

Министерство путей сообщения Российской Федерации

Дальневосточный государственный университет путей сообщения

Кафедра “электротехника,

электроника и электромеханика”

В.В. Кульчицкий

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Методическое пособие по расчету двигателей
постоянного тока с применением компьютерных технологий
для студентов ИИФО специальности 150700 “Локомотивы”

Хабаровск

2003

Рецензенты: Кафедра “Электромеханика” Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор *В.М. Кузьмин*)

Заместитель начальника отдела ремонта
Службы локомотивного хозяйства ДВЖД *В.И. Быстрицкий*

Кульчицкий, В.В.

К 906 Электрические машины: Методическое пособие по расчету двигателей постоянного тока с применением компьютерных технологий для студентов ИИФО специальности 150700 “Локомотивы” / В.В. Кульчицкий. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2003. – 51 с.: ил.

Методическое пособие соответствует государственному образовательному стандарту направления 657600 “Подвижной состав железных дорог” специальности 150700 “Локомотивы”.

В методическом пособии рассматриваются основные этапы проектирования двигателей постоянного тока мощностью до 30 кВт в форме конкретного примера. Приводятся данные по конструктивным особенностям главных полюсов и зубцовой зоны якоря, а также справочная информация в виде приложений и библиографического списка.

Пособие предназначено для студентов ИИФО специальности 150700 “Локомотивы”, выполняющих курсовой проект по дисциплине “Электрические машины”.

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
2003

Кульчицкий В.В., 2003

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ И ОБМОТКИ ЯКОРЯ ДВИГАТЕЛЯ

2. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИИ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ И ОБМОТКИ ЯКОРЯ

3. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

4. РАСЧЕТ НЕЗАВИСИМОЙ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

5. РАСЧЕТ ЩЕТОК И КОЛЛЕКТОРА

6. РАСЧЕТ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

7. Расчет потери коэффициента полезного действия двигателя постоянного тока

8. РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ

9. РАСЧЕТ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЙ ОБМОТКИ

10. ОФОРМЛЕНИЕ РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ И ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПРОЕКТА

ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное). Пример оформления текстового документа по ЕСКД

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное). Пример оформления титульного листа пояснительной записки

ПРИЛОЖЕНИЕ В (справочное). Параметры двигателя

ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное). Конструкция двигателя постоянного тока

Библиографический список

ВВЕДЕНИЕ

В общем объеме производства электротехнической промышленности электрические машины занимают ведущее место, а поэтому эксплуатационные свойства новых электрических машин имеют важное значение для экономики России.

Проектирование электрических машин основано на знании процессов электромеханического преобразования энергии и опыта инженеров-электромехаников, умеющих применять вычислительную технику.

При проектировании электрических машин конструктивные элементы должны быть рассчитаны так, чтобы при изготовлении машин трудоемкость и расход материалов были наименьшими, а при эксплуатации они должны обладать оптимальными энергетическими показателями с учетом современного мирового уровня изготовления, а также требований государственных и отраслевых стандартов.

Высокая трудоемкость расчетов электрических машин не позволяет проводить углубленные исследования, оптимизировать различные параметры и характеристики, создавать реальные проекты электрических машин. Громоздкие расчетные формулы не дают возможности увидеть закономерности сложных процессов, протекающих в электрических машинах, а также создания высоконадежной техники на уровне лучших мировых образцов.

Все эти задачи могут быть успешно решены переходом от традиционных методов проектирования к новым технологиям, основанным на организации информационного диалога ЭВМ – человек.

Цель настоящего пособия – восполнить недостаток учебной литературы по проектированию электрических машин постоянного тока, предоставить возможности студенту заочной формы обучения проявить максимум самостоятельности при подготовке проекта.

Наличие примера значительно уменьшает трудоемкость при работе над проектом, создает условия для творческого и осознанного подхода с использованием компьютерных технологий при расчете магнитной цепи и рабочих характеристик двигателя постоянного тока. Однако такой подход вовсе не исключает использование студентом справочников, журналов, каталогов и атласов чертежей типовых проектных решений в двигателях постоянного тока.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Рассчитать и разработать конструкцию двигателя постоянного тока с параметрами:

- номинальной мощностью $P_n = 18,5$ кВт;
- номинальным напряжением сети $U_n = 440$ В;
- номинальной частотой вращения $n_n = 3000$ об/мин;
- родом возбуждения – независимым $U_n = 220$ В;
- исполнением по способу защиты – IP44, по способу охлаждения – естественным (IC0141);
- режимом работы – длительным;
- классом изоляции по нагревостойкости – F.

1. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ И ОБМОТКИ ЯКОРЯ ДВИГАТЕЛЯ

Номинальный ток I_n , А, двигателя (предварительное значение) рассчитываем по формуле

$$I_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n \cdot U_n},$$

где η_n – предварительное значение коэффициента полезного действия двигателя, выбираем по [4, рис. 1.1 (кривая для машин серии 2П, $\eta_n = 87\%$)],

$$I_n = \frac{18,5 \cdot 10^3}{0,87 \cdot 440} = 4833 \text{ А}$$

Электромагнитную мощность двигателя, кВт, определяем по формуле

$$P_{\text{эл}} = P_n \frac{100 + \eta_n}{2\eta_n} = 18,5 \frac{100 + 87}{2 \cdot 87} = 19,882 \text{ кВт}$$

Для заданных параметров двигателя высота оси вращения $h = 180$ мм (см. приложение в задании на курсовой проект), а наружный диаметр D_n корпуса двигателя, м,

$$D_n = 2h - 8 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 0,18 - 8 \cdot 10^{-3} = 0,352 \text{ м.}$$

Серия машин постоянного тока 2П в диапазоне мощностей от 1,5 до 30 кВт имеет число главных полюсов $2p = 4$. Диаметр якоря D можно принять равным высоте оси вращения h , т. е. $D \approx h = 0,18$ м.

Тогда расчетная длина якоря ℓ'_δ , м, определяется как

$$l'_\delta = \frac{6,1P_{\text{эл}} \cdot 10^3}{\alpha_\delta A' B'_\delta D^2 n_n},$$

где $\alpha_\delta = 0,63$ – расчетный коэффициент полюсного перекрытия [4, рис. 1.5]; $A' = 2,2 \cdot 10^4$ А/м – линейная нагрузка якоря [4, рис. 1.3]; $B'_\delta = 0,6$ Тл – магнитная индукция в воздушном зазоре [4, рис. 1.4].

Подставив принятые значения, получим расчетную длину якоря

$$l'_\delta = \frac{6,1 \cdot 19,882 \cdot 10^3}{0,63 \cdot 22 \cdot 10^4 \cdot 0,6 \cdot 0,18^2 \cdot 3000} = 0,15 \text{ м}$$

В машинах постоянного тока при диаметрах якоря до 200 мм отсутствуют радиальные вентиляционные каналы. Расчетная длина якоря равна полной длине сердечника якоря, а отношение длины магнитопровода якоря к его диаметру

$$\lambda = \frac{l'_\delta}{D} = \frac{0,15}{0,18} = 0,833$$

Полученное значение находится в пределах от 0,4 до 1,25, что соответствует машинам общепромышленного применения.

Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2P} = \frac{3,14 \cdot 0,18}{4} = 0,141 \text{ м}$$

Расчетная ширина полюсного наконечника

$$b_\delta = \alpha_\delta \tau = 0,63 \cdot 0,141 = 0,088 \text{ м.}$$

Для уменьшения реакции якоря воздушный зазор под главными полюсами выполняется эксцентричным. Тогда действительная ширина полюсного наконечника b_p равна расчетной ширине b_δ

$$b_p = b_\delta = 0,088 \text{ м.}$$

Полученные размеры двигателя сводим в табл.1.1.

Главные размеры двигателя

Высота оси вращения, м	Число полюсов	Наружный диаметр, м	Диаметр якоря, м	Расчетная длина якоря, м	Полюсное деление, м	Ширина полюсного наконечника, м
0,18	4	0,352	0,18	0,15	0,141	0,088

Для выбора обмотки определяем ток в якоре двигателя I , А,

$$I = I_n (1 - K_b),$$

где значение коэффициента $K_b = 0,03$ принимаем по [4], тогда

$$I = 48,3 (1 - 0,03) = 46,9 \text{ А.}$$

В соответствии с рекомендациями [1] при токах якоря до 600 А выбираем простую волновую обмотку с числом параллельных ветвей $2a = 2$, где ток параллельной ветви

$$I_a = \frac{I}{2} = \frac{46,9}{2} = 23,45 \text{ А}$$

Предварительное число эффективных проводников обмотки якоря

$$N = \frac{\pi D A'}{I_a} = \frac{3,14 \cdot 180 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2 \cdot 10^4}{23,45} = 530$$

Число пазов якоря должно находиться в диапазоне от Z_{\min} до Z_{\max} , где

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

а пределы зубцового шага $t_{1\min} = 10$ мм и $t_{1\max} = 20$ мм зависят от высоты оси вращения двигателя [4].

Тогда

$$Z_{\max} = \frac{3,14 \cdot 180 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}} = 56; \quad Z_{\min} = \frac{3,14 \cdot 180 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-3}} = 28$$

Принимаем число пазов якоря $Z = 39$ на основе программы оптимизации параметров двигателя с использованием Excel 2002.

Тогда зубцовый шаг t_1 , мм

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z} = \frac{3,14 \cdot 180}{39} = 14,49 \text{ мм}$$

а число эффективных проводников в пазу

$$N_{\text{п}} = \frac{N}{Z} = \frac{530}{39} = 13,58.$$

В симметричной двухслойной обмотке это число должно быть четным.

Приняв $N_{\text{п}} = 14$, число проводников в обмотке якоря определяем как

$$N = N_{\text{п}} Z = 14 \cdot 39 = 546.$$

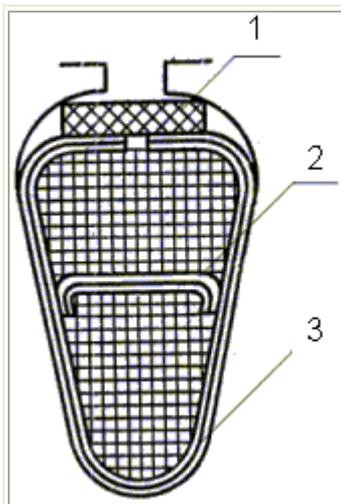


Рис. 1.1. Сечение паза якоря: 1 – клин пазовый; 2 – изоляция междуслойная; 3 – изоляция пазовая

В соответствии с рекомендациями [1] при диаметрах якоря до 200 мм выбираем полузакрытую конструкцию паза овальной формы с параллельными сторонами зубцов. Обмотку выполняем насыпной из эмалированных проводов круглого сечения, образующих мягкие секции. Сечение паза якоря приведено на рис. 1.1.

Размеры и число слоев изоляции в пазовой части обмотки якоря двигателя приведены в табл. 1.2.

Число коллекторных пластин при различном количестве элементарных пазов в одном реальном выбираем путем сравнения нескольких вариантов (табл. 1.3).

Таблица 1.2

Изоляция пазовой части обмотки якоря

Изоляция	Материал класса F	Толщина, мм	Число слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм
Междуслойная	Имидофлекс	0,25	2	0,5
Пазовая	Имидофлекс	0,25	2	0,5

Таблица 1.3

Выбор числа коллекторных делений

Номер варианта	Число элементарных пазов u_n	Число коллекторных пластин $K = u_n Z$	Число витков в секции $W_c = N/2K$	Напряжение между коллекторными пластинами $U_{к.ср} = 2PU_n/K$, В
Первый	1	39	7	45,1
Второй	2	78	3,5	22,5
Третий	3	117	2,33	15,04
Четвертый	4	156	1,75	11,28

Для серийных машин без компенсационной обмотки [1] напряжение между коллекторными пластинами $U_{к.ср}$ не должно превышать 16 В, что соответствует минимальному количеству коллекторных пластин K_{min}

$$K_{min} = \frac{2p U_n}{U_{к.ср}} = \frac{4 \cdot 440}{16} = 110$$

Максимальное число коллекторных пластин определяется минимальным значением коллекторного деления $t_k = 3,5$ мм [3]

$$K_{max} = \frac{\pi D_k}{t_k},$$

где $D_k = (0,65 \div 0,8) D = (0,65 \div 0,8) 0,18 = (0,117 \div 0,144)$ – наружный диаметр коллектора, м.

Принимая из стандартного ряда [3, 4] $D_k = 0,14$ м, получим

$$K_{\max} \frac{3,14 \cdot 0,14 \cdot 10^3}{3,5} = 125$$

Следовательно, число коллекторных пластин должно находиться в пределах от 110 до 125, при этом отношение $(k - 1)/p$ должно быть целым числом.

Всем условиям удовлетворяет третий вариант. В двигателях с полузакрытыми пазами и насыпной обмоткой из круглого провода можно применять секции с разным числом витков [1], расположенных в одном пазу $u_p = 3$, и средним значением $W_c = 2,33$. Число витков в секциях одного паза будет 2 – 3 – 2.

Уточним линейную нагрузку

$$A = \frac{N I_a}{\pi D} = \frac{546 \cdot 23,45}{3,14 \cdot 180 \cdot 10^{-3}} = 22653 \text{ А/м}$$

Корректируем длину якоря, м,

$$\ell_{\delta} = \ell'_{\delta} \frac{A'}{A} = 0,15 \frac{22000}{22653} = 0,146 \text{ м}$$

Тогда коллекторное деление t_k , мм,

$$t_k = \frac{\pi D_k}{K} = \frac{3,14 \cdot 0,14 \cdot 10^3}{117} = 3,76 \text{ мм}$$

При диаметре коллектора 140 мм параметр t_k должен быть не менее 3,5 мм [1], что соответствует полученным результатам.

