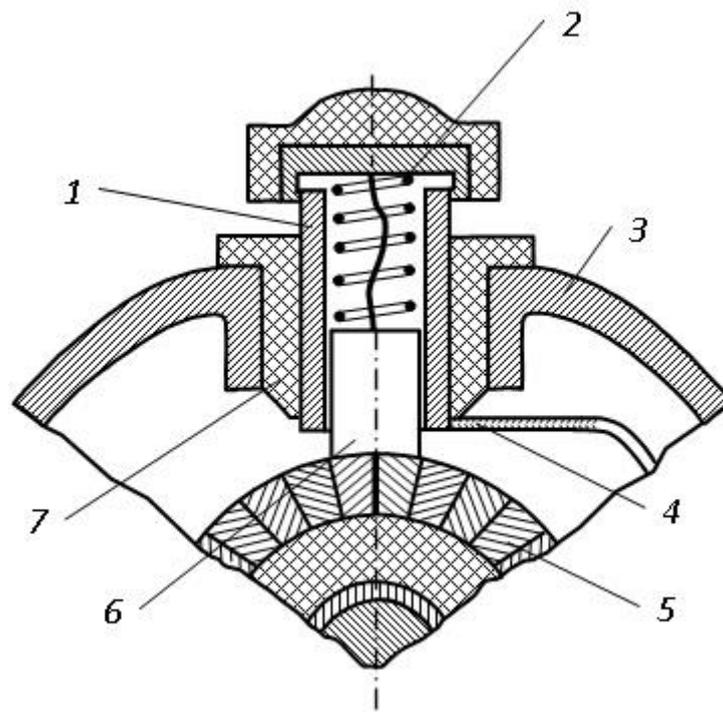


Рисунок 1.4 – Коллектор на пластмассе с втулкой



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

Рисунок 1.5 – Трубчатый щеткодержатель малых машин

Электрические свойства щеток и их стандартные размеры приведены в приложении Д.

1.5.1 Предварительное значение наружного диаметра коллектора

$$D'_k = (0,65 \div 0,8) \cdot D. \quad (1.38)$$

1.5.2 Относительное коллекторное деление

а) для простой волновой обмотки

1) если y - четное число

$$t_{k\delta}^* \leq \frac{0,8 \cdot \pi \cdot (1 - \alpha_\delta)}{\left(\gamma + \frac{\kappa}{z} - \frac{1}{2p} \right) \cdot 2p}, \quad (1.39)$$

где $\gamma = 1,5 \div 4$ - число коллекторных пластин, перекрываемых щеткой;

2) если y - нечетное число

$$t_{k\delta}^* \leq \frac{0,8 \cdot \pi \cdot (1 - \alpha_\delta)}{\left(\gamma + \frac{\kappa}{z} - \frac{1-p}{2p} \right) \cdot 2p}, \quad (1.40)$$

б) для простой петлевой обмотки

$$t_{k\delta}^* < \frac{0,8 \cdot \pi \cdot (1 - \alpha_\delta)}{\left(\frac{2 \cdot \kappa}{z} - 0,5 \right) \cdot 2p}. \quad (1.41)$$

Выбирают значение относительного коллекторного деления $t_k^* \leq t_{k\delta}^*$.

1.5.3 Предварительное значение коллекторного деления

$$t'_k = t_k^* \cdot D'_k. \quad (1.42)$$

1.5.4 Ширина медной коллекторной пластины

$$\beta'_k = t'_k - \beta_u, \quad (1.43)$$

где β'_k - предварительная ширина медной коллекторной пластины;

β_u - толщина изоляционной коллекторной пластины;

$$\beta_u = (0,4 \div 0,6) \cdot 10^{-3} \text{ м при } U_{ном} \leq 30 \text{ В};$$

$$\beta_u = (0,6 \div 0,8) \cdot 10^{-3} \text{ м при } U_{ном} > 30 \text{ В}.$$

Полученное значение β'_k округляют до десятых долей миллиметра и принимают β_k равным этому числу.

По технологическим требованиям необходимо, чтобы $\beta_k \geq 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

1.5.5 Окончательный диаметр коллектора

$$D_k = \frac{k \cdot t_k}{\pi}, \quad (1.44)$$

где $t_k = \beta_k + \beta_u$ - коллекторное деление.

1.5.6 Окружная скорость коллектора

$$V_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_{ном}}{60}. \quad (1.45)$$

1.5.7 Требуемая площадь поперечного сечения щетки

Выбирают марку щетки и плотность тока $j_{щд}$ по таблице П 4.2 [7] или по таблице Д.1 приложения Д.

$$S'_{щ} = \frac{I'_a}{n_{щ} \cdot j_{щд}}, \quad (1.46)$$

где $j_{щд}$ – допустимая плотность тока для выбранной марки щетки;

$n_{щ}$ – число пар щеток, установленных в машине.

1.5.8 Размеры щетки

а) предварительная ширина щетки

$$b'_{щ} = \gamma \cdot t_k; \quad (1.47)$$

б) предварительная длина щетки по оси коллектора

$$a'_{щ} = \frac{S'_{щ}}{b'_{щ}}. \quad (1.48)$$

По таблице П 4.1 [7] или по таблице Д.2 приложения Д выбирают такие стандартные значения $b_{щ}$, $a_{щ}$, чтобы $b_{щ} \geq b'_{щ}$, $a_{щ} \geq a'_{щ}$.

1.5.9 Длина коллектора

а) активная длина коллектора по оси вала

$$l'_k = (1,5 \div 2,0) \cdot a_{щ}; \quad (1.49)$$

б) полная длина коллектора по оси вала

$$l_k = l'_k + (3 \div 5) \cdot d. \quad (1.50)$$

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 ней реактивной ЭДС (e_p) и ЭДС поля якоря (e_a) [2]. Реактивная ЭДС и ЭДС поля якоря суммируются и вызывают в цепи короткозамкнутой секции добавочный ток, увеличивающий ток якоря 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. Чтобы избежать недопустимого искрения под щетками необходимо чтобы величина результирующей ЭДС в секции не превышала 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

$$b_{зк} = b_{щ} \cdot \frac{D}{D_k} + t_k \cdot \left(\frac{\kappa}{z} + \left| \frac{\kappa}{2p} - y_1 \right| - \frac{a}{p} \right) \cdot \frac{D}{D_k}. \quad (1.51)$$

Для благоприятной коммутации необходимо соблюдать соотношение

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

1.6.2 Среднее значение реактивной ЭДС в короткозамкнутой секции обмотки якоря

$$e_p = 2 \cdot \omega_c \cdot \lambda_n \cdot l_\delta \cdot A' \cdot V_a, \quad (1.52)$$

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

магнитная проводимость пазового рассеяния для овального паза;

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

пазового рассеяния для круглого паза;

$l_l = l_{acr} - l_\delta$ – длина лобовой части полувитка обмотки якоря;

$b_{ш} = (2 \div 8) \cdot d_{уз}$ – ширина шлица паза якоря, при выборе ширины шлица необходимо соблюдать условие $b_{ш} < b_{кл}$;

$$A' = \frac{N \cdot I_a'}{2a \cdot \pi \cdot D}.$$

1.6.3 Среднее значение ЭДС поля якоря

$$e_a = \frac{0,8 \cdot \pi \cdot \omega_c \cdot A' \cdot \tau \cdot l_\delta \cdot V_a}{\tau - b_\delta} \cdot 10^{-6}. \quad (1.53)$$

1.6.4 Среднее значение результирующей ЭДС в короткозамкнутой секции обмотки якоря

$$e = e_p + e_a. \quad (1.54)$$

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

$$e \leq e_{\max}, \quad (1.55)$$

где e_{\max} – максимальное значение результирующей ЭДС, для соответствующего $U_{\text{ном}}$ ее значение определяют из графика $e_{\max} = f(U_{\text{ном}})$ (см. рисунок 1.6) или по уравнению $e_{\max} = 0,01364 \cdot U_{\text{ном}}$.

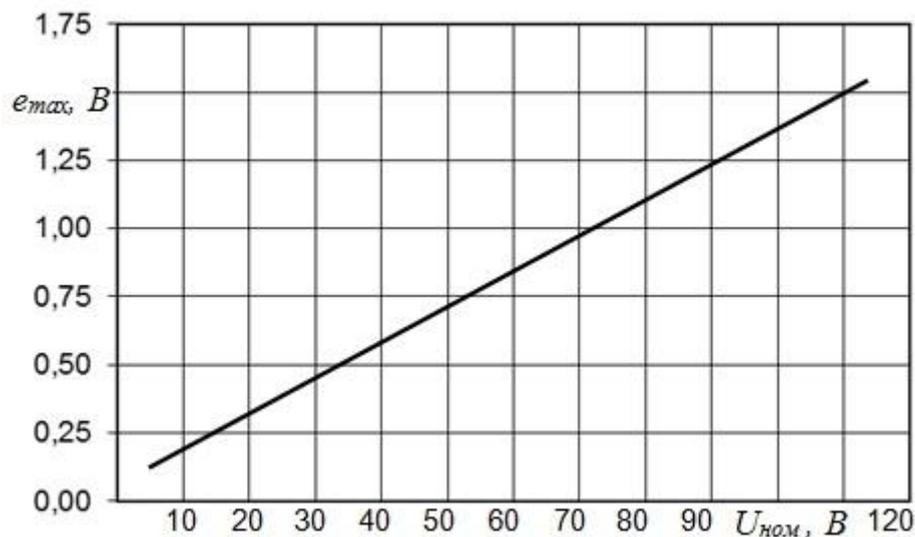


Рисунок 1.6 – Зависимость $e_{\max} = f(U_{\text{ном}})$

1.7 Магнитная система машины

Как известно, в электродвигателе происходит преобразование электрической энергии в механическую энергию. Необходимым условием такого преобразования энергии является наличие магнитного поля возбуждения. Магнитный поток возбуждения замыкается по магнитной цепи электродвигателя. 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 техни-

ческому заданию на проектирование диаметр корпуса электродвигателя задан, поэтому основные действия связаны с определением размеров полюса и расчетом обмотки возбуждения.

Магнитную цепь ДПТ можно разбить на ряд участков с приблизительно одинаковой индукцией на каждом участке. Принципиальная схема магнитной цепи четырехполюсного двигателя приведена на рисунке 1.7. В этой конструкции электродвигателя таких магнитных участков шесть: ярмо статора (станина), воздушный зазор, зубцы якоря, ярмо якоря, сердечник полюса и полюсной наконечник, технологический зазор между статором и сердечником главного полюса. Определение сечения участков магнитной цепи, кроме воздушного зазора, проводится исходя из допустимых для данных участков магнитных индукций, определяемых выбранным магнитным материалом магнитопровода. Рассматриваемая конструкция магнитной системы имеет осевую симметрию, поэтому для определения размеров полюса достаточно определить требуемую магнитную энергию на один полюс.

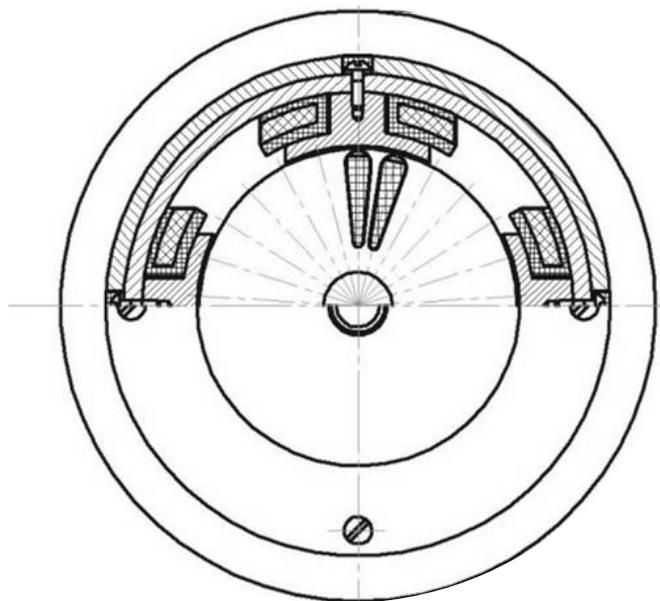


Рисунок 1.7 – Поперечный разрез четырехполюсного электродвигателя с электромагнитным возбуждением

Здесь приведена методика расчета магнитной системы с радиальным расположением полюсов с полюсными наконечниками.

Приняты следующие допущения:

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

1.7.1 Длина воздушного зазора под полюсом

а) при продолжительном режиме работы электродвигателя

$$\delta_\delta \geq 0,25 \cdot \frac{\tau \cdot A'}{B_\delta} \cdot 10^{-6}; \quad (1.56)$$

б) при кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы электродвигателя

$$\delta_\delta \geq 0,15 \cdot \frac{\tau \cdot A'}{B_\delta} \cdot 10^{-6}. \quad (1.57)$$

Принимают $\delta \geq \delta_\delta$.

1.7.2 Высота ярма якоря

$$h_j = \frac{D - (2 \cdot h_n + D_0)}{2}, \quad (1.58)$$

где $D_0 = (0,18 \div 0,24) \cdot D$ - диаметр отверстия в сердечнике якоря под вал.

1.7.3 Индукция в ярме якоря

$$B_j = \frac{\Phi_\delta}{2 \cdot k_{c2} \cdot h_j \cdot l_\delta}, \quad (1.59)$$

где $\Phi_\delta = B_\delta \cdot l_\delta \cdot b_\delta$ - магнитный поток полюса в воздушном зазоре.

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

1.7.4 Размеры станины электродвигателя

а) площадь поперечного сечения станины

$$S_c = \frac{\Phi_\delta \cdot \sigma}{2 \cdot B_c}, \quad (1.60)$$

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

$\sigma = 1,08$ при $2p = 2$;

$\sigma = 1,12$ при $2p = 4$;

B_c - магнитная индукция в станине, её значение выбирают в диапазоне от $0,5 \text{ Тл}$ до $1,6 \text{ Тл}$;

б) расчетная осевая длина станины

$$l_c = l_\delta + 0,2 \cdot D; \quad (1.61)$$

в) высота станины

$$h_c = \frac{S_c}{k_{c1} \cdot l_c}, \quad (1.62)$$

где k_{c1} – коэффициент заполнения станины сталью; если станина выполнена сплошной, то $k_{c1} = 1$.

По технологическим требованиям необходимо, чтобы $h_c \geq 0,003$ м.

1.7.5 Размеры сердечника полюса

а) высота сердечника полюса с полюсным наконечником

$$h_{zn} = \frac{D_{корп} - 2 \cdot h_{корп} - 2 \cdot h_c - D - 2 \cdot \delta}{2}, \quad (1.63)$$

где $D_{корп}$ – диаметр корпуса двигателя (эта величина указана в техническом задании на проектирование);

$h_{корп} = (3 \div 5) \cdot 10^{-3}$ м – толщина корпуса, ($h_{корп} = 0$, если станина в двигателе выполняет функцию корпуса);

б) длина сердечника полюса

$$l_{zn} = l_{\delta}; \quad (1.64)$$

в) ширина сердечника полюса

$$b_{zn} = \frac{\Phi_{\delta} \cdot \sigma}{l_{zn} \cdot B_n}, \quad (1.65)$$

где B_n – индукция в сердечнике полюса, ее значение выбирают в диапазоне от 0,8 Тл до 1,6 Тл.

1.8 Расчет полюса

Расчет полюса 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 полюсом 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:

$$H_i = (A_c \cdot B_i^2 + D_c \cdot B_i + C_c) \cdot sh(\beta_c \cdot B_i), \quad (1.66)$$

где B_i – значение индукции на i -том участке магнитной цепи;

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_c, D_c, C_c, β_c для основных кривых намагничивания некоторых марок сталей приведены в приложении Е.

1.8.1 Удельная магнитная энергия ярма статора (станины)

$$W_{c \text{ уд}} = \left(\frac{A_c \cdot B_c^2 + D_c \cdot B_c + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_c) - sh(\beta_c \cdot B_c) \cdot \frac{2A_c \cdot B_c + D_c}{\beta_c^2}, \quad (1.67)$$

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 сердечника полюса

$$W_{ny\delta} = \left(\frac{A_c \cdot B_n^2 + D_c \cdot B_n + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_n) - sh(\beta_c \cdot B_n) \cdot \frac{2A_c \cdot B_n + D_c}{\beta_c^2}. \quad (1.68)$$

1.8.3 Удельная магнитная энергия зубцов якоря

$$W_{zy\delta} = \left(\frac{A_c \cdot B_z^2 + D_c \cdot B_z + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_z) - sh(\beta_c \cdot B_z) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B_z + D_c}{\beta_c^2}. \quad (1.69)$$

1.8.4 Удельная магнитная энергия ярма якоря

$$W_{jy\delta} = \left(\frac{A_c \cdot B_j^2 + D_c \cdot B_j + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_j) - sh(\beta_c \cdot B_j) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B_j + D_c}{\beta_c^2}. \quad (1.70)$$

1.8.5 Удельная магнитная энергия воздушного зазора

$$W_{\delta y\delta} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B_{\delta cp\sigma}^2, \quad (1.71)$$

где μ_0 - магнитная постоянная;

$$B_{\delta_{cp\sigma}} = B_{\delta} \cdot \frac{(1 + \sigma)}{2} - \text{среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре с учетом потока рассеяния.}$$

1.8.6 Удельная магнитная энергия для зазора стыка

$$W_{\delta c y \delta} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B_{cm}^2. \quad (1.72)$$

В конструкции статора с отъемлемыми полюсами $B_{cm} = B_n$.

1.8.7 Объем магнитного материала ярма статора на один полюс

$$V_c = \frac{\pi \cdot (D_{корн} - 2 \cdot h_{корн} - h_c)}{2p} \cdot h_c \cdot l_c \cdot k_{c1}. \quad (1.73)$$

1.8.8 Объем магнитного материала сердечника полюса

$$V_n = h_{zn} \cdot l_{zn} \cdot b_{zn}. \quad (1.74)$$

1.8.9 Объем магнитного материала зубчатой зоны якоря на один полюс

$$V_z = \frac{\alpha_{\delta}}{2p} \cdot h_n \cdot b_z \cdot l_{\delta} \cdot z \cdot k_{c2}. \quad (1.75)$$

1.8.10 Объем магнитного материала ярма якоря на один полюс

$$V_j = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h_n - h_j)}{2p} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{\delta}}{2}\right) \cdot h_j \cdot l_{\delta} \cdot k_{c2}. \quad (1.76)$$

1.8.11 Объем воздушного зазора на один полюс

$$V_{\delta} = k_{\delta} \cdot \delta \cdot l_{\delta} \cdot b_{\delta}, \quad (1.77)$$

где $k_{\delta} = \frac{t_z + 10 \cdot \delta}{t_z - b_{\text{ш}} + 10 \cdot \delta}$ - коэффициент Картера.

1.8.12 Объем воздушного зазора стыка на один полюс

$$V_{\delta c} = \delta_{cm} \cdot l_{\delta} \cdot b_{cn}, \quad (1.78)$$

где δ_{cm} - длина воздушного зазора стыка, ее величина зависит от чистоты обработки поверхностей стыкуемых деталей.

1.8.13 Магнитная энергия, запасенная на участках магнитной цепи

$$W_c = W_{c \text{ y} \delta} \cdot V_c, \quad (1.79)$$

$$W_n = W_{n \text{ y} \delta} \cdot V_n, \quad (1.80)$$

$$W_z = W_{z \text{ y} \delta} \cdot V_z, \quad (1.81)$$

$$W_j = W_{j \text{ y} \delta} \cdot V_j, \quad (1.82)$$

$$W_{\delta} = W_{\delta \text{ y} \delta} \cdot V_{\delta}, \quad (1.83)$$

$$W_{\delta c} = W_{\delta c \text{ y} \delta} \cdot V_{\delta c}. \quad (1.84)$$

1.8.14 Магнитная энергия полюса, необходимая для намагничивания магнитной цепи электродвигателя

$$W = W_c + W_n + W_z + W_j + W_\delta + W_{\delta c}. \quad (1.85)$$

1.8.15 Размагничивающее действие поля якоря

В двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением магнитный поток якоря всегда направлен перпендикулярно магнитному потоку полюса. Под сбегающим краем полюса магнитный поток якоря направлен в воздушном зазоре навстречу магнитному потоку полюса и ослабляет его, уменьшая индукцию под этим краем полюса. Под другим краем полюса, набегающим, магнитный поток якоря совпадает по направлению с магнитным потоком полюса и усиливает его, увеличивая индукцию под этим краем полюса. Определение размагничивающего действия поперечной реакции якоря осуществляют аналитическим методом, учитывающим изменение магнитной энергии в воздушном зазоре при переходе двигателя из режима холостого хода в режим нагрузки [5].

Напряженность магнитного поля под сбегающим краем полюса

$$H'_\delta = H_\delta - H_{\delta a}, \quad (1.86)$$

где $H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}$ - напряженность магнитного поля в воздушном зазоре;

$H_{\delta a} = \frac{F_{\delta a}}{\delta}$ - напряженность поперечной составляющей магнитного

поля якоря в воздушном зазоре;

$F_{\delta a} = \frac{F_{aq} \cdot W_\delta}{W_z + W_j + W_\delta}$ - магнитодвижущая сила поперечной составляющей

магнитного поля якоря воздушного зазора;

$F_{aq} = \frac{b_{\delta} \cdot A'}{2}$ – магнитодвижущая сила поперечной составляющей магнитного поля якоря.

Напряженность магнитного поля под набегающим краем полюса

$$H_{\delta}'' = H_{\delta} + H_{\delta a}. \quad (1.87)$$

Индукция в воздушном зазоре под сбегающим и набегающим краями полюса

$$B_{\delta}' = H_{\delta}' \cdot \mu_0, \quad (1.88)$$

$$B_{\delta}'' = H_{\delta}'' \cdot \mu_0. \quad (1.89)$$

1.8.16 Удельные магнитные энергии участков магнитной цепи переходного слоя под сбегающим и набегающим краями полюса

$$W_{\delta y \delta}' = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot (B_{\delta' cp \sigma}')^2, \quad (1.90)$$

где $B_{\delta' cp \sigma}' = B_{\delta}' \cdot \left(\frac{1 + \sigma}{2} \right)$ – среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре под сбегающим краем полюса с учетом магнитного потока рассеяния;

$$W_{\delta y \delta}'' = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot (B_{\delta'' cp \sigma}'')^2, \quad (1.91)$$

где $B''_{\delta_{cp\sigma}} = B''_{\delta} \cdot \left(\frac{1+\sigma}{2} \right)$ – среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре под набегающим краем полюса с учетом потока рассеяния;

$$W'_{zy\delta} = \left(\frac{A_c \cdot (B'_z)^2 + D_c \cdot B'_z + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B'_z) - sh(\beta_c \cdot B'_z) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B'_z + D_c}{\beta_c^2}, \quad (1.92)$$

где $B'_z = \frac{B'_{\delta} \cdot t_z}{k_{c2} \cdot b_z}$ – магнитная индукция в зубце якоря под сбегающим краем полюса;

$$W''_{zy\delta} = \left(\frac{A_c \cdot (B''_z)^2 + D_c \cdot B''_z + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B''_z) - sh(\beta_c \cdot B''_z) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B''_z + D_c}{\beta_c^2}, \quad (1.93)$$

где $B''_z = \frac{B''_{\delta} \cdot t_z}{k_{c2} \cdot b_z}$ – магнитная индукция в зубце якоря под набегающим краем полюса;

$$W'_{jy\delta} = \left(\frac{A_c \cdot (B'_j)^2 + D_c \cdot B'_j + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B'_j) - sh(\beta_c \cdot B'_j) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B'_j + D_c}{\beta_c^2}, \quad (1.94)$$

где $B'_j = \frac{B'_{\delta} \cdot l_{zn} \cdot b_{\delta}}{2 \cdot k_{c2} \cdot h_j \cdot l_{\delta}}$ – магнитная индукция в ярме якоря под сбегающим краем полюса;

$$W_{jy\delta}'' = \left(\frac{A_c \cdot (B_j'')^2 + D_c \cdot B_j'' + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_j'') - sh(\beta_c \cdot B_j'') \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B_j'' + D_c}{\beta_c^2}, \quad (1.95)$$

где $B_j'' = \frac{B_\delta'' \cdot l_{zn} \cdot b_\delta}{2 \cdot k_{c2} \cdot h_j \cdot l_\delta}$ - магнитная индукция в ярме якоря под набегающим

краем полюса.

