

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Институт энергетики и транспортных систем
Кафедра «Теоретическая электротехника и электромеханика»

Работа допущена к защите
Зав. Кафедрой

_____ Н.В. Коровкин
“ ____ ” _____ 2017 г.

ВЫПУСКНАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**Тема: Влияние геометрии станины на технико-
экономические показатели двигателя постоянного тока
мощностью 40 кВт**

Направление: 140400 – Электротехника, Электроэнергетика

Выполнил студент гр.43216/1 _____ Суслов Г. В.

Руководитель, д.т.н., проф. _____ Забоин В.Н.

Санкт-Петербург
2017

Содержание

Введение	4
1. Определение основных геометрических размеров якоря	7
1.1. КПД и электромагнитная мощность	7
1.2. Электромагнитный момент и основные геометрические размеры якоря.....	7
1.3. Выбор числа пар полюсов.....	9
2. Электромагнитные и тепловые нагрузки якоря.....	10
2.1. Предварительный выбор пазовой геометрии.....	10
2.2. Выбор тепловых нагрузок якоря	11
2.3. Предварительный выбор электромагнитных нагрузок	11
3. Обмотка якоря и расчет активного слоя	11
3.1. Выбор типа якорной обмотки и ее основных данных	11
3.2. Расчет активного слоя якоря.....	12
3.3. Расчет электромагнитных нагрузок и параметров якоря	13
4. Выбор коллектора и щеток	15
4.1. Выбор диаметра коллектора	15
4.2. Выбор размеров и числа щеток	15
4.3. Проверка потенциальных условий на коллекторе.....	17
5. Расчет коммутации и добавочных полюсов	18
5.1. Расчет реактивной ЭДС	18
5.2. Расчет компенсационной обмотки	19
5.3. Расчет добавочных полюсов.....	21
6. Расчет магнитных характеристик и обмоток возбуждения	24
6.1. Выбор воздушного зазора под главным полюсом.....	24
6.2. Выбор основных геометрических размеров статора.....	24
6.3. Определение МДС зубцового слоя	25
6.4. МДС воздушного зазора	26
6.5. Расчет магнитной характеристики машины	26

6.6. Расчет обмоток возбуждения.....	28
7. Расчет потерь и КПД.....	31
8. Тепловой расчет	33
8.1. Потери в обмотках и контактах щеток.....	33
8.2. Обмотка якоря	33
8.3. Обмотка добавочных полюсов	34
8.4. Параллельная обмотка возбуждения.....	34
8.5. Коллектор.....	35
9. Сравнение технико-экономических показателей	37
Заключение	37
Список литературы	41
Приложение 1. Поперечный разрез машины	
Приложение 2. Продольный разрез машины	

Введение

Машины постоянного тока применяют в качестве электродвигателей и генераторов. Электродвигатели постоянного тока имеют хорошие регулировочные свойства, значительную перегрузочную способность и позволяют получать как жесткие, так и мягкие механические характеристики. Поэтому их широко используют для привода различных механизмов в черной металлургии (прокатные станы, кантователи, роликовые транспортеры), на транспорте (электровозы, тепловозы, электропоезда, электромобили), в грузоподъемных и землеройных устройствах (краны, шахтные подъемники, экскаваторы), на морских и речных судах, в металлообрабатывающей, бумажной, текстильной, полиграфической промышленности и др. Двигатели небольшой мощности применяют во многих системах автоматики.

Конструкция двигателей постоянного тока сложнее и их стоимость выше, чем асинхронных двигателей. Однако в связи с широким применением автоматизированного электропривода и тиристорных преобразователей, позволяющих питать электродвигатели постоянного тока регулируемым напряжением от сети переменного тока, эти электродвигатели широко используют в различных отраслях народного хозяйства.

Массогабаритные ограничения являются одной из главных проблем при проектировке электрической машины. Задачей всех проектировщиков является уменьшение габаритных размеров без потерь в мощности и КПД. Применение станины прямоугольного сечения позволяет сэкономить на высоте главных полюсов и обмотки возбуждения.

Целью данной работы является сравнение техно-экономических показателей двигателя постоянного тока мощностью 40кВт с прямоугольной станиной и его аналога мощностью 40кВт с круглой станиной.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие основные задачи:

1. Выполнить электромагнитный и тепловой расчеты проектируемого двигателя;
2. оценить точность расчета магнитной цепи двигателя по результатам численного моделирования его магнитного поля в программном пакете Elcut.
3. Сопоставить технико-экономические показатели спроектированного двигателя и соответствующего аналога;
4. Рассмотреть преимущества и недостатки замены геометрической формы станины с цилиндрической на прямоугольную.

Изложению результатов решения указанных задач и посвящены следующие разделы выпускной работы.

Техническое задание

Рассчитать конструкцию двигателя постоянного тока параллельного возбуждения со стабилизационной обмоткой.

Данные к расчету.

№ п/п	Данные задания	Величина
1	Назначение	Двигатель
2	$P_{2н}$, кВт	40
3	n_n , об/мин	775
4	U_n , В	440
5	Возбуждение U_e , В	Параллельное
6	Класс изоляции	F
7	Исполнение	IP22 IC01 IM1001 У4
8	Режим работы	S1
9	Дополнительные требования: 1) η 2) Конфигурация станины и ее выполнение	0,81 Прямоугольная шихтованная

Двигатель соединяется с приводным механизмом посредством упругой муфты.

1. Определение основных геометрических размеров якоря

1.1. КПД и электромагнитная мощность

Предварительное значение КПД для оценки потерь и электромагнитной мощности определяется (по рис. 8-6 [6]):

$$\eta_n = 0,81$$

Для электрических машин общего назначения можно определить предварительную электромагнитную мощность по формуле:

$$P_{эн} = P_n \left(\frac{\eta_n + 100}{2\eta_n} \right) = 40000 \left(\frac{81 + 100}{2 \cdot 81} \right) = 44690 \text{ Вт}$$

Предварительное значение тока якоря:

$K_T=0,98$ – определяется (по рис 10-3 [6])

$$I_{ан} = \frac{P_n}{U_n \cdot \eta} \cdot K_T = \frac{40000}{440 \cdot 0,81} \cdot 0,98 = 110 \text{ А}$$

ЭДС якоря:

$$E_{ан} = \frac{P_{эн}}{I_{ан}} = \frac{44690}{110} = 406,27 \text{ В}$$

1.2. Электромагнитный момент и основные геометрические размеры якоря

Электромагнитный момент:

$$M_{эн} = 9,55 \cdot \frac{P_{эн}}{n_n} = 9,55 \cdot \frac{44690}{775} = 550,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$\alpha_i = 0,67$ – коэффициент полюсного перекрытия

Предварительно примем $\lambda_a = 1.5$

Удельная электромагнитная сила:

$$\sigma_t = \alpha_i \cdot A_a \cdot B_\delta = 0,67 \cdot 33792 \cdot 0,9 = 19899 \text{ Па}$$

Диаметр якоря принимаем примерно равным высоте оси вращения (так как станина имеет восьмигранную форму имеем право выбрать несколько больший диаметр):

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{2}{\pi} \cdot \frac{M_{эм}}{\lambda_a \cdot \sigma_t}} = \sqrt[3]{\frac{2}{\pi} \cdot \frac{550,7}{1,5 \cdot 19899}} = 227 \text{ мм}$$

Где $\sigma_t = 19899$ – удельная электромагнитная сила (по рис. 3.3 [1]).

Окончательно выбираем диаметр якоря из нормализованного ряда: $D_a = 230$ мм

Длина якоря:

$$l_a = \frac{2 \cdot M_{эм}}{\pi \cdot \sigma_t \cdot D_a^2} = \frac{2 \cdot 550,7}{\pi \cdot 19899 \cdot 230^2} = 334 \text{ мм}$$

Принимаем длину якоря кратную 5 мм: $l_a = 335$ мм .

Новое отношение длины якоря к диаметру:

$$\lambda_a = \frac{l_a}{D_a} = \frac{335}{230} = 1,457$$

1.3. Выбор числа пар полюсов

Чтобы получить машину с хорошими массогабаритными показателями, а также, чтобы улучшить условия работы при питании от преобразователя с большим коэффициентом пульсаций, станину делаем шихтованной, четырехполюсной.

$$p = 2$$

Полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0.23}{2 \cdot 2} = 0.181 \text{ м}$$

Полюсная дуга $\alpha_i = 0.67$ – выбрана по рис.5.1 [1], но несколько меньше, чтобы при 2-х парах полюсов и выбранном диаметре якоря обеспечить приемлемые условия коммутации.