Вычислим окружную скорость коллектора

$$V_k = \frac{\pi D_k n_n}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,14 \cdot 3000}{60} = 2198 \text{ м/с}$$

Полный ток паза

$$I_n = I_a N_p = 23,45 \cdot 14 = 328,3 \text{ А.}$$

Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря

$$J_a = \frac{A j}{A} = \frac{19 \cdot 10^{11}}{22653} = 8,39 \cdot 10^6 \text{ а/м}^2$$

где $A j = 1,9 \cdot 10^{11} \text{ A}^2/\text{м}^3$ – произведение линейной нагрузки на плотность тока, принимаем по [4, рис. 1.3] для области F.

Предварительное сечение эффективного провода

$$q_a = \frac{I_a}{j_a} = \frac{23,45}{8,39 \cdot 10^6} = 2,795 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 ; q_a = 2,795 \text{ мм}^2 .$$

Выбираем из [4, табл. 2.4] круглый провод ПЭТ–155 сечением 3,14 мм² и диаметром 2 мм. По технологии изготовления насыпных обмоток диаметр изолированного провода не должен превышать 1,8 мм. Заменяем эффективный провод двумя элементарными, а предварительное сечение элементарного провода определим по формуле

$$q_{aэ} = \frac{I_a}{j_a n_{эл}} = \frac{23,45}{8,39 \cdot 10^6 \cdot 2} = 1,397 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 ; q_{aэ} = 1,397 \text{ мм}^2 ,$$

где $n_{эл} = 2$ – число элементарных проводников.

По сечению элементарного провода из [4, табл. 2.4] выбираем провод ПЭТ-155 сечением 1,767 мм².

Параметры обмотки якоря представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Параметры обмотки якоря

Тип обмотки	Конструкция паза	Число эффективных проводников	Число пазов	Марка провода	Диаметр голого провода, мм	Диаметр изолированного провода, мм	Эффективное сечение провода, мм ²
Простая волновая	Полузакрытый овальной формы	546	39	ПЭТ-155	1,5	1,585	2 • 1,767

2. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИИ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ И ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Для расчета геометрии зубцовой зоны якоря (рис. 2.1) предварительно выбираем высоту паза по [4, рис. 3.1] $h_n = 26,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

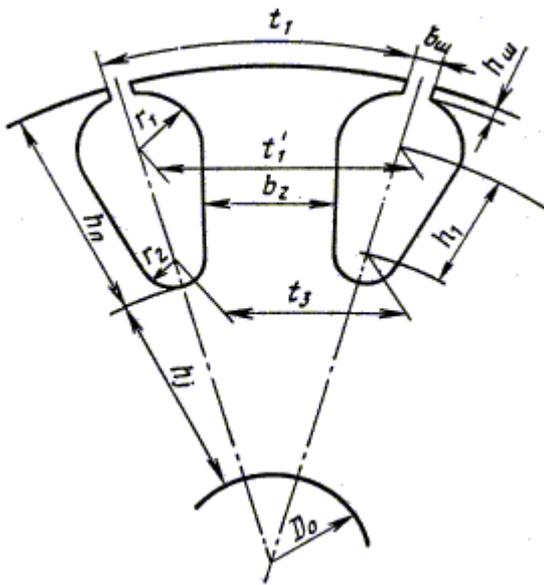


Рис. 2.1. Эскиз зубцовой зоны якоря

Высоту шлица $h_{ш}$ паза якоря из технологических соображений следует принимать равной $0,5 \div 0,8$ мм, т. е. $h_{ш} = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м. Ширину шлица $b_{ш}$ принимаем равной $b_{ш} = d_{из} + (1,5 \div 2)$ мм, где $d_{из}$ – диаметр изолированного элементарного провода, т. е.

$$b_{ш} = (1,585 + 1,5) 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Ширина зуба предварительно

$$b_z = \frac{B_{\delta} t_1}{B_z K_c},$$

где B_z – допустимое значение магнитной индукции в зависимости от частоты перемагничивания f

$$f = \frac{p n}{60} = \frac{2 \cdot 3000}{60} = 100 \text{ Гц},$$

степени защиты и способа охлаждения принимаем согласно [4, табл. 3.1], $B_z = 1,55$ Тл; K_c – коэффициент заполнения пакета якоря сталью, $K_c = 0,95$.

Тогда

$$b_z = \frac{0,6 \cdot 14,49 \cdot 10^{-3}}{1,55 \cdot 0,95} = 5,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Определим больший и меньший радиусы r_1 и r_2 , м,

$$r_1 = \frac{\pi (D - 2h_{ш}) - Zb_z}{2(Z + \pi)} = \frac{3,14 (180 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}) - 39 \cdot 5,9 \cdot 10^{-3}}{2(39 + 3,14)} =$$

$$= 3,916 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$r_2 = \frac{\pi (D - 2h_{п}) - Zb_z}{2(Z - \pi)} = \frac{3,14 (180 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 2,65 \cdot 10^{-3}) - 39 \cdot 5,9 \cdot 10^{-3}}{2(39 - 3,14)} =$$

$$= 2,352 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Расстояние между центрами радиусов

$$h_1 = h_{п} - h_{ш} - r_1 - r_2 = 26,5 \cdot 10^{-3} - 0,8 \cdot 10^{-3} -$$

$$3,916 \cdot 10^{-3} - 2,352 \cdot 10^{-3} = 19,432 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Площадь паза в штампе

$$S_{п} = \frac{\pi}{2} (r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2) h_1 = \frac{3,14}{2} (3,916^2 \cdot 10^{-6} + 2,352^2 \cdot 10^{-6}) +$$

$$+ (3,916 \cdot 10^{-3} + 2,352 \cdot 10^{-3}) 19,432 \cdot 10^{-3} = 154,558 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Площадь сечения пазовой изоляции

$$S_{из} = b_{из} (2\pi r_1 + \pi r_2 + 2 h_1),$$

где $b_{из}$ – односторонняя толщина изоляции (табл. 1.2), $b_{из} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

$$S_{из} = 0,5 \cdot 10^{-3} (2 \cdot 3,14 \cdot 3,916 \cdot 10^{-3} + 3,14 \cdot 2,352 \cdot 10^{-3} +$$

$$+ 2 \cdot 19,342 \cdot 10^{-3}) = 35,329 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Площадь пазового клина и изоляционной прокладки между слоями обмотки

$$S_{к} = (0,003 \text{ ч } 0,005) r_1; S_{к} = 0,005 r_1 = 0,005 \cdot 3,916 \cdot 10^{-3} = 19,58 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Площадь поперечного сечения $S_{п.о.}$, заполненная обмоткой

$$S_{п.о.} = S_{п} - S_{из} - S_{к} = 154,558 \cdot 10^{-6} - 35,329 \cdot 10^{-6} -$$

$$- 19,58 \cdot 10^{-6} = 99,639 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Определим коэффициент заполнения паза

$$K_{з} = \frac{2 d_{из}^2 n_{эл} u_{п} W_c}{S_{п.о.}},$$

где $d_{из}$ – диаметр изолированного провода (табл. 1.4), $d_{из} = 1,585 \cdot 10^{-3} \text{ м}$,

$$K_3 = \frac{2 (1,585 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2,33}{99,639 \cdot 10^{-6}} = 0,7$$

Значение этого коэффициента для серийных машин постоянного тока находится в пределах 0,68-0,72. Если коэффициент заполнения паза не укладывается в рекомендуемые пределы, то следует изменить геометрические размеры паза или изменить плотность тока обмотки якоря.

Минимальное сечение зубцов якоря

$$S_z = \frac{Z}{2p} \alpha_\delta b_z \ell_\delta K_c = \frac{39}{4} 0,63 \cdot 5,9 \cdot 10^{-3} \cdot 146 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 = 50,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Предварительное значение эдс и магнитного потока на полюс

$$E_H = U_H K_d; \quad \Phi_{\delta H} = \frac{60 a E_H}{p N n_H},$$

где $K_d = 0,89$ – выбираем по [4, табл.1.1]; a – число пар параллельных ветвей, $a = 1$ для волновой обмотки.

$$E_H = 440 \cdot 0,89 = 392 \text{ В}; \quad \Phi_{\delta H} = \frac{60 \cdot 392}{2 \cdot 546 \cdot 3000} = 0,718 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$$

Округляя предварительное значение магнитного потока, получим $\Phi_{\delta H} = 0,72 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$.

Магнитопровод якоря выполняем из холоднокатаной электротехнической стали марки 2312 [1, 3] и проверяем допустимое значение индукции в зубцах якоря

$$B_z = \frac{\Phi_{\delta H}}{S_z} = \frac{0,72 \cdot 10^{-2}}{50,26 \cdot 10^{-4}} = 1,432 \text{ Тл}$$

Полученное значение $B_z = 1,432 \text{ Тл}$ соответствует серийным машинам заданного исполнения [4, табл. 3.1].

Расчетные параметры зубцовой зоны якоря сводим в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Параметры зубцовой зоны якоря

Зубцовый шаг, мм	Высота паза, мм	Ширина зубца, мм	Ширина шлица, мм	Высота шлица, мм	Большой радиус, мм	Малый радиус, мм	Расстояние между центрами, мм
14,49	26,5	5,9	3	0,8	3,916	2,352	19,432
Площадь паза, мм ²	Площадь изоляции, мм ²	Площадь пазового клина, мм ²	Площадь, занимаемая обмоткой, мм ²	Коэффициент заполнения паза	Магнитный поток на полюс, Вб	Минимальное сечение зубцов, мм ²	Магнитная индукция в зубцах, Тл
154,558	35,329	19,58	99,639	0,7	$0,72 \cdot 10^{-2}$	5026	1,432

Средняя длина полувитка секции обмотки якоря, м,

$$l_{a.c.p} = l_{л} + l_{п},$$

где $l_{л}$ – длина лобовой части витка и при $2p = 4$ $l_{л} = 1,25 \tau = 1,25 \cdot 0,141 = 176,25 \cdot 10^{-3}$ м [3]; $l_{п}$ – полная длина сердечника якоря при отсутствии радиальных вентиляционных каналов $l_{п} = l_{б} = 0,146$ м,

$$l_{a.c.p} = 176,25 \cdot 10^{-3} + 146 \cdot 10^{-3} = 322,25 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Полная длина проводников обмотки якоря [4]

$$L_{ма} = N l_{a.c.p} = 546 \cdot 322,25 \cdot 10^{-3} = 176 \text{ м.}$$

Согласно ГОСТ 183-74 для обмоток с классом нагревостойкости F расчетная температура принимается 115°C . Тогда сопротивление обмотки якоря

$$R_a = \rho_{\theta} \frac{L_{ма}}{(2a)^2 q_a},$$

где ρ_{θ} – удельное сопротивление меди при рабочей температуре 115°C ,

$$\rho_{\theta} = \frac{1}{41} 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м} \text{ [3, табл. 4.1].}$$

$$R_a = \frac{176}{41 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 2 \cdot 1,767 \cdot 10^6} = 0,303 \text{ Ом}$$

Масса меди обмотки якоря

$$m_{ма} = 8900 L_{ма} q_a = 8900 \cdot 176 \cdot 2 \cdot 1,767 \cdot 10^{-6} = 5,35 \text{ кг.}$$

Конструктивные параметры обмотки якоря сведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Конструктивные параметры обмотки якоря

Длина лобовой части, м	Длина полувитка, м	Полная длина обмотки, м	Сопротивление обмотки при $t = 115^\circ \text{C}$, Ом	Масса меди обмотки, кг
0,17625	0,3225	176	0,303	5,535

Для простой волновой обмотки результирующий шаг по коллектору Y ,

$$Y = Y_k = \frac{K - 1}{P} = \frac{117 - 1}{2} = 58$$

Первый частичный шаг по якорю Y_1 ,

$$Y_1 = \frac{K}{2P} \pm \varepsilon$$

где ε – укорочение или удлинение шага обмотки.

При укорочении шага обмотки уменьшается длина вылета лобовых частей и общая длина секции, а также улучшается коммутация. Выбираем обмотку с укороченным шагом

$$Y_1 = \frac{117}{4} - \frac{1}{4} = 29$$

Второй частичный шаг по якорю Y_2 ,

$$Y_2 = Y - Y_1 = 58 - 29 = 29.$$

3. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Для расчета магнитной цепи двигателя постоянного тока необходимо знать размеры всех участков магнитопровода, площади их сечения и магнитные потоки этих участков. Магнитную систему машины постоянного тока представляют состоящей из 2р симметричных магнитных цепей, каждая из которых имеет ряд однородных участков: зубцов якоря, воздушного зазора под главными полюсами, сердечника главного полюса, зазора между главными полюсами и станиной.

Расчет магнитной цепи достаточно провести на один полюс, так как замкнутый контур магнитных линий пары полюсов является симметричным относительно геометрической нейтрали.

Размеры магнитной цепи. Предварительное значение внутреннего диаметра якоря и диаметр вала D_0 , м,

$$D_0 = 0,27 \sqrt[3]{\frac{P_H}{\eta_H}} = 0,27 \sqrt[3]{\frac{18,5}{3000}} = 49,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Высота спинки якоря (см. рис. 2.1)

$$h_i = \frac{D - D_0}{2} - h_n = \frac{180 \cdot 10^{-3} - 49,6 \cdot 10^{-3}}{2} - 26,5 \cdot 10^{-3} = 38,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Для сердечников главных полюсов принимаем сталь марки 3413 толщиной 0,5 мм и коэффициент заполнения сталью по [3, табл. 6.11] $K_c = 0,95$.