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

$$W_{\delta z j} = 0,5 \cdot \left[(W'_{\delta y\delta} + W''_{\delta y\delta}) \cdot V_\delta + (W'_{z y\delta} + W''_{z y\delta}) \cdot V_z + (W'_{j y\delta} + W''_{j y\delta}) \cdot V_j \right]. \quad (1.96)$$

1.8.18 Увеличение магнитной энергии переходного слоя от действия магнитного поля якоря

$$\Delta W = W_{\delta z j} - W_\delta - W_z - W_j. \quad (1.97)$$

1.8.19 Сечение провода обмотки возбуждения

$$g'_\delta = \frac{\omega'_\delta \cdot l'_{\delta cp}}{57 \cdot R'_\delta} \cdot 10^{-6}, \quad (1.98)$$

где $\omega'_\delta = \frac{2 \cdot 2p \cdot (W + \Delta W)}{I'_\delta \cdot \Phi_n}$ - предварительное число витков обмотки воз-

буждения электродвигателя;

$l'_{\delta cp} = 2 \cdot l_{zn} + 2 \cdot b_{zn} + 2 \cdot b_{\kappa max}$ - предварительная средняя длина витка

обмотки возбуждения;

$$b_{\text{кmax}} = 0,5 \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{ср}}}{2p} - b_{\text{2п}} - b_{\text{2з}} - b_3 \right) - \text{максимальная толщина катушки}$$

возбуждения;

$$D_{\text{ср}} = D + 2(\delta + h_{\text{пн}} + b_{\text{киз}});$$

$$h_{\text{пн}} = \frac{(b_{\delta} - b_{\text{2п}}) \cdot B_{\delta}}{2 \cdot B_{\text{пн}}} - \text{высота полюсного наконечника};$$

$b_{\text{киз}} = (1,5 \div 2) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - односторонняя толщина изоляционного каркаса катушки (выбирается из таблицы 10.3 [7]);

$B_{\text{пн}} = B_n$ - магнитная индукция в поперечном сечении полюсного наконечника;

$b_{\text{2з}} = (0,2 \div 1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - зазор между сердечником полюса и изоляционным каркасом обмотки возбуждения;

$b_3 = (0,5 \div 1) \cdot 10^{-2} \text{ м}$ - технологический зазор между катушками возбуждения соседних полюсов;

$\Phi_n = \Phi_{\delta} \cdot \sigma$ - магнитный поток в сердечнике полюса;

$$R'_g = \frac{U_{\text{ном}} - E - \Delta U_{\text{щп}} \cdot \frac{j'_{\text{щ}}}{j_{\text{щ}\delta}} - I'_a \cdot \sqrt{(R_a \cdot k'_{\theta})^2 + X_a^2}}{I'_g \cdot k'_{\theta g}};$$

$$E = \frac{p \cdot N \cdot \Phi_{\delta} \cdot n_{\text{ном}}}{a \cdot 60};$$

$\Delta U_{\text{щп}}$ - падение напряжения на пару щеток, это значение берут для выбранной марки щетки из таблицы Д1 приложения Д или по таблице П4.2 [7];

$$j'_{\text{щ}} = \frac{I'_a}{n_{\text{щ}} \cdot a_{\text{щ}} \cdot b_{\text{щ}}};$$

$$X_a = \frac{\mu_0 \cdot \kappa \cdot n_{\text{ном}} \cdot b_{\text{щ}}^2 \cdot n_{\text{щ}}^2 \cdot \omega_c^2 \cdot l_{\delta}}{a^3 \cdot t_{\kappa}^2 \cdot \left(\frac{b_{\text{щ}}}{t_{\kappa}} - \left(\frac{a}{p} - 1 \right) \right) \cdot 30} - \text{индуктивное сопротивление коммутируемых секций обмотки якоря};$$

$$k'_{\theta} = 1 + 0,004 \cdot \vartheta;$$

ϑ – расчетная температура;

можно предварительно принять $k'_{\theta_6} = k'_{\theta}$.

Согласно ГОСТ 183-74 для обмоток, соответствующих классу нагревостойкости B , расчетная температура (ϑ) принимается равной $75^{\circ}C$, для обмоток, соответствующих классам нагревостойкости F и H , расчетная температура принимается равной $115^{\circ}C$. Температура окружающей среды при эксплуатации двигателя принимается равной $20^{\circ}C$.

Окончательное значение сечения g_6 и диаметров проводов ($d_{уиз6}, d_6$) обмотки возбуждения выбирают из приложения Б по таблице Б2 или из приложения 3 [7].

1.8.20 Размеры катушки обмотки возбуждения

а) число витков в слое катушки обмотки возбуждения

$$\omega'_{ск} = \frac{h_{2n} - h_{nn} - 2 \cdot b_{куз}}{d_{уиз6}}, \quad (1.99)$$

расчетное значение ($\omega'_{ск}$) округляют до целого числа ($\omega_{ск}$);

б) число слоев провода в катушке возбуждения

$$n'_c = \frac{\omega'_6}{\omega_{ск} \cdot 2p}, \quad (1.100)$$

расчетное значение (n'_c) можно округлить до целого числа (n_c);

в) число витков обмотки возбуждения

$$\omega_6 = \omega_{ск} \cdot n_c \cdot 2p; \quad (1.101)$$

г) толщина катушки обмотки возбуждения

$$b_k = n_c \cdot d_{изв} + b_{киз} + b'_{из} + 0,5 \cdot b_{2з}, \quad (1.102)$$

необходимо, чтобы $b_k \leq b_{k\max}$;

д) средняя длина витка обмотки возбуждения

$$l_{в\text{ ср}} = 2 \cdot (l_{2н} + b_{2н} + b_k). \quad (1.103)$$

1.8.21 Сопротивление обмотки возбуждения при температуре 20 °С

$$R_\varepsilon = \frac{\omega_\varepsilon \cdot l_{в\text{ ср}}}{57 \cdot g_\varepsilon} \cdot 10^{-6}. \quad (1.104)$$

1.9 Потери и коэффициент полезного действия электродвигателя

1.9.1 Электрические потери в обмотке якоря

$$P_{\varepsilon a} = I_a^2 \cdot R_a \cdot k'_\theta, \quad (1.105)$$

$$\text{где } I_a = I_\varepsilon = I = \frac{U_{\text{ном}} - E - \Delta U_{\text{щн}} \cdot \frac{j'_{\text{щ}}}{j_{\text{щ}\delta}}}{R_\varepsilon \cdot k'_{\theta\varepsilon} + \sqrt{(R_a \cdot k'_\theta)^2 + X_a^2}}.$$

1.9.2 Электрические потери в щетках

$$P_{\varepsilon щ} = I \cdot \Delta U_{\text{щ}}, \quad (1.106)$$

где $\Delta U_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щн}} \cdot \frac{j_{\text{щ}}}{j_{\text{щд}}}$;

$$j_{\text{щ}} = \frac{I_a}{n_{\text{щ}} \cdot a_{\text{щ}} \cdot b_{\text{щ}}}.$$

1.9.3 Электрические потери в обмотке возбуждения

$$P_{\text{эв}} = I_{\text{в}}^2 \cdot R_{\text{в}} \cdot k'_{\theta\text{в}}. \quad (1.107)$$

1.9.4 Масса стали ярма якоря

$$m_j = 7,8 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h_n)^2}{4} \cdot k_{c2} \cdot l_{\delta}. \quad (1.108)$$

1.9.5 Масса стали зубцов якоря

$$m_z = 7,8 \cdot 10^3 \cdot k_{c2} \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 - S_n \cdot z \right) \cdot l_{\delta} - m_j. \quad (1.109)$$

1.9.6 Магнитные потери в ярме якоря

$$P_j = m_j \cdot \rho_j, \quad (1.110)$$

где $\rho_j = 2,3 \cdot P_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_2}{50} \right)^{\beta} \cdot \frac{1}{2} \left((B'_j)^2 + (B''_j)^2 \right)$ – удельные магнитные потери ярма якоря;

$\beta = 1,3 \div 1,5$ – коэффициент;

$\rho_{1,0/50}$ – удельные магнитные потери, их значение берут из таблицы П 1.17 [7] или из приложения Ж данного пособия в соответствии с выбранной маркой стали и толщиной листа якоря.

1.9.7 Магнитные потери в зубцах якоря

$$P_z = m_z \cdot \rho_z, \quad (1.111)$$

где $\rho_z = 2,3 \cdot \rho_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_2}{50}\right)^\beta \cdot \frac{1}{2} \left((B'_z)^2 + (B''_z)^2 \right)$ – удельные магнитные потери зубцов якоря.

1.9.8 Потери в стали якоря

$$P_c = P_j + P_z. \quad (1.112)$$

1.9.9 Механические потери в электродвигателе

а) потери на трение щеток о коллектор

$$P_{mщ} = \mu_m \cdot \rho_{щ} \cdot \sum S_{щ} \cdot V_k, \quad (1.113)$$

где μ_m , $\rho_{щ}$ – коэффициент трения щеток о коллектор и давление на щетку, их значения для выбранной в п.1.5.7 марки щетки берут из таблицы 4.2 [7] или из таблицы Д.1 приложения Д;
 $\sum S_{щ} = 2 \cdot n_{щ} \cdot S_{щ}$ – суммарное поперечное сечение установленных в электродвигателе электрических щеток;

б) потери в подшипниках

$$P_{mn} = k_m \cdot m_a \cdot n_{ном} \cdot 10^{-3}, \quad (1.114)$$

где $k_m = 1 \div 3$ – коэффициент [2];

$m_a = m_j + m_z + m_o + m_k$ – масса якоря;

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

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

масса коллектора;

в) вентиляционные потери

$$P_{me} = 2 \cdot D^3 \cdot n_{ном}^3 \cdot l_\delta \cdot 10^{-6}; \quad (1.115)$$

г) полные механические потери в электродвигателе

$$P_{mx} = P_{mц} + P_{mn} + P_{me}. \quad (1.116)$$

1.9.10 Добавочные потери

$$P_\delta = 0,01 \cdot U_{ном} \cdot I. \quad (1.117)$$

1.9.11 Суммарные потери мощности

$$\sum P = P_{\delta a} + P_{\delta e} + P_{\delta ц} + P_c + P_{mx} + P_\delta. \quad (1.118)$$

1.9.12 Потребляемая электродвигателем мощность

$$P_1 = U_{ном} \cdot I. \quad (1.119)$$

1.9.13 Полезная мощность на валу электродвигателя

$$P_2 = P_1 - \sum P. \quad (1.120)$$

1.9.14 Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%. \quad (1.121)$$

1.9.15 Расчет превышения температуры якоря

а) Превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды при продолжительном режиме работы с нагрузкой

$$\Delta \vartheta_a = \frac{\left(1 + \alpha_a \cdot b'_z \cdot \frac{\beta_n}{\lambda_1 \cdot \Pi_n} \right) \cdot \rho_{\varepsilon a} + \rho_c + \rho_{m \varepsilon}}{\alpha_a \cdot b'_z}, \quad (1.122)$$

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

$\alpha_1 = 16,7 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности неподвижного якоря;

$b'_z = t_z - b_{ш}$ – ширина коронки зубца якоря;

$\lambda_1 = 0,16 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ – коэффициент теплопроводности межвитковой изоляции;

$\beta_n = \frac{S_n \cdot (1 - k_z \cdot k_{nm})}{\Pi_n}$ – общая толщина эквивалентной изоляции в пазах якоря;

$$k_{nm} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{d^2}{d_{uz}^2} - \text{коэффициент заполнения изолированного провода}$$

медью;

$$\rho_{\varepsilon a} = \frac{I_a^2 \cdot R_a \cdot k'_\theta}{z \cdot l_{a\text{ср}}} - \text{относительные электрические потери в обмотке}$$

якоря при нагрузке;

$$\rho_c = \frac{P_c}{z \cdot l_\delta} - \text{относительные потери в стали сердечника якоря при}$$

нагрузке;

$$\rho_{m\text{в}} = \frac{P_{m\text{в}}}{z \cdot l_\delta} - \text{относительные вентиляционные потери при нагрузке.}$$

б) Превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды при кратковременном режиме работы электродвигателя с нагрузкой

$$\Delta \vartheta_{a\text{кр}} = \Delta \vartheta_a \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_p}} \right), \quad (1.123)$$

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

t_p – длительность рабочего периода электродвигателя.

в) Превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды при повторно-кратковременном режиме работы с нагрузкой

$$\Delta \mathcal{G}_{a.n.kp} = \Delta \mathcal{G}_a \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_p}} \right) \cdot \left(1 + e^{-a_1 \frac{t_p}{T_p}} + e^{-2a_1 \frac{t_p}{T_p}} + e^{-(m-1)a_1 \frac{t_p}{T_p}} \right), \quad (1.124)$$

где m – число циклов;

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

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

якоря электродвигателя;

t_n – длительность паузы повторно-кратковременного режима работы.

Для заданного режима работы двигателя должно выполняться одно из условий:

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{G}_a &\leq \Delta \mathcal{G}_{\text{дон}}, \\ \Delta \mathcal{G}_{a.kp} &\leq \Delta \mathcal{G}_{\text{дон}}, \\ \Delta \mathcal{G}_{a.n.kp} &\leq \Delta \mathcal{G}_{\text{дон}}, \end{aligned} \quad (1.125)$$

где $\Delta \mathcal{G}_{\text{дон}}$ – допустимое превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды для выбранного класса нагревостойкости изоляции, это значение берут из таблицы 3.2 [8].

1.9.16 Превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды при продолжительном режиме работы с нагрузкой с учетом температуры воздуха внутри двигателя

$$\Delta \mathcal{G} = \Delta \mathcal{G}_a + \Delta \mathcal{G}_{\text{воз}}, \quad (1.126)$$

где $\Delta \mathcal{G}_{\text{воз}} = \frac{\sum P'}{S_{\text{охл}} \cdot \alpha_n}$ - среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя [7];

$$\sum P' = \sum P - 0,3 \cdot P_{\text{эв}};$$

$$\sum P = P_1 - P_2 - (P_{mn} + P_{m\epsilon});$$

$$S_{\text{охл}} = \pi \cdot D_{\text{корн}} \cdot l_{\text{корн}};$$

$$l_{\text{корн}} = l_{\delta} + 2 \cdot b_{\kappa};$$

α_n - коэффициент подогрева воздуха [7].

Необходимо выполнение условия

$$\Delta \mathcal{G} \leq \Delta \mathcal{G}_{\text{доп}}.$$

1.9.17 Превышение температуры обмотки возбуждения над температурой окружающей среды

$$\Delta \mathcal{G}_{\epsilon} = \frac{P_{\text{эв}}}{2p \cdot S_{\epsilon}} \cdot \left(\frac{0,7}{\alpha_1} + \frac{\beta_{\epsilon}}{\lambda_1} \right) + \Delta \mathcal{G}_{\text{воз}}, \quad (1.127)$$

где $P_{\text{эв}} = I_{\epsilon}^2 \cdot R_{\epsilon} \cdot k_{\theta\epsilon}$ - электрические потери в обмотке возбуждения;

$S_{\epsilon} = (2 \cdot b_{2n} + 2 \cdot l_{2n}) \cdot (h_{2n} - h_{nn}) + (2 \cdot b_{2n} + 2 \cdot l_{2n} + 2 \cdot b_{\kappa}) \cdot b_{\kappa}$ - площадь охлаждения обмотки возбуждения;

$\beta_{\epsilon} = \frac{\omega_{\epsilon} \cdot d_{\text{из}\epsilon}^2 \cdot (1 - k_{nm\epsilon})}{2p \cdot \Pi_{\kappa}} + b_{\text{куз}} + b_{23}$ - толщина эквивалентной изоляции обмотки возбуждения;

обмотки возбуждения;

$\Pi_{\kappa} = h_{2n} - h_{nn} + b_{\kappa}$ - периметр катушки возбуждения, прилегающий к магнитопроводу;

$k_{\text{нмв}} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{d_6^2}{d_{\text{изв}}^2}$ – коэффициент заполнения провода обмотки возбуждения медью.

Необходимо выполнение условия $\Delta \mathcal{G} \leq \Delta \mathcal{G}_{\text{дон}}$.

1.10 Уточнение расчетных значений физических величин

1.10.1 Коэффициенты увеличения сопротивлений обмотки якоря и обмотки возбуждения при увеличении температуры нагревания обмоток

$$k_{\theta} = 1 + 0,004 \cdot \Delta \mathcal{G}; \quad (1.128)$$

$$k_{\theta_6} = 1 + 0,004 \cdot \Delta \mathcal{G}_6, \quad (1.129)$$

где $\Delta \mathcal{G}$ – превышение температуры якоря над температурой окружающей среды для продолжительного режима работы электродвигателя, при кратковременном режиме работы принимают $\Delta \mathcal{G} = \Delta \mathcal{G}_{\text{кр}}$, при повторно-кратковременном режиме работы принимают $\Delta \mathcal{G} = \Delta \mathcal{G}_{\text{н.кр}}$.

1.10.2 ЭДС обмотки якоря

$$E = U_{\text{ном}} - \Delta U_{\text{щ}} - I_a \cdot (R_6 \cdot k_{\theta_6} + \sqrt{(R_a \cdot k_{\theta})^2 + X_a^2}). \quad (1.130)$$

1.10.3 Частота вращения вала электродвигателя

$$n = \frac{60 \cdot a \cdot E}{p \cdot N \cdot \Phi_{\delta}}. \quad (1.131)$$

1.10.4 Момент на валу

$$M_2 = 9,57 \cdot \frac{P_2}{n}. \quad (1.132)$$

1.11 Рабочие характеристики и номинальные данные электродвигателя

1.11.1 Расчет рабочих характеристик представлен в виде таблицы 1.1. Расчет физических величин, указанных в таблице 1.1, осуществляют при изменении индукции в воздушном зазоре в диапазоне от $0,3 \cdot B_\delta$ до $1,1 \cdot B_\delta$ с шагом $0,1 \cdot B_\delta$ [9].

Таблица 1.1 – Расчет рабочих характеристик электродвигателя

Физическая величина и формула для ее определения	Ед. изм. физ. вел.	$0,3 \cdot B_\delta$...	$1,1 \cdot B_\delta$
1	2	3	4	5
B_δ	Тл			
$W_{c y \partial} = \left(\frac{A_c \cdot B_c^2 + D_c \cdot B_c + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_c) - sh(\beta_c \cdot B_c) \cdot \frac{2A_c \cdot B_c + D_c}{\beta_c^2}$	Дж/м ³			
$W_{n y \partial} = \left(\frac{A_c \cdot B_n^2 + D_c \cdot B_n + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_n) - sh(\beta_c \cdot B_n) \cdot \frac{2A_c \cdot B_n + D_c}{\beta_c^2}$	Дж/м ³			

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
$W_{z y \delta} = \left(\frac{A_c \cdot B_z^2 + D_c \cdot B_z + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_z) -$ $- sh(\beta_c \cdot B_z) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B_z + D_c}{\beta_c^2}$	Дж/м ³			
$W_{j y \delta} = \left(\frac{A_c \cdot B_j^2 + D_c \cdot B_j + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_j) -$ $- sh(\beta_c \cdot B_j) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B_j + D_c}{\beta_c^2}$	Дж/м ³			
$B_{\delta c p \sigma} = B_{\delta} \cdot \frac{(1 + \sigma)}{2}$	Тл			
$W_{\delta y \delta} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B_{\delta c p \sigma}^2$	Дж/м ³			
$W_{\delta c y \delta} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B_{c m}^2$	Дж/м ³			
$W_c = W_{c y \delta} \cdot V_c$	Дж			
$W_n = W_{n y \delta} \cdot V_n$	Дж			
$W_z = W_{z y \delta} \cdot V_z$	Дж			
$W_j = W_{j y \delta} \cdot V_j$	Дж			
$W_{\delta} = W_{\delta y \delta} \cdot V_{\delta}$	Дж			
$W_{\delta c} = W_{\delta c y \delta} \cdot V_{\delta c}$	Дж			
$\Phi'_n = B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot b_{\delta} \cdot \sigma$	Вб			
$I_n = \frac{(W_c + W_n + W_z + W_j + W_{\delta} + W_{\delta c}) \cdot 2 \cdot 2 p}{\Phi_n \cdot \omega_{\delta}}$	А			

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
$I' = \frac{I_a}{I_n \text{ (берется для } B_\delta = 1 \cdot B_\delta)} \cdot I_n$	<i>A</i>			
$A' = \frac{N \cdot I'}{2a \cdot \pi \cdot D}$	<i>A/м</i>			
$H_{\delta a} = \frac{b_\delta \cdot A'}{2 \cdot \delta} \cdot \frac{W_\delta}{W_z + W_j + W_\delta}$	<i>A/м</i>			
$B'_\delta = B_\delta - H_{\delta a} \cdot \mu_0$	<i>Тл</i>			
$B''_\delta = B_\delta + H_{\delta a} \cdot \mu_0$	<i>Тл</i>			
$\Phi_n = \frac{(1 + \sigma)}{4} \cdot (B'_\delta + B''_\delta) \cdot l_\delta \cdot b_\delta$	<i>Вб</i>			
$B'_{\delta c p \sigma} = B'_\delta \cdot \frac{(1 + \sigma)}{2}$	<i>Тл</i>			
$B''_{\delta c p \sigma} = B''_\delta \cdot \frac{(1 + \sigma)}{2}$	<i>Тл</i>			
$W'_{\delta y \delta} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot (B'_{\delta c p \sigma})^2$	<i>Дж/м³</i>			
$W''_{\delta y \delta} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot (B''_{\delta c p \sigma})^2$	<i>Дж/м³</i>			
$B'_z = \frac{B'_\delta \cdot t_z}{k_{c2} \cdot b_z}$	<i>Тл</i>			
$W'_{z y \delta} = \left(\frac{A_c \cdot (B'_z)^2 + D_c \cdot B'_z + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B'_z) -$ $- sh(\beta_c \cdot B'_z) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B'_z + D_c}{\beta_c^2}$	<i>Дж/м³</i>			

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
$B_z'' = \frac{B_\delta'' \cdot t_z}{k_{c2} \cdot b_z}$	Тл			
$W_{zy\delta}'' = \left(\frac{A_c \cdot (B_z'')^2 + D_c \cdot B_z'' + C_c + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3}}{\beta_c} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_z'') -$ $- sh(\beta_c \cdot B_z'') \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B_z'' + D_c}{\beta_c^2}$	Дж/м ³			
$B_j' = \frac{B_\delta' \cdot l_{zn} \cdot b_\delta}{2 \cdot k_{c2} \cdot h_j \cdot l_\delta}$	Тл			
$W_{jy\delta}' = \left(\frac{A_c \cdot (B_j')^2 + D_c \cdot B_j' + C_c + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3}}{\beta_c} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_j') -$ $- sh(\beta_c \cdot B_j') \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B_j' + D_c}{\beta_c^2}$	Дж/м ³			
$B_j'' = \frac{B_\delta'' \cdot l_{zn} \cdot b_\delta}{2 \cdot k_{c2} \cdot h_j \cdot l_\delta}$	Тл			
$W_{jy\delta}'' = \left(\frac{A_c \cdot (B_j'')^2 + D_c \cdot B_j'' + C_c + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3}}{\beta_c} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_j'') -$ $- sh(\beta_c \cdot B_j'') \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B_j'' + D_c}{\beta_c^2}$	Дж/м ³			
$\sum W = 0,5 \cdot \left[\begin{aligned} &(W'_{\delta y\delta} + W''_{\delta y\delta}) \cdot V_\delta + (W'_{z y\delta} + W''_{z y\delta}) \cdot V_z + \\ &+ (W'_{j y\delta} + W''_{j y\delta}) \cdot V_j \end{aligned} \right] + W_c + W_n + W_{\delta c}$	Дж			
$I = \frac{2 \cdot 2p \cdot \sum W}{\Phi_n \cdot \omega_s}$	А			
$j_{uy} = \frac{I}{n_{uy} \cdot a_{uy} \cdot b_{uy}}$	А/м ²			

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
$\Delta U_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щн}} \cdot \frac{j_{\text{щ}}}{j_{\text{щ}\delta}}$	<i>B</i>			
$\Delta U = \Delta U_{\text{щ}} + I \cdot (R_{\epsilon} \cdot k_{\theta\epsilon} + \sqrt{(R_a \cdot k_{\theta})^2 + X_a^2})$	<i>B</i>			
$E = U_{\text{ном}} - \Delta U$	<i>B</i>			
$A = \frac{N \cdot I}{2a \cdot \pi \cdot D}$	<i>A/м</i>			
$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0}$	<i>A/м</i>			
$H_{\delta a} = \frac{b_{\delta} \cdot A}{2 \cdot \delta} \cdot \frac{(W'_{\delta y \delta} + W''_{\delta y \delta}) \cdot V_{\delta}}{(W'_{z y \delta} + W''_{z y \delta}) \cdot V_z + (W'_{j y \delta} + W''_{j y \delta}) \cdot V_j + (W'_{\delta y \delta} + W''_{\delta y \delta}) \cdot V_{\delta}}$	<i>A/м</i>			
$H'_{\delta} = H_{\delta} - H_{\delta a}$	<i>A/м</i>			
$H''_{\delta} = H_{\delta} + H_{\delta a}$	<i>A/м</i>			
$B'_{\delta} = H'_{\delta} \cdot \mu_0$	<i>Tл</i>			
$B''_{\delta} = H''_{\delta} \cdot \mu_0$	<i>Tл</i>			
$B_{\delta \text{cp}} = \frac{B'_{\delta} + B''_{\delta}}{2}$	<i>Tл</i>			
$\Phi_{\delta} = B_{\delta \text{cp}} \cdot l_{\delta} \cdot b_{\delta}$	<i>Bб</i>			
$n = \frac{60 \cdot a \cdot E}{p \cdot N \cdot \Phi_{\delta}}$	<i>об/мин</i>			
$j = \frac{I}{2a \cdot g}$	<i>A/м²</i>			

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
$f_2 = \frac{p \cdot n}{60}$	Гц			
$V_a = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}$	м/с			
$V_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n}{60}$	м/с			
$P_{\rho a} = I^2 \cdot R_a \cdot k_{\theta}$	Вт			
$P_{\rho u} = I \cdot \Delta U_u$	Вт			
$P_{\rho \theta} = I^2 \cdot R_{\theta} \cdot k_{\theta \theta}$	Вт			
$B'_j = \frac{B'_\delta \cdot l_{zn} \cdot b_\delta}{2 \cdot k_{c2} \cdot h_j \cdot l_\delta}$	Тл			
$B''_j = \frac{B''_\delta \cdot l_{zn} \cdot b_\delta}{2 \cdot k_{c2} \cdot h_j \cdot l_\delta}$	Тл			
$P_j = m_j \cdot 2,3 \cdot p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_2}{50}\right)^\beta \cdot \frac{1}{2} \left((B'_j)^2 + (B''_j)^2 \right)$	Вт			
$B'_z = \frac{B'_\delta \cdot t_z}{k_{c2} \cdot b_z}$	Тл			
$B''_z = \frac{B''_\delta \cdot t_z}{k_{c2} \cdot b_z}$	Тл			
$P_z = m_z \cdot 2,3 \cdot p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_2}{50}\right)^\beta \cdot \frac{1}{2} \left((B'_z)^2 + (B''_z)^2 \right)$	Вт			
$P_c = P_j + P_z$	Вт			
$P_{m u} = \mu_m \cdot \rho_u \cdot \sum S_u \cdot V_k$	Вт			
$P_{m n} = k_m \cdot m_a \cdot n \cdot 10^{-3}$	Вт			

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
$P_{m\epsilon} = 2 \cdot D^3 \cdot n^3 \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-6}$	<i>Вт</i>			
$P_{mx} = P_{m\omega} + P_{mn} + P_{m\epsilon}$	<i>Вт</i>			
$P_{\delta} = 0,01 \cdot U_{ном} \cdot I$	<i>Вт</i>			
$\sum P = P_{\epsilon a} + P_{\epsilon b} + P_{\epsilon \omega} + P_c + P_{mx} + P_{\delta}$	<i>Вт</i>			
$P_1 = U_{ном} \cdot I$	<i>Вт</i>			
$P_2 = P_1 - \sum P$	<i>Вт</i>			
$M_2 = 9,57 \cdot \frac{P_2}{n}$	<i>Н·м</i>			
$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$	<i>%</i>			

По расчетным данным, приведенным в таблице 1.1, строят рабочие характеристики $I, P_1, M_2, n, \eta = f(P_2)$ при $U = U_{ном}$.

