

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Факультет приборостроения, информационных
технологий и электроники
Кафедра «Электроэнергетика и электротехника»

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ**

по дисциплине: «Электрические машины»
на тему: «Двигатель постоянного тока стартера автомобиля»

ПГУ 3.13.03.02.011 ПЗ

Студент: _____ Чернобаев Е.С.

Группа: _____ 14ПЭ2

Руководитель:
к.т.н., доцент _____ Исаев С.Г.

Работа защищена с оценкой удовл.

Преподаватель _____

Дата защиты 11.01.17

Пенза 2016 г.

ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Электроэнергетика и электротехника»

ЗАДАНИЕ

На курсовое проектирование по дисциплине

«Электрические машины»

Студенту гр. 14ПЭ2 Чернобаеву Е.С.

Тема проекта: «Расчет двигателя постоянного тока стартера автомобиля»

Исходные данные на проектирование:

Номинальное напряжение: $U_n = 12 \text{ В}$;

Номинальная мощность: $P_2 = 1410 \text{ Вт}$;

Частота вращения якоря: $n_a = 1900 \text{ об/мин}$;

Число полюсов: $2p = 4$;

Коэффициент кратности тока: $k = 0.55$;

Падение напряжения на щетках: $\Delta U_{щ} = 1.5 \text{ В}$.

1. Расчетная часть:

- 1.1 Определение расчётной мощности двигателя и номинальной ёмкости аккумуляторной батареи;
- 1.2 Расчёт главных размеров электродвигателя (диаметр якоря, длина пакета якоря);
- 1.3 Расчет обмотки якоря;
- 1.4 Определение размера полужакрытого паза прямоугольной формы;
- 1.5 Расчет магнитной системы электродвигателя;
- 1.6 Расчёт параметров обмотки возбуждения;
- 1.7 Расчет рабочих характеристик электрического двигателя;

2. Приложение к пояснительной записке

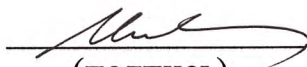
- 1. Приложение 1 – чертеж, общий вид стартера;
- 2. Приложение 2 – чертеж, магнитная система стартера;
- 3. Приложение 3 – характеристики стартерного двигателя.

Дата выдачи задания: 1 ноября 2016 г.

Срок выполнения проекта:

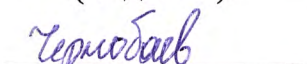
Даты защиты проекта:

Руководитель


(подпись)

/Исаев С.Г./

Студент


(подпись)

Содержание

Введение.....	3
Расчетная мощность. Номинальная ёмкость аккумуляторной батареи.....	4
Расчет главных размеров электродвигателя.....	5
Расчет обмотки якоря.....	6
Размеры полузакрытого паза прямоугольной формы.....	9
Магнитная система электродвигателя.....	10
Расчет параметров обмотки возбуждения.....	19
Рабочие характеристики.....	21
Вывод.....	28
Список литературы.....	29
Приложение 1. Чертеж общего вида стартера.....	30
Приложение 2. Чертеж магнитной системы стартера.....	31
Приложение 3. Характеристики стартерного двигателя.....	32

					ПГУ 3.13.03.02.011 ПЗ						
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Расчет двигателя постоянного тока			Лит.	Лист	Листов	
Разраб.		Чернобаев Е.С								2	32
Провер.		Исаев С.Г.									

ВВЕДЕНИЕ

Электростартер питается от аккумуляторной батареи и преобразует её электрическую энергию в механическую работу, необходимую для принудительного проворачивания коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания, до начала его самостоятельной работы. Он должен развивать достаточно большой крутящий момент, чтобы проворачивать двигатель в холодное время, когда масло в двигателе густеет. Основу автомобильных стартеров составляют электродвигатели постоянного тока с электромагнитным дистанционным управлением. Для стартерного электроприводного двигателя характерна значительная неравномерность нагрузки, обусловленная резким изменением момента сопротивления от сил давления газов в цилиндрах и сложной кинематикой кривошипно-шатунного механизма. При переменной нагрузке снижается мощность и коэффициент полезного действия системы пуска, что необходимо учитывать при выборе мощности стартерного электродвигателя и емкости аккумуляторной батареи. Режим работы электростартеров – кратковременный. В настоящее время пуск двигателей производится с помощью электрических стартеров с номинальным напряжением 12 – 24 В.