Форма наконечника полюса определяется видом выбранного воздушного зазора между главными полюсами и якорем. Для уменьшения влияния реакции якоря и понижения уровня магнитного шума машины выполняем эксцентричный зазор, при котором центры радиусов якоря и полюсной дуги не совпадают. Геометрия полюсного наконечника приводится на рис. 3.1.

Длину сердечника главного полюса l_r принимаем равной длине якоря

$$l_r = l_b = 146 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Действительная ширина полюсного наконечника при эксцентричном зазоре равна расчетной ширине $b_6 = 88 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Ширина выступа полюсного наконечника (рис. 3.1)

$$b'_n = (0,07 \div 0,15) b_6 = 0,15 \cdot 88 \cdot 10^{-3} = 13,2 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Ширина сердечника главного полюса

$$b_r = \frac{\sigma_r \Phi_{\delta H}}{B_r K_c l_r},$$

где σ_r – коэффициент рассеяния главных полюсов, $\sigma_r = 1,2$ [4]; B_r – магнитная индукция в сердечнике главных полюсов, принимается в зависимости от исполнения машины по табл. В-1 (Приложение В), $B_r = 1,4$ Тл,

$$b_r = \frac{1,2 \cdot 0,718 \cdot 10^{-2}}{1,4 \cdot 0,95 \cdot 146 \cdot 10^{-3}} = 44,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

При определении размеров станины двигателя постоянного тока (сталь Ст. 3) магнитная индукция в станине должна быть в пределах $B_c = (1,1 \text{ч} 1,2) \text{ Тл}$ для исполнения машины IP44, IC141 [3].

Сечение станины определяется как

$$S_c = \frac{\sigma_r \Phi_{\delta H}}{2B_c} = \frac{1,2 \cdot 0,178 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 1,1} = 3,916 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Расчетная длина станины

$$l_c = l_r + 0,4 D = 146 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 180 \cdot 10^{-3} = 218 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Высота станины

$$h_c = \frac{S_c}{l_c} = \frac{3,916 \cdot 10^{-3}}{218 \cdot 10^{-3}} = 17,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Внутренний диаметр станины

$$d_c = D_H - 2 h_c = 352 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 17,96 \cdot 10^{-3} = 316,08 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Высота главного полюса

$$h_r = \frac{d_c - D}{2} - 3\delta$$

где δ – предварительная величина воздушного зазора под главными полюсами [4, рис. 5.2], $\delta = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$,

$$h_r = \frac{316,08 \cdot 10^{-3} - 180 \cdot 10^{-3}}{2} - 3 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3} = 62,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Размеры главных полюсов и станины двигателя постоянного тока представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Размеры главных полюсов и станины двигателя

Длина полюса, мм	Ширина полюса, мм	Высота полюса, мм	Ширина выступа полюсного наконечника, мм
146	44,3	62,64	13,2

Продолжение табл. 3.1

Высота спинки якоря, мм	Длина станины, мм	Высота станины, мм	Внутренний диаметр станины, мм
38,7	218	17,96	316,08

Расчетные сечения магнитной цепи. Сечение воздушного зазора

$$S_{\delta} = b_p l_{\delta} = 88 \cdot 10^{-3} \cdot 146 \cdot 10^{-3} = 12,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Длина стали якоря

$$l_{ca} = l_{\delta} K_c = 146 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 = 138,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Магнитопровод якоря с овальными пазами выполняем без аксиальных каналов [3], а сечение спинки якоря определим как

$$S_j = l_{ca} h_j = 138,7 \cdot 10^{-3} \cdot 38,7 \cdot 10^{-3} = 5,32 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Сечение сердечника главного полюса

$$S_r = K_c l_{\delta} b_r = 0,95 \cdot 146 \cdot 10^{-3} \cdot 44,3 \cdot 10^{-3} = 6,144 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Полученные данные расчетных сечений магнитной цепи машины сводим в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Расчетные сечения магнитной цепи

Сечение воздушного зазора, м ²	Сечение зубцов якоря, м ²	Сечение спинки якоря, м ²	Сечение сердечника главного полюса, м ²	Сечение станины, м ²
$12,85 \cdot 10^{-3}$	$5,02 \cdot 10^{-3}$	$5,32 \cdot 10^{-3}$	$6,144 \cdot 10^{-3}$	$3,916 \cdot 10^{-3}$

Средние длины магнитных линий. Расчетный зазор в машине определяем с учетом эксцентricности, мм,

$$\delta' = 0,75 \delta_1 + 0,25 \delta_2,$$

где δ_1 – воздушный зазор под серединой полюса, $\delta_1 = \delta = 1,8$ мм; δ_2 – воздушный зазор по краям полюсов, принимается (2? 3) δ_1 , $\delta_2 = 3 \delta_1 = 5,4$ мм.

$$= 0,75 \cdot 1,8 + 0,25 \cdot 5,4 = 2,7 \text{ мм.}$$

Для учета влияния зубчатости якоря определим коэффициент воздушного зазора для пазов овальной формы [4]

$$K_{\delta a} = \frac{t_1 + 10\delta'}{t_1 - b_{\omega} + 10\delta'} = \frac{14,49 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3}}{14,49 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3}} = 1,08$$

Расчетная длина воздушного зазора

$$L_{\delta} = K_{\delta a} \delta = 1,08 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} = 2,916 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Средняя длина магнитных линий в зубцах якоря для пазов овальной формы [4]

$$L_z = h_n - 0,2 r_1 = 26,5 \cdot 10^{-3} - 0,2 \cdot 3,916 \cdot 10^{-3} = 25,71 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Средняя длина магнитных линий в спинке якоря

$$L_j = \frac{\pi (D_0 + h_j)}{4p} + \frac{h_j}{2} = \frac{3,14 (49,6 \cdot 10^{-3} + 38,7 \cdot 10^{-3})}{4 \cdot 2} + \frac{38,7 \cdot 10^{-3}}{2} = 54 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Средняя длина магнитных линий в сердечнике главного полюса

$$L_r = h_r = 62,64 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Воздушный зазор между главным полюсом и станиной

$$L_{c,p} = 2 \ell_r \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4},$$

где $\ell_r = 1\delta$ – длина сердечника главного полюса,

$$L_{c,p} = 2 \cdot 146 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} = 0,129 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Средняя длина магнитных линий в станине

$$L_c = \frac{\pi (D_H - h_c)}{4p} + \frac{h_c}{2} = \frac{3,14 (352 \cdot 10^{-3} - 17,96 \cdot 10^{-3})}{4 \cdot 2} + \frac{17,96 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,122 \text{ м}$$

Сводные данные по длине магнитных линий приводятся в табл. 3.3

Таблица 3.3

Средняя длина магнитных линий

В воздушном зазоре, мм	В зубцах якоря, мм	В спинке якоря, мм	В сердечнике главных полюсов, мм	Между полюсом и станиной, мм	В станине, мм
2,916	25,71	54	62,64	0,129	122

Магнитная индукция в расчетных сечениях. Магнитная индукция в воздушном зазоре

$$B_{\delta H} = \frac{\Phi_{\delta H}}{S_{\delta}} = \frac{0,718 \cdot 10^{-2}}{1285 \cdot 10^{-3}} = 0,558 \text{ Тл}$$

Магнитная индукция в спинке якоря

$$B_j = \frac{\Phi_{\delta H}}{2S_j} = \frac{0,718 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 5,32 \cdot 10^{-3}} = 0,675 \text{ Тл}$$

Магнитная индукция в зубцах якоря, в сердечнике главного полюса и станине были вычислены ранее. Сводные данные по расчету магнитной индукции представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Магнитная индукция в расчетных сечениях

Магнитная индукция, Тл	Участки магнитной цепи				
	Воздушный зазор	Зубцы якоря	Спинка якоря	Главные полюса	Станина
	0,558	1,432	0,675	1,4	1,1

Магнитное напряжение участков магнитной цепи. Магнитодвижущая сила (мдс) воздушного зазора для номинального режима

$$F_{\delta_H} = 0,8 B_{\delta_H} L_{\delta} 10^6 = 0,8 \cdot 0,558 \cdot 2,916 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 = 1301,7 \text{ A.}$$

Магнитное напряжение зубцов якоря

$$F_z = H_z L_z,$$

где H_z – напряженность магнитного поля в зубцах, определяемая по кривой намагничивания [4, табл. 9.1] для стали 2312. При магнитной индукции в зубцах $B_z = 1,432 \text{ Тл}$ напряженность магнитного поля находится на пересечении чисел 1,4 (ряд слева) и 0,03 (верхний ряд), $H_z = 1180 \text{ А/м}$,

$$F_z = 1180 \cdot 25,71 \cdot 10^{-3} = 31 \text{ A.}$$

Магнитное напряжение в спинке якоря

$$F_j = H_j L_j,$$

где H_j – напряженность магнитного поля в спинке якоря. Определяется по кривой намагничивания для стали 2312 [4, табл. 9.1]. Если $B_j = 0,7 \text{ Тл}$, то $H_j = 137 \text{ В}_j = 137 \cdot 0,675 = 92,5 \text{ А/м}$,

$$F_j = 92,5 \cdot 54 \cdot 10^{-3} = 5 \text{ A.}$$

Магнитное напряжение главного полюса

$$F_r = H_r L_r,$$

где H_r – напряженность магнитного поля в сердечнике главного полюса. Определяется по кривой намагничивания для стали 3412 [4, табл. 9.2], а при $B_r = 0,7 \text{ Тл}$ – по формуле $H_r = 147 \cdot B_r$, $H_r = 320 \text{ А/м}$, тогда

$$F_r = 320 \cdot 62,4 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ A.}$$

Магнитное напряжение в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной, А,

$$F_{c.п} = 0,8 B_{c.п} L_{c.п} \cdot 10^6,$$

где $B_{c.п}$ – магнитная индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной, $B_{c.п} = B_r = 1,4 \text{ Тл}$,

$$F_{c.п} = 0,8 \cdot 1,4 \cdot 0,129 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 = 144 \text{ A.}$$

Магнитное напряжение станины, А,

$$F_c = H_c L_c,$$

где H_c – напряженность магнитного поля в станине, определяется по кривой намагничивания для массивной стали Ст.3 [4, табл. 9.3], $H_c = 1090$ А/м,

$$F_c = 1090 \cdot 122 \cdot 10^{-3} = 133 \text{ А.}$$

Суммарная мдс, А, на полюс для номинального режима работы двигателя постоянного тока

$$F_\alpha = F\delta_n + F_z + F_j + F_r + F_{c.п} + F_c = 1302 + 31 + 5 + 20 + 144 + 133 = 1635 \text{ А.}$$

Мдс переходного слоя

$$F\delta_{zj} = F\delta_n + F_z + F_j = 1302 + 31 + 5 = 1338 \text{ А.}$$

Сводные данные по расчету магнитных напряжений на участках магнитной цепи для номинального режима двигателя представлены в табл. 3.5.

Аналогичным образом проводим расчет магнитной цепи для режимов, отличающихся от номинального, т. е. при значениях магнитного потока в воздушном зазоре: $\Phi = n \Phi\delta_n$, n принимаем 0,5; 0,75; 0,9; 1,10; 1,2 (при наличии программы рассчитываем на ЭВМ). Результаты расчета сводим в табл. 3.6.

Таблица 3.5

Мдс на участках магнитной цепи

Магнитное напряжение, А	Участки магнитной цепи							
	Воздушный зазор	Зубцы якоря	Спинка якоря	Главный полюс	Станина	Зазор между полюсом и станиной	Суммарная мдс	Мдс переходного слоя
	1302	31	5	20	133	144	1635	1338
F/ F α	79,6 %	1,9 %	0,3 %	1,2 %	8,1 %	6,8 %	–	81,8%