Ширина наконечника главного полюса :

$$b_{p0} = \alpha_i \cdot \tau = 0.67 \cdot 0.18 = 0.121 \text{ м}$$

Частота перемагничивания в стали:

$$f = p \cdot \frac{n_n}{60} = 2 \cdot \frac{775}{60} = 25.8 \text{ Гц}$$

2. Электромагнитные и тепловые нагрузки якоря

2.1. Предварительный выбор пазовой геометрии

Предварительно выбираем зубцовое деление $t_z = 20$ мм, высоту паза принимаем (по рисунку 8-12[6]) $h_n = 30$ мм

Предварительную ширину зубца принимаем $b_z = 9$ мм, $k_c = 0,97$ – коэффициент заполнения пакета якоря сталью.

Индукция в зубцах якоря:

$$B_z = \frac{B_\delta \cdot t_z}{b_z \cdot k_c} = \frac{0,9 \cdot 0,02}{0,009 \cdot 0,97} = 2 \text{ Тл}$$

Радиус верхней полуокружности паза:

$$r_1 = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h_u) - Z \cdot b_z}{2 \cdot (Z + \pi)} = \frac{\pi \cdot (0,23 - 2 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}) - 37 \cdot 0,009}{2 \cdot (37 + \pi)} = 4,76 \text{ мм}$$

Радиус нижней полуокружности паза:

$$r_2 = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h_n) - Z \cdot b_z}{2 \cdot (Z - \pi)} = \frac{\pi \cdot (0,23 - 2 \cdot 32 \cdot 10^{-3}) - 37 \cdot 0,009}{2 \cdot (37 - \pi)} = 2,7 \text{ мм}$$

Высота паза между центрами верхней и нижней полуокружностей:

$$h_1 = h_n - h_u - r_1 - r_2 = 32 - 0,8 - 4,7 - 2,7 = 24 \text{ мм}$$

Среднее зубцовое деление якоря:

$$t_{cp} = \frac{\pi \cdot (D_a - h_n)}{Z} = \frac{\pi \cdot (230 - 32)}{37} = 16,8 \text{ мм}$$

2.2. Выбор тепловых нагрузок якоря

Длина проводников лобовых частей обмоток якоря:

$$l_l = K_l \cdot \tau = 1,2 \cdot 181 = 217 \text{ мм}$$

Длина вылета лобовых частей:

$$l_{\text{эл}} = K_{\text{эл}} \cdot \tau = 0.4 \cdot 181 = 72 \text{ мм}$$

Суммарные потери, отводимые воздухом:

$$\Sigma p' = \Sigma p = \frac{P_n (1 - \eta_n)}{\eta_n} = \frac{40000(1 - 0,81)}{0,81} = 9383 \text{ Вт}$$

Касательная скорость на поверхности якоря:

$$V_a = \frac{\pi \cdot D_a \cdot n_n}{60} = \frac{\pi \cdot 0.23 \cdot 775}{60} = 9,33 \text{ м/с}$$

2.3. Предварительный выбор электромагнитных нагрузок

Линейная токовая нагрузка якоря:

$$A_a = \frac{N \cdot I_a}{\pi \cdot D} = \frac{444 \cdot 55}{\pi \cdot 0.23} = 33792 \text{ А / мм}$$

Предварительное значение магнитной индукции в воздушном зазоре:

$$B_\delta = 0,9 \text{ Тл}$$

Допустимое значение плотности тока в обмотке якоря:

$$j_a = \frac{(A_a j_a)}{A_a} = \frac{2,4 \cdot 10^{11}}{33792} = 7,102 \text{ А/мм}^2$$

3. Обмотка якоря и расчет активного слоя

3.1. Выбор типа якорной обмотки и ее основных данных

Выполняем простую волновую обмотку.

Необходимое полное число проводников обмотки:

$$N_a = \frac{\pi \cdot D_a \cdot A}{I_a} = \frac{\pi \cdot 0,23 \cdot 3,3 \cdot 10^4}{55} = 433$$

Принимаем число проводников 444, для получения равно секционной обмотки

$$N_a = 444$$

Уточним длину якоря:

$$l_a = D_a \cdot \lambda_a = 230 \cdot 1,8 = 414 \text{ мм}$$

Число витков в секции:

$$w_c = 2$$

Обмотку выполняем из равновитковых секций.

$$w_{ссп} = \frac{(w_{c1} + w_{c2} + w_{c3})}{u_n} = \frac{(2 + 2 + 2)}{3} = 2$$

Полное число проводников в пазу:

$$s_n = 2 \cdot u_n \cdot w_{ссп} = 2 \cdot 3 \cdot 2 = 12$$

Число пазов:

$$Z_a = \frac{N_a}{s_n} = \frac{444}{12} = 37$$

3.2. Расчет активного слоя якоря

Ток в параллельной ветви обмотки:

$$i_a = \frac{I_{ан}}{2a} = \frac{110}{2} = 55 \text{ А}$$

Нужное сечение проводников якорной обмотки:

$$q_{np} = \frac{i_a}{j_a} = \frac{55}{7102113} = 7,743 \text{ мм}^2$$

Для выполнения якорной обмотки выбираем провод ПЭТ-155 класса изоляции F. Для улучшения заполнения овального паза и для уменьшения ширины шлица паза провод подразделяем на два элементарных.

$$n_3 = 2$$

По [1, п.13] выбираем провод с сечением $q_{np3} = 3,94 \text{ мм}^2$.

Сечение проводников якорной обмотки:

$$q_{np} = q_{np3} \cdot n_3 = 3,94 \cdot 2 = 7,88 \text{ мм}^2$$

Предварительная величина потребной площади паза:

$$S_n = \frac{\pi}{2}(r1^2 + r2^2) + (r1 + r2) \cdot h1 = \frac{\pi}{2} \cdot (4,76^2 + 2,751^2) + (4,76 + 2,751) \cdot 24 = 225,5 \text{ мм}^2$$

Площадь сечения пазовой изоляции:

$$S_{из} = b_{из} \cdot (2 \cdot \pi \cdot r1 + \pi \cdot r2 + 2 \cdot h1) = \\ = 0,25 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 0,047 + \pi \cdot 0,027 + 2 \cdot 24) = 42,97 \text{ мм}^2$$

Где $b_{из} = 0,25 \cdot 2 \text{ мм}$ – 2 толщины пазовой изоляции

Площадь пазового клина и изоляционной прокладки между слоями обмотки

$$S_k = 1,5 \cdot r1 = 1,5 \cdot 0,047 = 3,402 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Площадь поперечного сечения паза, заполненного обмоткой:

$$S_{no} = S_n - S_{из} - S_k = 225 \cdot 10^{-6} - 42,9 \cdot 10^{-6} - 34 \cdot 10^{-6} = 148,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Площадь поперечного сечения обмотки уложенной в один паз:

$$S_0 = \frac{2 \cdot d_{из} \cdot n_{эл} \cdot u_n \cdot w_c}{k_3} = \frac{2 \cdot 1,995 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2}{0,68} = 1,405 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Из этого следует, что обмотка помещается в паз

Выбираем высоту щели паза $h_{щ} = 0,8 \text{ мм}$.

Допустимый уровень индукции в воздушном зазоре примем:

$$B_\delta = 0,9 \text{ Тл}$$

Полную высоту паза примем:

$$h_n = 32 \text{ мм}$$

3.3. Расчет электромагнитных нагрузок и параметров якоря

Плотность тока в обмотке якоря при номинальном токе:

$$j_a = \frac{(A_a j_a)}{A_a} = \frac{2,4 \cdot 10^{11}}{33792} = 7,102 \text{ А/мм}^2$$

Магнитный поток главных полюсов:

$$\Phi_n = \frac{60 \cdot E_{ан} \cdot a}{p \cdot n_n \cdot N} = \frac{60 \cdot 426,8 \cdot 1}{2 \cdot 444 \cdot 775} = 0,037 \text{ Вб}$$

Необходимая длина якоря:

$$l_a = l_\delta = 335 \text{ мм}$$

Окончательное значение индукции в воздушном зазоре:

$$B_\delta = \frac{\Phi_n}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l_\delta} = \frac{0,037}{0,67 \cdot 0,181 \cdot 0,335} = 0,9 \text{ Тл}$$

Окончательное значение индукции в зубце:

$$B_{z\max} = B_\delta \frac{t_z}{b_z \cdot K_{zc}} = 0,763 \frac{19,5}{9 \cdot 0,97} = 1,704 \text{ Тл}$$

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

$$R_a = \rho_m \frac{N_a \cdot (l_{acr} + l_a)}{(2a)^2 \cdot q_{нрз}} = 17,5 \cdot 10^{-6} \frac{444 \cdot (0,48 + 0,355)}{2^2 \cdot 7,88} = 0,202 \text{ Ом}$$

где $l_{acr} = l_n + l_{вл} = 217 + 264 = 480 \text{ мм}$ - Средняя длина полувитка секции

$l_n = 1,2 \cdot \tau$ - Длина проводников лобовых частей

$l_{вл} = 0,7 \cdot l_a$ - Длина вылета лобовых частей

$\rho_m = 17,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{мм}$ – удельное сопротивление меди при $\theta = 20^\circ \text{C}$.