По расчетным данным таблицы 1.1 для заданного номинального значения полезной мощности электродвигателя ($P_{2ном}$) определяют номинальные значения физических величин: $I_{ном}, n_{ном}, M_{2ном}, \eta_{ном}$.

1.11.2 Кратность пускового момента

$$m_n = \frac{57 \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{\omega}}{U_{ном}}\right) \cdot U_{ном} \cdot I_{ном} \cdot 10^6}{\pi \cdot D^2 \cdot (\lambda + k_p) \cdot A \cdot j}, \quad (1.130)$$

где $k_p = 1,2$ при $2p = 2$;

$k_p = 0,8$ при $2p = 4$.

1.11.3 Электромеханическая постоянная времени электродвигателя

$$T_{.м} = \frac{J \cdot n_{ном}^2 \cdot 10^{-2}}{9,2 \cdot m_n \cdot P_{2ном}}, \quad (1.131)$$

где $J = m_a \cdot D \cdot l_\delta$ – момент инерции якоря.

Быстродействие электродвигателя определяется величиной обратно пропорциональной электромеханической постоянной времени.

1.12 Тепловой расчет электродвигателя

Тепловой расчет электродвигателя предназначен для того, чтобы определить среднюю температуру перегрева отдельных частей машины: якоря, коллектора, полюсов, подшипников и т.д.

Здесь приведен упрощенный тепловой расчет электродвигателя, включающий определение перегрева самой нагретой части электродвигателя – якоря. Превышение температуры якоря должно быть близко к допустимому значению. 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. Расчет проводят с использованием номинальных значений физических величин, полученных для номинального режима в таблице 1.1.

1.12.1 Превышение температуры якоря над температурой окружающей среды при продолжительном режиме работы с номинальной нагрузкой:

а) Превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды при продолжительном режиме работы с номинальной нагрузкой

$$\Delta \mathcal{G}_a = \frac{\left(1 + \alpha_a \cdot b'_z \cdot \frac{\beta_n}{\lambda_1 \cdot \Pi_n}\right) \cdot \rho_{\text{эа ном}} + \rho_{\text{сном}} + \rho_{\text{тв ном}}}{\alpha_a \cdot b'_z}, \quad (1.132)$$

где $\rho_{\text{эа ном}} = \frac{I_{\text{ном}}^2 \cdot R_a \cdot k_\theta}{z \cdot l_{\text{аср}}}$ – относительные потери в обмотке якоря при номинальной нагрузке;

$\rho_{\text{сном}} = \frac{P_{\text{сном}}}{z \cdot l_\delta}$ – относительные потери в стали сердечника якоря при номинальной нагрузке;

$\rho_{\text{тв ном}} = \frac{P_{\text{тв ном}}}{z \cdot l_\delta}$ – относительные вентиляционные потери при номинальной нагрузке.

б) Превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды при кратковременном режиме работы электродвигателя с номинальной нагрузкой

$$\Delta \mathcal{G}_{a \text{ кр}} = \Delta \mathcal{G}_a \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_p}}\right). \quad (1.133)$$

в) Превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды при повторно-кратковременном режиме работы с номинальной нагрузкой

$$\Delta \mathcal{G}_{a \text{ п.кр}} = \Delta \mathcal{G}_a \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_p}}\right) \cdot \left(1 + e^{-a_1 \frac{t_p}{T_p}} + e^{-2a_1 \frac{t_p}{T_p}} + e^{-(m-1)a_1 \frac{t_p}{T_p}}\right). \quad (1.134)$$

1.12.2 Превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды при работе с номинальной нагрузкой с учетом температуры воздуха внутри двигателя

а) при продолжительном режиме работы электродвигателя

$$\Delta \mathcal{G} = \Delta \mathcal{G}_a + \Delta \mathcal{G}_{\text{воз}}, \quad (1.135)$$

где $\Delta \mathcal{G}_{\text{воз}} = \frac{\sum P'}{S_{\text{охл}} \cdot \alpha_n}$ – среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя [7];

$$\sum P' = \sum P - 0,3 \cdot P_{\text{эв}};$$

$$\sum P = P_1 - P_{2\text{ном}} - (P_{\text{мп}} + P_{\text{тв}});$$

б) при кратковременном режиме работы электродвигателя

$$\Delta \mathcal{G}_{\text{кр}} = \Delta \mathcal{G}_{a \text{кр}} + \Delta \mathcal{G}_{\text{воз}}; \quad (1.136)$$

в) при повторно-кратковременном режиме работы электродвигателя

$$\Delta \mathcal{G}_{\text{п.кр}} = \Delta \mathcal{G}_{a \text{п.кр}} + \Delta \mathcal{G}_{\text{воз}}. \quad (1.137)$$

Для заданного режима работы электродвигателя должно выполняться одно из условий:

$$\Delta \mathcal{G}_a \leq \Delta \mathcal{G}_{\text{дон}},$$

$$\Delta \mathcal{G}_{a \text{кр}} \leq \Delta \mathcal{G}_{\text{дон}}, \quad (1.138)$$

$$\Delta \mathcal{G}_{a \text{п.кр}} \leq \Delta \mathcal{G}_{\text{дон}}.$$

где $\Delta \vartheta_{дон}$ - допустимое превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды для выбранного класса нагревостойкости изоляции, это значение берут из таблицы 3.2 [8].

1.12.3 Превышение температуры обмотки возбуждения над температурой окружающей среды

$$\Delta \vartheta_{\varepsilon} = \frac{P_{\varepsilon}}{2p \cdot S_{\varepsilon}} \cdot \left(\frac{0,7}{\alpha_1} + \frac{\beta_{\varepsilon}}{\lambda_1} \right) + \Delta \vartheta_{воз}, \quad (1.139)$$

где $P_{\varepsilon} = I_{ном}^2 \cdot R_{\varepsilon} \cdot k_{\theta_{\varepsilon}}$ - электрические потери в обмотке возбуждения при номинальной нагрузке.

Необходимо выполнение условия

$$\Delta \vartheta_{\varepsilon} \leq \Delta \vartheta_{дон}.$$

1.13 Элементы конструирования основных деталей двигателя постоянного тока

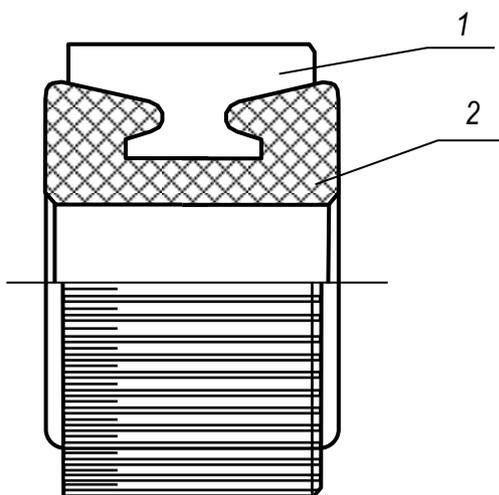
После проведения расчета электродвигателя составляют расчетно-пояснительную записку, на основе содержания которой осуществляют конструирование электродвигателя.

Магнитная система статора состоит из станины цилиндрической формы, которую выполняют из цельнотянутых труб из стали Ст3 или шихтованных листов электротехнической стали, полюсов с полюсными наконечниками, которые прикрепляют к станине при помощи крепежных элементов .

Сердечник якоря выполняется шихтованным из пластин электротехнической стали толщиной 0,35 мм, 0,5 мм, 0,65 мм и 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 изготавливают из твердотянутой меди и изолируют друг от друга миканитом или пластмассой (рисунки 1.4 и 1.8). Щеткодержатель выполняют радиальным трубчатого типа (рисунок 1.5). В низковольтных двигателях применяют меднографитовые щетки, в электродвигателях с напряжением выше 50 В применяют графитовые и электрографитовые щетки.

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 якоря.



- 1 – Коллекторная пластина;
- 2 – Пластмасса

Рисунок 1.8 – Коллектор на пластмассе

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 электродвигателя. 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).

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 1.9). 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 1.10). 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 1.11). Для присоединения с приводом чаще всего применяют муфты полуэластичного типа. Размеры конца вала должны соответствовать ГОСТ 12080-66 (см. приложение М). Закрепление узлов, насаживаемых на вал, на ступенях вала до 0,01 м осуществляют посадкой на гладкий вал с натягом. Если используется вал с несколькими ступенями, то проводят механический расчет вала по методике, изложенной в литературе [7].

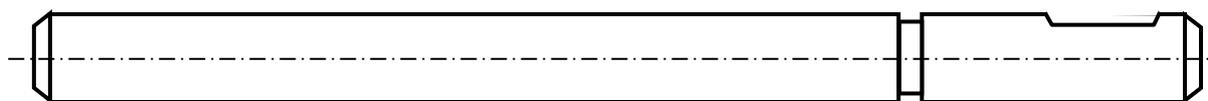


Рисунок 1.9 - Вал без ступеней

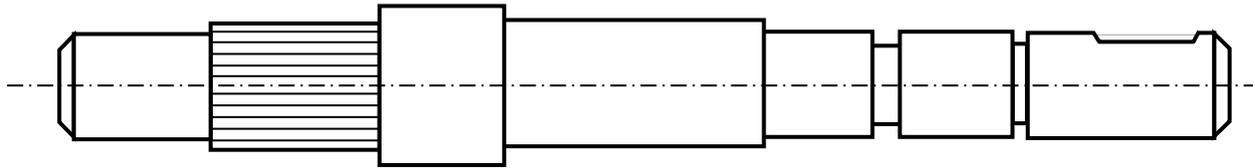


Рисунок 1.10- Ступенчатый вал

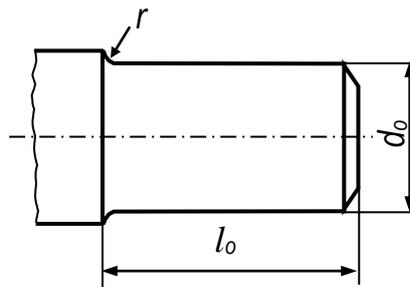


Рисунок 1.11- Рабочий конец вала

В ДПТ малой мощности с горизонтальным валом применяют радиальные однорядные шарикоподшипники. Радиальные шарикоподшипники имеют наименьшие потери на трение и наибольшие допустимые скорости вращения по сравнению с подшипниками качения других типов. Шариковые подшипники бывают радиальные и радиально упорные. В двигателях малой мощности применяют щитовые подшипники. Внутреннее кольцо щитового подшипника плотно насаживают на вал, тогда наружное кольцо оказывается в подшипниковом щите. Продолжительность работы подшипника во многом зависит от смазки. В качестве смазки применяют минеральные масла или консистентные смазки. В машинах малой мощности часто применяют подшипники с защитными шайбами. Подшипник – это готовый стандартный узел, поэтому при расчете электрической машины надо уметь правильно его выбрать по справочной литературе. В ГОСТе на подшипники указаны его размеры, значения коэффициента работоспособности (C) и максимальной частоты вращения (n). Долговечность подшипника должна быть $t_n \geq (15 \div 20) \cdot 10^3$ часов. Исходя из требуемого t_n и заданной частоты вращения $n_{ном}$ можно определить постоянную подшипника

$C = Q \cdot (n_{ном} \cdot t_n)^{0,3}$, где Q – условная нагрузка. Зная внутренний диаметр подшипника, C и $n_{ном}$ выбирают по справочнику или по Приложению Н тип подшипника и определяют все его размеры.

В машинах малой мощности подшипники размещают в подшипниковых щитах (крышках), которые располагаются по торцам машины. Подшипниковые щиты выполняют литыми или штампованными, в средней части щитов выполняют цилиндрический паз для подшипников (рисунки 1.12 и 1.13).

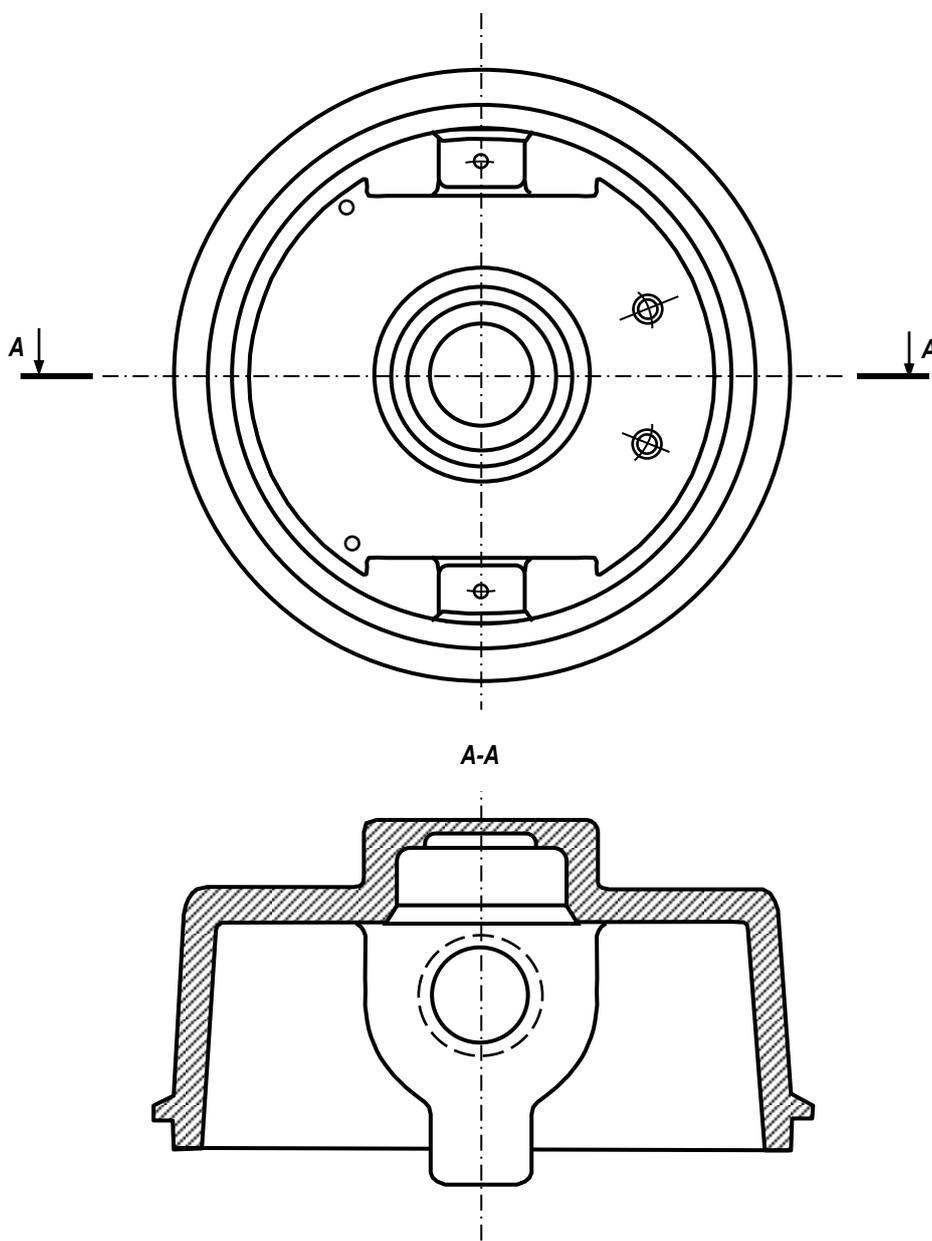


Рисунок 1.12 – Крышка передняя

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 [10].

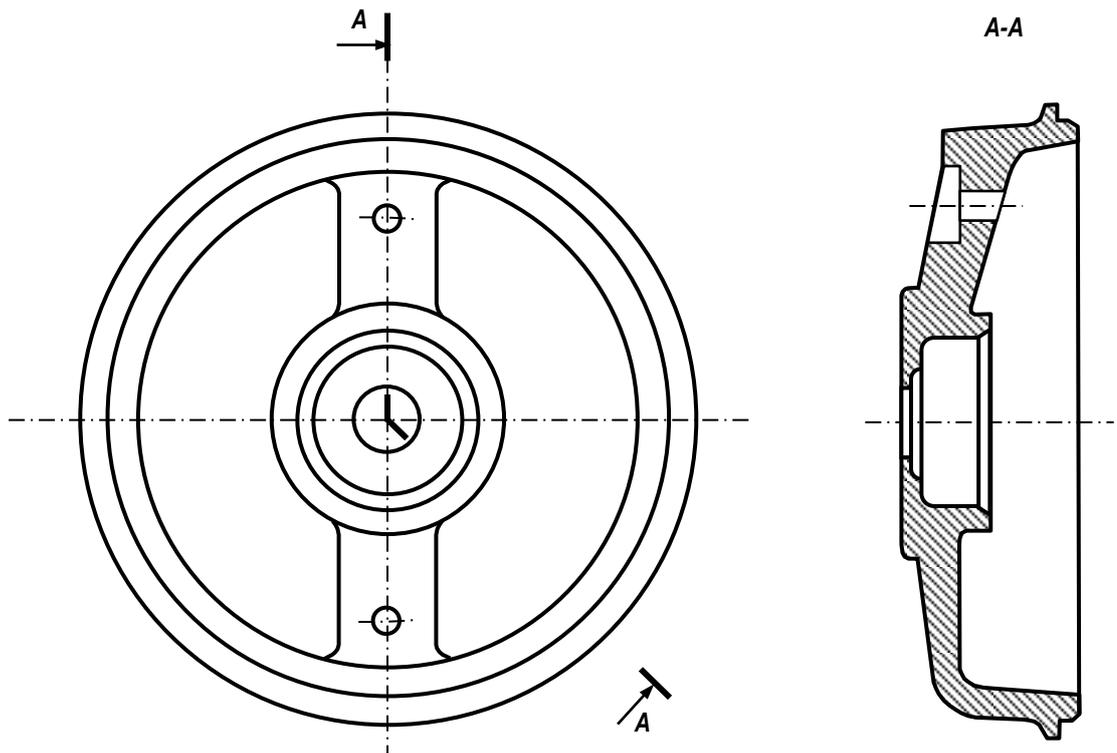


Рисунок 1.13 – Крышка задняя

Контрольные вопросы

- 1 Что относится к основным размерам ДПТ и на какие эксплуатационные характеристики двигателя они влияют?
- 2 Что необходимо учитывать при выборе индукции в воздушном зазоре и токовой линейной нагрузки?
- 3 Какие типы обмоток применяют для якорных обмоток ДПТ малой мощности и их отличительные особенности?
- 4 Что учитывают при выборе марки провода?
- 5 Какие формы паза якоря целесообразно выбирать для двигателей малой мощности? С учетом чего выбирают материал для сердечника якоря?
- 6 Для чего выполняют скос пазов на якоре?
- 7 Если коэффициент заполнения паза якоря изолированными проводами больше рекомендуемого значения, что необходимо предпринять, чтобы его уменьшить?
- 8 Если коэффициент заполнения паза якоря изолированными проводами меньше рекомендуемого значения, что необходимо предпринять, чтобы его значение увеличить?
- 9 Как влияет величина сопротивления обмотки якоря на механическую характеристику ДПТ?
- 10 Если толщина зубца меньше рекомендуемого значения, что необходимо предпринять, чтобы ее увеличить?
- 11 С учетом чего выбирают марку щетки?
- 12 Что надо учитывать при выборе ширины шлица паза якоря?
- 13 Если в результате расчета получено, что коммутация неблагоприятная, что необходимо предпринять, чтобы это устранить?
- 14 С учетом чего выбирают материал для станины?
- 15 На что влияет величина воздушного зазора и чем обосновывается его выбор?
- 16 Как осуществляется расчет обмотки возбуждения?

- 17 Как установить, что в двигателе отсутствует «опрокидывание поля»?
- 18 Какое воздействие на основной поток оказывает поле якоря и как оно учитывается?
- 19 При каком условии в расчете рабочих характеристик принимают магнитный поток в воздушном зазоре величиной постоянной?
- 20 Как из данных расчета рабочих характеристик выделить номинальные данные двигателя?
- 21 Как из данных расчета рабочих характеристик выделить данные режима холостого хода?
- 22 Что определяет быстродействие двигателя и что необходимо сделать, чтобы его повысить?
- 23 На основе чего делают вывод о перегреве двигателя и что необходимо предпринять, чтобы это устранить?

2 Пример расчета двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

2.1 Задание на проектирование электродвигателя и исходные данные

Рассчитать и разработать конструкцию коллекторного двигателя постоянного тока с последовательным электромагнитным возбуждением со следующими данными:

- а) номинальная мощность двигателя $P_{ном} = 100 \text{ Вт}$;
- б) номинальные напряжения $U_{ном} = 24 \text{ В}$;
- в) номинальная частота вращения $n_{ном} = 2400 \text{ об/мин}$;
- г) наружный диаметр корпуса $D_{корп} = 0,12 \text{ м}$;
- д) возбуждение последовательное электромагнитное;
- е) режим работы $S1$;
- ж) класс нагревостойкости изоляции B ;
- и) исполнение по степени защиты $IP 44$;
- к) по способу охлаждения $IC 0040$.

Конструкция разработанного электродвигателя 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 проектируемого электродвигателя постоянного тока принимаем конструкцию электродвигателя с радиальными полюсами на статоре, зубчатым якорем и цилиндрическим коллектором.

2.2 Определение основных размеров двигателя постоянного тока

Основными размерами двигателя постоянного тока принято называть диаметр якоря (D) и расчетную длину якоря (l_δ).

Ток якоря в двигателе с последовательным возбуждением одновременно является током двигателя и током возбуждения.