Таблица 3.6

Расчет характеристики намагничивания

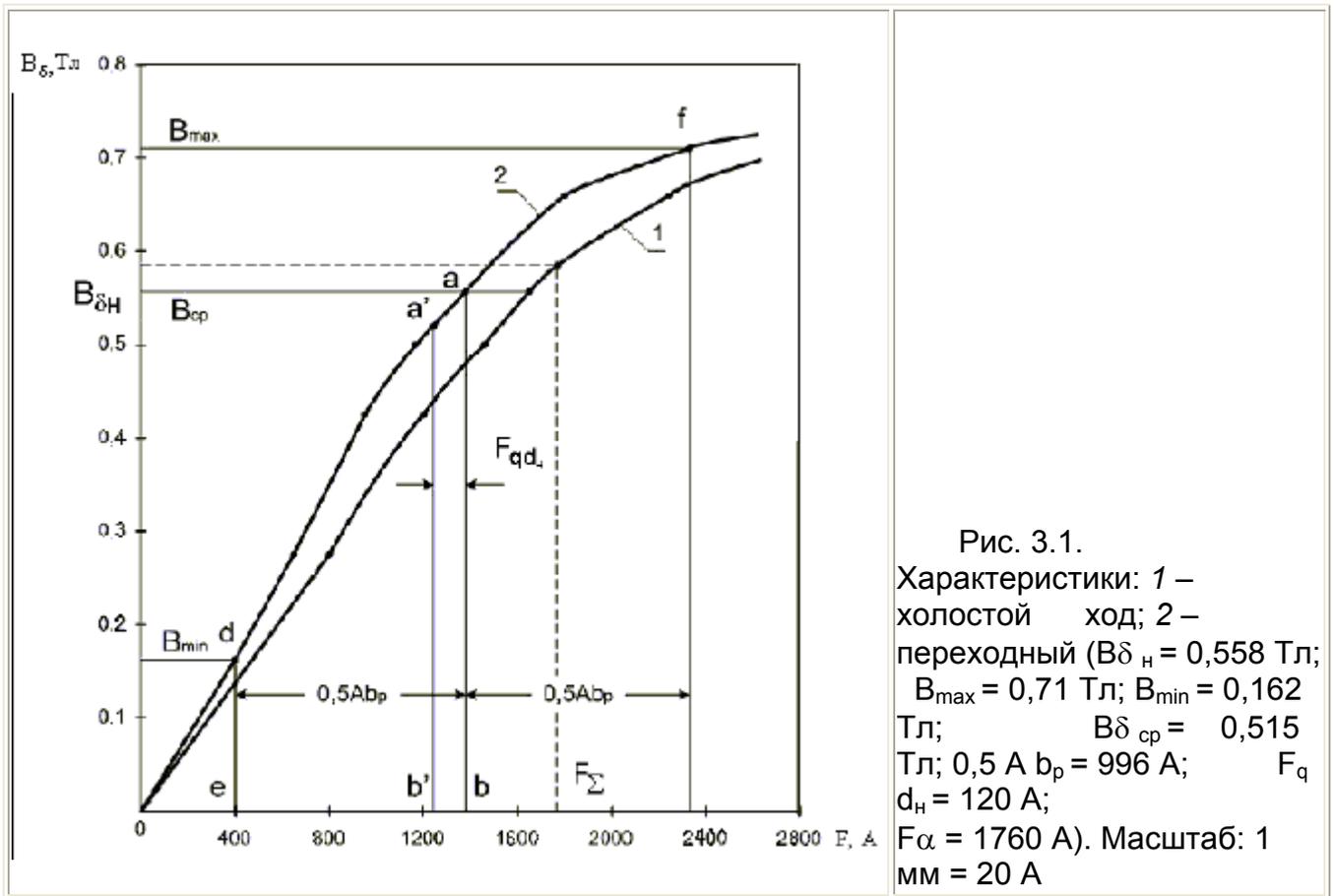
Номер параметра	Расчетная величина	Единица измерения	Числовые значения					
			0,5 Φ_{δ_n}	0,75 Φ_{δ_n}	0,9 Φ_{δ_n}	1,0 Φ_{δ_n}	1,1 Φ_{δ_n}	1,2 Φ_{δ_n}
1	Эдс	В	196	294	352,8	392	432,2	470,4
2	Магнитный поток	$Вб \cdot 10^{-2}$	0,359	0,538	0,646	0,718	0,79	0,86
3	Магнитная индукция в воздушном зазоре	Тл	0,279	0,418	0,502	0,558	0,614	0,669
4	Мдс воздушного зазора	А	651	976,5	1171,6	1302	1432,2	1562,4
5	Магнитная индукция в зубцах якоря	Тл	0,716	1,074	1,289	1,432	1,575	1,718
6	Напряженность магнитного поля в зубцах якоря	А/м	102	282	520	1180	2700	8900
7	Магнитное напряжение зубцов	А	2,62	7,25	13,37	31	69,42	228,8
8	Магнитная индукция в спинке якоря	Тл	0,337	0,506	0,607	0,675	0,742	0,81
9	Напряженность магнитного поля в спинке якоря	А/м	46,2	69,3	83,16	92,5	113	145
10	Магнитное напряжение в спинке якоря	А	2,49	3,74	4,45	5	6,1	7,83
11	Магнитный поток главного полюса	Вб	0,431	0,646	0,776	0,862	0,948	1,034

Окончание табл. 3.6

Номер параметра	Расчетная величина	Единица измерения	Числовые значения					
			0,5 $F\delta_n$	0,75 $F\delta_n$	0,9 $F\delta_n$	1,0 $F\delta_n$	1,1 $F\delta_n$	1,2 $F\delta_n$
12	Магнитная индукция в сердечнике главного полюса	Тл	0,7	1,05	1,26	1,4	1,54	1,68
13	Напряженность магнитного поля в сердечнике главного полюса	А/м	103	182	261	320	438	732
14	Магнитное напряжение сердечника главного полюса	А	6,45	11,4	16,35	20	27,44	45,85
15	Магнитная индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной	Тл	0,7	1,05	1,76	1,4	1,54	1,68
16	Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и главным полюсом	А	72	108	129,6	144	158,4	172,8
17	Магнитная индукция в станине	Тл	0,55	0,825	0,99	1,1	1,21	1,32
18	Напряженность магнитного поля в станине	А/м	443	703	911	1090	1315	1670
19	Магнитное напряжение в станине	А	54,04	85,76	111,14	133	160,4	203,7
20	Сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи	А	888,6	1192,6	1446,5	1635	1854	2221,4
21	Сумма магнитных напряжений участков переходного слоя	А	656,1	987,5	1189,4	1338	1507,7	1800

Примечание. Все расчетные параметры, кроме напряженности магнитного поля и магнитного напряжения в стальных участках, прямопропорциональны магнитному потоку в воздушном зазоре двигателя и определяются через пропорцию.

По расчетным данным табл. 3.6 строим переходную характеристику $B\delta = f(F\delta_{zj})$ (рис. 3.1, кривая 2).



4. РАСЧЕТ НЕЗАВИСИМОЙ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

При нагрузке двигателя под действием реакции якоря магнитное поле в воздушном зазоре под одним краем полюса уменьшается, а под другим – возрастает. Расчет размагничивающего действия поперечной реакции якоря выполняем по переходной характеристике (рис. 3.1).

Согласно построению, точки d и f определяют значения магнитной индукции $B_{\delta \text{min}}$ и $B_{\delta \text{max}}$ под краями полюсов и откладываем от ординаты ab на расстоянии $0,5 Ab_p$, где ордината ab равна номинальному значению магнитной индукции в воздушном зазоре $B_{\delta H}$.

Среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре определяем по формуле приближения квадратуры

$$B_{\text{cp}} = \frac{B_{\delta \text{min}} + 4B_{\delta H} + B_{\delta \text{max}}}{6} = \frac{0,162 + 4 \cdot 0,558 + 0,71}{6} = 0,515 \text{ Тл}$$

На переходной характеристике откладываем ординату $a' b'$, равную B_{cp} . В этом случае абсцисса $b b'$ определяет размагничивающее действие реакции якоря. С учетом принятого масштаба получим $F_{qd} = 120 \text{ A}$, а необходимая МДС независимой обмотки возбуждения

$$F_B = F_\alpha + F_{qd} = 1635 + 120 = 1755 \text{ A.}$$

Обмотку главных полюсов выполняем из круглого провода марки ПЭТВ, а изоляцию обмотки см. на рис. 4.1 и в табл. 4.1 [1].

Для определения размеров катушки (обмотка возбуждения) выполним эскиз главного полюса двигателя (рис. 4.2).

Размеры обмотки главного полюса приводятся на рис. 4.3.

Средняя длина витка обмотки главного полюса

$$l_{\text{ср.в}} = 2 (b_{\Gamma} + l_{\Gamma}) + \pi (b_{\text{кт}} + 2 \Delta_{\text{из}}),$$

где $b_{\text{кт}}$ – ширина катушки принимается по [4, табл. 10.1] в зависимости от диаметра якоря, $b_{\text{кт}} = 0,03 \text{ м}$; $\Delta_{\text{из}}$ – толщина изоляции катушки (табл. 4.1) плюс односторонний зазор между катушкой и полюсом, который принимается равным $(0,5 \div 0,8) \cdot 10^{-3}$ при диаметрах якоря до 0,2 м, $\Delta_{\text{из}} = (0,25 + 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$,

$$l_{\text{ср.в}} = 2 (44,3 \cdot 10^{-3} + 146 \cdot 10^{-3}) + 3,14 (30 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3}) = 479,21 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

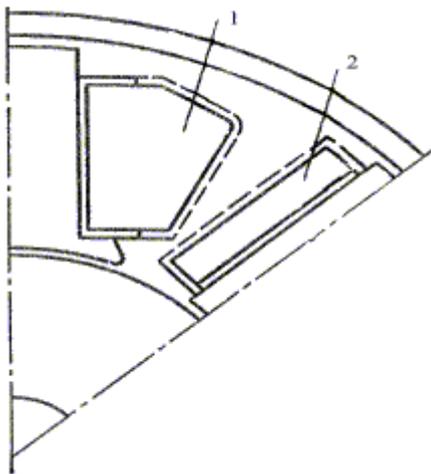


Рис. 4.2. Размещение обмоток главного (1) и добавочного (2) полюсов

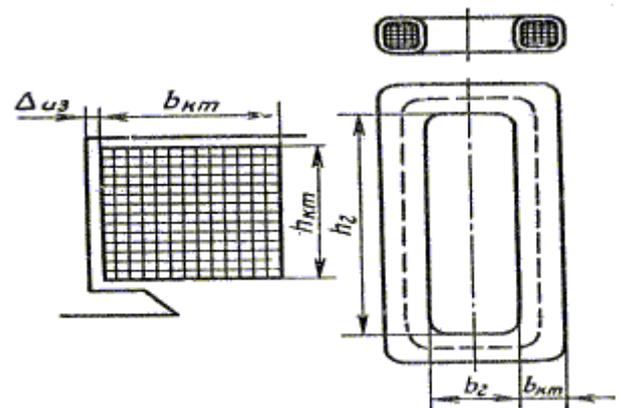


Рис. 4.3. Размеры обмотки возбуждения главных полюсов

Таблица 4.1

Изоляция обмотки главных полюсов

Позиция на рис. 4.1	Назначение	Материал класса В, F	Толщина, мм	Число слоев
1	Изоляция сердечника (напыление)	Эпоксидная смола	1	–
2	Изоляция катушки	Лакотканеслюдопласт ГИТ, ЛСБ, ПСП	0,25	1
3	Изоляция катушки	Стекланная лента ЛЭС	0,1	1 Вполнахлеста
4	Рамка	Стеклотекстолит СТЭФ	0,5	1

Площадь сечения проводников независимой обмотки возбуждения при последовательном соединении катушек, м^2 ,

$$q_B = \frac{K_3 m 2P F_B \ell_{\text{ср.в}}}{57 \cdot 10^6 U_B}$$

где K_3 – коэффициент запаса мдс обмотки возбуждения, $K_3 = 1,1 \div 1,2$;
 m – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления меди при увеличении температуры до 115°C , $m = 1,39$; U_B – напряжение в обмотке возбуждения, $U_B = U_H = 220 \text{ В}$,

$$q_B = \frac{1,1 \cdot 1,39 \cdot 4 \cdot 1755 \cdot 479,21 \cdot 10^{-3}}{57 \cdot 10^6 \cdot 220} = 0,41 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

По [4, табл. 2.4] выбираем, согласно сечению проводника q_B , круглый провод марки ПЭТВ. Диаметр голого провода $0,71 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, диаметр изолированного провода $0,77 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, сечение провода $0,396 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Для расчета числа витков независимой обмотки возбуждения задаемся плотностью тока J_B , которая для машин постоянного тока исполнения I P44 находится в пределах $(2 \div 3) 10^6 \text{ А/м}^2$. Принимаем $J_B = 3,0 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$. Тогда число витков обмотки возбуждения на полюс

$$W_B = \frac{F_B}{J_B q_B} = \frac{1755}{3 \cdot 10^6 \cdot 0,396 \cdot 10^{-6}} = 1477$$

Номинальный ток возбуждения

$$I_{BH} = \frac{F_B}{W_B} = \frac{1755}{1477} = 1,19 \text{ A}$$

Полная длина обмотки возбуждения

$$L_B = 2\pi L_{cp.B} W_B = 4 \cdot 479,21 \cdot 10^{-3} \cdot 1477 = 2831 \text{ м.}$$

Сопротивление обмотки возбуждения при температуре $\theta = 20^\circ \text{C}$

$$R_B = \frac{L_B}{57 \cdot 10^6 q_B} = \frac{2831}{57 \cdot 10^6 \cdot 0,396 \cdot 10^{-6}} = 125,42 \text{ Ом}$$

Сопротивление обмотки возбуждения при температуре $\theta = 115^\circ \text{C}$

$$R_{BH} = m R_B = 1,39 \cdot 125,42 = 174,33 \text{ Ом.}$$

Максимальный ток обмотки возбуждения

$$I_{B.max} = \frac{U_B}{R_B} = \frac{220}{125,42} = 1,754 \text{ A}$$

Коэффициент запаса K_3 должен быть не менее 1,1

$$K_3 = \frac{I_{B.max} W_B}{F_B} = \frac{1,754 \cdot 1477}{1755} = 1,476$$

что удовлетворяет условию.

Масса меди независимой обмотки возбуждения

$$m_{MB} = 8,9 \cdot 10^3 L_B q_B = 8,9 \cdot 10^3 \cdot 2831 \cdot 0,396 \cdot 10^{-6} = 9,98 \text{ кг.}$$

Параметры обмотки возбуждения представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Параметры обмотки возбуждения

Марка провода	Ширина катушки, мм	Высота катушки, мм	Сечение провода, мм ²	Диаметр изолированного провода, мм	Диаметр голого провода, мм	Число витков	Полная длина обмотки, м	Масса меди обмотки, кг
ПЭТВ	30	40	0,396	0,77	0,71	1477	2831	9,98

5. РАСЧЕТ ЩЕТОК И КОЛЛЕКТОРА

Для простой волновой обмотки ширину щетки $b_{щ}$ рекомендуется выбирать в пределах $(2 \div 4) t_k$. Принимаем

$$b_{щ} = 4 t_k = 4 \cdot 3,76 \cdot 10^{-3} = 15,04 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

В двигателях со средними и затрудненными условиями коммутации применяются щетки марки ЭГ14, с плотностью тока $J_{щ} = 11 \text{ А/см}^2$. Стандартные размеры по ГОСТ 12232.1-71 $b_{щ}$, $l_{щ}$, $h_{щ}$ выбираем из [4, табл. 11.1], мм,

$$b_{щ} \cdot l_{щ} \cdot h_{щ} = 16 \cdot 32 \cdot 40.$$

Ширина щетки $b_{щ}$ определяет ширину зоны коммутации $b_{зк}$, т. е. ширину дуги окружности поверхности якоря, в границах которой находятся коммутируемые секции, м,

$$b_{зк} = \left(\frac{b_{щ}}{t_k} + u_n - \frac{a}{p} + \varepsilon_k \right) t_k \frac{D}{D_k},$$

где ε_k – укорочение обмотки якоря в коллекторных делениях принимается всегда со знаком плюс

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z} = \frac{3,14 \cdot 180}{39} = 14,49 \text{ мм}$$

Тогда ширина зоны коммутации

$$b_{зк} = \left(\frac{16 \cdot 10^{-3}}{3,76 \cdot 10^{-3}} + 3 - 0,5 + 0,25 \right) 3,76 \cdot 10^{-3} \frac{0,18}{0,14} = 33,83 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Отношение $b_{зк}/(\tau - b_p)$ не должно превышать $0,55 \div 0,7$, где верхние границы этого отношения относятся к машинам с диаметром якоря до 0,2 м, а нижние значения принимаются при диаметрах якоря более 0,4 м.