Сопротивление обмотки якоря при температуре $\theta = 155^\circ \text{C}$:

$$R_{ан} = R_a \cdot K_{\rho\theta} = 0,202 \cdot 1,54 = 0,31 \text{ Ом}$$

Диаметр вала в месте посадки сердечника якоря:

$$D_{\text{вл}} = 27 \sqrt[3]{\frac{P_n}{n_n}} = 27 \sqrt[3]{\frac{40}{775}} = 100 \text{ мм}$$

Принимаем $D_{\text{вл}} = 100 \text{ мм}$.

Высота спинки сердечника якоря:

$$h_a = 0,5 \cdot (D_a - D_{\text{вл}}) - h_n = 0,5 \cdot (230 - 100) - 32 = 33 \text{ мм}$$

Ввиду малого диаметра якоря осевые вентиляционные каналы не выполняются.

Индукция в спинке сердечника якоря:

$$B_a = \frac{\Phi_n}{2 \cdot S_a} = \frac{0.037}{2 \cdot 0.0139} = 1,3 \text{ Тл}$$

4. Выбор коллектора и щеток

4.1. Выбор диаметра коллектора

С учетом того, что машина выполняется с овальными пазами и мягкими секциями, а также имеет малый диаметр якоря, концы секций будут непосредственно впаиваться в хвостовики коллекторных пластин.

Тогда диаметр коллектора может быть сделан наибольшим:

$$D_{\kappa} = (0,65 \dots 0,8) \cdot D_a = 150 \dots 184 \text{ мм}$$

Окончательно выбираем диаметр коллектора из нормализованного ряда:

$$D_{\kappa} = 150 \text{ мм}$$

Отношение диаметров коллектора и якоря:

$$K_{\kappa} = \frac{D_{\kappa}}{D_a} = \frac{150}{230} = 0,652$$

Ширина коллекторной пластины:

$$t_{\kappa} = \frac{\pi \cdot D_{\kappa}}{K} = \frac{\pi \cdot 150}{111} = 4,24 \text{ мм}$$

4.2. Выбор размеров и числа щеток

Выбираем щетки ЭГ-14 по ГОСТ 2332-75.

Допустимая плотность тока в контакте:

$$j_{щ} = 11 \text{ А/см}^2$$

Необходимая поверхность скользящего контакта на пару полюсов:

$$S_{щр} = \frac{I_{ан}}{p \cdot j_{щ}} = \frac{2 \cdot 89,1}{2 \cdot 11 \cdot 10^{-2}} = 405 \text{ мм}^2$$

Для обеспечения достаточного щеточного перекрытия и обеспечения допустимой ширины коммутационной зоны выбираем размеры щеток:

$$b_{щ} = 23 \text{ мм}$$

$$l_{щ} = 46 \text{ мм}$$

На щеточном пальце будет располагаться одна щетка:

$$n_{щ} = 1.$$

Надежность контакта в этом случае будет обеспечиваться за счет установки полного комплекта щеток, хотя для волновой обмотки достаточно половины.

Площадь выбранного щеточного контакта:

$$S_{щр} = n_{щ} \cdot b_{щ} \cdot l_{щ} = 1 \cdot 23 \cdot 46 = 1058 \text{ мм}^2$$

Фактическая контактная площадь:

$$S_{щн} = 2 \cdot p \cdot n_{щ} \cdot S_{щ} = 2 \cdot 2 \cdot 1058 = 4232 \text{ мм}^2$$

Плотность тока в щетке:

$$j_{щ} = \frac{I_{ан}}{p \cdot S_{щр}} = \frac{110}{2 \cdot 1058 \cdot 10^{-2}} = 5,2 \text{ А/см}^2$$

Щеточное перекрытие:

$$K_{щ} = \frac{b_{щ}}{t_k} = \frac{23}{4,24} = 5,425$$

Ширина коммутационной зоны:

$$b_k = \left(\frac{b_{щ}}{t_k} + u_n - \frac{a}{p} + \varepsilon k \right) \cdot t_k \cdot \frac{D_a}{D_k} = b_k = \left(\frac{23}{4,24} + 3 - \frac{1}{2} + 0,25 \right) \cdot 4,24 \cdot \frac{0,23}{0,15} = 50 \text{ мм}$$

Где $\varepsilon = -0,25$ - сокращение шага

Необходимая осевая длина коллектора:

$$l_k = n_{щ} \cdot (l_{щ} + 0,008) + 0,01 = 1 \cdot (46 + 0,008) + 0,01 = 64 \text{ мм}$$

Принимаем длину коллектора: $l_k = 65 \text{ мм}$.

4.3. Проверка потенциальных условий на коллекторе

Напряжение между смежными коллекторными пластинами:

$$U_{ксп} = \frac{2p \cdot U_{ан}}{K} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 440}{111} = 15,8 \text{ В}$$

Среднее напряжение между смежными коллекторными пластинами на ширине расчетной полюсной дуги или напряжение при равномерном зазоре при холостом ходе:

$$U_{ко} = \frac{U_{ксп}}{\alpha_i} = \frac{15,8}{0,67} = 23,58 \text{ В}$$

Максимальное напряжение смежными коллекторными пластинами:

$$U_{кmax} = U_{ко} \cdot K_u = 23,58 \cdot 1,3 = 30,65 \text{ В}$$

При $U_{кmax} < 30...40$ В вероятность возникновения вспышек и кругового огня на коллекторе практически исключается.

Градиент потенциала в месте образования первичных дуг:

$$g_{кmax} = \frac{U_{кmax}}{t_{к}} = \frac{30,65}{0,424} = 69,5 \text{ В/см}$$

При $g_{кmax} < 60...75$ В/см вероятность переброса дуг мала.

Таким образом, потенциальные условия на коллекторе можно считать хорошими.

5. Расчет коммутации и добавочных полюсов

Для расчета коммутации и добавочных полюсов необходимо определить среднюю реактивную ЭДС в коммутируемых секциях, а также определить размеры и конфигурацию сердечников и обмотки добавочных полюсов.

5.1. Расчет реактивной ЭДС

На рис. 5.1 приведены размеры, определяемые из эскиза выкладки паза, необходимые для расчета удельной магнитной проводимости. В данном расчете размеры соответствуют пазу, представленному на рис. 3.2.

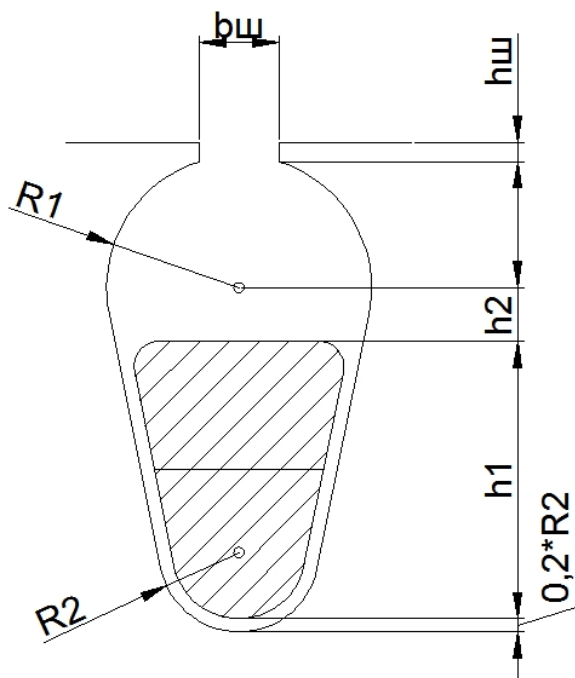


Рис. 5.1. Необходимые для расчета размеры паза и размещение обмотки.

Приведенная удельная магнитная проводимость пазового рассеяния:

$$\lambda'_n = 0,6 \cdot \frac{h_n}{2 \cdot r_2} + \frac{l_a}{l_a} + \frac{2,5 \cdot 10^5}{w_c \cdot l_a \cdot A \cdot v_a} + \frac{h_{uu}}{b_{uu}} =$$

$$= 0,6 \cdot \frac{32}{2 \cdot 2,7} + \frac{217}{402,6} + \frac{2,5 \cdot 10^5}{2 \cdot 0,402 \cdot 27372 \cdot 9,33} + \frac{0,8}{5,5} = 5,4$$

Воздушный зазор под добавочным полюсом:

$$\delta_{\delta} = 2 \cdot \delta = 2 \cdot 2 = 4 \text{ мм}$$

Принимаем $\delta_{\delta} = 4 \text{ мм}$.