2.2.1 Предварительное значение тока якоря при нагрузке электродвигателя по (1.1) I'_a , A :

$$I'_a = I' = I'_g = \frac{P_{ном}}{\eta' \cdot U_{ном}},$$

где $\eta' = 0,73$ - предварительное значение коэффициента полезного действия электродвигателя, его значение выбираем из диапазона от 0,6 до 0,75;

$P_{ном} = 100 \text{ Вт}$ - номинальная мощность двигателя;

$U_{ном} = 24 \text{ В}$ - номинальное напряжение,

$$I'_a = I' = I'_g = \frac{100}{0,73 \cdot 24} = 5,71 \text{ А}.$$

2.2.2 Предварительное значение электромагнитной мощности электродвигателя по (1.3) $P'_{эм}$, $Вт$:

$$P'_{эм} = \frac{1 + 2 \cdot \eta'}{3 \cdot \eta'} \cdot P_{ном},$$

$$P'_{эм} = \frac{1 + 2 \cdot 0,73}{3 \cdot 0,73} \cdot 100 = 112,3 \text{ Вт}.$$

2.2.3 Диаметр якоря по (1.4) D , м:

$$D_n = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot P'_{эм}}{\alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot A'' \cdot n_{ном} \cdot \lambda}},$$

где D_n - предварительное значение диаметра якоря;

$\alpha_\delta = 0,75$ - коэффициент полюсного перекрытия, его значение выбираем из диапазона от 0,6 до 0,75;

$B_\delta = 0,39 \text{ Тл}$ - магнитная индукция в воздушном зазоре, ее значение выбираем из диапазона от 0,1 Тл до 0,7 Тл;

$A'' = 6000 \frac{\text{А}}{\text{м}}$ - предварительное значение токовой линейной нагрузки,

ее значение рекомендуется выбирать из диапазона от $40 \cdot 10^2 \text{ А/м}$ до $120 \cdot 10^2 \text{ А/м}$ при продолжительном режиме работы двигателя;

$n_{ном} = 2400 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ - номинальная частота вращения вала (эта величина

указана в техническом задании на проектирование);

$\lambda = 1,4$ - отношение длины магнитопровода якоря к его диаметру, это значение выбираем из диапазона от 0,5 до 1,8 ,

$$D_n = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot 112,3}{0,75 \cdot 0,39 \cdot 6000 \cdot 2400 \cdot 1,4}} = 0,049 \text{ м.}$$

По полученному предварительному значению диаметра якоря выбираем ближайшее стандартное значение диаметра по приложению А. Принимаем $D = 0,05 \text{ м}$.

2.2.4 Расчетная длина якоря по (1.5) l_δ , м:

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

$$l_{\delta} = 1,4 \cdot 0,05 = 0,07 \text{ м.}$$

2.2.5 Окружная скорость вращения якоря по (1.6) V_a , м/с:

$$V_a = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{ном}}{60},$$

$$V_a = \frac{\pi \cdot 0,05 \cdot 2400}{60} = 6,28 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

2.2.6 Полосное деление по (1.7) τ , м:

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

принимаяем $2p = 2$,

$$\tau = \frac{\pi \cdot 0,05}{2} = 0,0785 \text{ м.}$$

2.2.7 Расчетная ширина полюсного наконечника по (1.8) b_{δ} , м:

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

$$b_{\delta} = 0,75 \cdot 0,0785 = 0,0589 \text{ м.}$$

2.2.8 Частота перемагничивания стали якоря по (1.9) f_2 , Гц:

$$f_2 = \frac{p \cdot n_{ном}}{60},$$

$$f_2 = \frac{1 \cdot 2400}{60} = 40 \text{ Гц}.$$

2.3 Обмотка якоря

В ДПТ малой мощности при двухполюсном исполнении магнитной системы целесообразно применять простую петлевую обмотку якоря.

2.3.1 Предварительное общее число эффективных проводников обмотки якоря по (1.10):

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

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

$$N' = \frac{\pi \cdot 0,05 \cdot 6000 \cdot 2}{5,71} = 330.$$

2.3.2 Число пазов якоря по (1.12) z :

$$z' = 4 \cdot D \cdot 100 \quad \text{при} \quad D \geq 0,05,$$

$$z' = 4 \cdot 0,05 \cdot 100 = 20.$$

Выбираем целое нечетное число пазов якоря ($z = 19$) так, чтобы (z/a) было целым числом.

2.3.3 Число коллекторных пластин по (1.13) κ :

$$\kappa = (1 \div 3) \cdot z,$$

принимаем $\kappa = 2 \cdot z$ при $2p = 2$,

$$\kappa = 2 \cdot 19 = 38.$$

2.3.4 Предварительное число витков в секции обмотки якоря по (1.14):

$$\omega'_c = \frac{N'}{2 \cdot \kappa},$$

$$\omega'_c = \frac{330}{2 \cdot 38} = 4,3.$$

Полученное предварительное значение числа витков в секции округляем до целого числа витков в секции обмотки якоря $\omega_c = 4$.

2.3.5 Число проводников обмотки якоря по (1.15) N :

$$N = \omega_c \cdot 2 \cdot \kappa,$$

$$N = 4 \cdot 2 \cdot 38 = 304.$$

2.3.6 Число проводников обмотки якоря в пазу якоря по (1.16) N_n :

$$N_n = \frac{N}{z},$$

$$N_n = \frac{304}{19} = 16.$$

2.3.7 Шаги обмотки якоря в пазах

Схема соединения секций петлевой обмотки представлена на рисунке 2.1.

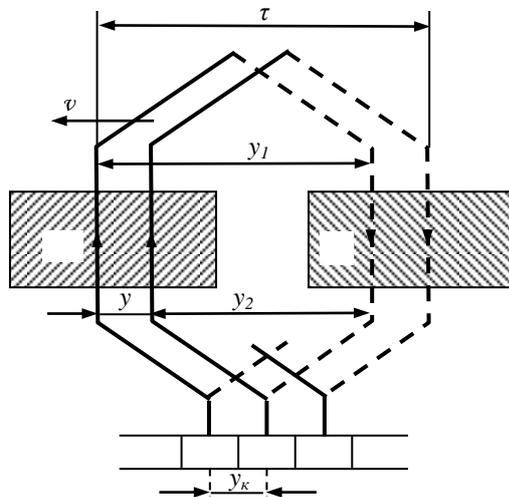


Рисунок 2.1 – Схема соединения секций петлевой обмотки

Первый частичный шаг по (1.17):

$$y_1 = \frac{z}{2p} - \varepsilon,$$

$$y_1 = \frac{19}{2} - 0,5 = 9,$$

результатирующий шаг и шаг по коллектору по (1.18):

$$y = 1; y_{\kappa} = 1,$$

второй частичный шаг по (1.19):

$$y_2 = y_1 - y = y_1 - 1,$$

$$y_2 = 9 - 1 = 8.$$

По [11] вычерчиваем схему простой петлевой обмотки ($2p = 2, z = 19, y_1 = 9, y_2 = 8$). Схема обмотки якоря представлена на рисунке 2.2.

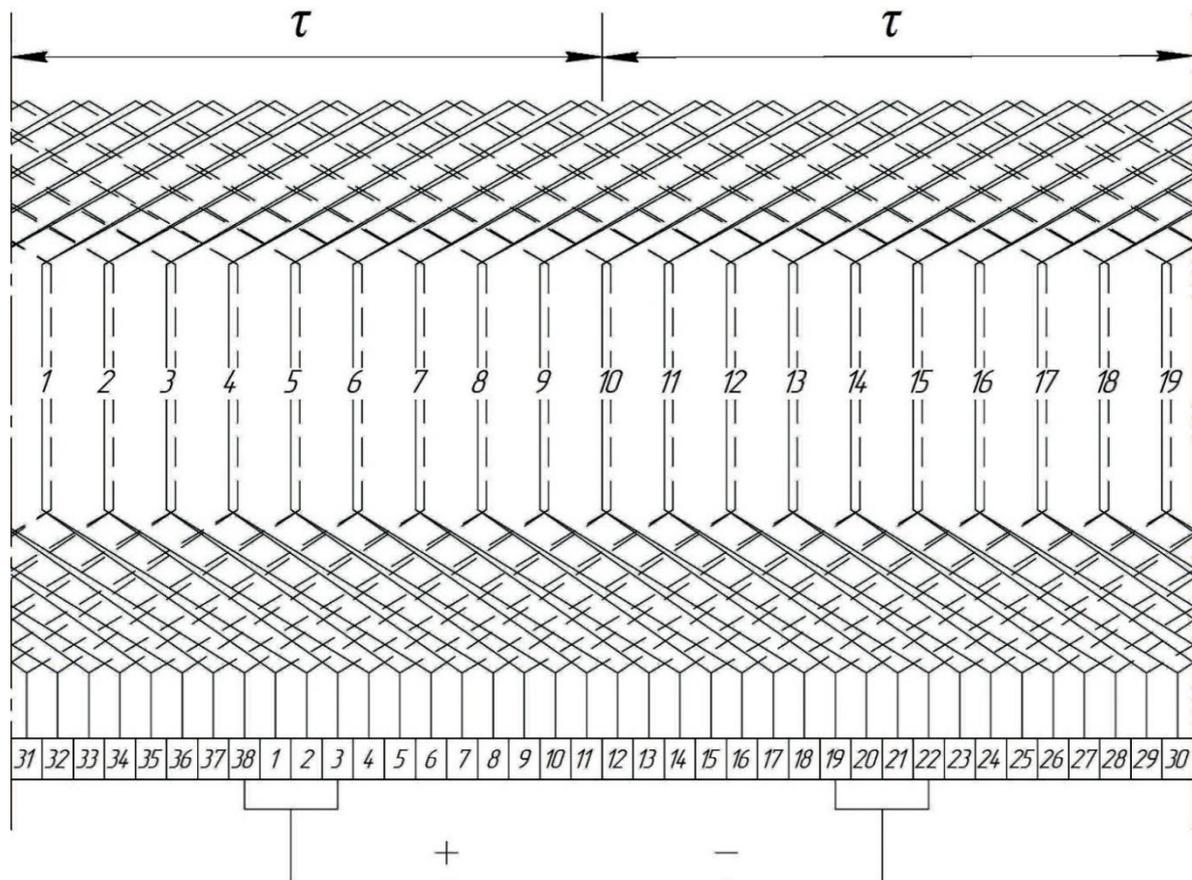


Рисунок 2.2– Схема простой петлевой обмотки ($z = 19, 2p = 2, y_n = 9$)

2.4 Размеры зубцов, пазов и проводов обмотки якоря

В двигателе малой мощности применяют полузакрытые пазы якоря круглой или овальной формы. Обмотка якоря выполняется из круглого медного обмоточного провода с эмалевой изоляцией. По приложению Б для класса нагревостойкости изоляции V выбираем провод марки ПЭТВ, а форму паза выбираем из рисунка 1.3. Выбираем полузакрытый паз якоря овальной формы. Выбираем материал для сердечника якоря: выбираем листовую электротехническую сталь марки 2013 толщиной 0,5 мм.

2.4.1 Большой диаметр овального паза якоря по (1.23) b_{n1} , м:

$$b_{n1} = \frac{k_{c2} \cdot B_z \cdot z \cdot D' \cdot \sin \frac{\alpha'}{2} - \pi \cdot D \cdot B_\delta}{k_{c2} \cdot B_z \cdot z \cdot \left(1 + \sin \frac{\alpha'}{2}\right)},$$

где $k_{c2} = 0,95$ – коэффициент заполнения пакета якоря сталью, его значение выбираем по таблице В.1 приложения В для электротехнической стали марки 2013 толщиной 0,5 мм и оксидированной изоляции листов;

$$\alpha' = \frac{2\pi}{z} = \frac{2\pi}{19} = 0,165263 \text{ рад} - \text{центральный угол на один паз якоря};$$

$$D' = D - 2 \cdot h_{ш} = 0,05 - 2 \cdot 0,0005 = 0,049 \text{ м} - \text{диаметр якоря без шлица};$$

$$h_{ш} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} - \text{высота шлица паза якоря};$$

$$B_z = 1,1 \text{ Тл} - \text{магнитная индукция в зубце},$$

$$b_{n1} = \frac{0,95 \cdot 1,1 \cdot 19 \cdot 0,049 \cdot \sin 0,165263 - \pi \cdot 0,05 \cdot 0,39}{0,95 \cdot 1,1 \cdot 19 \cdot (1 + \sin 0,165263)} = 0,043 \text{ м}.$$

2.4.2 Меньший диаметр овального паза принимаем по (1.24) b_{n2} , м:

$$b_{n2} = 0,0028 \text{ м.}$$

2.4.3 Периметр паза по (1.25) Π_n , м:

$$\Pi_n = b_{n1} \cdot \left(\frac{\pi + \alpha'}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha'}{2} \right) - \frac{b_{n2} \cdot \left(1 - \operatorname{Sin} \frac{\alpha'}{2} \right)}{\operatorname{Sin} \frac{\alpha'}{2}},$$

$$\Pi_n = 0,0043 \cdot \left(\frac{\pi + 0,3305}{2} + \operatorname{ctg} 0,165263 \right) - \frac{0,0028 \cdot (1 - \operatorname{Sin} 0,165263)}{\operatorname{Sin} 0,165263} = 0,019 \text{ м.}$$

2.4.4 Высота паза якоря, ее рассчитываем исходя из условия обеспечения параллельности стенок зубца по (1.27) h_n , м:

$$h_n = \frac{(b_{n1} - b_{n2})}{2 \cdot \operatorname{Sin} \frac{\alpha'}{2}} + \frac{(b_{n1} + b_{n2})}{2} + h_{\text{ш}},$$

$$h_n = \frac{(0,0043 - 0,0028)}{2 \cdot \operatorname{Sin} 0,165263} + \frac{(0,0043 + 0,0028)}{2} + 0,0005 = 0,0086 \text{ м.}$$

2.4.5 Площадь паза якоря по (1.29) S_n , м:

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

где $k_{ск} = \frac{l_{\delta}}{\sqrt{(n_z \cdot t_z)^2 + l_{\delta}^2}} = \frac{0,07}{\sqrt{0,0083^2 + 0,07^2}} = 0,993$ - коэффициент скоса па-

зов якоря;

$$t_z = \frac{\pi \cdot D}{z} = \frac{3,14 \cdot 0,05}{19} = 0,0083 \text{ м} - \text{зубцовое деление};$$

$n_z \cdot t_z$ - величина скоса пазов в зубцовых делениях, выбираем скос пазов якоря на одно зубцовое деление: $n_z = 1$,

$$S_n = \left[\frac{(0,0043)^2}{4} \cdot \left(\frac{\pi + 0,3305}{2} + ctg 0,165263 \right) - \frac{(0,0028)^2}{4 \cdot tg 0,165263} \right] \cdot 0,993 = 2,3817 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

2.4.6 Ширина зубца якоря по (1.31) b_z , м:

$$b_z = \frac{B_{\delta} \cdot t_z}{k_{c2} \cdot B_z},$$

$$b_z = \frac{0,39 \cdot 0,0083}{0,95 \cdot 1,1} = 0,0031 \text{ м}.$$

Для обеспечения механической прочности зубца необходимо, чтобы выполнялось условие $b_z \geq 0,002 \text{ м}$.

2.4.7 Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря

Обмотку якоря электродвигателя постоянного тока малой мощности выполняем из круглого медного обмоточного провода с эмалевой изоляцией класса нагревостойкости B и укладываем в изолированные пазы якоря.

Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря (j') для продолжительного режима работы (SI) выбираем из диапазона от $2,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ до

$10 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$. Выбираем предварительное значение плотности тока $j' = 5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$.

2.4.8 Сечение и диаметр провода обмотки якоря

Предварительное значение сечения провода обмотки якоря по (1.32):

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

$$g' = \frac{5,71}{2 \cdot 5 \cdot 10^6} = 0,571 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Окончательное значение сечения провода, диаметр неизолированного провода и диаметр изолированного провода выбираем из таблицы Б.2 приложения Б:

$$g = 0,567 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; \quad d = 0,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad d_{из} = 0,915 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

2.4.9 Площадь поперечного сечения паза якоря, заполненного обмоткой, по (1.33) $S_{но}$, м^2 :

$$S_{но} = S_n - S_{из} - S_{кл},$$

где $S_{из} = b_{из} \cdot \Pi_n = 0,15 \cdot 10^{-3} \cdot 0,019 = 2,85 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ - площадь поперечного сечения пазовой изоляции;

$b_{из} = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - толщина пазовой изоляции, ее значение выбираем из приложения К;

$$b_{кл} = 0,5 \cdot 0,0043 = 0,0023 \text{ м} - \text{ширина клина};$$

$$S_{\text{кл}} = \frac{\pi}{8} \cdot b_{\text{кл}}^2 = \frac{3,14}{8} \cdot 0,0023^2 = 2,076 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 - \text{площадь поперечного сечения пазового клина, так как клин имеет форму, копирующую форму верхней части паза,}$$

верхней части паза,

$$S_{\text{но}} = 2,3817 \cdot 10^{-5} - 2,85 \cdot 10^{-6} - 2,076 \cdot 10^{-6} = 1,8891 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

2.4.10 Коэффициент заполнения паза якоря изолированными проводниками по (1.34) k_3 :

$$k_3 = \frac{N_n \cdot d_{\text{уз}}^2}{S_{\text{но}}},$$

$$k_3 = \frac{16 \cdot (0,915 \cdot 10^{-3})^2}{1,8891 \cdot 10^{-5}} = 0,71.$$

Для автоматизированной укладки обмотки в пазы якоря необходимо, чтобы $0,68 \leq k_3 \leq 0,72$.

2.4.11 Средняя длина полувитка секции обмотки якоря по (1.35) $l_{a \text{ ср}}$, м:

$$l_{a \text{ ср}} = \frac{l_{\delta}}{k_{\text{ск}}} + l_{\text{нл}} + \frac{y_1}{z} \cdot \pi \cdot (D - h_n),$$

где $l_{\text{нл}} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - прямолинейный отрезок лобовой части обмотки,

$$l_{a \text{ ср}} = \frac{0,07}{0,993} + 2,5 \cdot 10^{-3} + \frac{9}{19} \cdot \pi \cdot (0,05 - 0,0086) = 0,1346 \text{ м}.$$

2.4.12 Сопротивление обмотки якоря при температуре 20°C по (1.37) R_a ,

Ом:

$$R_a = \frac{N \cdot l_{acp}}{57 \cdot (2a)^2 \cdot g} \cdot 10^{-6},$$

$$R_a = \frac{304 \cdot 0,1346}{57 \cdot 4 \cdot 0,567 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 0,317 \text{ Ом.}$$

2.5 Коллектор и щетки

В электродвигателе постоянного тока малой мощности применяем коллектор на пластмассе. Коллекторные пластины изготовляют из твердотянутой меди и изолируют их друг от друга и от вала якоря пластмассой. Конструкция щеткодержателя должна обеспечить правильное положение щеток на коллекторе, поэтому в двигателе будем использовать трубчатый щеткодержатель.

2.5.1 Предварительное значение наружного диаметра коллектора по (1.38):

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

$$D'_k = 0,8 \cdot 0,05 = 0,04 \text{ м.}$$

2.5.2 Относительное коллекторное деление по (1.41):

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

$$t_{\kappa\partial}^* < \frac{0,8 \cdot \pi \cdot (1 - 0,75)}{\left(\frac{2 \cdot 38}{19} - 0,5\right) \cdot 2} = 0,0897.$$

2.5.3 Предварительное значение коллекторного деления по (1.42):

$$t'_\kappa = t_\kappa^* \cdot D'_\kappa,$$

$$t'_\kappa = 0,9 \cdot 0,04 = 0,0036 \text{ м.}$$

2.5.4 Ширина коллекторной пластины по (1.43) β'_κ , м:

$$\beta'_\kappa = t'_\kappa - \beta_u,$$

где β'_κ - предварительное значение ширины коллекторной пластины;

$\beta_u = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м - толщина изоляционной пластины,

$$\beta'_\kappa = 0,0036 - 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,0031 \text{ м.}$$

По технологическим требованиям необходимо, чтобы $\beta_\kappa \geq 1,5 \cdot 10^{-3}$ м,

принимаем $\beta_\kappa = 0,003$ м.

2.5.5 Окончательный диаметр коллектора по (1.44) D_κ , м:

$$D_\kappa = \frac{\kappa \cdot t_\kappa}{\pi},$$

где $t_\kappa = \beta_\kappa + \beta_u = 0,003 + 0,0005 = 0,0035$ м - коллекторное деление,

$$D_k = \frac{38 \cdot 0,0035}{\pi} = 0,042 \text{ м.}$$

2.5.6 Окружная скорость коллектора по (1.45) V_k , м/с:

$$V_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_{ном}}{60},$$

$$V_k = \frac{\pi \cdot 0,042 \cdot 2400}{60} = 5,28 \text{ м/с.}$$

2.5.7 Требуемая площадь поперечного сечения щетки по (1.46) $S_{щ}$, м²:

по таблице Д.1 приложения Д выбираем металлографитные щетки марки МГ2 ГОСТ 12232-89 со следующими значениями параметров:

$\Delta U_{щн} = 0,5 \text{ В}$ - переходное падение напряжения на пару щеток;

$j_{щд} = 20 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$ - допустимая плотность тока под щеткой;

$\mu_m = 0,25$ - коэффициент трения щеток о коллектор,

$$S'_{щ} = \frac{I'_a}{n_{щ} \cdot j_{щд}},$$

где $n_{щ} = 1$ - число пар щеток, установленных в машине,

$$S'_{щ} = \frac{5,71}{1 \cdot 20 \cdot 10^4} = 0,2855 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

2.5.8 Размеры щетки

а) предварительная ширина щетки по (1.47):

$$b'_{щ} = \gamma \cdot t_k,$$

$$b'_{щ} = 1,5 \cdot 0,0035 = 0,0052 \text{ м};$$

б) предварительная длина щетки по оси коллектора по (1.48):

$$a'_{щ} = \frac{S'_{щ}}{b'_{щ}},$$

$$a'_{щ} = \frac{0,2855 \cdot 10^{-4}}{0,0052} = 0,0055 \text{ м}.$$

По таблице Д.2 приложения Д выбираем стандартные размеры щеток:

$$a_{щ} = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad b_{щ} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

2.5.9 Длина коллектора

а) активная длина коллектора по оси вала по (1.49) l'_k , м:

$$l'_k = (1,5 \div 2,0) \cdot a_{щ},$$

$$l'_k = 1,7 \cdot 0,0063 = 0,0107 \text{ м};$$

б) полная длина коллектора по оси вала по (1.50) l_k , м:

$$l_k = l'_k + (3 \div 5) \cdot d,$$

$$l_k = 0,0107 + 4 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3} = 0,014 \text{ м}.$$

2.6 Проверка коммутации

Реактивная ЭДС и ЭДС поля якоря суммируются в цепи короткозамкнутой секции и вызывают добавочный ток, увеличивающий ток якоря 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. Чтобы избежать недопустимого искрения под щетками величина результирующей ЭДС в секции не должна превышать определенного значения.

2.6.1 Среднее значение реактивной ЭДС в короткозамкнутой секции обмотки якоря по (1.52) e_p, B :

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

где λ_n - магнитная проводимость пазового рассеяния для овального паза;

$$\begin{aligned} \lambda_n &= \left[0,6 \cdot \frac{2 \cdot h_n}{b_{n1} + b_{n2}} + \frac{l_l}{l_\delta} + 0,921 \lg \left(\frac{\pi \cdot t_z}{b_{uu}} \right) \right] \cdot 10^{-6} = \\ &= \left[0,6 \cdot \frac{2 \cdot 0,0086}{0,0043 + 0,0028} + \frac{0,0646}{0,07} + 0,921 \lg \left(\frac{3,14 \cdot 0,0083}{0,0019} \right) \right] \cdot 10^{-6} = \\ &= 3,17 \cdot 10^{-6} \text{ Вб} / \text{А} \cdot \text{м}; \end{aligned}$$

$l_l = l_{a\text{cp}} - l_\delta = 0,1346 - 0,07 = 0,0646 \text{ м}$ - длина лобовой части полувитка обмотки якоря;

$b_{uu} = 0,0019 \text{ м}$ - ширина шлица паза якоря, при выборе ширины шлица (b_{uu}) необходимо соблюдать условие $b_{uu} < b_{кл}$,

$$A' = \frac{N \cdot I'_a}{2a \cdot \pi \cdot D} = \frac{304 \cdot 5,71}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,05} = 5528,2 \text{ А} / \text{м},$$

$$e_p = 2 \cdot 4 \cdot 3,17 \cdot 10^{-6} \cdot 0,07 \cdot 5528,2 \cdot 6,28 = 0,062 \text{ В}.$$

2.6.2 Среднее значение ЭДС поля якоря по (1.53) e_a , В:

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

$$e_a = \frac{0,8 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 5528,2 \cdot 0,0785 \cdot 0,07 \cdot 6,28}{0,0785 - 0,0589} \cdot 10^{-6} = 0,098 \text{ В.}$$

2.6.3 Среднее значение результирующей ЭДС в короткозамкнутой секции обмотки якоря по (1.54) e , В:

$$e = e_p + e_a,$$

$$e = 0,062 + 0,098 = 0,16 \text{ В.}$$

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

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

где $e_{\max} = 0,38 \text{ В}$ – максимальное значение результирующей ЭДС, ее значение определяем из графика $e_{\max} = f(U)$ для $U_{\text{ном}} = 24 \text{ В}$ (см. рисунок 2.3).