При выбранных размерах щеток это отношение составит

$$\frac{b_{зк}}{\tau - b_p} = \frac{33,83 \cdot 10^{-3}}{141 \cdot 10^{-3} - 88 \cdot 10^{-3}} = 0,63$$

Поверхность соприкосновения щетки с коллектором $S_{щ}$, м^2 ,

$$S_{\text{щ}} = b_{\text{щ}} l_{\text{щ}} = 16 \cdot 10^{-3} \cdot 32 \cdot 10^{-3} = 5,12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Число щеток на один щеточный болт

$$N_{\text{щ}} = \frac{I_{\text{н}}}{\rho S_{\text{щ}} J_{\text{щ}}} = \frac{48,33}{2 \cdot 5,12 \cdot 10^{-4} \cdot 11 \cdot 10^4} = 0,429$$

Принимаем $N_{\text{щ}} = 1$, и тогда поверхность соприкосновения всех щеток с коллектором

$$\alpha S_{\text{щ}} = 2\rho N_{\text{щ}} S_{\text{щ}} = 4 \cdot 1 \cdot 5,12 \cdot 10^{-4} = 20,48 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Действительная плотность тока под щетками

$$J_{\text{щ}} = \frac{2I_{\text{н}}}{\sum S_{\text{щ}}} = \frac{2 \cdot 48,3}{20,48 \cdot 10^{-4}} = 4,72 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$$

Активная длина коллектора

$$l_{\text{к}} = N_{\text{щ}} (l_{\text{щ}} + 8 \cdot 10^{-3}) + 10 \cdot 10^{-3} = 1 (32 \cdot 10^{-3} + 8 \cdot 10^{-3}) + 10 \cdot 10^{-3} = 50 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Параметры щеток и коллектора двигателя сводим в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Параметры щеток и коллектора

Размеры щеток			Отношение $\frac{b_{\text{зк}}}{\tau - b_{\text{р}}}$	Число щеток на болт	Плотность тока, А/м ²	Длина коллектора, мм
ширина, мм	длина, мм	высота, мм				
16	32	40	0,63	1	$4,72 \cdot 10^4$	50

6. РАСЧЕТ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

Сердечник добавочных полюсов собирается из штампованных листов анизотропной электротехнической стали 3411 (при диаметре якоря менее 0,16 м из стали Ст.3) толщиной 1 мм и прямоугольной формы поперечного сечения (рис. 6.1).

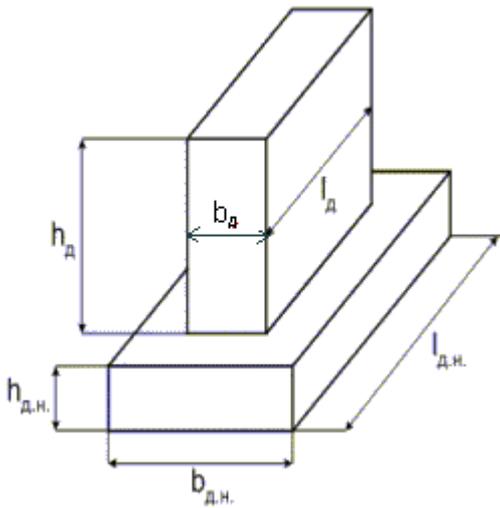


Рис. 6.1. Форма сечения добавочного полюса

Магнитодвижущая сила, A , обмотки добавочных полюсов для машин постоянного тока без компенсационной обмотки определяется выражением

$$F_d = (1,2 \div 1,4) A \frac{\tau}{2}$$

Принимаем

$$F_d = 1,3 A \frac{\tau}{2} = 1,3 \cdot 22653 \cdot 0,141 \cdot 0,5 = 2076 \text{ A}$$

Число витков обмотки на один добавочный полюс

$$W_d = \frac{F_d a_d}{I}$$

где a_d – число параллельных ветвей обмотки добавочного полюса, $a_d = 1$ (при токе в якоре $I \leq 1000 \text{ A}$),

$$W_d = \frac{2076 \cdot 1}{46,9} = 44,26; W_d = 44$$

Предварительное сечение обмотки добавочных полюсов, м^2 ,

$$q_d = \frac{I}{a_d J_d}$$

где J_d – среднее значение плотности тока при исполнении IP44, $J_d = (2 \div 3) \cdot 10^6 \text{ A}/\text{м}^2$,

$$q_d = \frac{46,9}{1 \cdot 3 \cdot 10^6} = 15,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

В соответствии с рекомендациями [1] при $q_d \geq 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ обмотку добавочных полюсов выполняют из провода прямоугольного сечения марки ПСД (изолированный двухслойной обмоткой стекловолокном с подклейкой и пропиткой каждого слоя нагревостойким лаком) с соотношением сторон $1,4 \div 1,8$.

Размеры провода выбираем по [4, табл. 2.5]. Номинальный размер проволоки по большей стороне $b = 5 \text{ мм}$, по меньшей стороне $a = 3,35 \text{ мм}$, расчетное сечение $q'_d = 16,2 \text{ мм}^2$, что больше предварительно принятого сечения обмотки добавочных полюсов $q_d = 15,6 \text{ мм}^2$.

Изоляция обмотки добавочных полюсов аналогична изоляции обмотки главных полюсов (см. рис. 4.1 и табл. 4.1). Размещение полюсов представлено на рис. 4.2.

При диаметре якоря $D > 0,132 \text{ м}$ длина сердечника добавочного полюса равна длине якоря

$$l_d = l_a = 0,146 \text{ м.}$$

Средняя длина витка обмотки добавочного полюса, м,

$$l_{d\text{-ср}} = 2 (b_d + l_d) + \pi (b_{\text{кт.д}} + 2 \Delta_{\text{из}}),$$

где b_d – ширина добавочного полюса, принимается в зависимости от диаметра якоря по [4, рис. 12.1], $b_d = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $b_{\text{кт.д}}$ – ширина катушки добавочного полюса, $b_{\text{кт.д}} = 1,6 b_d = 1,6 \cdot 9 \cdot 10^{-3} = 14,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\Delta_{\text{из}}$ – односторонний размер зазора между сердечником добавочного полюса и катушкой с учетом изоляции сердечника, $\Delta_{\text{из}} = (1,7 \div 2,2) 10^{-3} \text{ м}$ при диаметре якоря до $0,5 \text{ м}$,

$$l_{d\text{-ср}} = 2 (9 \cdot 10^{-3} + 146 \cdot 10^{-3}) + \pi (14,4 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3}) = 375,76 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Полная длина проводников обмотки дополнительного полюса

$$L_d = 2p l_{d\text{-ср}} W_d = 2 \cdot 2 \cdot 375,76 \cdot 10^{-3} \cdot 44 = 64,63 \text{ м.}$$

Сопротивление обмотки добавочных полюсов при температуре 20° C

$$R_{д} = \frac{L_{д}}{57 \cdot 10^6 a_{д}^2 q_{д}} = \frac{64,63}{57 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 16,2 \cdot 10^{-6}} = 0,07 \text{ Ом}$$

Сопротивление обмотки добавочных полюсов при температуре 115 ° С

$$R_{д 115} = 1,39 R_{д} = 1,39 \cdot 0,07 = 0,097 \text{ Ом.}$$

Масса меди обмотки дополнительных полюсов

$$m_{д} = 8900 L_{д} q'_{д} = 8900 \cdot 64,63 \cdot 16,2 \cdot 10^{-6} = 9,26 \text{ кг.}$$

Параметры добавочных полюсов приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Параметры добавочных полюсов

Марка стали и толщина, мм	Марка провода	Число витков	Сечение прямоугольное, мм ²	Размеры провода		Длина обмотки, м	Сопротивление при t = 115 ° С, Ом	Масса меди, кг
				b, мм	a, мм			
4311 Δ = 1 мм	ПСД	43	16,2	5	3,35	64,63	0,097	9,26

7. Расчет потерь и коэффициента полезного действия двигателя постоянного тока

В машинах постоянного тока различают основные и добавочные потери. Если основные потери связаны с электромагнитными и механическими процессами в двигателе, то добавочные потери являются результатом дополнительных процессов.

Электрические потери в обмотке якоря

$$P_{ма} = I^2 R_a = 46,9^2 \cdot 0,303 = 666,48 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в обмотке добавочных полюсов

$$P_{мд} = I^2 R_{д115} = 46,9^2 \cdot 0,097 = 213,36 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в независимой обмотке возбуждения

$$P_{м.в} = U_{в} I_{вн} = 220 \cdot 1,19 = 261,8 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в переходном контакте щеток на коллекторе

$$P_{э.щ} = 2 \Delta U_{щ} I,$$

где $2\Delta U_{щ}$ – переходное падение напряжения на пару щеток марки ЭГ14 при рекомендуемой плотности тока выбираем по [1, табл. П-35]. С учетом действительной плотности тока $J_{щ} = 4,72 \cdot 10^{-4} \text{ A/m}^2$ принимаем $2 \Delta U_{щ} = 2,5 \text{ В}$,

$$P_{э.щ} = 2,5 \cdot 46,9 = 117,25 \text{ Вт.}$$

Потери на трение щеток о коллектор, Вт,

$$P_{т.щ} = \alpha S_{щ} p_{щ} f V_k,$$

где $p_{щ}$ – давление на щетку выбираем по [1, табл. П-35]. Для щетки марки ЭГ14 $p_{щ} = 3 \cdot 10^4 \text{ Па}$; f – коэффициент трения, $f = 0,2$,

$$P_{т.щ} = 20,48 \cdot 3 \cdot 10^4 \cdot 0,2 \cdot 21,98 = 270 \text{ Вт.}$$

Суммарные механические потери, Вт,

$$P_{мех} = P_{т.щ} + P_{вен} + P_{тп},$$

где $P_{вен} + P_{тп}$ – потери на вентиляцию и трение в подшипниках, определяем по [4, рис.13.1] для машин с вентиляторами, установленными на валу машины (семейство кривых), $P_{вен} + P_{тп} = 0,4 \text{ кВт}$,

$$P_{мех} = 270 + 400 = 670 \text{ Вт.}$$

Масса стали спинки якоря

$$m_j = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\pi [(D - 2h_n)^2 - D_0^2]}{4} \ell_{ca} = 7,8 \cdot 10^3 \times \\ \times \frac{3,14 \left[(180 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 26,5 \cdot 10^{-3})^2 - (49,6 \cdot 10^{-3})^2 \right]}{4} 138,7 \cdot 10^{-3} = 1,16 \text{ кг}$$

Масса стали зубцов якоря с овальными пазми

$$m_z = 7800 Z b_z \left[h_1 + \frac{(r_1 + r_2)}{2} \right] \ell_{ca} = 7800 \cdot 39 \cdot 5,9 \cdot 10^{-3} \times \\ \times \left[19,432 \cdot 10^{-3} + \frac{(3,916 \cdot 10^{-3} + 2,352 \cdot 10^{-3})}{2} \right] 138,7 \cdot 10^{-3} = 5,618 \text{ кг.}$$

Магнитные потери в спинке якоря, Вт,

$$P_j = m_j p_j,$$

где p_j – удельные потери в спинке якоря, Вт/кг, и определяются выражением

$$p_j = 2,3 p_{10/50} \left(\frac{f}{50} \right)^\beta B_j^2,$$

где $p_{10/50}$ – удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции 1 Тл, $p_{10/50} = 1,75$ Вт/кг; β – показатель степени и зависит от марки стали, $\beta = 1,4$ [прил. В, табл. В-6].

$$p_j = 2,3 \cdot 1,75 \left(\frac{100}{50} \right)^{1,4} 0,675^2 = 7,33 \text{ Вт / кг}$$

Тогда магнитные потери в спинке якоря

$$P_j = 11,6 \cdot 4,84 = 56,144 \text{ Вт.}$$

Магнитные потери в зубцах якоря, Вт,

$$P_z = m_z p_z,$$

где p_z – удельные потери в зубцах якоря, определяем из выражения,

$$p_z = 2,3 p_{10/50} \left(\frac{f}{50} \right)^\beta B_z^2 = 2,3 \cdot 1,75 \left(\frac{100}{50} \right)^{1,4} 1,432^2 = 21,78 \text{ Вт / кг}$$

а магнитные потери в зубцах якоря

$$P_z = 5,618 \cdot 21,78 = 122,36 \text{ Вт.}$$

Добавочные потери, Вт, определяем как

$$P_{\text{доб}} = 0,01 U_n I_n,$$

где I_n – номинальный ток двигателя постоянного тока, А,

$$I_n = I + I_{\text{вн}} = 46,9 + 1,19 = 48,09 \text{ А,}$$

а добавочные потери

$$P_{\text{доб}} = 0,01 \cdot 440 \cdot 48,09 = 211,6 \text{ Вт.}$$

Сумма потерь

$$\alpha P = P_{м.а} + P_{м.д} + P_{м.в} + P_{э.щ} + P_{т.щ} + P_{вен} + P_{т.п} + \\ + P_j + P_z + P_{доб} = 666,48 + 213,36 + 261,8 + 117,7 + 270 + \\ + 400 + 56,14 + 122,36 + 211,6 = 2318,9 \text{ Вт.}$$

Потери холостого хода

$$P_0 = P_j + P_z + (P_{т.п} + P_{вен}) + P_{т.щ} = 56,14 + 122,36 + 400 + 270 = 848,5 \text{ Вт.}$$

Мощность, потребляемая двигателем постоянного тока,

$$P_1 = P_H + \alpha P = 18500 + 2318,9 = 20819 \text{ Вт.}$$

Номинальный ток, потребляемый двигателем,

$$I_{1н} = \frac{P_1}{U_H} = \frac{20819}{440} = 47,47 \text{ А}$$

Номинальный ток в обмотке якоря

$$I_{ан} = I_{1н} - I_{вн} = 47,47 - 1,19 = 46,28 \text{ А,}$$

что соответствует предварительно выбранному току якоря 46,9 А.