Реактивная ЭДС коммутируемой секции:

$$\begin{aligned} E_r &= 2 \cdot w_c \cdot l_{\delta} \cdot V_a \cdot A \cdot \lambda = \\ &= 2 \cdot 2 \cdot 0,335 \cdot 9,33 \cdot 33792 \cdot 5,4 \cdot 10^{-6} = 2,31 \text{ В} \end{aligned}$$

5.2. Расчет компенсационной обмотки.

Определим число проводников компенсационной обмотки на один полюс:

$$N_k = \frac{A \cdot b_p \cdot a_k}{I_{ан}} = \frac{33792 \cdot 0,12 \cdot 1}{110} = 38$$

Где $a_k = 1$ – число параллельных ветвей компенсационной обмотки.

Принимаем $N_k = 38$.

Выбираем $Z_k = 6$ и определяем зубцовое деление компенсационной обмотки:

$$t_k = \frac{b_p}{Z_k} = \frac{0,121}{6} = 0,02 \text{ м}$$

Ширина зубца обмотки:

$$b_{zk} = \frac{t_k \cdot B_{\delta} \cdot \sigma_{\Gamma}}{B_{zk} \cdot k_c} = \frac{0,02 \cdot 0,9 \cdot 1,05}{1,6 \cdot 0,97} = 0,012 \text{ м}$$

Где $\sigma_{\Gamma} = 1,05$ – коэффициент рассеяния главного полюса; $B_{zk} = 1,6 \text{ Тл}$ – индукция в минимальном сечении зубца компенсационной обмотки.

Число проводников в одном пазу:

$$n_k = \frac{N_k}{Z_k} = \frac{38}{6} = 6,33, \text{ округляем до } 6$$

Уточняем число проводников компенсационной обмотки:

$$N_k = n_k \cdot Z_k = 6 \cdot 6 = 36$$

Найдем площадь сечения компенсационной обмотки:

Исходя из класса нагревостойкости F $J_k = 5500000 \text{ А/м}^2$

$$q_k = \frac{I}{a_k \cdot J_k} = \frac{110}{5,5 \cdot 10^6} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Ширина паза компенсационной обмотки:

$$b_{кп} = t_k - b_{zk} = 0,02 - 0,012 = 7,89 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Так как число проводников в пазу равно 6, компенсационную обмотку выполняем катушечной, с укладкой в открытые пазы.

Из таблицы (П 3.2 [6]) выбираем размеры проводников $b=6,7$ мм, $a=2,5$ мм,

Тогда площадь поперечного сечения будет равна $q_k = 16,22 \text{ мм}^2$

Расчет общей толщины изоляции (по таблице 3.12 [6])

$$\begin{aligned} b_{уиз} &= 0,14 \cdot 2 \cdot n_k + 0,14 \cdot 2 + 0,1 \cdot 2 + 0,15 \cdot 2 + 0,5 = \\ &= 0,14 \cdot 2 \cdot 6 + 0,14 \cdot 2 + 0,1 \cdot 2 + 0,15 \cdot 2 + 0,5 = 2,96 \text{ мм} \end{aligned}$$

Следовательно высота паза компенсационной обмотки:

$$h_{кп} = a \cdot n_k + b_{уиз} = 2,5 \cdot 6 + 2,96 = 17,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Степень компенсации:

$$K_\kappa = \frac{I \cdot N_k}{A \cdot b_p \cdot a_k} = \frac{110 \cdot 36}{33792 \cdot 0,121 \cdot 1} = 0,968$$

Диаметр внутренней поверхности главного полюса:

$$D_2 = D + 2 \cdot \delta = 0,23 + 2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-2} = 0,234 \text{ м}$$

Средняя ширина катушки компенсационной обмотки:

$$\begin{aligned} b_{к.кат.ср} &= \frac{(D_\Gamma + h_k) \cdot \pi}{2 \cdot p} - \frac{b_p}{2} \cdot \frac{D_\Gamma + h_k}{D_\Gamma} = \\ &= \frac{(0,234 + 2,5 \cdot 10^{-3}) \cdot \pi}{2 \cdot 2} - \frac{0,121}{2} \cdot \frac{0,234 + 2,5 \cdot 10^{-3}}{0,234} = 0,125 \text{ м} \end{aligned}$$

Средняя длина лобовой части компенсационной обмотки:

$$l_{кл} = 1,2 \cdot b_{к.кат.ср} = 1,2 \cdot 0,124 = 0,15 \text{ м}$$

Средняя длина прямолинейной части катушки компенсационной обмотки:

$$l_{кп} = l_{\delta 1} + 2 \cdot b_{кл} = 0,316 + 2 \cdot 0,03 = 0,377 \text{ м}$$

Средняя длина полувитка обмотки:

$$l_{ксп} = l_{кл} + l_{кн} = 0,149 + 0,377 = 0,526 \text{ м}$$

Сопротивление компенсационной обмотки:

Сопротивление обмотки якоря при 20 градусах

$$R_k = \rho \cdot \frac{N_k \cdot l_{ксп} \cdot 2 \cdot p}{a_k^2 \cdot q_k} = \frac{1}{57 \cdot 10^6} \cdot \frac{36 \cdot 0,473 \cdot 2 \cdot 2}{a_k^2 \cdot q_k} = 0,074 \text{ Ом}$$

Сопротивление обмотки при 155 градусах

$$R_{кн} = 1,54 \cdot R_k = 1,54 \cdot 0,073 = 0,114 \text{ Ом}$$

Масса меди компенсационной обмотки:

$$m_k = 8900 \cdot l_{ксп} \cdot N_k \cdot 2 \cdot p \cdot q_k = 8900 \cdot 0,526 \cdot 36 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 16,2 \cdot 10^{-6} = 10,929 \text{ кг}$$

МДС компенсационной обмотки:

$$F_k = N_k \cdot I_{ан} = 42 \cdot 77 = 4180 \text{ А}$$

5.3. Расчет добавочных полюсов

Для несколько ускоренной коммутации примем значение реактивной ЭДС коммутируемой секции равным:

$$E_{r1} = 1,1 \cdot E_r = 1,1 \cdot 2,22 = 2,44 \text{ В}$$

Средняя индукция в воздушном зазоре:

$$B_{\delta d} = \frac{E_{r1}}{2 \cdot l_{\delta} \cdot V_a} = \frac{2,44}{2 \cdot 0,335 \cdot 9,33} = 0,368 \text{ Тл}$$

Ширина наконечника добавочного полюса:

$$b_{он} = 2 \cdot \delta_{\delta} + b_{зк} = 2 \cdot 4 + 42 = 50 \text{ мм}$$

Коммутирующий поток:

$$\Phi_{\delta d} = B_{\delta d} \cdot b_{он} \cdot l_a = 0,325 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 0,335 = 8,326 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса:

$$\Phi_{\delta} = \Phi_{\delta d} \cdot \sigma_{\delta} = 8,326 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 17 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

Где, $\sigma_{\delta}=2$ – коэффициент рассеяния добавочных полюсов для машин с компенсационной обмоткой.

Индукция в сердечнике добавочного полюса:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{S_{\delta}} = \frac{0,017}{0,011} = 1,514 \text{ Тл}$$

Поперечная составляющая МДС якоря:

$$F_{aq} = A \cdot \tau \cdot K_{aq} = 33792 \cdot 0,165 \cdot 0,82 = 4907 \text{ А}$$

Где K_{aq} Коэффициент, учитывающий уменьшение МДС якоря

Магнитное напряжение воздушного зазора:

$$F_{\delta\delta} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot k_{\delta\delta} \cdot B_{\delta\delta} \cdot \delta_{\delta} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1,101 \cdot 0,406 \cdot 0,004 = 2850 \text{ А}$$

МДС на пару добавочных полюсов:

$$F_{\delta n} = F_{aq} + F_{\delta\delta} - F_k = 4907 + 2850 - 4090 = 3666 \text{ А}$$

Число витков обмотки добавочных полюсов:

$$w_{\delta} = \frac{F_{aq} + F_{\delta\delta} - F_k}{2 \cdot I_{ан}} = \frac{4907 + 2850 - 4090}{2 \cdot 110} = 16,7$$

Принимаем:

$$w_{\delta} = 18$$

Полная длина проводников обмотки:

$$\begin{aligned} l_{\delta\delta} &= 2(l_{\delta n} + b_{\delta n}) + \pi \cdot (4 + 7,4) \cdot 10^{-3} = \\ &= 2(0,027 + 0,402) + \pi \cdot (4 + 7,4) \cdot 10^{-3} = 0,896 \text{ м} \end{aligned}$$

Для многослойных обмоток выбираем (согласно рекомендациям § 8-7 [6])