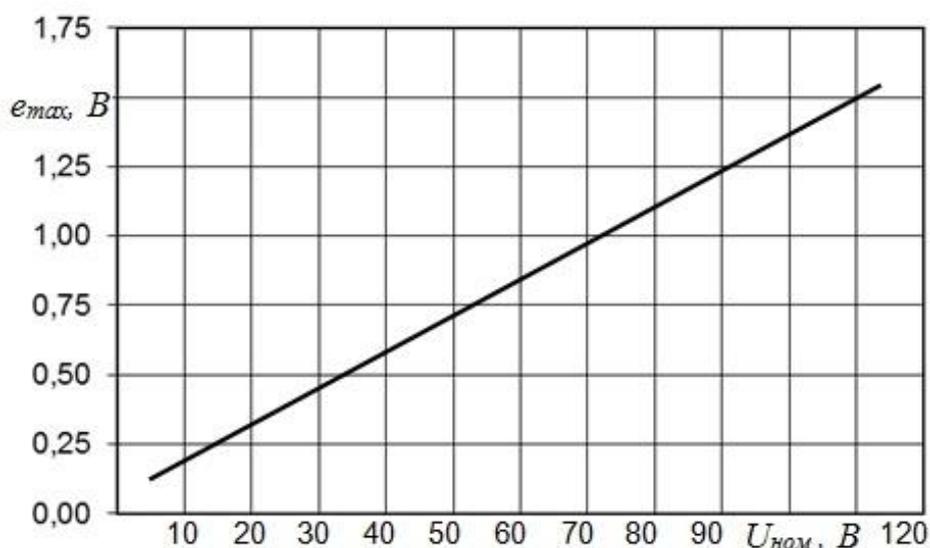


Рисунок 2.3 – Зависимость $e_{max} = f(U_{ном})$

2.7 Магнитная система машины

Магнитная цепь ДПТ разбита на ряд участков с приблизительно одинаковой индукцией на каждом участке: ярмо статора (станина), воздушный зазор, зубцы якоря, ярмо якоря, сердечник полюса, полюсной наконечник, технологический зазор между статором и сердечником главного полюса. Определение сечения участков магнитной цепи, кроме воздушного зазора, проводится исходя из допустимых для данных участков магнитных индукций, ограничиваемых магнитными свойствами выбранного материала магнитопровода. Рассматриваемая конструкция магнитной системы электродвигателя имеет осевую симметрию, поэтому для определения размеров полюса достаточно определить требуемую магнитную энергию на один полюс.

Приняты следующие допущения:

- 1) зубчатая поверхность якоря заменена гладкой поверхностью, и эффективная длина воздушного зазора определяется с помощью коэффициента Картера (k_s);
- 2) щетки расположены на геометрической нейтрали;

3) потоки рассеяния полюса учитываются коэффициентом рассеяния магнитной системы статора.

2.7.1 Длина воздушного зазора под полюсом по (1.56) δ , м:

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

$$\delta_{\delta} \geq 0,25 \cdot \frac{0,0785 \cdot 5528,2}{0,39} \cdot 10^{-6} = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Принимаем $\delta = 0,0007 \text{ м}$.

2.7.2 Высота ярма якоря по (1.58) h_j , м:

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

где $D_0 = 0,22 \cdot 0,05 = 0,011 \text{ м}$ - диаметр вала якоря под сердечником,

$$h_j = \frac{0,05 - (2 \cdot 0,0086 + 0,011)}{2} = 0,0109 \text{ м.}$$

2.7.3 Индукция в ярме якоря по (1.59) B_j , Тл:

$$B_j = \frac{\Phi_{\delta}}{2 \cdot k_{c2} \cdot h_j \cdot l_{\delta}},$$

где $\Phi_{\delta} = B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot b_{\delta} = 0,39 \cdot 0,07 \cdot 0,0589 = 16,08 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$,

$$B_j = \frac{16,08 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,95 \cdot 0,0109 \cdot 0,07} = 1,11 \text{ Тл.}$$

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

2.7.4 Размеры станины

а) площадь поперечного сечения станины по (1.60) S_c , м^2 :

$$S_c = \frac{\Phi_\delta \cdot \sigma}{2 \cdot B_c},$$

где $\sigma = 1,08$ - коэффициент рассеяния магнитной системы статора при $2p = 2$;

$B_c = 1,6 \text{ Тл}$ - индукция в станине,

$$S_c = \frac{16,08 \cdot 10^{-4} \cdot 1,08}{2 \cdot 1,6} = 5,427 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

б) расчетная осевая длина станины по (1.61) l_c , м :

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

$$l_c = 0,07 + 0,2 \cdot 0,05 = 0,08 \text{ м};$$

в) высота станины по (1.62) h_c , м :

$$h_c = \frac{S_c}{k_{c1} \cdot l_c},$$

где $k_{c1} = 1$ – коэффициент заполнения станины сталью (станина выполнена сплошной)

$$h_c = \frac{5,427 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 0,08} = 0,0068 \text{ м.}$$

2.7.5 Размеры сердечника полюса

а) высота сердечника полюса и полюсного наконечника по (1.63) h_{zn} , м:

$$h_{zn} = \frac{D_{корп} - 2 \cdot h_{корп} - 2 \cdot h_c - D - 2 \cdot \delta}{2},$$

где $D_{корп} = 0,12 \text{ м}$ – диаметр корпуса двигателя (эта величина указана в техническом задании на проектирование);

$h_{корп} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – толщина корпуса двигателя (корпус выполнен из сплава алюминия),

$$h_{zn} = \frac{0,12 - 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,0068 - 0,05 - 2 \cdot 0,0007}{2} = 0,0295 \text{ м};$$

б) длина сердечника полюса по (1.64) l_{zn} , м:

$$l_{zn} = l_{\delta},$$

$$l_{zn} = 0,07 \text{ м};$$

в) ширина сердечника полюса по (1.65) b_{zn} , м:

$$b_{2n} = \frac{\Phi_{\delta} \cdot \sigma}{l_{2n} \cdot B_n},$$

где $B_n = 1 \text{ Тл}$ – индукция в сердечнике полюса,

$$b_{2n} = \frac{16,08 \cdot 10^{-4} \cdot 1,08}{0,07 \cdot 1} = 0,248 \text{ м.}$$

2.8 Расчет полюса

Якорь двигателя выполняем из стали 2013. Ядро статора и полюсы выполняем из стали 3.

Из приложения Е выбираем коэффициенты аппроксимации основных кривых намагничивания электротехнических сталей.

Коэффициенты для стали 3:

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

коэффициенты для стали 2013:

$$A_c = 0,05; \quad D_c = 0,05; \quad C_c = 10; \quad \beta_c = 3,7.$$

2.8.1 Удельная магнитная энергия ядра статора по (1.67) $W_{c \text{ yd}}$, Дж / м³:

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

$$W_{c \text{ yd}} = \left(\frac{10,718 \cdot 1,6^2 - 6,931 \cdot 1,6 + 610,718}{1,205} + \frac{2 \cdot 10,718}{1,205^3} \right) \cdot ch(1,205 \cdot 1,6) -$$

$$- sh(1,205 \cdot 1,6) \cdot \frac{2 \cdot 10,718 \cdot 1,6 - 6,931}{1,205^2} = 1806,45 \text{ Дж} / \text{м}^3.$$

2.8.2 Удельная магнитная энергия сердечника полюса по (1.68)

$W_{ny\delta}$, Дж / м³:

$$W_{ny\delta} = \left(\frac{A_c \cdot B_n^2 + D_c \cdot B_n + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_n) - \\ - sh(\beta_c \cdot B_n) \cdot \frac{2A_c \cdot B_n + D_c}{\beta_c^2},$$

$$W_{ny\delta} = \left(\frac{10,718 \cdot 1^2 - 6,931 \cdot 1 + 610,718}{1,205} + \frac{2 \cdot 10,718}{1,205^3} \right) \cdot ch(1,205 \cdot 1) - \\ - sh(1,205 \cdot 1) \cdot \frac{2 \cdot 10,718 \cdot 1 - 6,931}{1,205^2} = 934,33 \text{ Дж} / \text{м}^3.$$

2.8.3 Удельная магнитная энергия зубцов якоря по (1.69) $W_{zy\delta}$, Дж / м³:

$$W_{zy\delta} = \left(\frac{A_c \cdot B_z^2 + D_c \cdot B_z + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_z) - \\ - sh(\beta_c \cdot B_z) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B_z + D_c}{\beta_c^2},$$

$$W_{zy\delta} = \left(\frac{0,05 \cdot 1,1^2 + 0,05 \cdot 1,1 + 10}{3,7} + \frac{2 \cdot 0,05}{3,7^3} \right) \cdot ch(3,7 \cdot 1,1) - \\ - sh(3,7 \cdot 1,1) \cdot \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 1,1 + 0,05}{3,7^2} = 79,78 \text{ Дж} / \text{м}^3.$$

2.8.4 Удельная магнитная энергия ярма якоря по (1.70) $W_{j\ y\delta}$, Дж / м³:

$$W_{j\ y\delta} = \left(\frac{A_c \cdot B_j^2 + D_c \cdot B_j + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot ch(\beta_c \cdot B_j) - \\ - sh(\beta_c \cdot B_j) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B_j + D_c}{\beta_c^2},$$

$$W_{j\ y\delta} = \left(\frac{0,05 \cdot 1,11^2 + 0,05 \cdot 1,11 + 10}{3,7} + \frac{2 \cdot 0,05}{3,7^3} \right) \cdot ch(3,7 \cdot 1,11) - \\ - sh(3,7 \cdot 1,11) \cdot \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 1,11 + 0,05}{3,7^2} = 82,8 \text{ Дж} / \text{м}^3.$$

2.8.5 Удельная магнитная энергия воздушного зазора по (1.71)

$W_{\delta\ y\delta}$, Дж / м³:

$$W_{\delta\ y\delta} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B_{\delta\ c\ p\ \sigma}^2,$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн / м - магнитная постоянная;

$$B_{\delta\ c\ p\ \sigma} = B_{\delta} \cdot \frac{(1 + \sigma)}{2} = 0,39 \cdot \frac{(1 + 1,08)}{2} = 0,4056 \text{ Тл} - \text{среднее значение ин-}$$

дукции в воздушном зазоре с учетом потока рассеяния,

$$W_{\delta\ y\delta} = \frac{1}{2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,4056^2 = 65490,19 \text{ Дж} / \text{м}^3.$$

2.8.6 Удельная магнитная энергия для зазора стыка по (1.72)

$W_{\delta\ c\ y\delta}$, Дж / м³:

$$W_{\delta c y \delta} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B_{cm}^2,$$

где $B_{cm} = B_n = 1 \text{ Тл}$,

$$W_{\delta c y \delta} = \frac{1}{2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1^2 = 398089,17 \text{ Дж/м}^3.$$

2.8.7 Объем магнитного материала ярма статора (станины) на один полюс по (1.73) V_c , м^3 :

$$V_c = \frac{\pi \cdot (D_{корн} - 2 \cdot h_{корн} - h_c)}{2p} \cdot h_c \cdot l_c \cdot k_{c1},$$

$$V_c = \frac{\pi \cdot (0,12 - 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} - 0,0068)}{2} \cdot 0,0068 \cdot 0,07 \cdot 1 = 8,011 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

2.8.8 Объем магнитного материала сердечника полюса по (1.74) V_n , м^3 :

$$V_n = h_{zn} \cdot l_{zn} \cdot b_{zn},$$

$$V_n = 0,0295 \cdot 0,07 \cdot 0,0248 = 5,121 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

2.8.9 Объем магнитного материала зубчатой зоны якоря на один полюс по (1.75) V_z , м^3 :

$$V_z = \frac{\alpha_\delta}{2p} \cdot h_n \cdot b_z \cdot l_\delta \cdot z \cdot k_{c2},$$

$$V_z = \frac{0,75}{2} \cdot 0,0086 \cdot 0,0031 \cdot 0,07 \cdot 19 \cdot 0,95 = 1,263 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

2.8.10 Объем магнитного материала ярма якоря на один полюс по (1.76)

$V_j, \text{м}^3$:

$$V_j = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h_n - h_j)}{2p} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_\delta}{2}\right) \cdot h_j \cdot l_\delta \cdot k_{c2},$$

$$V_j = \frac{\pi \cdot (0,05 - 2 \cdot 0,0086 - 0,0109)}{2} \cdot \left(1 - \frac{0,75}{2}\right) \cdot 0,0109 \cdot 0,07 \cdot 0,95 = 1,558 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

2.8.11 Объем воздушного зазора на один полюс по (1.77) $V_\delta, \text{м}^3$:

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

где $k_\delta = \frac{t_z + 10 \cdot \delta}{t_z - b_{uu} + 10 \cdot \delta} = \frac{0,0083 + 10 \cdot 0,0007}{0,0083 - 0,0019 + 10 \cdot 0,0007} = 1,14,$

$$V_\delta = 1,14 \cdot 0,0007 \cdot 0,07 \cdot 0,0589 = 3,29 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

2.8.12 Объем воздушного зазора стыка на один полюс по (1.78) $V_{\delta c}, \text{м}^3$:

$$V_{\delta c} = \delta_{cm} \cdot l_\delta \cdot b_{2n},$$

где $\delta_{cm} = 0,04 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - длина воздушного зазора стыка, берем для расчета восьмой квалитет чистоты обработки станины и сердечника полюса,

$$V_{\delta c} = 0,04 \cdot 10^{-3} \cdot 0,07 \cdot 0,0248 = 6,944 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3.$$

2.8.13 Магнитная энергия, запасенная на участках магнитной цепи по (1.79 – 1.84):

$$W_c = W_{c \text{ y}\partial} \cdot V_c,$$

$$W_c = 1806,45 \cdot 8,011 \cdot 10^{-5} = 0,1447 \text{ Дж};$$

$$W_n = W_{n \text{ y}\partial} \cdot V_n,$$

$$W_n = 934,33 \cdot 5,121 \cdot 10^{-5} = 0,0478 \text{ Дж};$$

$$W_z = W_{z \text{ y}\partial} \cdot V_z,$$

$$W_z = 79,78 \cdot 1,263 \cdot 10^{-5} = 0,001 \text{ Дж};$$

$$W_j = W_{j \text{ y}\partial} \cdot V_j,$$

$$W_j = 82,8 \cdot 1,558 \cdot 10^{-5} = 0,0013 \text{ Дж};$$

$$W_\delta = W_{\delta \text{ y}\partial} \cdot V_\delta,$$

$$W_\delta = 65490,19 \cdot 3,29 \cdot 10^{-6} = 0,2155 \text{ Дж};$$

$$W_{\delta c} = W_{\delta c \text{ y}\partial} \cdot V_{\delta c},$$

$$W_{\delta c} = 398089,17 \cdot 6,944 \cdot 10^{-8} = 0,0276 \text{ Дж}.$$

2.8.14 Магнитная энергия, необходимая для намагничивания магнитной цепи электродвигателя по (1.85) W , Дж:

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

$$W = 0,1447 + 0,0478 + 0,001 + 0,0013 + 0,2155 + 0,0276 = 0,4379 \text{ Дж.}$$

2.8.15 Размагничивающее действие поля якоря

Напряженность магнитного поля под сбегающим краем полюса по (1.86)

H'_δ , A/m :

$$H'_\delta = H_\delta - H_{\delta a},$$

где $H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{0,39}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 310509,55 \text{ A/m}$ - напряженность магнитного поля

в воздушном зазоре;

$$F_{aq} = \frac{b_\delta \cdot A'}{2} = \frac{0,0589 \cdot 5528,2}{2} = 162,81 \text{ A}$$
 - магнитодвижущая сила поперечной составляющей поля якоря;

$$F_{\delta a} = \frac{F_{aq} \cdot W_\delta}{W_z + W_j + W_\delta} = \frac{162,81 \cdot 0,2155}{0,001 + 0,0013 + 0,2155} = 161,09 \text{ A}$$
 - магнитодвижущая сила поперечной составляющей магнитного поля якоря воздушного зазора;

магнитодвижущая сила поперечной составляющей магнитного поля якоря воздушного зазора;

$$H_{\delta a} = \frac{F_{\delta a}}{\delta} = \frac{161,09}{0,0007} = 230129,57 \text{ A/m}$$
 - напряженность поперечной составляющей магнитного поля якоря в воздушном зазоре,

магнитного поля якоря в воздушном зазоре,

$$H'_\delta = 310509,55 - 230129,57 = 80379,78 \text{ A.}$$

Напряженность магнитного поля под набегающим краем полюса по (1.87)

H''_δ , A/m :

$$H''_{\delta} = H_{\delta} + H_{\delta a},$$

$$H''_{\delta} = 310509,55 + 230129,57 = 540638,92 \text{ A / м.}$$

Индукция в воздушном зазоре под сбегающим и набегающим краями полюса по (1.88-1.89)

$$B'_{\delta} = H'_{\delta} \cdot \mu_0 = 80379,78 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 0,101 \text{ Тл},$$

$$B''_{\delta} = H''_{\delta} \cdot \mu_0 = 540638,92 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 0,679 \text{ Тл}.$$

2.8.16 Удельные магнитные энергии участков магнитной цепи переходного слоя под сбегающим и набегающим краями полюса по (1.90-1.95):

$$W'_{\delta y \delta} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot (B'_{\delta c p \sigma})^2,$$

где $B'_{\delta c p \sigma} = B'_{\delta} \cdot \left(\frac{1 + \sigma}{2} \right) = 0,101 \cdot \left(\frac{1 + 1,08}{2} \right) = 0,105 \text{ Тл},$

$$W'_{\delta y \delta} = \frac{1}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,105^2 = 4388,93 \text{ Дж / м}^3;$$

$$W''_{\delta y \delta} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot (B''_{\delta c p \sigma})^2,$$

где $B''_{\delta c p \sigma} = B''_{\delta} \cdot \left(\frac{1 + \sigma}{2} \right) = 0,679 \cdot \left(\frac{1 + 1,08}{2} \right) = 0,7062 \text{ Тл}$ – индукция в воздушном зазоре под набегающим краем полюса,

$$W''_{\delta y \delta} = \frac{1}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,7062^2 = 198534,41 \text{ Дж} / \text{м}^3;$$

$$W'_{zy\delta} = \left(\frac{A_c \cdot (B'_z)^2 + D_c \cdot B'_z + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot \text{ch}(\beta_c \cdot B'_z) - \\ - \text{sh}(\beta_c \cdot B'_z) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B'_z + D_c}{\beta_c^2},$$

где $B'_z = \frac{B'_\delta \cdot t_z}{k_{c2} \cdot b_z} = \frac{0,101 \cdot 0,0083}{0,95 \cdot 0,0031} = 0,2847 \text{ Тл}$ - магнитная индукция в зубце

якоря под сбегающим краем полюса,

$$W'_{zy\delta} = \left(\frac{0,05 \cdot 0,2847^2 + 0,05 \cdot 0,2847 + 10}{3,7} + \frac{2 \cdot 0,05}{3,7^3} \right) \cdot \text{ch}(3,7 \cdot 0,2847) - \\ - \text{sh}(3,7 \cdot 0,2847) \cdot \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 0,2847 + 0,05}{3,7^2} = 4,35 \text{ Дж} / \text{м}^3;$$

$$W''_{zy\delta} = \left(\frac{A_c \cdot (B''_z)^2 + D_c \cdot B''_z + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot \text{ch}(\beta_c \cdot B''_z) - \\ - \text{sh}(\beta_c \cdot B''_z) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B''_z + D_c}{\beta_c^2},$$

где $B''_z = \frac{B''_\delta \cdot t_z}{k_{c2} \cdot b_z} = \frac{0,679 \cdot 0,0083}{0,95 \cdot 0,0031} = 1,9137 \text{ Тл}$ - магнитная индукция в зубце

якоря под набегающим краем полюса,

$$W''_{zy\delta} = \left(\frac{0,05 \cdot 1,9137^2 + 0,05 \cdot 1,9137 + 10}{3,7} + \frac{2 \cdot 0,05}{3,7^3} \right) \cdot \text{ch}(3,7 \cdot 1,9137) - \\ - \text{sh}(3,7 \cdot 1,9137) \cdot \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 1,9137 + 0,05}{3,7^2} = 1641,95 \text{ Дж} / \text{м}^3;$$

$$W'_{jy\delta} = \left(\frac{A_c \cdot (B'_j)^2 + D_c \cdot B'_j + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot \text{ch}(\beta_c \cdot B'_j) - \\ - \text{sh}(\beta_c \cdot B'_j) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B'_j + D_c}{\beta_c^2},$$

где $B'_j = \frac{B'_\delta \cdot l_{zn} \cdot b_\delta}{2 \cdot k_{c2} \cdot h_j \cdot l_\delta} = \frac{0,101 \cdot 0,07 \cdot 0,0589}{2 \cdot 0,95 \cdot 0,0109 \cdot 0,07} = 0,2872 \text{ Тл}$ - магнитная ин-

дукция в ярме якоря под сбегающим краем полюса,

$$W'_{jy\delta} = \left(\frac{0,05 \cdot 0,2872^2 + 0,05 \cdot 0,2872 + 10}{3,7} + \frac{2 \cdot 0,05}{3,7^3} \right) \cdot \text{ch}(3,7 \cdot 0,2872) - \\ - \text{sh}(3,7 \cdot 0,2872) \cdot \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 0,2872 + 0,05}{3,7^2} = 4,38 \text{ Дж} / \text{м}^3;$$

$$W''_{jy\delta} = \left(\frac{A_c \cdot (B''_j)^2 + D_c \cdot B''_j + C_c}{\beta_c} + \frac{2 \cdot A_c}{\beta_c^3} \right) \cdot \text{ch}(\beta_c \cdot B''_j) - \\ - \text{sh}(\beta_c \cdot B''_j) \cdot \frac{2 \cdot A_c \cdot B''_j + D_c}{\beta_c^2},$$

где $B''_j = \frac{B''_\delta \cdot l_{zn} \cdot b_\delta}{2 \cdot k_{c2} \cdot h_j \cdot l_\delta} = \frac{0,679 \cdot 0,07 \cdot 0,0589}{2 \cdot 0,95 \cdot 0,0109 \cdot 0,07} = 1,9311 \text{ Тл}$ - магнитная ин-

дукция в ярме якоря под набегающим краем полюса,

$$W''_{jy\delta} = \left(\frac{0,05 \cdot 1,9311^2 + 0,05 \cdot 1,9311 + 10}{3,7} + \frac{2 \cdot 0,05}{3,7^3} \right) \cdot \text{ch}(3,7 \cdot 1,9311) - \\ - \text{sh}(3,7 \cdot 1,9311) \cdot \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 1,9311 + 0,05}{3,7^2} = 1751,78 \text{ Дж} / \text{м}^3.$$

2.8.17 Магнитная энергия переходного слоя магнитной цепи при размагничивающем действии поля якоря по (1.96) $W_{\delta zj}$, Дж :

$$W_{\delta zj} = 0,5 \cdot \left[(W'_{\delta y\delta} + W''_{\delta y\delta}) \cdot V_{\delta} + (W'_{z y\delta} + W''_{z y\delta}) \cdot V_z + (W'_{j y\delta} + W''_{j y\delta}) \cdot V_j \right],$$

$$W_{\delta zj} = 0,5 \cdot \left[(4388,93 + 198534,41) \cdot 3,29 \cdot 10^{-6} + (4,35 + 1641,95) \cdot \right. \\ \left. \cdot 1,263 \cdot 10^{-5} + (4,38 + 1751,78) \cdot 1,558 \cdot 10^{-5} \right] = 0,358 \text{ Дж.}$$

2.8.18 Увеличение магнитной энергии переходного слоя от действия поля якоря по (1.97) ΔW , Дж:

$$\Delta W = W_{\delta zj} - W_{\delta} - W_z - W_j,$$

$$\Delta W = 0,358 - 0,2155 - 0,001 - 0,0013 = 0,1402 \text{ Дж.}$$

2.8.19 Сечение провода обмотки возбуждения по (1.98) g'_g , m^2 :

$$g'_g = \frac{\omega'_g \cdot l'_{gcp}}{57 \cdot R'_g} \cdot 10^{-6},$$

где $\omega'_g = \frac{2 \cdot 2p \cdot (W + \Delta W)}{I'_g \cdot \Phi_n} = \frac{2 \cdot 2 \cdot (0,4379 + 0,1402)}{5,71 \cdot 17,366 \cdot 10^{-4}} = 233,2$ - предваритель-