Наиболее часто применяются двигатели постоянного тока стартера автомобиля с последовательным возбуждением. Для двигателей с последовательным возбуждением характерно резкое увеличение крутящего момента, а, следовательно, и мощности с уменьшением числа оборотов вала и наоборот. Наличие больших крутящих моментов в период пуска двигателя и его разгона необходимо для преодоления инерции подвижных деталей привода. Недостатком этих двигателей является значительная частота вращения якоря в режиме холостого хода. При этом возрастают центробежные силы, действующие на якорь.

					ПГУ 3.13.03.02.011 ПЗ	Лист
						3
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1. Расчётная мощность. Номинальная ёмкость аккумуляторной батареи.

Электромагнитный КПД, учитывающий влияние магнитных и механических потерь в электродвигателе, равна $\eta_{\text{ЭМ}} = 0,91$ и определяется по рисунку 1 в заштрихованной зоне [3].

Исходные данные:

$U_{\text{н}} = 12 \text{ В}$; $P_{\text{н}} = 1410 \text{ Вт}$; $n_{\text{я}} = 1900 \text{ об/мин}$; $k = 0,55$; $U_{\text{щ}} = 1,2 \text{ В}$;

Расчетная электромагнитная мощность:

$$P = \frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{ЭМ}}} = \frac{1410}{0,91} = 1549 \text{ Вт};$$

Расчетная ЭДС в обмотке якоря:

$$E_{\text{я}} = (U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{щ}}) \cdot (1 - k) = (12 - 1,2) \cdot (1 - 0,55) = 4,86 \text{ В};$$

где $\Delta U_{\text{щ}} = 1,5 \text{ В}$ – падение напряжения на щетках.

Сила тока в расчетном режиме работы:

$$I_{\text{я}} = \frac{P}{E_{\text{я}}} = \frac{1549}{4,86} = 318,817 \text{ А};$$

Суммарное сопротивление цепи якоря:

$$R_{\text{я}} = \frac{(U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{щ}})^2 \cdot (1 - k) \cdot k}{P} = \frac{(12 - 1,2)^2 \cdot (1 - 0,55) \cdot 0,55}{1549} = 0,019 \text{ Ом};$$

Максимальная электромагнитная мощность:

$$P_{\text{max}} = \frac{P}{4k \cdot (1 - k)} = \frac{1549}{4 \cdot 0,55 \cdot (1 - 0,55)} = 1565 \text{ Вт};$$

В режиме максимальной электромагнитной мощности ($k=0,5$):

$$E_{\text{ям}} = 0,5 \cdot (U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{щ}}) = 0,5 \cdot (12 - 1,2) = 5,4 \text{ В};$$

$$I_{\text{ям}} = \frac{I_{\text{я}}}{2 \cdot k} = \frac{318,817}{2 \cdot 0,55} = 289,834 \text{ А};$$

$$R_{ят} = \frac{(U_H - \Delta U_{ш})^2}{4 \cdot P_{max}} = \frac{(12 - 1,2)^2}{4 \cdot 1565} = 0,019 \text{ Ом};$$

$$n_{ят} = \frac{0,5 \cdot n_{я}}{1 - k} = \frac{0,5 \cdot 1900}{1 - 0,55} = 2111 \frac{\text{об}}{\text{мин}};$$

По графику, представленному на рисунке 2 (а), определяем номинальную емкость аккумуляторной батареи (для температуры 25°C) [3]:

$$C_{20} = 55 \text{ А} \cdot \text{ч};$$

Внутренне сопротивление аккумуляторной батареи:

$$R_6 = \frac{\alpha_6 \cdot U_H}{C_{20}} = \frac{0,05 \cdot 12}{55} = 0,011 \text{ Ом}.$$

2. Расчёт главных размеров электродвигателя.