плотность тока:

$$j_{\delta} = 5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

Предварительное сечение проводника:

$$q_{\delta} = \frac{I_{ан}}{a_{\delta} \cdot j_{\delta}} = \frac{110}{1,5 \cdot 10^6} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Выбираем изолированный провод прямоугольного сечения класса нагревостойкости F ПЭТП-155:

$$q_{\delta} = 23 \text{ мм}^2$$

$$a = 3,15 \text{ мм}$$

$$b = 7,5 \text{ мм}$$

Площадь сечения обмотки добавочных полюсов:

$$S_{\delta} = w_{\delta} \cdot q_{\delta} = 18 \cdot 23 \cdot 10^{-6} = 415,4 \text{ мм}^2$$

Сопротивление обмотки добавочных полюсов при температуре $\theta = 20^{\circ} \text{C}$:

$$R_{\delta} = p \cdot \frac{2p_{\delta} \cdot w_{\delta} \cdot l_{\text{дсз}}}{a_{\delta}^2 \cdot q_{\delta}} = \frac{1}{57 \cdot 10^6} \cdot \frac{2 \cdot 2 \cdot 18 \cdot 0,775}{1^2 \cdot 23 \cdot 10^{-6}} = 0,043 \text{ Ом}$$

Сопротивление обмотки добавочных полюсов при температуре $\theta = 155^{\circ} \text{C}$:

$$R_{\delta n} = R_{\delta} \cdot 1,54 = 0,043 \cdot 1,54 = 0,066 \text{ Ом}$$

Масса меди обмотки добавочных полюсов:

$$m_{\delta} = 8900 \cdot w_{\delta} \cdot l_{\text{дсз}} \cdot 2 \cdot p_{\delta} \cdot q_{\delta} = 8900 \cdot 18 \cdot 0,775 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 23 \cdot 10^{-6} = 11,4 \text{ кг}$$

Мощность потерь в обмотке добавочных полюсов:

$$P_{\delta} = I_{an}^2 \cdot R_{\delta n} = 110^2 \cdot 0,066 = 793 \text{ Вт}$$

6. Расчет магнитных характеристик и обмоток возбуждения

6.1. Выбор воздушного зазора под главным полюсом

Выбираем наиболее оптимальный воздушный зазор под главным полюсом:

$$\delta_2 = 2 \text{ мм}$$

6.2. Выбор основных геометрических размеров статора

Для снижения потерь в стали зубцов и потерь на возбуждение, будем принимать уровни допустимых индукций на участках магнитопровода несколько меньшие в сравнении с рекомендуемыми.

Предварительная ширина сердечника главного полюса:

$$b_m = b_p - 2 \cdot (0,15 \cdot b_p) = 121 - 2 \cdot (0,15 \cdot 121) = 101 \text{ мм}$$

Принимаем $b_m = 101 \text{ мм}$.

Предварительный коэффициент потока рассеяния главных полюсов:

$$\sigma_r = 1,15$$

Уровень индукции в сердечнике главных полюсов:

$$B_m = \frac{\Phi_{\delta n} \cdot \sigma_r}{b_m \cdot l_m \cdot k_c} = \frac{0,034 \cdot 1,15}{101 \cdot 0,335 \cdot 0,97} = 1,2 \text{ Тл}$$

Высота машины с прямоугольной формой статора выбирается из условия получения минимально возможной нормализованной централи (по п.1 [1]):

$$h = 180 \text{ мм}$$

Длина ярма шихтованной станины:

$$l_c = l_a + 0,4 \cdot D = 335 = 335 \text{ мм}$$

Допустимый уровень индукции в станине:

$$B_c = 1,3 \text{ Тл}$$

Сечение станины по эскизу:

$$S_c = 0,009 \text{ м}^2$$

Высота станины:

$$h_c = \frac{S_c}{l_c} = \frac{0,013}{0,335} = 27 \text{ мм}$$

Наружный диаметр станины

$$D_c = 2 \cdot h - 9 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 180 - 9 \cdot 10^{-3} = 351 \text{ мм}$$

Высота главного полюса по эскизу:

$$h_m = 31 \text{ мм}$$

Длина магнитных линий в станине по эскизу:

$$L_c = \frac{1,196}{2 \cdot 2p} + \frac{h_c}{2} = \frac{1196}{2 \cdot 2p} + \frac{27}{2} = 163 \text{ мм}$$

Напряженность поля в станине:

$$H_c = 1590 \text{ А/м}$$

Падение магнитного потенциала в станине:

$$F_c = H_c \cdot L_c = 1590 \cdot 0,163 = 259 \text{ А}$$

Высота спинки якоря:

$$h_j = \frac{D_a - D_{\text{вл}}}{2} - h_n = \frac{230 - 100}{2} - 32 = 33 \text{ мм}$$

6.3. Определение МДС зубцового слоя

Индукция в зубце:

$$B_z = 2 \text{ Тл}$$

Выбираем для машины сталь 2312, т.к. она обладает большей магнитной проницаемостью, что уменьшит токи намагничивания.

По кривым намагничивания зубцов (п.6 [1]) и по основной кривой намагничивания для стали 2312 (п.2 [1]) находим напряженность поля в зубцовом слое:

$$H_z = 19400 \text{ А/м}$$

Длина магнитной линии в зубцовом слое.

$$L_z = h_n - 0,2 \cdot r_1 = 32 - 0,2 \cdot 4,7 = 31 \text{ мм}$$

МДС зубцового слоя:

$$F_z = H_z \cdot L_z = 19400 \cdot 0,031 = 602 \text{ А}$$

6.4. МДС воздушного зазора

Длина магнитной линии в воздушном зазоре.

$$L_\delta = k_\delta \cdot \delta = 1,75 \cdot 2 = 2,3 \text{ мм}$$

Где $k_\delta = 1,75$ коэффициент воздушного зазора

Падение магнитного потенциала в воздушном зазоре:

$$F_\delta = 0,8 \cdot B_\delta \cdot L_\delta = 0,8 \cdot 0,9 \cdot 2323 = 1673 \text{ А}$$

6.5. Расчет магнитной характеристики машины

Длина спинки якоря:

$$l_j = l_a \cdot k_c = 335 \cdot 0,97 = 323 \text{ мм}$$

Сечение спинки якоря:

$$S_j = h_j \cdot l_j = 30 \cdot 33 = 9,89 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Индукция в спинке якоря:

$$B_j = \frac{\Phi_n}{2 \cdot S_j} = \frac{0,03}{2 \cdot 9,89 \cdot 10^{-3}} = 1,526 \text{ Тл}$$

Длина магнитных линий в спинке якоря:

$$L_j = \frac{\pi(D_{\text{вл}} - h_j)}{2 \cdot 2p} + \frac{h_j}{2} = \frac{\pi(100 - 32,7)}{2 \cdot 2 \cdot 2} + \frac{32,7}{2} = 43 \text{ мм}$$

Напряженность поля в спинке якоря (по п.2 [1]):

$$H_j = 169 \text{ А/м}$$

Падение магнитного потенциала в спинке якоря:

$$F_j = H_j \cdot L_j = 169 \cdot 0,043 = 7,265 \text{ А}$$

Магнитный поток полюса:

$$\Phi_m = \Phi_n = 0,037 \text{ Вб}$$

Индукция в сердечнике главного полюса:

$$B_m = \frac{\sigma_\tau \cdot \Phi_n}{S_\Gamma} = \frac{1,15 \cdot 0,034}{0,009} = 1,209 \text{ Тл}$$

Напряженность поля в сердечнике главного полюса (по п.2 [1]):

$$H_m = 2090 \text{ А/м}$$

Падение магнитного потенциала в сердечнике главного полюса:

$$F_m = H_m \cdot L_m = 2090 \cdot 31 \cdot 10^{-3} = 65 \text{ А}$$

Сечение компенсационной обмотки:

$$S_{kn} = (b_p - Z_k \cdot b_{kn}) \cdot l_a \cdot k_c = (121 - 6 \cdot 7,8) \cdot 335 \cdot 0,97 = 0,024 \text{ м}^2$$

Индукция в наконечнике главного полюса с компенсационной обмоткой:

$$B_{kn} = \frac{\Phi_n \cdot \sigma_\Gamma}{S_{kn}} = \frac{0,037 \cdot 1,15}{0,024} = 1,773 \text{ Тл}$$

Напряженность в наконечнике главного полюса с компенсационной обмоткой:

$$H_{kn} = 15800 \text{ А/м}$$

Падение магнитного потенциала в наконечнике главного полюса с компенсационной обмоткой:

$$F_{kn} = H_{kn} \cdot L_{kn} = 15800 \cdot 0,018 = 284,4 \text{ А}$$

Падения магнитного потенциала на границе ярмо-полюс падения потенциала нет, т.к. ярмо и полюса штампуются как одно целое.