ное число витков обмотки возбуждения,

$$l'_{gcp} = 2 \cdot l_{zn} + 2 \cdot b_{zn} + 2 \cdot b_{kmax} = 2 \cdot 0,07 + 2 \cdot 0,0248 + 2 \cdot 0,035 = 0,2596 \text{ м}$$

предварительная длина витка обмотки возбуждения;

$$b_{kmax} = 0,5 \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{cp}}{2p} - b_{zn} - b_{z3} - b_3 \right) = \\ = 0,5 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0,0672}{2} - 0,0248 - 0,2 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2} \right) = 0,035 \text{ м;}$$

$$D_{cp} = D + 2(\delta + h_{nn} + b_{kuz}) = 0,05 + 2 \cdot (0,0007 + 0,0066 + 1,5 \cdot 10^{-3}) = 0,0672 \text{ м;}$$

$$h_{nn} = \frac{(b_{\delta} - b_{zn}) \cdot B_{\delta}}{2 \cdot B_{nn}} = \frac{(0,0589 - 0,0248) \cdot 0,39}{2 \cdot 1} = 0,0066 \text{ м} - \text{высота полюсного}$$

наконечника;

$$b_{киз} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} - \text{односторонняя толщина изоляционного каркаса катушки};$$

$B_{nn} = B_n = 1 \text{ Тл}$ - магнитная индукция в поперечном сечении полюсного наконечника;

$b_{зз} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - зазор между сердечником полюса и каркасом обмотки возбуждения;

$b_3 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ - технологический зазор между соседними катушками возбуждения;

$\Phi_n = \Phi_{\delta} \cdot \sigma = 16,08 \cdot 10^{-4} \cdot 1,08 = 17,3664 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$ - магнитный поток в сердечнике полюса;

$$R'_e = \frac{U_{ном} - E - \Delta U_{щн} \cdot \frac{j'_{щ}}{j_{щ\delta}} - I'_a \cdot \sqrt{(R_a \cdot k'_{\theta})^2 + X_a^2}}{I'_e \cdot k'_{\theta e}} =$$

$$= \frac{24 - 19,55 - 0,5 \cdot \frac{18,13 \cdot 10^4}{20 \cdot 10^4} - 5,71 \cdot \sqrt{0,317^2 \cdot 1,28^2 + 0,006^2}}{5,71 \cdot 1,12} = 0,262 \text{ Ом};$$

$$E = \frac{p \cdot N \cdot \Phi_{\delta} \cdot n_{ном}}{a \cdot 60} = \frac{1 \cdot 304 \cdot 16,08 \cdot 10^{-4} \cdot 2400}{1 \cdot 60} = 19,55 \text{ В};$$

$$j'_{щ} = \frac{I'_a}{n_{щ} \cdot a_{щ} \cdot b_{щ}} = \frac{5,71}{1 \cdot 0,0063 \cdot 0,005} = 18,13 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2;$$

$$X_a = \frac{\mu_0 \cdot \kappa \cdot n_{ном} \cdot b_{щ}^2 \cdot n_{щ}^2 \cdot \omega_c^2 \cdot l_{\delta}}{a^3 \cdot t_{\kappa}^2 \cdot \left(\frac{b_{щ}}{t_{\kappa}} - \left(\frac{a}{p} - 1 \right) \right) \cdot 30} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 39 \cdot 2400 \cdot 0,005^2 \cdot 1^2 \cdot 4^2 \cdot 0,07}{1 \cdot 0,0035^2 \cdot \left(\frac{0,005}{0,0035} - (1 - 1) \right) \cdot 30} = 0,006 \text{ Ом};$$

принимаем:

$$\vartheta = 70 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$k'_{\theta} = 1 + 0,004 \cdot \vartheta = 1 + 0,004 \cdot 70 = 1,28;$$

$$g_{\theta} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$k'_{\theta\theta} = 1 + 0,004 \cdot 30 = 1,12,$$

$$g'_{\theta} = \frac{233,2 \cdot 0,2596}{57 \cdot 0,262} \cdot 10^{-6} = 4,054 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Выбираем размеры провода марки ПЭТВ:

$$g_{\theta} = 3,34 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; \quad d_{\text{из}} = 2,34 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad d = 2,24 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

2.8.20 Размеры катушки обмотки возбуждения

а) число витков в слое катушки обмотки возбуждения по (1.99):

$$\omega'_{\text{ск}} = \frac{h_{\text{zn}} - h_{\text{nn}} - 2 \cdot b_{\text{к из}}}{d_{\text{из в}}},$$

$$\omega'_{\text{ск}} = \frac{0,0295 - 0,0066 - 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{2,34 \cdot 10^{-3}} = 8,5.$$

принимаем $\omega_{\text{ск}} = 8$;

б) число слоев провода в катушке возбуждения по (1.100) n_c :

$$n'_c = \frac{\omega'_{\theta}}{\omega_{\text{ск}} \cdot 2p},$$

$$n'_c = \frac{233,2}{8 \cdot 2} = 14,5.$$

принимаем $n_c = 14,5$;

в) число витков обмотки возбуждения по (1.101) ω_{θ} :

$$\omega_g = \omega_{ск} \cdot n_c \cdot 2p,$$

$$\omega_g = 8 \cdot 14,5 \cdot 2 = 232;$$

г) толщина катушки обмотки возбуждения по (1.102) $b_k, м$:

$$b_k = n_c \cdot d_{изв} + b_{куз} + b'_{из} + 0,5 \cdot b_{зз},$$

где $b'_{из} = 0,2 \cdot 10^{-3} м$ - толщина наружной изоляции катушки возбуждения,

$$b_k = 14 \cdot 2,34 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 10^{-3} + 0,2 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 0,0345 м.$$

необходимо, чтобы $b_k \leq b_{kmax} : 0,0345 \leq 0,035$;

д) средняя длина витка обмотки возбуждения по (1.103) $l_{вср}, м$:

$$l_{вср} = 2 \cdot (l_{zn} + b_{zn} + b_k),$$

$$l_{вср} = 2 \cdot (0,07 + 0,0248 + 0,0345) = 0,259 м.$$

2.8.21 Сопротивление обмотки возбуждения при температуре 20^0C по (1.104) $R_g, Ом$:

$$R_g = \frac{\omega_g \cdot l_{вср}}{57 \cdot g_g} \cdot 10^{-6},$$

$$R_g = \frac{232 \cdot 0,259}{57 \cdot 3,94 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 0,258 Ом.$$

2.9 Потери и коэффициент полезного действия электродвигателя

2.9.1 Электрические потери в обмотке якоря по (1.105) $P_{\text{я}}$, Вт:

$$P_{\text{я}} = I_a^2 \cdot R_a \cdot k'_\theta,$$

где

$$I_a = I_\epsilon = I = \frac{U_{\text{ном}} - E - \Delta U_{\text{щ}} \cdot \frac{j'_{\text{щ}}}{j_{\text{щ}\delta}}}{R_\epsilon \cdot k'_{\theta\epsilon} + \sqrt{(R_a \cdot k'_\theta)^2 + X_a^2}} = \frac{24 - 19,55 - 0,5 \cdot \frac{18,3 \cdot 10^4}{20 \cdot 10^4}}{0,268 \cdot 1,12 + \sqrt{0,317^2 \cdot 1,28^2 + 0,006^2}} = 5,66 \text{ A},$$

$$P_{\text{я}} = 5,66^2 \cdot 0,317 \cdot 1,28 = 13 \text{ Вт}.$$

2.9.2 Электрические потери в щетках по (1.106) $P_{\text{щ}}$, Вт:

$$P_{\text{щ}} = I \cdot \Delta U_{\text{щ}},$$

$$\text{где } \Delta U_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щн}} \cdot \frac{j_{\text{щ}}}{j_{\text{щ}\delta}} = 0,5 \cdot \frac{17,97 \cdot 10^4}{20 \cdot 10^4} = 0,45 \text{ В};$$

$$j_{\text{щ}} = \frac{I_a}{n_{\text{щ}} \cdot a_{\text{щ}} \cdot b_{\text{щ}}} = \frac{5,66}{1 \cdot 0,0063 \cdot 0,005} = 17,97 \cdot 10^4 \text{ A / м}^2,$$

$$P_{\text{щ}} = 5,66 \cdot 0,45 = 2,55 \text{ Вт}.$$

2.9.3 Электрические потери в обмотке возбуждения по (1.107) $P_{\text{в}}$, Вт:

$$P_{\text{в}} = I_\epsilon^2 \cdot R_\epsilon \cdot k'_{\theta\epsilon},$$

$$P_{\rho\sigma} = 5,66^2 \cdot 0,268 \cdot 1,12 = 9,62 \text{ Вт.}$$

2.9.4 Масса стали ярма якоря по (1.108) m_j , кг:

$$m_j = 7,8 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h_n)^2}{4} \cdot k_{c2} \cdot l_\delta,$$

$$m_j = 7,8 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi \cdot (0,05 - 2 \cdot 0,0086)^2}{4} \cdot 0,95 \cdot 0,07 = 0,438 \text{ кг.}$$

2.9.5 Масса стали зубцов якоря по (1.109) m_z , кг:

$$m_z = 7,8 \cdot 10^3 \cdot k_{c2} \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 - S_n \cdot z \right) \cdot l_\delta - m_j,$$

$$m_z = 7,8 \cdot 10^3 \cdot 0,95 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 0,05^2 - 2,3817 \cdot 10^{-5} \cdot 19 \right) \cdot 0,07 - 0,438 = 0,345 \text{ кг.}$$

2.9.6 Магнитные потери в ярме якоря по (1.110) P_j , Вт:

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

где

$$\begin{aligned} \rho_j &= 2,3 \cdot p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_2}{50} \right)^\beta \cdot \frac{1}{2} \left((B'_j)^2 + (B''_j)^2 \right) = \\ &= 2,3 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{40}{50} \right)^{1,5} \cdot 0,5 (0,2872^2 + 1,9311^2) = 7,84 \text{ Вт / кг} - \end{aligned}$$

- удельные магнитные потери ярма якоря;

$\beta = 1,5$ - коэффициент;

$\rho_{1,0/50} = 2,5 \text{ Вт} / \text{кг}$ – удельные магнитные потери для стали 2013,

$$P_j = 0,438 \cdot 7,84 = 3,43 \text{ Вт}.$$

2.9.7 Магнитные потери в зубцах якоря по (1.111) P_z , Вт:

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

где ρ_z – удельные магнитные потери в зубцах якоря для стали 2013:

$$\begin{aligned} \rho_z &= 2,3 \cdot p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_2}{50}\right)^\beta \cdot \frac{1}{2} \left((B'_z)^2 + (B''_z)^2 \right) = \\ &2,3 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{40}{50}\right)^{1,5} \cdot \frac{1}{2} (0,2847^2 + 1,9137^2) = 7,7 \text{ Вт} / \text{кг}, \end{aligned}$$

$$P_z = 0,345 \cdot 7,7 = 2,66 \text{ Вт}.$$

2.9.8 Потери в стали якоря по (1.112) P_c , Вт:

$$P_c = P_j + P_z,$$

$$P_c = 3,43 + 2,66 = 6,09 \text{ Вт}.$$

2.9.9 Механические потери в электродвигателе

а) потери на трение щеток о коллектор по (1.113) $P_{m_{щ}}$, Вт:

$$P_{m_{щ}} = \mu_m \cdot \rho_{щ} \cdot \sum S_{щ} \cdot V_k,$$

где $\sum S_{щ} = 2 \cdot n_{щ} \cdot S_{щ} = 2 \cdot 1 \cdot 0,005 \cdot 0,0063 = 6,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ - суммарное поперечное сечение щеток;

$$\mu_m = 0,25;$$

$$\rho_{щ} = 2 \cdot 10^4 \text{ Па},$$

$$P_{mщ} = 0,25 \cdot 20000 \cdot 6,3 \cdot 10^{-5} \cdot 5,28 = 1,66 \text{ Вт};$$

б) потери в подшипниках по (1.114) P_{mn} , Вт:

$$P_{mn} = k_m \cdot m_a \cdot n_{ном} \cdot 10^{-3},$$

где $k_m = 1$ - коэффициент;

$m_a = m_j + m_z + m_o + m_k = 0,438 + 0,345 + 0,206 + 0,138 = 1,127 \text{ кг}$ - масса якоря;

$m_o = 8,9 \cdot 10^3 \cdot N \cdot g \cdot l_{a\text{ср}} = 8,9 \cdot 10^3 \cdot 304 \cdot 0,567 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1346 = 0,206 \text{ кг}$ - масса обмотки якоря;

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

$$= 8,9 \cdot 10^3 \cdot 0,014 \cdot \left[\frac{\pi}{4} \cdot \left(0,042^2 - \left(\frac{0,0042 - 2 \cdot 0,011}{3} \right)^2 \right) - \right. \\ \left. - 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 38 \cdot \left(\frac{0,042 - 0,011}{3} \right) \right] = 0,138 \text{ кг} -$$

- примерная масса коллектора;

$$P_{mn} = 1 \cdot 1,127 \cdot 2400 \cdot 10^{-3} = 2,7 \text{ Вт};$$

в) вентиляционные потери по (1.115) $P_{mв}$, Вт:

$$P_{m\epsilon} = 2 \cdot D^3 \cdot n_{ном}^3 \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-6},$$

$$P_{m\epsilon} = 2 \cdot 0,05^3 \cdot 2400^3 \cdot 0,07 \cdot 10^{-6} = 0,242 \text{ Вт};$$

г) полные механические потери в электродвигателе по (1.116) P_{mx} , Вт :

$$P_{mx} = P_{m\omega} + P_{mn} + P_{m\epsilon},$$

$$P_{mx} = 1,66 + 2,7 + 0,242 = 4,6 \text{ Вт}.$$

2.9.10 Добавочные потери по (1.117) P_{δ} , Вт :

$$P_{\delta} = 0,01 \cdot U_{ном} \cdot I_a,$$

$$P_{\delta} = 0,01 \cdot 24 \cdot 5,66 = 1,36 \text{ Вт}.$$

2.9.11 Суммарные потери мощности по (1.118) $\sum P$, Вт :

$$\sum P = P_{\epsilon a} + P_{\epsilon \epsilon} + P_{\epsilon \omega} + P_c + P_{mx} + P_{\delta},$$

$$\sum P = 13 + 9,62 + 2,55 + 6,09 + 4,6 + 1,36 = 37,22 \text{ Вт}.$$

2.9.12 Потребляемая электродвигателем мощность по (1.119) P_1 , Вт :

$$P_1 = U_{ном} \cdot I,$$

$$P_1 = 24 \cdot 5,66 = 135,84 \text{ Вт}.$$

2.9.13 Полезная мощность на валу электродвигателя по (1.120) P_2 , Вт :

$$P_2 = P_1 - \Sigma P,$$

$$P_2 = 135,84 - 37,22 = 98,6 \text{ Вт}.$$

2.9.14 Коэффициент полезного действия двигателя по (1.121) η , % :

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

$$\eta = \frac{98,6}{135,84} \cdot 100\% = 72,6 \%.$$

2.9.15 Превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды при продолжительном режиме работы электродвигателя с нагрузкой по (1.122) $\Delta \vartheta_a$, °C :

$$\Delta \vartheta_a = \frac{\left(1 + \alpha_a \cdot b'_z \cdot \frac{\beta_n}{\lambda_1 \cdot \Pi_n} \right) \cdot \rho_{\text{эa}} + \rho_c + \rho_{mв}}{\alpha_a \cdot b'_z},$$

где $\alpha_a = \alpha_1 \cdot (1 + 0,1 \cdot V_a) = 16,7 \cdot (1 + 0,1 \cdot 6,28) = 27,1876 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{°C}}$ – результи-

рующий коэффициент теплоотдачи с поверхности вращающегося якоря;

$\alpha_1 = 16,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности непо-

движного якоря;

$b'_z = t_z - b_{uz} = 0,0083 - 0,0019 = 0,0064$ м – ширина коронки зубца якоря;

$\lambda_1 = 0,16 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ – коэффициент теплопроводности межвитковой изоляции;

$$\beta_n = \frac{S_n \cdot (1 - k_3 \cdot k_{nm})}{\Pi_n} = \frac{2,3817 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,71 \cdot 0,797)}{0,019} = 5,442 \cdot 10^{-4} \text{ м} \quad -$$

общая толщина эквивалентной изоляции в пазе;

$$k_{nm} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{d^2}{d_{uz}^2} = \frac{3,14 \cdot 0,85^2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1,7 \cdot 0,915^2 \cdot 10^{-6}} = 0,797 \quad - \text{ коэффициент заполнения}$$

изолированного провода медью;

$$\rho_{\varepsilon a} = \frac{I_a^2 \cdot R_a \cdot k'_\theta}{z \cdot l_{a \text{ ср}}} = \frac{5,66^2 \cdot 0,317 \cdot 1,28}{19 \cdot 0,1346} = 5,1 \frac{Вт}{м} \quad - \text{ относительные электрические}$$

потери в обмотке якоря при нагрузке;

$$\rho_c = \frac{P_c}{z \cdot l_\delta} = \frac{6,09}{19 \cdot 0,07} = 4,579 \frac{Вт}{м} \quad - \text{ относительные потери в стали}$$

сердечника якоря при нагрузке;

$$\rho_{m \varepsilon} = \frac{P_{m \varepsilon}}{z \cdot l_\delta} = \frac{0,242}{19 \cdot 0,07} = 0,182 \frac{Вт}{м} \quad - \text{ относительные вентиляционные}$$

потери при нагрузке,

$$\Delta \vartheta_a = \frac{\left(1 + 27,1876 \cdot 0,0064 \cdot \frac{5,442 \cdot 10^{-4}}{0,16 \cdot 0,019} \right) \cdot 5,1 + 4,579 + 0,182}{27,1876 \cdot 0,0064} = 58 \text{ } ^\circ C.$$

Для продолжительного режима работы двигателя должно выполняться условие:

$$\Delta \vartheta_a \leq \Delta \vartheta_{\text{дон}},$$

где $\Delta \vartheta_{дон} = 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - допустимое превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды для класса нагревостойкости изоляции B , это значение берем из таблицы 3.2 [8],

$$58 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq 75 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

2.9.16 Превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды при продолжительном режиме работы с нагрузкой с учетом температуры воздуха внутри двигателя по (1.123) $\Delta \vartheta, \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_a + \Delta \vartheta_{воз},$$

где $\Delta \vartheta_{воз} = \frac{\sum P'}{S_{охл} \cdot \alpha_n} = \frac{31,47}{0,052 \cdot 55} = 11 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя [7];

$$\sum P' = \sum P - 0,3 \cdot P_{э\epsilon} = 34,3 - 0,3 \cdot 9,42 = 31,47 \text{ Вт};$$

$$\sum P = P_1 - P_2 - (P_{mn} + P_{m\epsilon}) = 135,84 - 98,6 - (2,7 + 0,242) = 34,3 \text{ Вт};$$

$$S_{охл} = \pi \cdot D_{корн} \cdot (l_{\delta} + 2 \cdot b_{\kappa}) = \pi \cdot 0,12 \cdot (0,07 + 2 \cdot 0,0345) = 0,052 \text{ м}^2;$$

$$\alpha_n = 55 - \text{коэффициент подогрева воздуха [7],}$$

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_a + \Delta \vartheta_{воз} = 58 + 11 = 69 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Необходимо выполнение условия

$$\Delta \vartheta \leq \Delta \vartheta_{дон},$$

$$69 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq 75 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

2.9.17 Превышение температуры обмотки возбуждения над температурой окружающей среды по (1.127) $\Delta \vartheta_e, ^\circ\text{C}$:

$$\Delta \vartheta_e = \frac{P_{эв}}{2p \cdot S_e} \cdot \left(\frac{0,7}{\alpha_1} + \frac{\beta_e}{\lambda_1} \right) + \Delta \vartheta_{воз},$$

где

$$S_e = (2 \cdot b_{zn} + 2 \cdot l_{zn}) \cdot (h_{zn} - h_{nn}) + (2 \cdot b_{zn} + 2 \cdot l_{zn} + 2 \cdot b_k) \cdot b_k = (2 \cdot 0,0248 + 2 \cdot 0,07) \cdot (0,0295 - 0,0066) + (2 \cdot 0,0248 + 2 \cdot 0,07 + 2 \cdot 0,0345) \cdot 0,0345 = 0,0132 \text{ м}^2$$

- площадь охлаждения обмотки возбуждения;

$$\begin{aligned} \beta_e &= \frac{\omega_e \cdot d_{изв}^2 \cdot (1 - k_{нмв})}{2p \cdot (h_{zn} - h_{nn} + b_k)} + b_{куз} + b_{зз} = \\ &= \frac{224 \cdot 2,34^2 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,846)}{2 \cdot (0,0295 - 0,0066 + 0,0345)} + 1,5 \cdot 10^{-3} + 0,2 \cdot 10^{-3} = 0,00165 \text{ м} \end{aligned}$$

- толщина эквивалентной изоляции обмотки возбуждения;

$$k_{нмв} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{d_e^2}{d_{изв}^2} = \frac{\pi \cdot 2,24^2 \cdot 10^{-6}}{3,4 \cdot 2,34^2 \cdot 10^{-6}} = 0,846$$

- коэффициент заполнения

провода обмотки возбуждения медью,

$$\Delta \vartheta_e = \frac{9,42}{2 \cdot 0,0132} \cdot \left(\frac{0,7}{16,7} + \frac{0,00165}{0,16} \right) + 11 = 29,6 ^\circ\text{C}.$$

Необходимо выполнение условия $\Delta \vartheta_e \leq \Delta \vartheta_{дон}$: $29,6 \leq 75 ^\circ\text{C}$.

2.10 Уточнение расчетных значений физических величин

2.10.1 Коэффициенты увеличения сопротивления обмотки якоря и обмотки возбуждения при рабочей температуре по (1.128-1.129)

$$k_{\theta} = 1 + 0,004 \cdot \Delta \vartheta = 1 + 0,004 \cdot 69 = 1,28;$$

$$k_{\theta_{\epsilon}} = 1 + 0,004 \cdot \Delta \vartheta_{\epsilon} = 1 + 0,004 \cdot 29,6 = 1,12,$$

где $\Delta \vartheta = 69 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - превышение температуры якоря над температурой окружающей среды для продолжительного режима работы электродвигателя.

2.10.2 Эдс обмотки якоря по (1.130) $E, \text{ В}$:

$$E = U_{\text{ном}} - \Delta U_{\text{щ}} - I_a \cdot (R_{\epsilon} \cdot k_{\theta_{\epsilon}} + \sqrt{(R_a \cdot k_{\theta})^2 + X_a^2}),$$

$$E = 24 - 0,45 - 5,66 \cdot (0,268 \cdot 1,12 + \sqrt{(0,317 \cdot 1,28)^2 + 0,006^2}) = 19,54 \text{ В.}$$

2.10.3 Частота вращения вала электродвигателя по (1.131) $n, \text{ об / мин}$:

$$n = \frac{60 \cdot a \cdot E}{p \cdot N \cdot \Phi_{\delta}},$$

$$n = \frac{60 \cdot 1 \cdot 19,54}{1 \cdot 304 \cdot 16,08 \cdot 10^{-4}} = 2398 \text{ об / мин.}$$

2.10.4 Момент на валу по (1.132) $M_2, \text{ Н} \cdot \text{ м}$:

$$M_2 = 9,57 \cdot \frac{P_2}{n},$$

$$M_2 = 9,57 \cdot \frac{98,6}{2398} = 0,393 \text{ Н} \cdot \text{ м.}$$

2.11 Рабочие характеристики и номинальные данные электродвигателя

2.11.1 Расчет рабочих характеристик представлен в таблице 2.1. Расчет соответствующих физических величин осуществляем при изменении индукции в воздушном зазоре в диапазоне от $0,5 \cdot B_{\delta}$ до $1,1 \cdot B_{\delta}$.