Коэффициент полезного действия двигателя постоянного тока

$$\eta = \frac{P_H}{P_H + \sum P} 100 = \frac{18500}{18500 + 2318,9} 100 = 88,56 \%$$

Данные расчета потерь в двигателе постоянного тока сведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Потери и коэффициент полезного действия двигателя

Электрические потери, Вт	Механические потери, Вт	Магнитные потери в стали, Вт	Добавочные потери, Вт	Суммарные потери, Вт	Потери холостого хода, Вт	Коэффициент полезного действия, %	Потребляемая мощность, Вт	Масса	
								Спинка якоря, кг	Зубцы якоря, кг
<u>1235,44</u> 51,7 %	<u>670</u> 28 %	<u>270,49</u> 11,3 %	<u>211,6</u> 8,8 %	2318,9	<u>848,5</u> 36,6 %	88,56	20819	11,6	5,618

Примечание. В знаменателе указана доля этих потерь от суммарных.

8. РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ

Для построения рабочих характеристик двигателя независимого возбуждения $n, M, I_1, P_{1\eta} = f(P_2)$ при $U_H = 440$ В и токе возбуждения $I_B = I_{BH}$ полагаем, что потери холостого хода P_0 не зависят от нагрузки.

Мдс реакции якоря изменяется пропорционально току якоря

$$F_{qd} = F_{qdn} \frac{I_a}{I_{ан}},$$

где F_{qdn} – мдс реакции якоря при номинальной нагрузке, А, определяется по рис. 3.1, $F_{qdn} = 120$ А.

Эдс обмотки якоря при номинальном токе

$$\begin{aligned} E_H &= U_H - I_{ан}(R_a + R_d) - 2 \Delta U_{щ} = \\ &= 440 - 46,28(0,303 + 0,097) - 2,5 = 418,99 \text{ В.} \end{aligned}$$

Номинальный магнитный поток в воздушном зазоре

$$\Phi_{\delta H} = \frac{60 a E_H}{PN n_0} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 418,99}{2 \cdot 546 \cdot 3000} = 0,768 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$$

По характеристике холостого хода (см. рис. 3.1) определяем результирующую мдс обмотки возбуждения $F\alpha$ на полюс при $\Phi_{\delta H}$

$$\Phi_{\delta H} = 0,768 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}; B_{\delta H} = 0,59 \text{ Тл}; F\alpha = 1760 \text{ А.}$$

Мдс обмотки возбуждения при номинальной нагрузке

$$F_{BH} = F\alpha + F_{qdn} = 1760 + 120 = 1880 \text{ А.}$$

Номинальный ток возбуждения

$$I_{BH} = \frac{F_{BH}}{W_B} = \frac{1880}{1477} = 1,27 \text{ А}$$

Номинальный ток двигателя

$$I_{1H} = I_{ан} + I_{BH} = 46,28 + 1,27 = 47,55 \text{ А.}$$

Потребляемая мощность при номинальной нагрузке

$$P_{1H} = U_H \cdot I_{1H} = 440 \cdot 47,55 = 20922 \text{ Вт.}$$

Полезная мощность на валу двигателя при номинальной нагрузке

$$P_{2н} = E_{н I_{1н}} - P_0 - P_{доб} = 418,99 \cdot 47,55 - 848,5 - 211,6 = 18886 \text{ Вт.}$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_{2н}}{P_{1н}} 100 = \frac{18886}{20922} 100 = 90,2 \%$$

Вращающий (полезный) момент на валу двигателя

$$M_{н} = 9,57 \frac{P_{2н}}{n_{н}} = 9,57 \frac{18886}{3000} = 60 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Частота вращения двигателя при любой нагрузке определяется выражением

$$n = \frac{60aE}{PN\Phi_{\delta}}$$

Аналогичным образом проводим расчет рабочих характеристик двигателя для значений тока якоря $0,1 I_{ан}$; $0,25 I_{ан}$; $0,5 I_{ан}$; $0,75 I_{ан}$; $1,25 I_{ан}$ (при наличии программы на ЭВМ). Для каждого значения тока якоря определяем по вышеизложенной методике F_{qd} , E , Φ_{δ} , F_{α} , $F_{в}$, n , I_1 , P_1 , P_2 , M и η , а результаты расчета сводим в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Рабочие характеристики двигателя постоянного тока

Расчетные параметры	Обозначения	Ток якоря, А					
		0,1 I _{ан}	0,25 I _{ан}	0,5 I _{ан}	0,75 I _{ан}	1,0 I _{ан}	1,25 I _{ан}
		4,63	11,57	23,14	34,71	46,28	57,28
Ток возбуждения, А	I _в	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
Эдс якоря, В	E	436,15	433,37	428,74	424,11	418,99	415,08
Мдс реакции якоря, А	F _{qd}	12	30	60	90	120	150
Магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл	B _б	0,637	0,633	0,626	0,619	0,592	0,59
Магнитный поток в воздушном зазоре, Вб	Φ _б	0,796 · 10 ⁻²	0,792 · 10 ⁻²	0,787 · 10 ⁻²	0,774 · 10 ⁻²	0,768 · 10 ⁻²	0,758 · 10 ⁻²
Мдс результирующая, А	F _α	2080	2000	1960	1870	1760	1720
Мдс обмотки возбуждения, А	F _{вн}	2092	2030	2020	1960	1880	1870
Частота вращения, об/мин	n	3007	3006	3007	3008	3000	3008
Ток двигателя, А	I ₁	5,996	12,936	24,504	36,07	47,55	58,64
Потребляемая мощность, Вт	P ₁	2638	5692	10782	15871	20922	25801
Полезная мощность, Вт	P ₂	1463	4454	9354	14146	18886	23188
Вращающий момент, Н·м	M	4,656	14,18	29,77	45	60	73,77
Коэффициент полезного действия, %	η	55,4	78,2	86,7	89,1	90,2	89,8

По данным табл. 8.1 строим графики рабочих характеристик двигателя и уточняем при номинальной мощности P_н номинальные значения тока I_н, частоты вращения n_н, полезного момента M_н и коэффициента полезного действия η_н (рис. 8.1).

В результате расчета и построения рабочих характеристик двигателя определим параметры номинального режима:

- номинальную мощность $P_H = 18,5$ кВт;
- полезный момент $M_H = 59$ Н·м;
- номинальный ток $I_H = 47,5$ А;
- потребляемую мощность $P_{1H} = 21$ кВт;
- коэффициент полезного действия $\eta = 84,5$ %;
- номинальный ток возбуждения $I_{BH} = 1,27$ А;
- номинальный ток якоря $I_{aH} = 46,23$ А;
- номинальную частоту вращения $n_H = 3000$ об/мин.

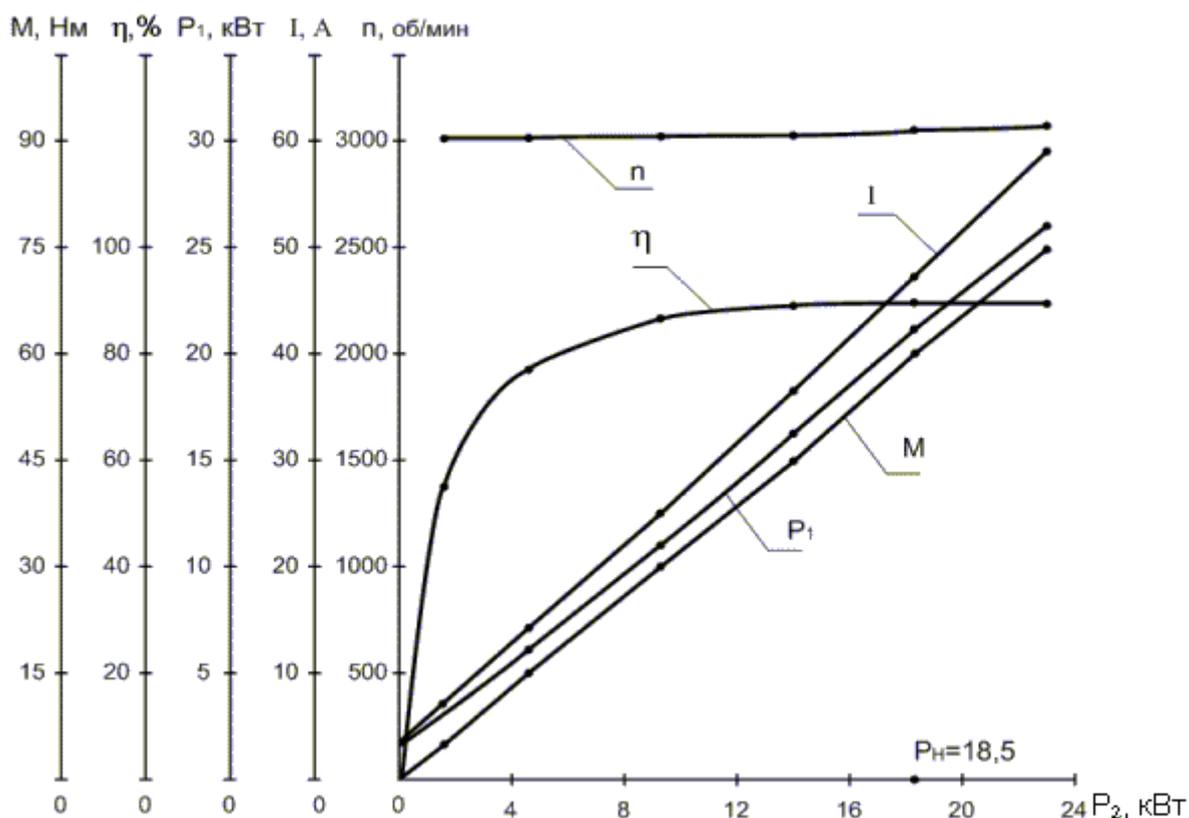


Рис. 8.1. Рабочие характеристики двигателя постоянного независимого возбуждения ($\eta = 84,5$ %; $I_H = 47,5$ А; $P_H = 21$ кВт; $M_H = 59$ Н·м; $n_H = 3000$ об/мин)

9. РАСЧЕТ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЙ ОБМОТКИ

На главных полюсах машин постоянного тока, кроме обмотки параллельного или независимого возбуждения, с целью повышения устойчивости двигателя и частичной компенсации поперечной реакции якоря устанавливают стабилизирующую обмотку, которая соединяется последовательно с обмоткой якоря и обмоткой дополнительных полюсов.

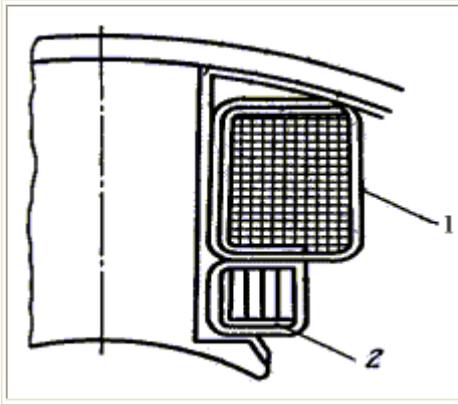


Рис. 9.1. Расположение обмоток возбуждения: 1 – параллельная или независимая; 2 – стабилизирующая

Конструктивно последовательную обмотку возбуждения располагают или у полюсного наконечника, или между секциями катушек главных полюсов. При высоте оси вращения до 200 мм [3] принимается первый вариант (рис. 9.1).