Суммарная МДС обмотки возбуждения на пару полюсов при холостом ходе:

$$F_{\epsilon 0} = F_{\delta} + F_z + F_j + F_m + F_{\kappa n} + F_c = \\ = 1672 + 602,3 + 7,26 + 284,4 + 259,4 = 2843 \text{ А}$$

Коэффициент насыщения:

$$K_{\mu} = \frac{F_{\epsilon 0}}{F_{\delta}} = \frac{2843}{1672} = 1,7$$

6.6. Расчет обмоток возбуждения

МДС обмотки возбуждения на один полюс:

$$F_{\epsilon} = F_{\epsilon 0}$$

Средняя длина витка обмотки параллельного возбуждения (ОВ):

$$l_{\text{ср}} = 2(l_m + b_m) + \pi \cdot (b_{\kappa\epsilon} + 2 \cdot \delta_{\text{из}}) = 2(335 + 101) + \pi \cdot (30 + 2 \cdot 8,5) = 972 \text{ мм}$$

Где $b_{\kappa\epsilon} = 30 \text{ мм}$ - ширина катушки параллельной обмотки

Определяем требуемое сечение проводника:

$$q_{\epsilon} = \frac{\rho_m \cdot k_z \cdot 2p \cdot F_{\epsilon} \cdot l_{\text{ср}}}{U_n} = \frac{1}{57 \cdot 10^6} \frac{1,1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2863 \cdot 0,971}{440} = 0,488 \text{ мм}^2$$

Для выполнения обмотки параллельного возбуждения выбираем провод ПЭТВ класса изоляции F по п.1 [4]:

$$q_{\epsilon} = 0,488 \text{ мм}^2$$

$$d_{\text{из}} = 0,815 \text{ мм}$$

$$d_{\text{неиз}} = 0,75 \text{ мм}$$

Предварительная принимаем плотность тока в обмотке возбуждения равной:

$$j_{\epsilon} = 5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

Число витков обмотки на один полюс:

$$w_{\epsilon} = \frac{F_{\epsilon}}{j_{\epsilon} \cdot q_{\epsilon}} = \frac{2863}{5 \cdot 10^6 \cdot 0,503 \cdot 10^{-6}} = 1138,37$$

Принимаем $w_{\epsilon} = 1138$

Находим номинальный ток возбуждения:

$$i_{\epsilon} = \frac{F_{\epsilon}}{w_{\epsilon}} = \frac{2863}{1138} = 2,5 \text{ А}$$

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

$$R_{\epsilon} = 2p \cdot \rho_m \frac{w_{\epsilon}}{q_{\epsilon}} \cdot l_{\text{всп}} = 4 \cdot \frac{1}{57 \cdot 10^6} \cdot \frac{1138}{0,503 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,97 = 154 \text{ Ом}$$

Сопротивление обмотки параллельного возбуждения при температуре $\theta = 155^{\circ} \text{C}$:

$$R_{\text{вн}} = K_{\rho\theta} \cdot R_{\epsilon} = 1,54 \cdot 154 = 237 \text{ Ом}$$

Максимальный ток возбуждения:

$$i_{\epsilon \text{ max}} = \frac{U_a}{R_{\epsilon}} = \frac{440}{154} = 2,85 \text{ А}$$

Коэффициент запаса возбуждения:

$$K_{\text{зв}} = \frac{i_{\epsilon \text{ max}}}{i_{\epsilon}} = \frac{2,85}{2,516} = 1,133$$

Площадь, занимаемая катушкой в междуполюсном окне:

$$S_{\epsilon} = \frac{\pi \cdot d_{\text{np}}^2 \cdot w_{\epsilon}}{4} = \frac{\pi \cdot 0,815^2 \cdot 1138}{4} = 669,1 \text{ мм}^2$$

Проверка расчета обмотки произведена численным моделированием в пакете «Elcut». По результатам расчета построена картина поля (рис. 6.1) и кривая распределения индукции (рис. 6.2)

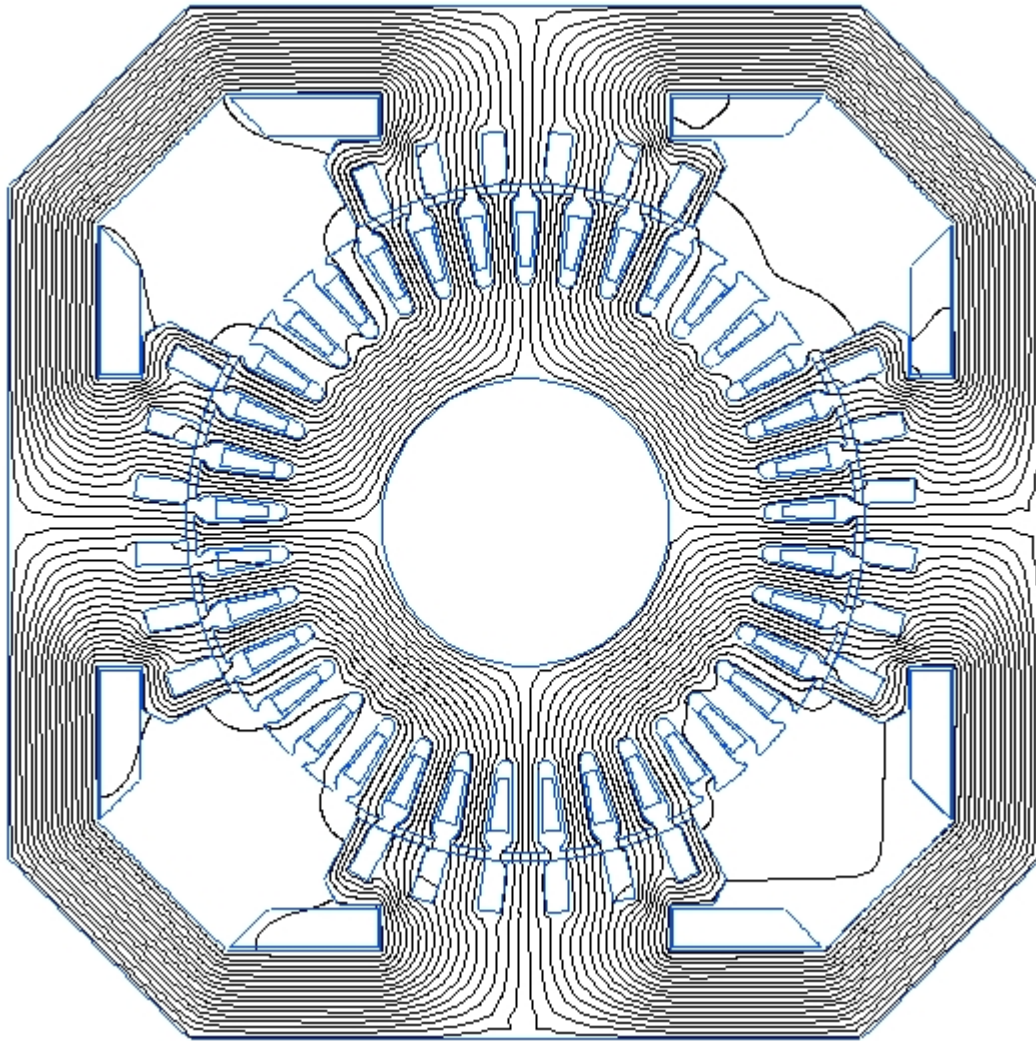


Рис. 6.1. Поле обмотки возбуждения при Холостом ходе.

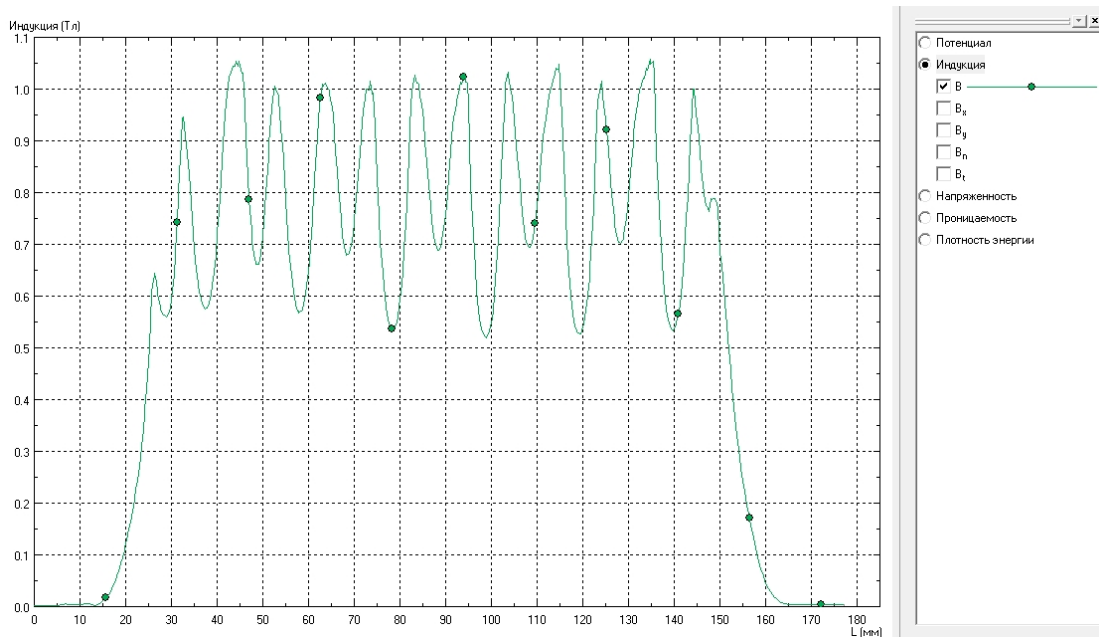


Рис. 6.2. Кривая магнитной индукции в воздушном зазоре при номинальной нагрузке.