Таблица 2.1 – Расчет рабочих характеристик

Физ. велич.	Ед. изм.	$0,5 \cdot B_{\delta}$	$0,6 \cdot B_{\delta}$	$0,7 \cdot B_{\delta}$	$0,8 \cdot B_{\delta}$	$0,9 \cdot B_{\delta}$	$1 \cdot B_{\delta}$	$1,1 \cdot B_{\delta}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
B_{δ}	Тл	0,195	0,234	0,273	0,312	0,351	0,39	0,429
$W_{суд}$	Дж/м ³	773,2	892,1	1056,6	1254,9	1501,8	1806,5	2183,9
$W_{нуд}$	Дж/м ³	613,8	657,2	715,6	773,2	847,6	934,3	1034,7
$W_{зуд}$	Дж/м ³	10,5	15,7	23,6	35,3	53	79,8	120
W_{jud}	Дж/м ³	10,7	16	24,2	36,4	54,9	82,8	126,4
$B_{\delta c p \sigma}$	Тл	0,2028	0,24336	0,28392	0,32448	0,36504	0,4056	0,44616
$W_{\delta уд}$	Дж/м ³	16372,5	23576,5	32090,2	41913,7	53047,1	65490,2	79243,1
$W_{\delta суд}$	Дж/м ³	99522,3	143312,1	195063,7	254777,1	322452,2	398089,2	481687,9
W_c	Дж	0,0619	0,0714	0,0847	0,1005	0,1203	0,1447	0,1749
W_n	Дж	0,0314	0,0336	0,0366	0,0395	0,0434	0,0478	0,053
W_z	Дж	0,000133	0,000198	0,000298	0,000446	0,000669	0,001	0,015
W_j	Дж	0,000166	0,000243	0,000377	0,000567	0,000855	0,0013	0,002
W_{δ}	Дж	0,0539	0,0776	0,1056	0,1379	0,1745	0,2155	0,2607
$W_{\delta c}$	Дж	0,0069	0,01	0,0135	0,0172	0,0224	0,0276	0,0334
Φ'_n	10^{-4} Вб	8,683	10,4196	12,1563	13,8928	15,6295	17,366	19,1027
I_n	А	3,18	3,31	3,54	3,81	4,14	4,5	4,91
I'	А	4,03	4,19	4,48	4,83	5,24	5,7	6,22
A'	А/м	3901,7	4056,6	4337,3	4676,2	5073,1	5518,5	6021,9
$H'_{\delta a}$	А/м	163244,4	169689,4	181317,3	195299,6	211584,5	229719,4	249993,5
B'_{δ}	Тл	-0,01	0,0209	0,0453	0,0667	0,0852	0,1015	0,115
B''_{δ}	Тл	0,4	0,4471	0,5007	0,5573	0,6168	0,6785	0,743

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$B'_{\delta\sigma}$	Тл	-0,0104	0,0217	0,0471	0,0694	0,0886	0,1056	0,1196
$B''_{\delta\sigma}$	Тл	0,416	0,465	0,5207	0,5796	0,6415	0,7056	0,7727
Φ_n	10^{-4} Вб	8,58	10,03	11,71	13,38	15,05	16,72	18,39
$W'_{\delta y \delta}$	Дж/м ³	-39,81	173,9	816,9	1771,1	2889,7	4101,2	5264,7
$W''_{\delta y \delta}$	Дж/м ³	68891,7	86076,8	107933,3	133732,5	163822,6	198197,2	23768,2
B'_z	Тл	-0,0282	0,0589	0,1277	0,188	0,2401	0,2861	0,3241
$W'_{z y \delta}$	Дж/м ³	-2,72	2,77	3,01	3,38	3,84	4,38	4,9
B''_z	Тл	1,1273	1,2601	1,4111	1,5707	1,7383	1,9122	2,094
$W''_{z y \delta}$	Дж/м ³	88,3	144,6	253,3	458,5	855,02	1632,5	3212,1
B'_j	Тл	-0,0284	0,0594	0,1288	0,1897	0,2423	0,2887	0,3271
$W'_{j y \delta}$	Дж/м ³	-2,72	2,8	3,02	3,4	3,9	4,4	4,94
B''_j	Тл	1,1376	1,2716	1,424	1,585	1,7542	1,9297	2,1131
$W''_{j y \delta}$	Дж/м ³	91,7	150,9	265,8	483,5	907,1	1742,68	3448,8
ΣW	Джс	0,2147	0,2582	0,3174	0,3868	0,4781	0,5768	0,7082
I	А	4,26	4,3	4,5	4,8	5,27	5,73	6,39
$j_{\text{ц}}$	10^4 А/м ²	13,42	13,56	14,29	15,24	16,73	18,19	20,29
$\Delta U_{\text{ц}}$	В	0,336	0,34	0,357	0,381	0,418	0,455	0,507
ΔU	В	3,344	3,354	3,534	3,77	4,139	4,5	5,018
E	В	20,656	20,646	20,466	20,23	19,861	19,5	18,982
A	А	4124,33	4134,01	4356,69	4647,13	5102,17	5547,52	6186,5
H_{δ}	А/м	155254,8	186305,7	217356,7	248407,6	279458,6	310509,6	341560,5
$H_{\delta a}$	А/м	171646,8	171353,8	179565,6	189798,2	205283,5	217723,7	232772,1
B'_{δ}	Тл	-0,0206	0,0188	0,0475	0,0736	0,0932	0,1165	0,1366
B''_{δ}	Тл	0,4106	0,4492	0,4985	0,5504	0,6088	0,6635	0,7214

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$B_{\delta cp}$	<i>Тл</i>	0,195	0,234	0,273	0,312	0,351	0,39	0,423
Φ_{δ}	10^{-4} <i>Вб</i>	8,04	9,65	11,26	12,86	14,47	16,08	17,68
n	<i>об/мин</i>	5071	4186	3546	3105	2709	2393	2119
j	10^4 <i>А/м²</i>	3,76	3,78	3,97	4,23	4,65	5,05	5,63
f_2	<i>Гц</i>	84,52	69,77	59,1	51,75	45,15	39,89	35,32
V_a	<i>м/с</i>	13,27	10,95	9,28	8,13	7,09	6,26	5,55
V_k	<i>м/с</i>	11,15	9,2	7,79	6,82	5,95	5,26	4,66
$P_{\partial a}$	<i>Вт</i>	7,36	7,4	8,22	9,35	11,27	13,32	16,57
$P_{\partial u}$	<i>Вт</i>	1,43	1,45	1,61	1,83	2,2	2,61	3,24
$P_{\partial \partial}$	<i>Вт</i>	5,45	5,47	6,09	6,92	8,34	9,86	12,26
B'_j	<i>Тл</i>	0,0585	0,0535	0,1351	0,2093	0,2651	0,3312	0,3885
B''_j	<i>Тл</i>	1,1677	1,2775	1,4177	1,5653	1,7314	1,887	2,052
P_j	<i>Вт</i>	3,78	3,39	3,28	3,29	3,32	3,29	3,26
B'_z	<i>Тл</i>	0,0581	0,053	0,1339	0,2074	0,2627	0,3283	0,385
B''_z	<i>Тл</i>	1,1572	1,266	1,4049	1,5512	1,7158	1,87	2,033
P_z	<i>Вт</i>	2,93	2,63	2,54	2,56	2,56	2,55	2,52
P_c	<i>Вт</i>	6,71	6,02	5,82	5,85	5,88	5,84	5,78
P_{mu}	<i>Вт</i>	3,51	2,9	2,45	2,15	1,84	1,67	1,47
P_{mn}	<i>Вт</i>	5,72	4,72	4,0	3,5	3,05	2,7	2,39
$P_{m\partial}$	<i>Вт</i>	2,28	1,28	0,78	0,52	0,35	0,24	0,17
P_{mx}	<i>Вт</i>	11,51	8,9	7,23	6,17	5,24	4,61	4,03
P_{∂}	<i>Вт</i>	1,02	1,03	1,08	1,15	1,26	1,38	1,53
$\sum P$	<i>Вт</i>	33,48	30,26	30,05	31,27	34,19	37,62	43,41
P_1	<i>Вт</i>	102,24	102,48	108	115,2	126,48	137,52	153,36

Продолжение таблицы 2.1

P_2	<i>Вт</i>	68,76	72,22	77,95	83,93	92,29	99,9	109,95
M_2	<i>Н·м</i>	0,1298	0,1651	0,2104	0,2587	0,326	0,3995	0,4966
η	<i>%</i>	67,25	70,47	72,18	72,86	72,97	72,64	71,69

Из расчетных данных таблицы 2.1 выделяем физические величины, определяющие рабочие характеристики двигателя, и сводим их в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Рабочие характеристики электродвигателя

Физ. велич.	Ед. изм.	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
P_2	<i>Вт</i>	68,8	72,2	78	83,9	92,3	100	110
I	<i>А</i>	4,26	4,3	4,5	4,8	5,27	5,73	6,39
M_2	<i>Н·м</i>	0,13	0,17	0,21	0,26	0,33	0,4	0,5
n	<i>об/мин</i>	5071	4186	3546	3105	2709	2393	2119
η	<i>%</i>	67,3	70,5	72,2	72,9	73	72,6	71,7

По данным таблицы 2.2 для заданного номинального значения полезной мощности электродвигателя ($P_{2ном} = 100 \text{ Вт}$) определяем номинальные значения следующих физических величин:

$$I_{ном} = 5,73 \text{ А}, \quad n_{ном} = 2393 \text{ об / мин}, \quad M_{2ном} = 0,4 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad \eta_{ном} = 72,6 \text{ \%}.$$

2.11.2 Кратность пускового момента по (1.127) m_n :

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

где $k_p = 1,2$ при $2p = 2$,

$$m_n = \frac{57 \cdot \left(1 - \frac{0,455}{24}\right) \cdot 24 \cdot 5,73 \cdot 10^6}{\pi \cdot 0,05^2 \cdot (1,4 + 1,2) \cdot 5547,5 \cdot 5,05 \cdot 10^6} = 13,45.$$

2.11.3 Электромеханическая постоянная времени электродвигателя по (1.128) T_m , с:

$$T_m = \frac{J \cdot n_{ном}^2 \cdot 10^{-2}}{9,2 \cdot m_n \cdot P_{ном}},$$

где $J = m_a \cdot D \cdot l_\delta = 1,127 \cdot 0,05 \cdot 0,07 = 0,0039445 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент инерции якоря,

$$T_m = \frac{0,0039445 \cdot 2393^2 \cdot 10^{-2}}{9,2 \cdot 13,45 \cdot 100} = 0,02 \text{ с}.$$

Быстродействие электродвигателя определяется величиной обратно пропорциональной электромеханической постоянной времени.

2.12 Тепловой расчет электродвигателя

Тепловой расчет электродвигателя предназначен для того, чтобы определить среднюю температуру перегрева отдельных частей машины: якоря и обмотки возбуждения. Расчет проводим с использованием номинальных значений физических величин, полученных для номинального режима в таблице 2.1.

2.12.1 Превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды при продолжительном режиме работы электродвигателя с номинальной нагрузкой по (1.132) $\Delta \vartheta_a$, $^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta \vartheta_a = \frac{\left(1 + \alpha_a \cdot b'_z \cdot \frac{\beta_n}{\lambda_1 \cdot \Pi_n}\right) \cdot \rho_{\text{э а ном}} + \rho_{\text{с ном}} + \rho_{\text{т в ном}}}{\alpha_a \cdot b'_z},$$

где $\rho_{\text{э а ном}} = \frac{I_{\text{ном}}^2 \cdot R_a \cdot k_\theta}{z \cdot l_{a \text{ ср}}} = \frac{5,73^2 \cdot 0,317 \cdot 1,28}{19 \cdot 0,1346} = 5,21 \text{ Вт} / \text{м}$ – относительные

потери в обмотке якоря при номинальной нагрузке;

$$\rho_{\text{с ном}} = \frac{P_{\text{с ном}}}{z \cdot l_\delta} = \frac{5,84}{19 \cdot 0,07} = 4,39 \text{ Вт} / \text{м}$$
 – относительные потери в стали

сердечника якоря при номинальной нагрузке;

$$\rho_{\text{т в ном}} = \frac{P_{\text{т в ном}}}{z \cdot l_\delta} = \frac{0,242}{19 \cdot 0,07} = 0,182 \text{ Вт} / \text{м}$$
 – относительные вентиляци-

онные потери при номинальной нагрузке,

$$\Delta \vartheta_a = \frac{\left(1 + 27,1876 \cdot 0,0064 \cdot \frac{5,442 \cdot 10^{-4}}{0,016 \cdot 0,019}\right) \cdot 5,21 + 4,39 + 0,182}{27,1876 \cdot 0,0064} = 58,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2.12.2 Превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды при работе электродвигателя с номинальной нагрузкой с учетом температуры воздуха внутри двигателя при продолжительном режиме работы по (1.135) $\Delta \vartheta$, $^\circ\text{C}$:

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_a + \Delta \vartheta_{\text{воз}},$$

где $\Delta \vartheta_{\text{воз}} = \frac{\sum P'}{S_{\text{охл}} \cdot \alpha_n} = \frac{31,6}{0,052 \cdot 50} = 11,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ – среднее превышение темпера-

туры воздуха внутри двигателя [7];

$$\sum P' = \sum P - 0,3 \cdot P_{\text{э в}} = 34,58 - 0,3 \cdot 9,86 = 31,6 \text{ Вт};$$

$$\sum P = P_1 - P_2 - (P_{\text{мн}} + P_{\text{мс}}) = 137,52 - 100 - 2,7 - 0,242 = 34,58 \text{ Вт},$$

$$\Delta \vartheta = 57,2 + 11,1 = 68,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для продолжительного режима работы двигателя должно выполняться условие:

$$68,3 \text{ } ^\circ\text{C} \leq 75 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $75 \text{ } ^\circ\text{C}$ - допустимое превышение температуры обмотки якоря для класса нагревостойкости изоляции B , это значение берут из таблицы 3.2 [9].

2.12.3 Превышение температуры обмотки возбуждения над температурой окружающей среды по (1.139) $\Delta \vartheta_{\epsilon}$, $^\circ\text{C}$:

$$\Delta \vartheta_{\epsilon} = \frac{P_{\epsilon}}{2p \cdot S_{\epsilon}} \cdot \left(\frac{0,7}{\alpha_1} + \frac{\beta_{\epsilon}}{\lambda_1} \right) + \Delta \vartheta_{\text{воз}},$$

где $P_{\epsilon} = 9,86 \text{ Вт}$ - электрические потери в обмотке возбуждения при номинальном режиме,

$$\Delta \vartheta_{\epsilon} = \frac{9,86}{2 \cdot 0,0132} \cdot \left(\frac{0,7}{16,7} + \frac{0,00165}{0,16} \right) + 11,1 = 30,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Необходимо выполнение условия $30,6 \text{ } ^\circ\text{C} \leq 75 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Таким образом, превышение температуры обмотки якоря и обмотки возбуждения лежат в пределах допустимого значения температуры для класса изоляции B .

2.13 Паспортные данные спроектированного двигателя постоянного тока

Исполнение по степени защиты	– <i>IP 44</i>
Исполнение по способу охлаждения	– <i>IC 0040</i>
Режим работы	– <i>S1</i>
Способ возбуждения	– последовательное
Класс изоляции	– <i>B</i>
Диаметр корпуса	- <i>0,12 м</i>

Таблица 2.3 – паспортные данные ДПТ

Номинальные данные	Условное обозначение	Един. измер.	Численное значение
Номинальная мощность	$P_{ном}$	<i>Вт</i>	100
Номинальная частота вращения	$n_{ном}$	об/мин	2393
Номинальное напряжение	$U_{ном}$	<i>В</i>	24
Номинальный ток	$I_{ном}$	<i>А</i>	5,73
Момент на валу	$M_{2ном}$	<i>Н·м</i>	0,4
КПД	$\eta_{ном}$	%	72,6
Электромеханическая постоянная времени	T_m	<i>с</i>	0,02
Кратность пускового момента	m_n	-	13,45

Продолжение таблицы 2.3

Размеры якоря			
Диаметр якоря	D	<i>м</i>	0,05
Расчетная длина якоря	l_{δ}	<i>м</i>	0,07
Диаметр вала	D_0	<i>м</i>	0,011
Отношение длины якоря к его диаметру	λ	—	1,4
Число пазов	z	—	19
Бóльший диаметр паза	b_{n1}	<i>мм</i>	4,3
Меньший диаметр паза	b_{n2}	<i>мм</i>	2,8
Высота паза	h_n	<i>мм</i>	8,6
Высота шлица	$h_{ш}$	<i>мм</i>	0,5
Ширина шлица	$b_{ш}$	<i>мм</i>	1,9
Ширина зубца	b_z	<i>мм</i>	3,1
Толщина листа якоря	—	<i>мм</i>	0,5
Марка стали	2013	—	
Размеры станины			
Внешний диаметр станины	D_c	<i>м</i>	0,104
Внутренний диаметр станины	d_c	<i>м</i>	0,098
Длина станины	l_c	<i>м</i>	0,08
Высота станины	h_c	<i>м</i>	0,0068
Марка стали	Ст3	—	
Размеры полюса и зазора			
Длина полюса	l_{zn}	<i>м</i>	0,07
Высота полюса	h_{zn}	<i>м</i>	0,0295
Ширина полюса	b_{zn}	<i>м</i>	0,0248
Ширина полюсного наконечника	b_{δ}	<i>м</i>	0,0589
Коэффициент полюсного перекрытия	α_{δ}	—	0,75
Число полюсов	$2p$	—	2
Длина воздушного зазора	δ	<i>мм</i>	0,7
Марка провода обмотки возбуждения	ПЭТВ		

Продолжение таблицы 2.3

Размеры коллектора и щетки			
Диаметр коллектора	D_k	<i>м</i>	0,042
Число коллекторных пластин	k	—	38
Длина коллектора	l_k	<i>м</i>	0,016
Ширина коллекторной пластины	β_k	<i>мм</i>	3
Ширина изоляционной пластины	β_u	<i>мм</i>	0,5
Длина щетки	$a_{щ}$	<i>мм</i>	6,3
Ширина щетки	$b_{щ}$	<i>мм</i>	5
Марка щетки	<i>МГ2</i>		
Обмотка якоря и обмотка возбуждения			
Тип обмотки якоря	<i>петлевая</i>	—	
Число параллельных ветвей	$2a$	—	2
Число проводников обмотки якоря	N	—	304
Число витков в секции обмотки якоря	ω_c	—	4
Диаметр неизолированного провода	d	<i>мм</i>	0,85
Диаметр изолированного провода	$d_{из}$	<i>мм</i>	0,915
Сечение провода обмотки якоря	g	<i>мм²</i>	0,567
Средняя длина витка обмотки якоря	$2l_{a\text{ ср}}$	<i>м</i>	0,135
Сопротивление обмотки якоря при 20 °С	R_a	<i>Ом</i>	0,317
Марка провода обмотки якоря	<i>ПЭТВ</i>		
Число витков обмотки возбуждения	ω_e	-	332
Диаметр неизолированного провода обмотки возбуждения	d_e	<i>мм</i>	2,24
Диаметр изолированного провода обмотки возбуждения	$d_{из\ e}$	<i>мм</i>	2,34
Сечение провода обмотки возбуждения	g_e	<i>мм²</i>	3,34
Сопротивление обмотки возбуждения	R_e	<i>Ом</i>	0,258
Марка провода обмотки возбуждения	<i>ПЭТВ</i>		

Продолжение таблицы 2.3

Электромагнитные нагрузки			
Индукция в воздушном зазоре	B_{δ}	Тл	0,39
Магнитный поток под полюсом	Φ_{δ}	Вб	$16,1 \cdot 10^{-4}$
Индукция в ярме якоря	B_j	Тл	1,11
Индукция в зубце якоря	B_z	Тл	1,1
Индукция в станине	B_c	Тл	1,6
Токовая линейная нагрузка	A	А/м	5547
Плотность тока в обмотке якоря	j	А/м ²	$5 \cdot 10^{-6}$
Плотность тока в щетке	$j_{щ}$	А/м ²	$18,2 \cdot 10^4$
Превышение температуры обмотки якоря	$\Delta \vartheta_a$	°С	68,3
Масса якоря, коллектора и станины			
Масса обмотки якоря	m_o	кг	0,206
Масса коллектора	m_k	кг	0,138
Масса якоря	m_a	кг	1,127
Масса станины	m_c	кг	0,4
Масса статора	m_{cm}	кг	3,3
Габаритные и установочные размеры двигателя			
Осевой габаритный размер	B	мм	145
Радиальный габаритный размер	G	мм	128
Длина посадочной поверхности двигателя	C	мм	70
Диаметр выходного конца вала	d_o	мм	7
Длина выходного конца вала	l_o	мм	16

Перечень условных буквенных обозначений физических величин

- I_a - ток якоря, A ;
- I - ток двигателя, A ;
- I_v - ток возбуждения, A ;
- $P_{ном}$ - номинальная мощность электродвигателя, $Вт$;
- η - коэффициент полезного действия двигателя;
- $U_{ном}$ - номинальное напряжение электродвигателя, B ;
- $P_{эм}$ - электромагнитная мощность, $Вт$;
- D - диаметр якоря, $м$;
- α_δ - коэффициент полюсного перекрытия;
- B_δ - индукция в воздушном зазоре, $Тл$;
- A' - предварительное значение токовой линейной нагрузки, $A/м$;
- $n_{ном}$ - номинальная частота вращения вала, $об/мин$;
- λ - коэффициент, отношение длины магнитопровода якоря к его диаметру;
- l_δ - расчетная длина якоря, $м$;
- V_a - окружная скорость вращения якоря, $м/с$;
- τ - полюсное деление, $м$;
- $2p$ - число полюсов;
- b_δ - расчетная ширина полюсного наконечника, $м$;
- f_2 - частота перемагничивания стали, $Гц$;
- p - число пар полюсов;
- N' - предварительное число проводников обмотки якоря;
- $2a$ - число параллельных ветвей обмотки якоря;
- z - число пазов якоря;
- k - число коллекторных пластин;

- ω'_c - предварительное число витков в секции обмотки якоря;
- ω_c - число витков в секции обмотки якоря;
- N - число проводников обмотки якоря;
- N_n - число проводников в пазу якоря;
- A - токовая линейная нагрузка A/m ;
- y_1 - первый частичный шаг обмотки якоря;
- y - результирующий шаг;
- y_k - шаг обмотки по коллектору;
- y_2 - второй частичный шаг обмотки якоря;
- y_n - шаг обмотки по пазам;
- ε - укорочение шага обмотки по пазам;
- j - плотность тока в обмотке якоря, A/m ;
- g - сечение провода обмотки якоря, m^2 ;
- d - диаметр неизолированного провода обмотки якоря, m ;
- $d_{из}$ - диаметр изолированного провода обмотки якоря, m ;
- b_{n_1} - бóльший диаметр паза якоря, m ;
- k_c - коэффициент заполнения пакета якоря сталью;
- B_z - индукция в зубце якоря, $Tл$;
- α' - центральный угол на один паз якоря, $рад$;
- $h_{ш}$ - высота шлица паза якоря, m ;
- b_{n_2} - меньший диаметр паза якоря, m ;
- Π_n - периметр паза якоря, m ;
- h_n - высота паза якоря, m ;
- S_n - площадь паза якоря в свету, m^2 ;
- $k_{ск}$ - коэффициент скоса пазов якоря;

- t_z - зубцовое деление якоря, м;
 $S_{из}$ - площадь сечения пазовой изоляции, м²;
 $b_{из}$ - толщина пазовой изоляции, м;
 $b_{кл}$ - ширина клина, м;
 $h_{кл}$ - высота клина, м;
 $S_{кл}$ - площадь сечения клина, м²;
 $S_{но}$ - площадь сечения паза якоря, заполненного обмоткой, м²;
 k_z - коэффициент заполнения паза проводниками;
 b_z - ширина зубца якоря, м;
 $l_{аср}$ - средняя длина полувитка секции обмотки якоря, м;
 $l_{нл}$ - прямолинейный отрезок лобовой части обмотки якоря, м;
 R_a - сопротивление обмотки якоря при температуре 20 °С, Ом;
 k_θ - коэффициент увеличения сопротивления обмотки якоря при увеличении температуры;
 ϑ - расчетная температура обмотки якоря, °С;
 $D'_к$ - предварительный диаметр коллектора, м;
 t_k^* - относительное коллекторное деление;
 γ - число перекрываемых щеткой коллекторных пластин;
 t_k - коллекторное деление, м;
 β_k - ширина коллекторной пластины, м;
 β_u - ширина изоляционной пластины коллектора, м;
 V_k - окружная скорость коллектора, м/с;
 $S_{щ}$ - площадь сечения щетки, м².
 $j_{щ}$ - плотность тока для щетки, А/м²;