Мдс стабилизирующей обмотки, А,

$$F_c \approx F_{qдн} = W_c \frac{I_{ан}}{a_c},$$

где a_c – число параллельных ветвей стабилизирующей обмотки, $a_c = 1$;
 W_c – число витков стабилизирующей обмотки

$$W_c = \frac{F_{qдн}}{I_{ан}} = \frac{120}{46,23} = 2,6$$

Принимая $W_c = 3$, получим мдс стабилизирующей обмотки

$$F_c = 3 \cdot 46,23 = 138,69 \text{ А.}$$

Мдс обмотки возбуждения

$$F_B = F_\alpha + F_{qдн} - F_c = 1710 + 120 - 138,69 = 1741,3 \text{ А.}$$

Принимаем сечение провода обмотки независимого возбуждения, как в вариантах без стабилизирующей обмотки

$$q_B = 0,396 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; d = 0,71 \cdot 10^{-3} \text{ м}; d_{из} = 0,77 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

при плотности тока $J_B = 3 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

Число витков на полюс обмотки независимого возбуждения

$$W_B = \frac{F_B}{J_B q_B} = \frac{1741,3}{3 \cdot 10^6 \cdot 0,396 \cdot 10^{-6}} = 1466$$

Полная длина обмотки возбуждения

$$L_B = 2p l_{в.ср} W_B = 4 \cdot 479,21 \cdot 10^{-3} \cdot 1466 = 2810 \text{ м.}$$

Сопротивление обмотки возбуждения при температуре $\theta = 20^\circ \text{C}$

$$R_B = \frac{L_B}{57 \cdot 10^6 q_B} = \frac{2810}{57 \cdot 10^6 \cdot 0,396 \cdot 10^{-6}} = 124,5 \text{ Ом}$$

Сопротивление обмотки возбуждения при температуре $\theta = 115^\circ \text{C}$

$$R_{BH} = m \cdot R_B = 1,39 \cdot 124,5173 \text{ Ом.}$$

Длина витка стабилизирующей обмотки

$$l_c \approx l_{в.ср} = 0,4792 \text{ м.}$$

Полная длина стабилизирующей обмотки

$$L_c = 2p W_c l_c = 4 \cdot 3 \cdot 0,4792 = 5,75 \text{ м.}$$

Размеры и сечение проводников стабилизирующей обмотки принимаем, как и обмотки добавочных полюсов. Номинальный размер провода по большей стороне $b = 5 \text{ мм}$, по меньшей стороне $a = 3,35 \text{ мм}$, расчетное сечение $= 16,2 \text{ мм}^2$.

Сопротивление стабилизирующей обмотки при температуре $\theta = 20^\circ \text{C}$

$$R_c = \frac{L_c}{57 \cdot 10^6 q_c} = \frac{5,75}{57 \cdot 10^6 \cdot 16,2 \cdot 10^{-6}} = 0,0062 \text{ Ом}$$

Сопротивление стабилизирующей обмотки при температуре $\theta = 115^\circ \text{C}$

$$R_{CH} = 1,39 R_c = 1,39 \cdot 0,0062 = 0,0086 \text{ Ом.}$$

ЭДС якоря при номинальной нагрузке

$$E_H = U_H - I_{ан} (R_a + R_d + R_{CH}) - 2\Delta U_{щ} = 440 - 46,23 \cdot (0,303 + 0,097 + 0,0086) - 2,5 = 418,6 \text{ В.}$$

Магнитный поток в воздушном зазоре при номинальной нагрузке

$$\Phi_{\delta H} = \frac{60 E_H}{p N n_H} = \frac{60 \cdot 418,6}{2 \cdot 546 \cdot 3000} = 0,767 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$$

По характеристике холостого хода (см. рис. 3.1) определяем результирующую мдс обмотки возбуждения F_{α} на полюс при

$$\Phi_{\text{бн}} = 0,767 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}; B_{\text{бн}} = 0,588 \text{ Тл}; F_{\alpha} = 1745 \text{ А.}$$

Мдс обмотки возбуждения при номинальной нагрузке

$$F_{\text{в}} = F_{\alpha} + F_{\text{адн}} - F_{\text{с}} = 1745 + 120 - 138,69 = 1726,3 \text{ А.}$$

Номинальный ток возбуждения

$$I_{\text{вн}} = \frac{F_{\text{в}}}{W_{\text{в}}} = \frac{1726,3}{1466} = 1,177 \text{ А}$$

Параметры стабилизирующей обмотки сведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Параметры стабилизирующей обмотки

Число витков	Длина обмотки, м	Сопротивление, Ом	Номинальный ток возбуждения, А	Размеры провода		
				b, мм	a, мм	, мм ²
3	5,75	0,0086	1,177	5	3,35	16,2

Рабочие характеристики двигателя со стабилизирующей обмоткой рассчитываются аналогичным образом, сводятся в табличную форму и представляются в виде графиков. По результатам сравнения делают вывод о влиянии стабилизирующей обмотки на характеристики двигателя постоянного тока.

10. ОФОРМЛЕНИЕ РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ И ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПРОЕКТА

Оформление пояснительной записки. Пояснительная записка является текстовым документом проекта и включает описание проектируемого устройства с обоснованием технических решений, а содержание и оформление ее должно отвечать требованиям Единой системы конструкторской документации, которые регламентируются ГОСТ 2.105-95 “Общие требования к текстовым документам”.

Оформление пояснительной записки может быть выполнено на пишущей машинке шрифтом высотой не менее 2,5 мм (лента черного цвета), рукописным чертежным шрифтом по ГОСТ 2.304-81 высотой букв и цифр не менее 2,5 мм тушью (чернилами или пастой) черного цвета или в

компьютерной верстке в редакторе “Word” 14-м кеглем через 1,2 интервала шрифтом Arial Cyr.

Пояснительную записку выполняют на одной стороне белой нелинованной бумаги формата А4 (210 • 297) с рамкой. Расстояние от края страницы до линии рамки слева 20 мм, а справа, снизу и сверху – 5 мм.

На первом текстовом листе выполняют основную надпись (штамп) по форме 2 ГОСТ 2.104-68 (рис. 10.1), а на всех последующих листах – по форме 2а (рис. 10.2).

Расстояние от рамки до границ текста в начале и в конце строк – не менее 3 мм, а от рамки до верхней или нижней строки текста – не менее 10 мм.

Абзацный отступ должен быть одинаковым для всего текста и равняться 15–17 мм (пять знаков).

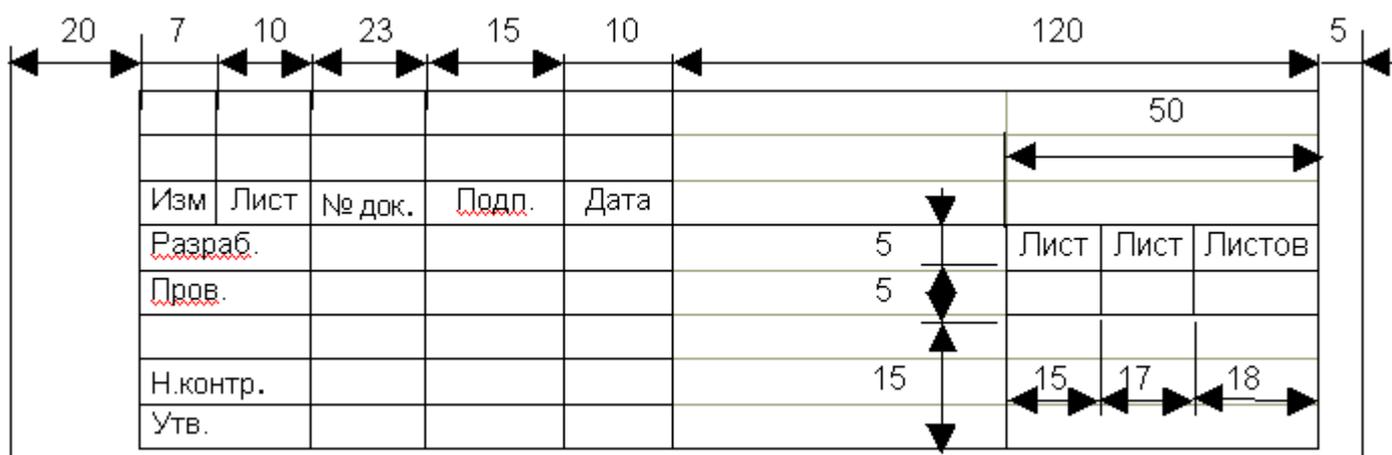


Рис. 10.1. Основная надпись первого текстового листа (форма 2 ГОСТ 2.104-68)

Расстояние между заголовком и текстом должно составлять 15 мм (2,4 интервала при компьютерной верстке). Расстояние между заголовками раздела и подраздела, а также между строками текста 8–10 мм (1,2 интервала).

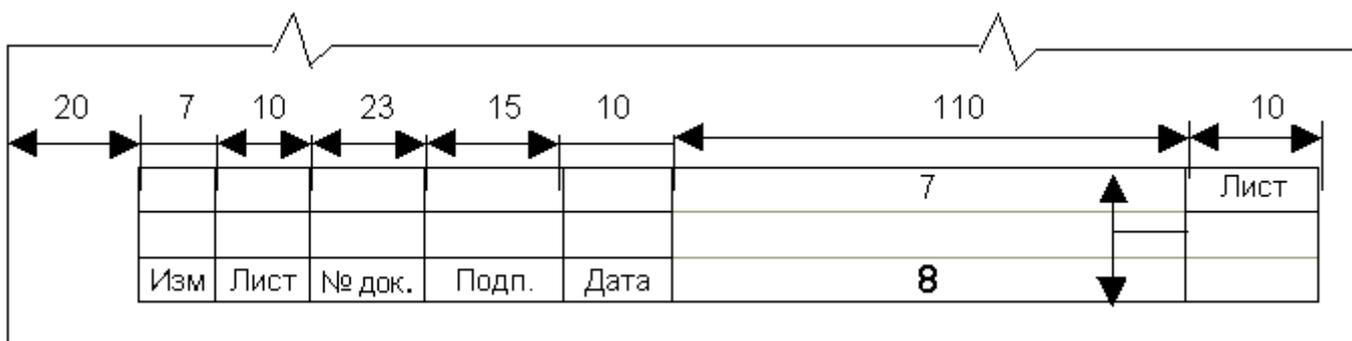


Рис. 10.2. Основная надпись для всех последующих листов пояснительной записки (форма 2а ГОСТ 2.104-68)

Пример выполнения листа текстового документа приводится в прил. А.

Структура пояснительной записки. Первым листом пояснительной записки является *титульный*, в котором приводится полное наименование проектируемой электрической машины (прил. Б). Далее следуют *содержание*, включающее наименования разделов с указанием номеров страниц, и введение, отражающее общее состояние вопроса. Первые три листа **не нумеруются**.

Нумерация текста пояснительной записки начинается со страницы 4 и должна быть сквозной. При необходимости текст разделяют на разделы и подразделы. Разделы должны иметь порядковые номера, обозначенные арабскими цифрами без точки и записанные с абзацного отступа. Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой. В конце номера подраздела точка не ставится.

Разделы и подразделы должны иметь заголовки, которые следует писать строчными буквами (кроме первой прописной) без точки в конце. Переносы слов в заголовках *не допускаются*

В конце текстового документа приводится список литературы. Выполнение списка и ссылки на него в тексте – по ГОСТ 7.1-84 “Библиографическое описание документа”. Список литературы включают в содержание пояснительной записки.

Изложение текста и расчеты. При изложении текста должны применяться научно-технические термины, обозначения и определения, установленные соответствующими стандартами, а при их отсутствии – общепринятые в научно-технической литературе.

Условные буквенные обозначения, изображения или знаки должны соответствовать принятым в действующем и государственных стандартах.

Применение в одном документе разных систем обозначения физических величин не допускается. Единица физической величины одного и того же параметра в пределах документа должна быть постоянной. Не допустимо отделять единицу физической величины от числового значения (переносить на разные строки или страницы), кроме единиц физических величин в таблицах. Между последней цифрой числа и обозначением единицы физической величины следует оставлять пробел.

Числовые значения параметров следует указывать с тремя знаками после запятой, а дробные числа необходимо приводить в виде десятичных дробей.

Уравнения для расчета должны быть представлены сначала в общем виде (в буквенном обозначении) со ссылкой на литературный источник. Формулы

выносятся ниже строки с текстом симметрично левой и правой границ текста, а в качестве символов следует применять обозначения, установленные стандартами.

Пояснения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, если они не пояснены ранее в тексте, должны быть приведены непосредственно под формулой. Пояснение каждого символа следует давать с новой строки в той последовательности, в которой символы приведены в формуле (прил. А).

Формулы, следующие одна за другой и не разделенные текстом, разделяют запятой.

После расшифровки символов подставляются числовые значения физических величин и приводится окончательный ответ.

Переносить формулы на следующую строку допускается только на знаках выполняемых операций, причем знак в начале следующей строки повторяют, а при переносе формулы на знаке умножения применяют знак “?”.

Формулы должны нумероваться сквозной нумерацией арабскими цифрами, которые записывают на уровне формулы справа в круглых скобках в пределах границы текста (прил. А). Допускается нумерация формул в пределах раздела, в этом случае номер формулы состоит из номера раздела и порядкового номера формулы, разделенных точкой.

Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в круглых скобках, а ссылки на литературные источники должны приводиться по тексту в квадратных скобках. Арабскими цифрами пишут номер источника в соответствии с перечнем использованной литературы, например [2].

Ссылаться следует на документ в целом или его разделы и приложения. Ссылка на подразделы, пункты, таблицы и иллюстрации не допускается, за исключением подразделов, пунктов, таблиц и иллюстраций данного документа.

Таблицы и иллюстрации. Цифровой материал оформляют в виде таблицы, которую размещают под текстом со ссылкой на эту таблицу, или на следующей странице.

Название таблицы должно отражать ее содержание и помещаться над таблицей после номера таблицы (прил. А). Таблицы нумеруются арабскими цифрами. Допускается нумерация таблиц в пределах раздела, и в этом случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой.

Высота строк таблицы должна быть не менее 8 мм.

Заголовки граф и строк следует писать с прописной буквы, а подзаголовки граф – со строчной буквы, если они составляют одно предложение с заголовком, или с прописной буквы, если имеют самостоятельное значение. В конце заголовков и подзаголовков таблиц точки не ставят.

Для сокращения текста заголовков и подзаголовков граф отдельные понятия заменяют буквенными обозначениями, если они пояснены в тексте или приведены на иллюстрациях.

При отсутствии отдельных данных в таблице следует ставить прочерк (тире).