7. Расчет потерь и КПД

Потери в обмотках якорной цепи:

$$P_a = I_{ан}^2 \cdot R_{ан} = 110^2 \cdot 0,310 = 3754 \text{ Вт}$$

Потери в цепи обмотки параллельного возбуждения:

$$P_{\epsilon} = i_{\epsilon}^2 \cdot R_{\epsilon н} = 2,5^2 \cdot 237 = 1504 \text{ Вт}$$

Электрические потери в щеточном контакте:

$$P_{щк} = 2U_{щ} \cdot I_{ан} = 2,5 \cdot 110 = 275 \text{ Вт}$$

Где $2U_{щ} = 2,5$ по таблице П4.2

Масса зубцов:

$$\begin{aligned} m_{cz} &= g_{Fe} \cdot Z_a \cdot b_z \cdot \left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2} \right) \cdot l_a \cdot k_c = \\ &= 7,8 \cdot 37 \cdot 9 \cdot \left(24 + \frac{4,7 + 2,7}{2} \right) \cdot 335 \cdot 0,97 = 23,3 \text{ кг} \end{aligned}$$

Масса сердечника якоря:

$$\begin{aligned} m_{cj} &= g_{Fe} \cdot \frac{\pi}{4} \left[(D_a - 2 \cdot h_n)^2 - D_{вл}^2 \right] \cdot l_a \cdot k_c = \\ &= 7,8 \cdot \frac{\pi}{4} \left[(230 - 2 \cdot 32)^2 - 100^2 \right] \cdot 335 \cdot 0,97 = 48,45 \text{ кг} \end{aligned}$$

Удельные потери в стали 2312 (ГОСТ 21427.2-83):

$$p_{1.0/50} = 1,75 \text{ Вт/кг}$$

Потери в стали в зубцовом слое:

$$P_{cz} = 2,3 \cdot p_{1.0/50} \cdot B_z^2 \cdot m_{cz} = 2,3 \cdot 1,75 \cdot 1,89^2 \cdot 23,3 = 336 \text{ Вт}$$

Потери в стали в сердечнике якоря:

$$P_{cj} = 2,3 \cdot p_{1.0/50} \cdot B_j^2 \cdot m_{ca} = 2,3 \cdot 1,75 \cdot 1,57^2 \cdot 48,45 = 483 \text{ Вт}$$

Суммарные потери в стали:

$$P_c = P_{cj} + P_{cz} = 336 + 483 = 819 \text{ Вт}$$

Потери в компенсационной обмотке:

$$P_k = I_{ан}^2 \cdot R_{кн} = 110^2 \cdot 0,113 = 1375 \text{ Вт}$$

Механические потери на трение щеток о коллектор:

$$P_{миц} = 7,5 \cdot S_{щн} \cdot V_k = 7,5 \cdot 4,2 \cdot 6 = 193 \text{ Вт}$$

Масса меди обмотки якоря:

$$\begin{aligned} m_{ма} &= g_{Cu} \cdot N_a \cdot q_{np} \cdot l_{аср} = \\ &= 8,9 \cdot 444 \cdot 7,88 \cdot 0,48 = 14,9 \text{ кг} \end{aligned}$$

Где $l_{аср}$ средняя длина полувитка секции обмотки якоря.

Длина вала:

$$\begin{aligned} l_{вл} &= l_a + \tau + l_{ксп} + l_{1вл} + (100 \dots 300) = \\ &= 335 + 181 + 50 + 50 + (100 \dots 300) = 716 \dots 916 \text{ мм} \end{aligned}$$

Принимаем для расчета длину вала $l_{вл} = 750 \text{ мм}$.

Масса вала:

$$m_{вл} = g_{Fe} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{влсп} \cdot l_{вл} \cdot 10^{-6} = 7,8 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 70 \cdot 750 \cdot 10^{-6} = 3,2 \text{ кг}$$

Суммарная масса всех основных элементов ротора:

$$\begin{aligned} m_{р\Sigma} &= (m_{сj} + m_{сz} + m_{ма} + m_k + m_{вл}) \cdot 1,2 = \\ &= (48,45 + 23,3 + 14,9 + 9,8 + 3,2) \cdot 1,2 = 119,58 \text{ кг} \end{aligned}$$

Добавочные потери:

$$P_{доб} = 0,005 \cdot \frac{P_{2н}}{\eta} = 0,005 \cdot \frac{40000}{0,81} = 25 \text{ Вт}$$

Полные потери:

$$\begin{aligned} \Sigma P &= P_a + P_g + P_{доб} + P_{щк} + P_d + P_c + P_k = \\ &= 3754 + 1504 + 25 + 275 + 793 + 819 + 1375 = 8758 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Полная подведенная мощность:

$$P_{1н} = U_n \cdot I_n + U_n \cdot i_g = 440 \cdot 110 + 440 \cdot 2,51 = 49507 \text{ Вт}$$

Активная мощность:

$$P_{2н} = P_{1н} - \Sigma P = 49507 - 8758 = 40750 \text{ Вт}$$

КПД:

$$\eta = \frac{P_{2н}}{P_{1н}} = \frac{40750}{49507} = 0,823$$

8. Тепловой расчет.

Расчетное сопротивление обмотки якоря:

$$R_{at} = 1,54 \cdot R_a = 1,54 \cdot 0,119 = 0,183 \text{ Ом}$$

Сопротивление в обмотке добавочных полюсов:

$$R_{dt} = 1,54 \cdot R_d = 1,54 \cdot 0,043 = 0,066 \text{ Ом}$$

Сопротивление в обмотке главных полюсов:

$$R_{gt} = 1,54 \cdot R_g = 1,54 \cdot 154 = 237,6 \text{ Ом}$$

Максимальный пусковой ток:

$$I_{п\max} = \frac{U_n}{R_{gt}} = \frac{440}{237} = 1,852 \text{ А}$$

Средняя ширина секции обмотки:

$$b_{cp} = t_{cp} \cdot y_{1z} = 16,8 \cdot 9,25 = 155 \text{ мм}$$

Средняя длина одной лобовой части обмотки:

$$l_{л2} = (0,7 + 0,4 \cdot p) \cdot b_{cp} + 15 = (0,7 + 0,4 \cdot 2) \cdot 155 + 15 = 248,2 \text{ мм}$$

Средняя длина витка обмотки:

$$l_{cp} = (l_{\delta} \cdot 10^3 + l_{л2}) \cdot 2 = (0,335 + 248,2) \cdot 2 = 1167 \text{ мм}$$

Условная поверхность охлаждения якоря:

$$S_{nat} = \pi \cdot D_a \cdot 10^3 \cdot l_a \cdot 10^3 = \pi \cdot 0,230 \cdot 10^3 \cdot 0,335 \cdot 10^3 = 242100 \text{ мм}^2$$

Удельный тепловой поток от потерь в якоря:

$$p_{at} = \frac{\frac{P_{at} \cdot 2 \cdot l_{\delta} \cdot 10^3}{l_{cp}} + P_{cm}}{S_{nat}} = \frac{\frac{2212 \cdot 2 \cdot 0,335 \cdot 10^3}{1167} + 819}{242100} = 8,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}$$

Превышение температуры охлаждаемой поверхности якоря:

$$\Delta_{va} = \frac{p_{at}}{\alpha_2} = \frac{8,6 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-5}} = 86,3 \text{ °С}$$

Где, $\alpha_2=10 \cdot 10^{-5}$ - коэффициент теплоотдачи поверхности якоря

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки якоря:

Условная поверхность охлаждения пазов:

$$P_{II} = \pi \cdot (r_1 + r_2) + 2 \cdot h_1 = \pi \cdot (4,7 + 2,7) + 2 \cdot 0,024 = 0,071 \text{ м}$$

$$S_{изп} = P_{II} \cdot Z \cdot l_a \cdot 10^3 = 0,071 \cdot 37 \cdot 0,335 \cdot 10^3 = 879,7 \text{ мм}^2$$