- $b'_{щ}$ - предварительная ширина щетки, $м$;
- $a'_{щ}$ - предварительная длина щетки, $м$;
- $a_{щ}$ - ширина щетки, $м$;
- $b_{щ}$ - длина щетки, $м$;
- $h_{щ}$ - высота щетки, $м$;
- $l'_к$ - активная длина коллектора, $м$;
- $l_к$ - полная длина коллектора, $м$;
- E - ЭДС обмотки якоря, $В$;
- $\Delta U_{щ}$ - падение напряжения на щетках, $В$;
- Φ_{δ} - магнитный поток в воздушном зазоре под одним полюсом, $Вб$;
- $b_{зк}$ - ширина коммутационной зоны, $м$;
- λ_n - магнитная проводимость пазового рассеяния, $Вб/А \cdot м$;
- l_l - длина лобовых частей обмотки якоря, $м$;
- $b_{ш}$ - ширина шлица паза якоря, $м$;
- e_p - реактивная ЭДС в короткозамкнутой секции, $В$;
- e_a - ЭДС поля в короткозамкнутой секции, $В$;
- e - результирующая ЭДС в секции обмотки якоря, $В$;
- δ_{δ} - допустимая минимальная величина воздушного зазора под полюсом, $м$;
- δ - длина воздушного зазора под полюсом, $м$;
- h_j - высота ярма якоря, $м$;
- D_0 - диаметр вала якоря, $м$;
- B_j - индукция в ярме якоря, $Тл$;
- S_c - площадь сечения станины, $м^2$;

- σ - коэффициент рассеяния;
 B_c - индукция в станине, Тл ;
 l_c - длина станины, м;
 h_c - высота станины, м;
 $D_{корп}$ - внешний диаметр корпуса электродвигателя, м;
 $h_{корп}$ - односторонняя толщина корпуса, м;
 H - напряженность магнитного поля, А/м;
 A_c - коэффициент;
 D_c - коэффициент;
 C_c - коэффициент;
 β_c - коэффициент;
 $W_{c\ y\delta}$ - удельная магнитная энергия ярма статора, Дж/м³;
 $W_{z\ y\delta}$ - удельная магнитная энергия зубцов якоря, Дж/м³;
 $W_{j\ y\delta}$ - удельная магнитная энергия ярма якоря, Дж/м³;
 $W_{\delta\ y\delta}$ - удельная магнитная энергия воздушного зазора, Дж/м³;
 $W_{\delta c\ y\delta}$ - удельная магнитная энергия для зазора стыка, Дж/м³;
 μ_0 - магнитная постоянная, Гн/м;
 $B_{ст}$ - магнитная индукция в зазоре стыка, Тл;
 V_c - объем ярма статора, м³;
 V_z - объем зубцовой зоны якоря, м³;
 V_j - объем ярма якоря, м³;
 V_{δ} - объем воздушного зазора, м³;
 k_{δ} - коэффициент Картера;
 $V_{\delta c}$ - объем воздушного зазора стыка, м³;

- V_n - объем полюса, m^3 ;
 W_c - магнитная энергия статора, Дж;
 W_z - магнитная энергия зубцов якоря, Дж;
 W_j - магнитная энергия ярма якоря, Дж;
 W_δ - магнитная энергия воздушного зазора, Дж;
 $W_{\delta c}$ - магнитная энергия зазора стыка, Дж;
 W_n - магнитная энергия полюса, Дж;
 W - магнитная энергия магнитной цепи, Дж;
 H_{ag} - напряженность поперечной составляющей поля якоря, А/м;
 $W_{\delta z j}$ - магнитная энергия переходного слоя магнитной цепи, Дж;
 ΔW - изменение магнитной энергии переходного слоя, Дж;
 h_{zn} - высота сердечника полюса, м;
 l_{zn} - длина сердечника полюса, м;
 b_{zn} - ширина сердечника полюса, м;
 B_n - индукция в сердечнике полюса, Тл;
 g_v - сечение провода обмотки возбуждения, m^2 ;
 ω_v - число витков обмотки возбуждения;
 b_k - толщина катушки возбуждения, м;
 $l_{вср}$ - средняя длина витка обмотки возбуждения, м;
 R_v - сопротивление обмотки возбуждения при температуре 20 °С, °С;
 $P_{эa}$ - электрические потери в обмотке якоря, Вт;
 $P_{эщ}$ - электрические потери в щетках, Вт;
 m_j - масса стали ярма якоря, кг;
 m_z - масса стали зубцов якоря, кг;

- P_j - магнитные потери в ярме якоря, $Вт$;
- ρ_j - удельные потери стали ярма якоря, $Вт/кг$;
- β - коэффициент;
- P_z - магнитные потери в зубцах якоря, $Вт$;
- ρ_z - удельные потери стали зубцов якоря, $Вт/кг$;
- P_c - потери в стали якоря, $Вт$;
- $P_{m_{щ}}$ - потери на трение щеток, $Вт$;
- μ_m - коэффициент трения;
- $\rho_{щ}$ - удельное нажатие щетки, $Н/м^2$;
- P_{m_n} - потери в подшипниках, $Вт$;
- k_m - коэффициент;
- m_a - масса якоря, $кг$;
- m_0 - масса обмотки якоря, $кг$;
- m_k - масса коллектора, $кг$;
- P_{m_v} - вентиляционные потери, $Вт$;
- P_δ - добавочные потери, $Вт$;
- $\sum P$ - сумма потерь, $Вт$;
- P_1 - потребляемая мощность, $Вт$;
- P_2 - полезная мощность, $Вт$;
- M - момент на валу двигателя, $Н\cdot м$;
- $I_{ном}$ - номинальный ток двигателя, $А$;
- $M_{ном}$ - номинальный момент на валу двигателя, $Н\cdot м$;
- $\eta_{ном}$ - номинальный КПД двигателя, %;
- m_n - кратность пускового момента;

- k_p - коэффициент;
- T_m - электромеханическая постоянная времени, с;
- J - момент инерции якоря, кг·м²;
- $\Delta \vartheta_a$ - превышение температуры якоря над температурой окружающей среды при продолжительном режиме работы, °С ;
- α_a - коэффициент теплоотдачи с поверхности вращающегося якоря, Вт/м²·°С;
- α_1 - коэффициент теплоотдачи с поверхности неподвижного якоря, Вт/м²·°С;
- b'_z - максимальная ширина зубца якоря, м;
- λ_1 - коэффициент теплопроводности межвитковой и пазовой изоляции, Вт/м·°С;
- β_n - общая толщина эквивалентной изоляции в пазе, м;
- $k_{n.m}$ - коэффициент заполнения изолированного провода медью;
- $\rho_{\varepsilon a}$ - относительные потери в обмотке якоря, Вт/м;
- ρ_c - относительные потери в стали якоря, Вт/м;
- $\rho_{m\varepsilon}$ - относительные вентиляционные потери, Вт/м;
- $\Delta \vartheta_{a_{кр}}$ - превышение температуры якоря над температурой окружающей среды при кратковременном режиме работы, °С;
- t_p - длительность рабочего периода, с;
- T_p - постоянная времени нагревания якоря, с;
- a_1 - коэффициент;
- m - число циклов;
- t_n - длительность паузы, с;
- T_n - 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 **Ерунов, В.П.** Расчет коллекторных машин постоянного тока малой мощности с независимым возбуждением: учеб. пособие / В.П. Ерунов. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2019. – 501с. – ISBN 978-5-7410-2386-0.

4 **Морозов, А.Г.** Расчет электрических машин постоянного тока: учеб. пособие для втузов /А.Г.Морозов. - Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1977. - 264 с. с илл.

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 **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).

7 **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).

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 **Ерунов, В.П.** К вопросу расчета двигателя постоянного тока малой мощности с последовательным возбуждением. Труды Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы» : - Оренбург: ФГОУВО ОГУ, 2019. – 11 с. ISBN 978-5-4417-0090-0.

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.

11 **Жерве, Г.К.** Обмотки электрических машин / Г.К. Жерве – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 400 с. – ISBN 5 – 283 – 04458 – 0.

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 0,026
		0,002	0,002 0,003			0,028	0,028 0,030
	0,004	0,004	0,004 0,005		0,032	0,032	0,032 0,034
		0,006	0,006 0,007			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 R5a	Ряд R10a	Ряд R20a	Ряд R40a	Ряд R5a	Ряд R10a	Ряд R20a	Ряд R40a		
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 5,2			32	32 34		
	5,6	5,6	5,6 5,0		36	36	36 38		
		6,3	6,3 6,5			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 эмалевой 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 изоляцией	0,06–2,50 0,06–0,45	0,025–0,085 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 высокую механическую прочность и нагревостойкость	0,05–2,50	0,025–0,06

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 магнитодиэлектрики [4].

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 направления, 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. По точности прокатки, неплоскостности, коэффициенту заполнения пакета сталью у изотропной стали 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 Ж.

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 магнито-диэлектрики – 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, Тл</i>	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H, А/м</i>									
0,4	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
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)

<i>B, Тл</i>	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)

<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	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

$$B = 1,9140 + 1,256H \cdot 10^{-6}.$$

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

<i>B, Тл</i>	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H, А/м</i>									
0,6	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)

$B, \text{Тл}$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H, \text{А/м}$									
0,4	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)

$B, \text{Тл}$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H, \text{А/м}$									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	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, Тл</i>	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H, А/м</i>									
0,4	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)

$B, \text{Тл}$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H, \text{А/м}$									
0,4	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	0,0
	<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
<i>H, А/м</i>									
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

<i>B, Тл</i>	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	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

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

<i>B, Тл</i>	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H, А/м</i>									
0,4	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
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

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	Допустимая 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	Допустимая плотность тока, А/см ²	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
М1	Металло-графитные	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 Плотность тока щетки должна выбираться в зависимости от частоты вращения коллектора и условий коммутации каждого конкретного типа электрической машины.

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

Таблица Д.2 – Шкала размеров электрических щеток (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 20	— — 16 20	— — — 20	— — — 20	— — — 20	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —
5	— — — — —	12,5 16 — — —	— 16 20 25 —	— 16 20 25 —	— — 20 25 32	— — 20 25 32	— — 20 25 32	— — 25 32 40	— — — — —	— — — — —	— — — — —	— — — — —
6,3	— — — —	— — — —	20 25 — —	20 25 32 —	20 25 32 —	— 25 32 —	— 25 32 —	— 25 32 40	— — 32 40	— — 32 40	— — — —	— — — —
8	— — — — —	— — — — —	— — — — —	20 25 32 — —	— 25 32 — —	— 25 32 — —	— 25 32 — —	— 25 32 40 50	— — 32 40 50	— — 32 40 50	— — — — —	— — — — —
10	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	25 32 — —	25 32 — —	25 32 40 —	— 32 40 50	— 32 40 50	— 32 40 50	— — 40 50	— — — —
12,5	— — — — —	— — — — —	— — — — —	— — — — —	— — — — —	25 32 — — —	— 32 40 — —	— 32 40 50 —	— 32 40 50 —	— 32 40 50 64	— — 40 50 64	— — — 50 64
16	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	32 40 50 —	32 40 50 —	32 40 50 64	— 40 50 64	— — 50 64
20	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	32 40 50 —	32 40 50 —	— 40 50 64	— — 50 64

Продолжение таблицы Д.2

Тангенци- альный размер $b_{ш}$	Осевой размер $a_{ш}$										
	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
A_c	0,05	0,1	0,05	0,1	0,1	10,718
D_c	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	- 6,931
C_c	7,5	0,5	10	0,8	0,3	610,718
β_c	4,5	6	3,7	5,5	6	1,205

Приложение Ж
(справочное)
Удельные потери в листовой электротехнической стали
при $B = 1$ Тл и $f = 50$ Гц

Таблица Ж.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
$p_{1,0/50}$, Вт/кг	5,8	3,3	5,4	3,1	2,5	2	1,6	1,8	1,4	1,55	1,35

Таблица Ж.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
$p_{1,0/50}$, Вт/кг	1,55	1,35	1,4	1,2	1,25	1,05	0,8	0,6	3,8	3,5

Таблица Ж.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	0,65	0,5	0,5	0,35
$p_{1,0/50}$, Вт/кг	3,6	2,9	3,1	2,5	2,6	2,2	2	2,4	1,75	1,3	1,15

Приложение И

(справочное)

Общий вид двигателя постоянного тока

На рисунках И1 и И2 приведены продольный и поперечный разрезы основного вида двигателя постоянного тока с электромагнитным возбуждением. Якорь выполнен со скосом пазов.

Двигатель постоянного тока имеет закрытое исполнение (IP44). Статор электродвигателя состоит из алюминиевого корпуса, цилиндрического магнитомягкого ярма, по внутренней поверхности которого расположены полюсы.

Якорь двигателя постоянного тока состоит из сердечника, обмотки, коллектора и вала. 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 бандаж из стеклоленты или шнура.

К корпусу винтами (шпильками, болтами) прикреплены выполненные из алюминиевого сплава (Ал2, А9) подшипниковые щиты (крышки). Эти щиты заливают на стальные втулки, в которых размещают шарикоподшипники. Щеткодержатель 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.

На общем виде двигателя постоянного тока (рисунок И1, рисунок И2) указывают габаритные размеры (B , G) и установочно-присоединительные размеры (D , C , E , F).

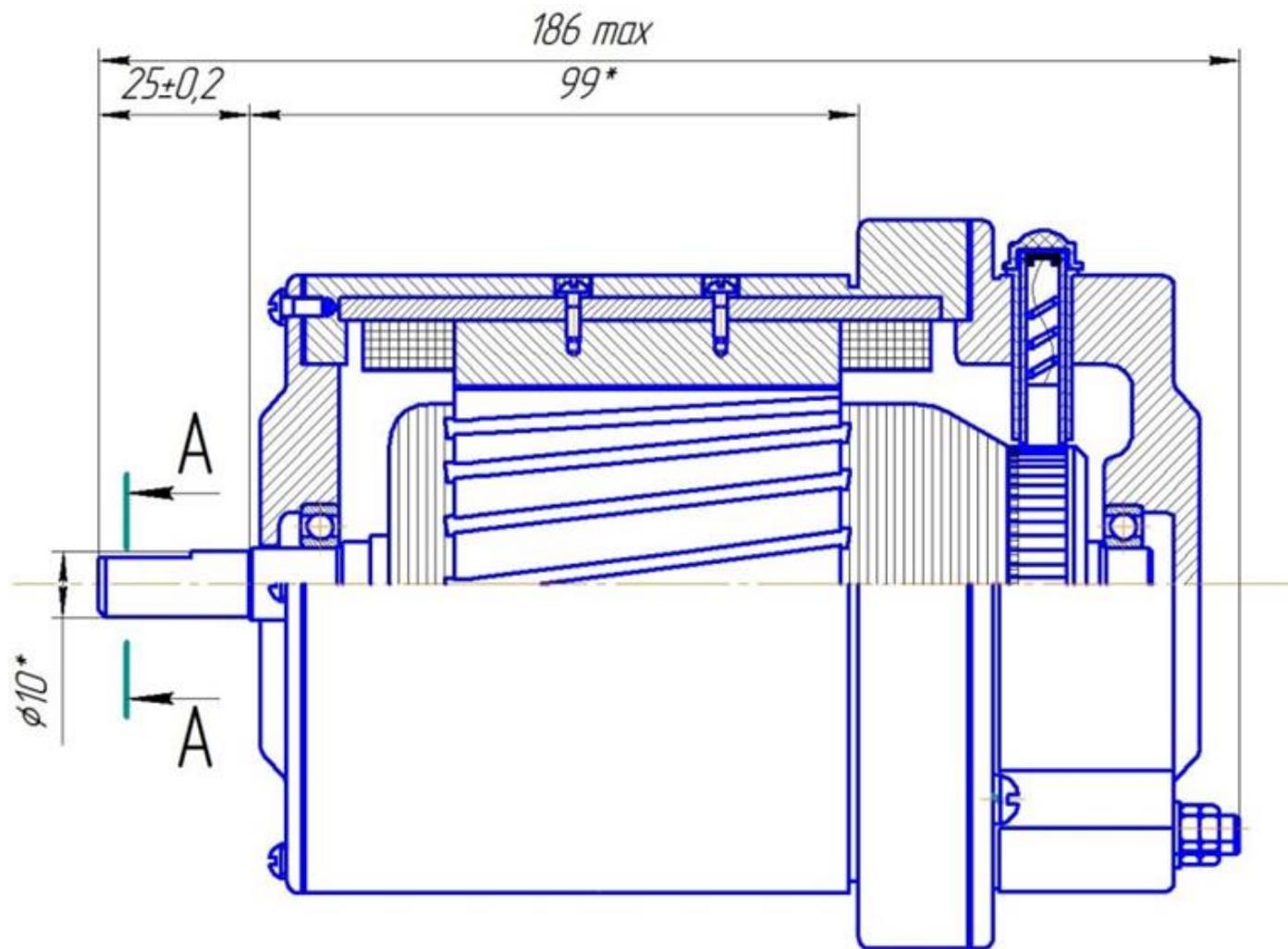


Рисунок И1- Общий вид двигателя постоянного тока (продольный разрез)

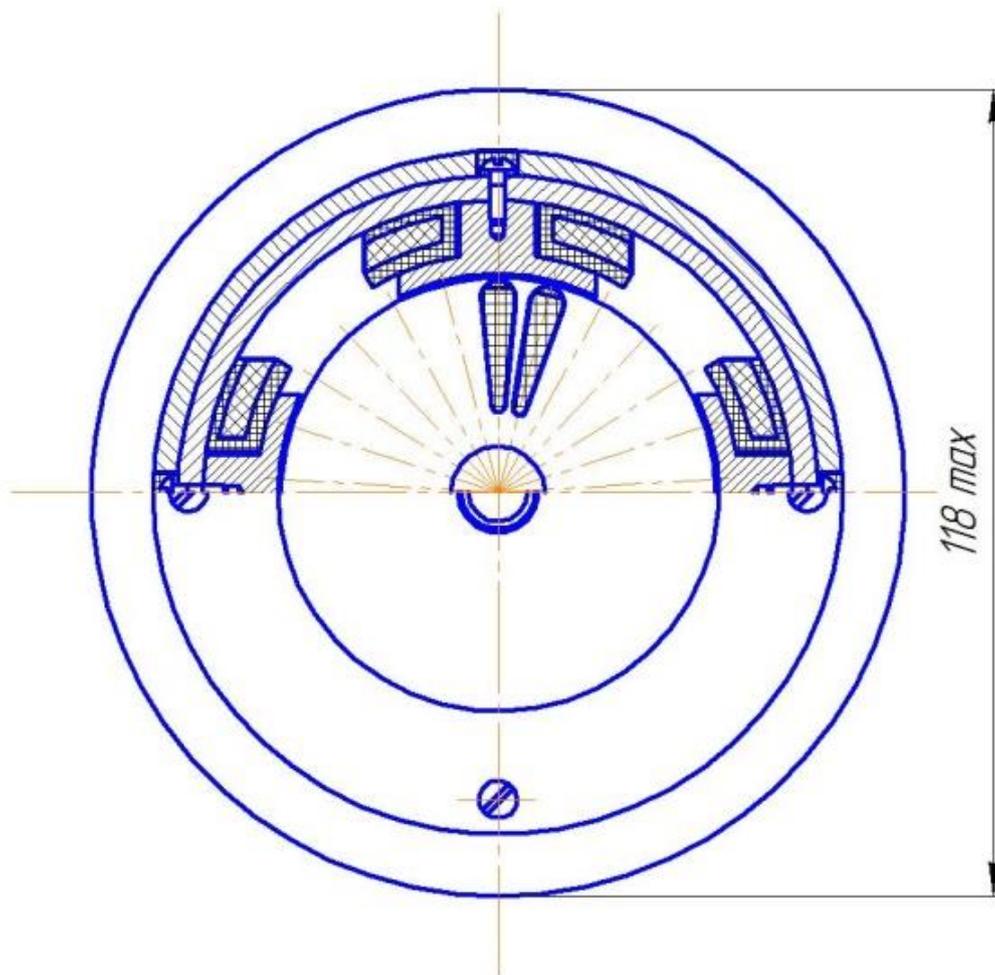


Рисунок И2 – Общий вид двигателя постоянного тока (поперечный разрез)

Приложение К (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 К1, торец 2 и участок вала 1).

В якорях небольшого диаметра эффективным способом изолирования являются нанесение и последующая запечка изоляционных порошков (рисунок К1, 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 $0,2 \div 0,5$ 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 $0,15 \div 0,25$ 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 К.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 работы. В других случаях изоляцию выполняют двумя деталями. Одну деталь, изолирующую торцы 2 (см. рисунок К.1, в), штампуют из электрокартона тем же штампом, который штампует прямой зубец, надевают на вал и клеем крепят к торцу, а дру-

гую деталь (в виде трубки из электрокартона), изолирующую вал, надевают на него, плотно прижимая к торцу. 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 [4].

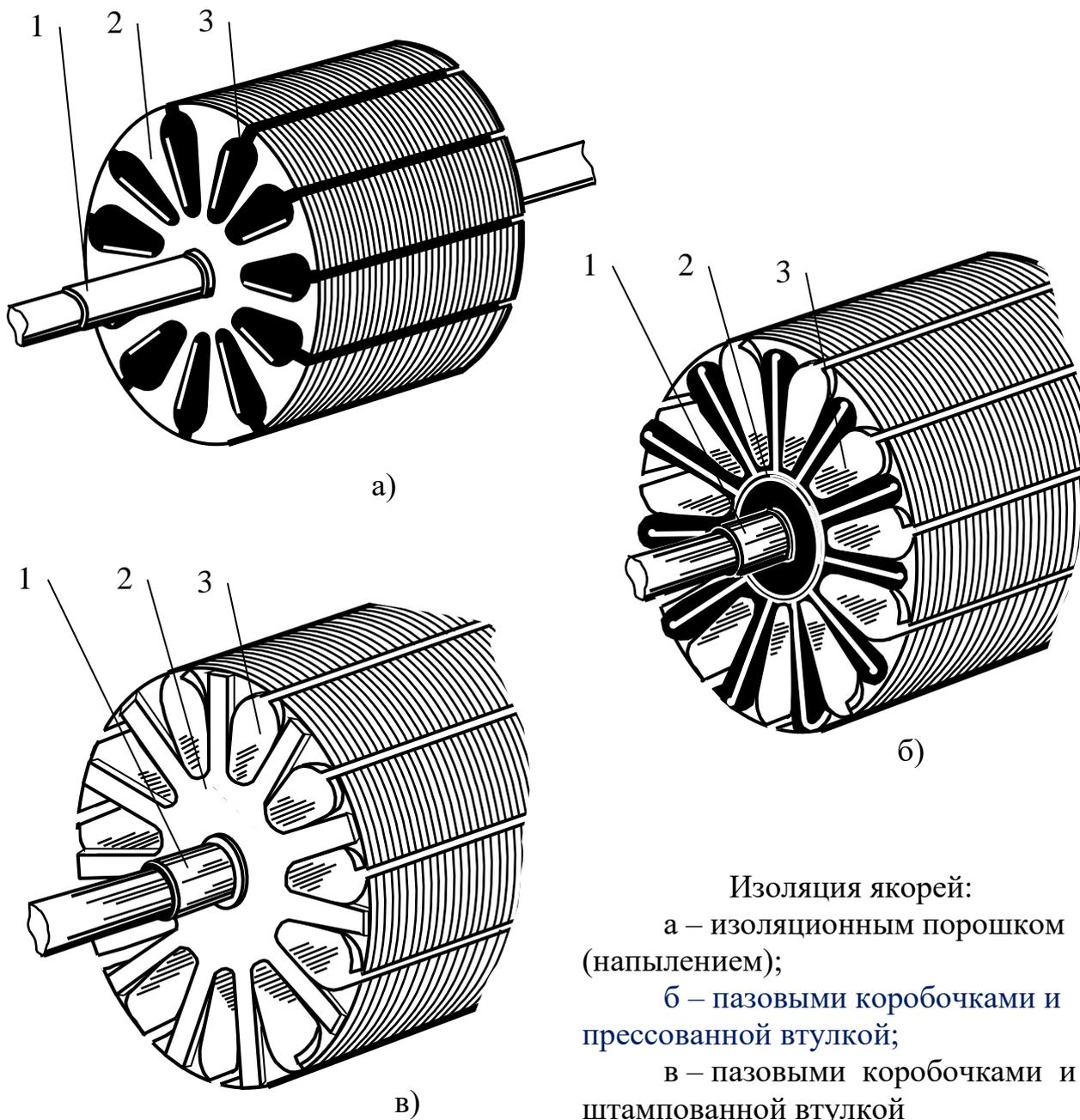


Рисунок К.1 – Изоляция якорей

Приложение Л
(справочное)
Концы валов цилиндрические электрических машин
по ГОСТ 12080-66

Таблица Л.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 М

(справочное)

Подшипники шариковые радиальные однорядные по ГОСТ 8338-75

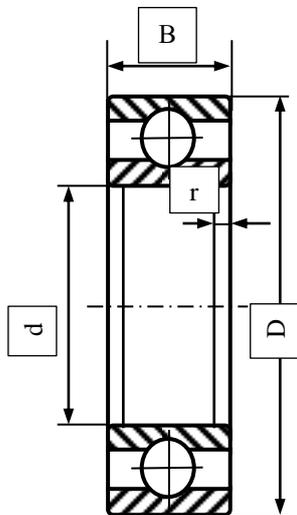


Таблица М.1

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 М.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