Цифры в графах таблиц располагают так, чтобы разряды чисел во всей графе были расположены один под другим, если они относятся к одному показателю. В одной графе, как правило, должно быть соблюдено одинаковое количество десятичных знаков для всех значений величин.

Иллюстрации (расчетные схемы и эскизы) выполняют карандашом (пастой, тушью) черного цвета в масштабе, обеспечивающем четкое представление о проектируемой электрической машине.

Количество иллюстраций должно быть достаточным для пояснения излагаемого текста. Располагают иллюстрации как по тексту (возможно ближе к соответствующим частям текста), так и в конце его. Вклеивание иллюстраций, вырезанных из научно-технической литературы или выполненных калькированием, недопустимо.

Иллюстрации нумеруют арабскими цифрами сквозной нумерацией и обозначают “Рисунок 1”, а при нумерации в пределах раздела – “Рисунок 1.2”. При необходимости иллюстрации могут иметь наименование и пояснительные данные (подрисуночный текст). Слово “Рисунок” и наименование помещают после пояснительного текста.

Например: Рисунок 5 – Каркас обмотки трансформатора.

Графики, приложения и список литературы. Графики функциональных зависимостей допускается выполнять без шкал значений величин, где оси координат следует заканчивать стрелками, а обозначения размещать вблизи стрелки.

Графики должны иметь координатную сетку. Оси координат выполняют сплошными линиями, а линии координатной сетки – тонкими сплошными линиями.

Иллюстративный материал, дополняющий текст, таблицы большого формата или текст вспомогательного характера допускается давать в виде приложения.

Приложения оформляют как продолжение документа на последующих его листах или выпускают в виде самостоятельного документа. Приложения располагают в порядке ссылок на них в тексте.

Каждое приложение следует начинать с новой страницы с указанием наверху посередине страницы слова "Приложение" и его обозначения, а под ним в скобках для обязательного приложения пишут слово "обязательное", а для информационного – "справочное". Приложение должно иметь заголовок, который записывают симметрично относительно текста с прописной буквы отдельной строкой. Приложение обозначают заглавными буквами русского алфавита, начиная с А, за исключением букв Е, З, Й, О, Ч, Ъ, Ы, Ь.

Список литературы (библиографический список) в курсовом проекте составляется по мере ссылок на источники. Список литературы следует размещать в конце пояснительной записки перед приложением.

Графическая часть проекта. Этот раздел проекта выполняется карандашом согласно государственным стандартам на формате А2 и должен содержать две проекции двигателя постоянного тока (прил. Г) с указанием габаритных и расчетных размеров, а также способа крепления двигателя на месте установки. Кроме того, необходимо представить продольный и поперечный разрезы двигателя постоянного тока с указанием размеров и расположения обмоток главных и добавочных полюсов. На чертеже необходимо привести спецификацию элементов двигателя с указанием марки стали, типа провода и др. параметров по соответствующим государственным стандартам.

Чертеж выполняется в масштабе 5:1, 4:1, 2.5:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:2.5.

15-17

1 Выбор магнитопровода трансформатора

1.1 Расчетная мощность _____

5

15

10

5

Конструкция магнитопровода выбирается на основе расчетной мощности трансформатора S_p , ВА, которая при суммарной мощности во вторичных обмотках до 100 ВА, определяется выражением

$$S_p = \frac{1}{2}(S_2 + S_3) \left(1 + \frac{1}{\eta}\right), \text{ ВА} \quad (1.1)$$

10

где $\eta = 0,79$ – коэффициент полезного действия трансформатора принимается в соответствии с [8].

Подставляя принятое значение в (1.1), получим

$$S_p = \frac{1}{2}(30 + 15) \left(1 + \frac{1}{0,79}\right) = 51 \text{ ВА.}$$

На основании рекомендаций [9] принимаем для полученной расчетной мощности броневой трансформатор с ленточной конструкцией сердечника серии ШЛ, а в качестве материала выбираем сталь холоднокатаную марки 3411 толщиной ленты 0,35 мм.

Для принятой конструкции магнитопровода по расчетной мощности в соответствии с [9] принимаем ориентировочные значения магнитной индукции, плотности тока, коэффициента

10

						Лист
					КТ 1807.00.428.ПЗ	
Изм	Лист	№ док	Подп	Дата		4

заполнения окна и коэффициента заполнения магнитопровода, а результаты сводим в табл. 1.

Таблица 1 – Магнитная индукция, плотность тока и коэффициенты

Магнитная индукция	Плотность тока	Коэффициент окна	Коэффициент стали
$B_c = 1,65 \text{ Т}$	$j_{cp} = 2,7 \text{ А/мм}^2$	$k_{ок} = 0,29$	$k_{ст} = 0,93$

1.2 Сечение стержня и размеры окна

Сечение стержня магнитопровода трансформатора, $Q_{ст}$, мм^2 определим на основе уравнения [10]

$$Q_{ст} = \frac{C}{k_{ст}} \sqrt{\frac{S_p \alpha \cdot 10^6}{f B_{ст} j_{cp}}}, \quad (1.2)$$

где $C = 0,7$ – постоянный коэффициент для броневых трансформаторов; $\alpha = 2,5$ – отношение массы стали к массе меди при расчете на минимум веса.

Подставив принятые значения в (1.2), получим

$$Q_{ст} = \frac{0,7}{0,93} \sqrt{\frac{51 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{50 \cdot 1,65 \cdot 2,7}} = 564 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент отношения сечения стержня к площади окна сердечника

						Лист
					КТ 1807. 00. 428. ПЗ	
Изм	Лист	№ док	Подп	Дата		5

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(обязательное)

Пример оформления титульного листа пояснительной записки

Министерство путей сообщения
Российской Федерации
Дальневосточный государственный
университет путей сообщения

Кафедра “Электротехника,
электроника и электромеханика”

**РАСЧЕТ ДВИГАТЕЛЯ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Расчетно-пояснительная записка
КТ 1807. 00. 428. ПЗ

Руководитель проекта
_____ В.В. Кульчицкий

Разработчик
_____ И.В. Сидоров

Хабаровск
2003

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

Параметры двигателя

Таблица В.1 – Магнитная индукция в сердечнике главных полюсов и в станине из массивной стали в зависимости от исполнения машины

Исполнение машины	I P22	I P22	I P44	I P44	I P44
	I C01	I C017	I C37	I C0141	I C0141
Магнитная индукция в сердечнике главных полюсов B_r , Тл	1,6÷1,7	1,6÷1,7	1,6÷1,7	1,4÷1,5	1,35÷1,45
Магнитная индукция в станине B_c , Тл	1,2÷1,3	1,2÷1,3	1,2÷1,3	1,1÷1,2	1,0÷1,1

Таблица В.2 – Размеры обмоток главного полюса двигателя постоянного тока

Диаметр якоря D , м	0,09	0,106	0,11	0,132	0,156	0,18
Ширина катушки $b_{кт}$, м	0,023	0,032	0,034	0,025	0,025	0,03
Высота катушки $h_{кт}$, м	0,019	0,018	0,023	0,03	0,038	0,04

Таблица В.3 – Марка провода и конструкция обмотки

Сечение, мм ²	Марка провода	Тип обмотки
$< 8 \cdot 10^{-6}$	ПЭТВ, ПЭТ-155, ПСД	Многослойная катушка, проводники круглого сечения
$\geq 8 \cdot 10^{-6}$	ПЭТВП, ПЭТП-155, ПСД	Многослойная катушка, проводники прямоугольного сечения с отношением сторон 1,4 ÷ 1,8

Таблица В.4 – Рекомендуемые стандартные размеры щеток в зависимости от диаметра якоря

Диаметр якоря D, мм	70–100		100–200		Свыше 200	
Стандартная ширина щетки $b_{щ}$, мм	8	10	12,5	16	20	25
Стандартная длина щетки $l_{щ}$, мм	10 12,5	12,5 16	16 20	25 32	25 32	32 –

Окончание прил. В

Таблица В.5 – Плотность щеток в щеточном контакте

Марка щетки	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения	Плотность тока, А/см ²	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Область применения
ГЗ	Графитные	1,9	11	25	20–25	Машины с облегченными условиями коммутации
611М		2,0	12	40	20–25	
6110М		2,0	15	90	12–22	
ЭГ4	Электрографитированные	2,0	12	40	15–20	Машины с затрудненными условиями коммутации
ЭГ8		2,4	10	40	20–40	
ЭГ14		2,5	11	50	20–40	
ЭГ74		2,7	15	50	17,5–25	

Таблица В.6 – удельные потери и показатель степени β для разных марок электротехнической стали

Марка стали	2013	2312	2411
$P_{1,0/50}$, Вт/кг	2,5	1,75	1,6
Коэффициент β	1,5	1,4	1,3

Таблица В.7 – Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока (пазы овальные полузакрытые, обмотка двухслойная насыпная из круглого эмалированного провода напряжением до 600 В)

Высота оси вращения h, мм	Изоляция	Материал классов В и F	Толщина, мм	Число слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм
80–112	Междуслойная Пазовая	Пленкостеклопласт Изофлекс	0,35	1	0,35
		Пленкостеклопласт Изофлекс	0,35	1	0,35
132–200	Междуслойная Пазовая	Пленкостеклопласт Изофлекс	0,25	2	0,5
		Пленкостеклопласт Изофлекс	0,25	2	0,5

Конструкция двигателя постоянного тока

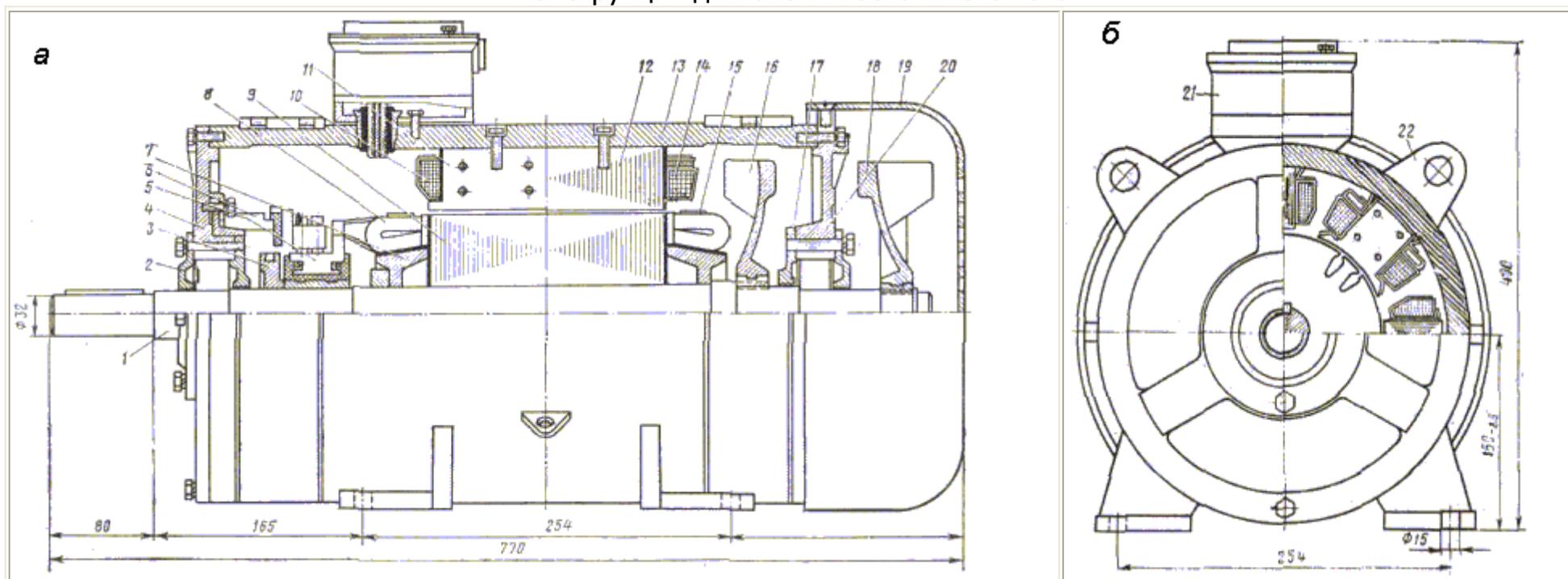


Рисунок. Общий вид двигателя постоянного тока с высотой оси вращения $h = 160$ мм; со степенью защиты IP44; способом охлаждения JC0141; 7,5 кВт, 220 В, 1500 об/мин: а – продольный разрез; б – поперечный разрез:

1 – вал; 2 – крышка подшипниковая наружная; 3 – кольцо для размещения балансировочных грузов; 4 – шит подшипниковый; 5 – коллектор; 6 – траверса; 7 – обмоткодержатель:

8 – обмотка якоря; 9 – сердечник якоря;

10 – обмотка добавочных полюсов; 11 – сердечник добавочного полюса; 12 – сердечник главного полюса; 13 – станина; 14 – параллельная обмотка главных полюсов; 15 – бандаж лобовой части обмотки якоря; 16 – вентилятор внутренний; 17 – крышка подшипниковая внутренняя; 18 – вентилятор наружный; 19 – кожух наружного вентилятора; 20 – шит подшипниковый; 21 – коробка выводов:

22 – ушко транспортное

Библиографический список

1. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. – Логос, 2000. – 605 с.
2. Гольдберг, О.Д. Проектирование электрических машин / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свиридов. – М.: Высшая школа, 2001. – 431 с.
3. Проектирование электрических машин / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 495 с.
4. Пашнин, В.М. Электрические машины: Методические указания к курсовому проекту / В.М. Пашнин. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2000. – 39 с.
5. Автоматизированное проектирование электрических машин / Под ред. Ю.Б. Бородулина. – М.: Высшая школа, 1989. – 289 с.