Удельный тепловой поток от потерь в якоря:

$$p_{изп} = \frac{P_{at} \cdot 2 \cdot l_{\delta} \cdot 10^3}{S_{изп}} = \frac{2212 \cdot 2 \cdot 0,335 \cdot 10^3}{879,7} = 1,444 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}$$

$$\Delta_{визп} = p_{изп} \cdot \left(\frac{r_1 + r_2}{8 \cdot \lambda_{\text{эквд}}} + \frac{b_{из}}{\lambda_{\text{эква}}} \right) = 1,444 \cdot \left(\frac{4,7 + 2,7}{8 \cdot 130 \cdot 10^{-5}} + \frac{0,0005}{16 \cdot 10^{-5}} \right) = 5,55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Где $\lambda_{\text{эква}}=130 \cdot 10^{-5}$, а $\lambda_{\text{эква}}=16 \cdot 10^{-5}$

Превышение температуры охлаждаемой поверхности лобовых частей обмотки якоря:

Условная поверхность охлаждения лобовых частей:

$$l_B = 0,4 \cdot \tau \cdot 10^3 = 0,4 \cdot 0,181 \cdot 10^3 = 72,2 \text{ мм}$$

$$S_{лч} = 2 \cdot \pi \cdot D_a \cdot 10^3 \cdot l_B = 2 \cdot \pi \cdot 230 \cdot 72,2 = 104400 \text{ мм}^2$$

Удельный тепловой поток от потерь в лобовых частях:

$$p_{лч} = \frac{P_{at} \cdot 2 \cdot l_{л2}}{S_{лч}} = \frac{2212 \cdot 2 \cdot 248,2}{1044 \cdot 10^5} = 9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}$$

$$\Delta_{влч} = \frac{p_{лч}}{\alpha_2} = \frac{9 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-5}} = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки якоря:

$$\Delta_{визл} = p_{лч} \cdot \left(\frac{h_n \cdot 10^3}{8 \cdot \lambda_{\text{эква}}} \right) = 9 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{0,032 \cdot 10^3}{8 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3}} \right) = 27,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta_{t_2}' = (\Delta_{va} + \Delta_{vuzn}) \cdot \frac{2 \cdot l_{\delta}}{l_{cp}} + (\Delta_{v_{лч}} + \Delta_{v_{узн}}) \cdot \frac{2 \cdot l_{л2}}{l_{cp}} =$$

$$= (86,32 + 5,5) \cdot \frac{2 \cdot 335}{1166} + (90 + 27,7) \cdot \frac{2 \cdot 248,2}{1166} = 102,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Для данной машины среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой воздуха внутри машины, необходимо уменьшить на 20%

$$\Delta_{t_2} = \Delta_{t_2}' \cdot 0,8 = 102,9 \cdot 0,8 = 82,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Сумма потерь, отводимых охлаждающим внутренним объемом двигателя воздухом:

$$P_{\Sigma} = P_{at} + P_{kt} \cdot \frac{2 \cdot l_{л2}}{l_{аср}} + k_h \cdot (P_{dt} + P_{kt} \cdot \frac{2 \cdot l_{кн}}{l_{аср}} + P_{et}) + P_{цит} + (P_{мех} + P_c + P_{доб}) =$$

$$= 2211 + 1374 \cdot \frac{2 \cdot 248}{480} + 0,9 \cdot (792,8 + 1374 \cdot \frac{2 \cdot 0,018}{0,480} + 814) + 254 +$$

$$+ (213 + 819 + 247) = 6483 \text{ Вт}$$

Условная поверхность охлаждения двигателя:

$$S_{охл} = P_{нар} \cdot 10^3 \cdot (l_{\delta} + 2 \cdot l_g) = 1,292 \cdot 10^3 \cdot (335 + 2 \cdot 72) = 619500 \text{ мм}^2$$

Где $P_{нар} = 1,292 \text{ м}$ – периметр наружной поверхности (по эскизу)

Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя

Коэффициент подогрева воздуха: $\alpha_B = 50 \cdot 10^{-5}$

$$\Delta_{v_{возд}} = \frac{P_{\Sigma}}{S_{охл} \cdot \alpha_B} = \frac{6483}{619500 \cdot 65 \cdot 10^{-5}} = 16,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды:

$$\Delta_{T_2} = \Delta_{t_2} + \Delta_{v_{возд}} = 82,367 + 16,1 = 98,467 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Объем круглой станины по эскизу: $V_k = 0,027 \text{ м}^3$, Объем прямоугольной

станины по эскизу: $V_{п} = 0,019 \text{ м}^3$

Масса станины круглой машины: $m_{кс} = V_k \cdot 7800 = 209,58 \text{ кг}$

Масса станины прямоугольной машины: $m_{пс} = V_{п} \cdot 7800 = 151,2 \text{ кг}$

Выводы и заключение

В нижеследующую таблицу сведены основные результаты проектирования двигателя.

Обозначение и ед. измерений	Круглая станина	Прямоугольная станина
h , мм	230	180
D_a , мм	230	230
l_a , мм	335	335
λ_a	1,453	1,453
N_a	444	444
$w_{c.c.p}$	2	2
Z_a	37	37
K	111	111
t_z , мм	19,5	19,5
yn	9	9
ε	-0,75	-0,75
q_{np} , мм ²	7,88	7,88
r_1 , мм	4,7	4,7
r_2 , мм	2,7	2,7
h_1 , мм	24	24
h_n , мм	32	32
$j_{ан}$, А/мм ²	7,4	7,4
$A_{ан}$, А/м	33792	33792

Φ_H , Вб	0,037	0,037
B_δ , ТЛ	0,8	0,8
B_{z_max} , ТЛ	1,9	1,9
$r_{a\Theta}$, Ом	0,119	0,119
h , мм	225	180
P_a , Вт	3754	3754
P_{dt} , Вт	793	793
P_e , Вт	1456	1504
P_{kt} , Вт	1375	1375
P_{uit} , Вт	193	193
P_c , Вт	845	819
$P_{доб}$, Вт	25	25
$P_{мех}$, Вт	213	213
ΣP , Вт	8706	8758
P_{1H} , Вт	49507	49507
P_{2H} , Вт	40806	40750
η	0,824	0,823
Δ_{va} , °C	71	86,329
$\Delta_{визп}$, °C	5,53	5,556
$\Delta_{vлч}$, °C	89,74	90,161
$\Delta_{возд}$, °C	13,425	16,1
Δ_{t2} , °C	82,367	82,367
Δ_{T2} , °C	95,792	98,467

Анализ данных, представленных в таблице, позволяет сделать следующие выводы:

1. Двигатель с прямоугольной станиной по сравнению с двигателем со станиной круглой формы имеет уменьшенную на две ступени централь - с 225 мм до 180 мм.
2. Погрешность расчета магнитного потока в цепной постановке по результатам численного моделирования поля в среде Elcut составляет 8 %, что указывает на возможность уменьшения и расхода активных материалов, и электрических потерь в обмотке возбуждения.
3. Из сопоставления соответствующих технико-экономических показателей, представленных в итоговой таблице, следует, что спроектированный двигатель превосходит отечественные и зарубежные аналоги по КПД (у ЛАК 4180 ВА больше частота вращения).

Обозначение и размерность	Спроектированный двигатель	4ПФ180М	ЛАК 4180 ВА
P_2 , кВт	40	40	41
n_n , об/мин	775	775	820
n_{max} , об/мин	3800	3800	2360
U_1 , В	440	440	440
I_a , А	110	97.6	111
η , %	82	81	82.5

Список литературы

1. Забоин В.Н., Прусс-Жуковский В.В., Сарычев Г.М. Оптимизация электромагнитных параметров коллекторных электрических машин: Учебн. Пособие. – Л.: изд. ЛПИ, 1988.– 98с.
2. Расчет магнитных характеристик и обмоток возбуждения электрических машин постоянного тока. Методические указания /Сост. Забоин В.Н., Прусс-Жуковский В.В., Сарычев Г.М. – Л.: ЛПИ, 1989. – 23с.
3. Забоин В.Н. Расчет потерь и К.П.Д. машин постоянного тока. СПб.: Изд. «НЕСТОР», 2006. – 28с.
4. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов/ Под ред. О.Д. Гольдберга. – М.: Высш. шк., 1984. – 431с., илл.
5. Рабинович И.Н., Шубов И.Г. Проектирование электрических машин постоянного тока. Л., «Энергия», 1967. – 504с., с илл.
6. Проектирование электрических машин: Учебное пособие для вузов/ И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.; под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. –496 с., илл.
7. Электрические машины : Учебник для вузов / А.И. Вольдек .— 3-е изд., перераб .— Ленинград : Энергия, 1978 .— 832 с : ил .— Библиогр.: с. 814-817.
8. Проектирование электрических машин / П.С. Сергеев, Н.В. Виноградов, Ф.А. Горяинов ; Под ред. П.С. Сергеева .— 3-е изд., перераб. и доп .— Москва : Энергия, 1969 .— 632 с. : ил .— Библиогр.: с.626-627.