Соотношение мощности и частоты вращения:

$$Q = \frac{0,5 \cdot P}{k \cdot n_{я}} = \frac{0,5 \cdot 1549}{0,55 \cdot 1900} = 0,741 \text{ Вт/мин}^{-1};$$

По графику, представленному на рисунке 3 (а), определяем диаметр якоря (при температуре 25°C):

$$D_{я} = 0,065 \text{ м};$$

Диаметр корпуса:

$$D_j = 1,55 \cdot D_{я} = 1,55 \cdot 0,065 = 0,101 \text{ м};$$

По графикам, представленным на рисунках 4а, 4б, 4в определяем:

Линейную нагрузку якоря: $A = 42000 \text{ А/м}$;

Магнитную индукцию: $B_\delta = 0,85 \text{ Тл}$;

Коэффициент полюсного перекрытия: $\alpha_\delta = 0,65$.

Определяем машинную постоянную:

$$C_A = \frac{6,1}{B_\delta \cdot A \cdot a_\delta} = \frac{6,1}{0,85 \cdot 42000 \cdot 0,65} = 0,000263;$$

Длина пакета якоря:

$$l_{\text{я}} = \frac{C_A \cdot P}{n_{\text{я}} \cdot D_{\text{я}}^2} = \frac{0,000263 \cdot 1549}{1900 \cdot (0,065)^2} = 0,051 \text{ м};$$

Отношение $l_{\text{я}}/D_{\text{я}} = 0,78$ находится в рекомендуемых пределах $0,75 \dots 1,25$.

Полюсное деление:

$$\tau_{\text{пол}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{я}}}{2 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot 0,065}{2 \cdot 2} = 0,051 \text{ м};$$

Основной магнитный поток на два полюса:

$$\Phi = a_\delta \cdot \tau_{\text{пол}} \cdot l_{\text{я}} \cdot B_\delta = 0,65 \cdot 0,051 \cdot 0,051 \cdot 0,85 = 0,00143 \text{ Вб};$$

3. Расчёт обмотки якоря.

Число активных проводников обмотки якоря:

$$N = \frac{60 \cdot a_{\text{я}} \cdot E_{\text{я}}}{p \cdot n_{\text{я}} \cdot \Phi} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 4,86}{2 \cdot 1900 \cdot 0,00143} = 53,62;$$

Принимаем Число пазов якоря: $Z_{\text{пз}} = 27$.

Число витков в секции обмотки якоря:

$$\omega_{\text{я}} = \frac{0,5 \cdot N}{Z_{\text{пз}}} = \frac{0,5 \cdot 53,62}{27} = 0,993.$$

Принимаем $\omega_{\text{я}} = 1$;

Уточняем число активных проводников якоря:

$$N = \frac{\omega_{\text{я}} \cdot Z_{\text{пз}}}{0,5} = \frac{1 \cdot 27}{0,5} = 54;$$

Уточняем значение линейной нагрузки якоря:

$$A = \frac{I_{\text{я}} \cdot N}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot D_{\text{я}}} = \frac{318,817 \cdot 54}{2 \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 0,065} = 42150 \text{ А/м};$$

Уточняем значение длины пакета якоря:

$$l_{\text{я}} = \frac{6,1 \cdot P}{B_{\delta} \cdot A \cdot a_{\delta} \cdot n_{\text{я}} \cdot D_{\text{я}}^2} = \frac{6,1 \cdot 1602,27}{0,85 \cdot 42150 \cdot 0,65 \cdot 1900 \cdot (0,065)^2} = 0,051 \text{ м};$$

Отношение $l_{\text{я}} / D_{\text{я}} = 0,778$ находится в рекомендуемых пределах $0,75 \dots 1,25$.

Суммарное сопротивление обмотки якоря и последовательной обмотки возбуждения:

$$R_{\text{ст}} = R_{\text{я}\Sigma} - R_{\text{б}} = 0,019 - 0,011 = 0,0077 \text{ Ом};$$

Сопротивление обмотки якоря:

$$R_{\text{я}} = 0,55 \cdot R_{\text{ст}} = 0,55 \cdot 0,0077 = 0,004247 \text{ Ом};$$

Средняя длина проводника:

$$L_{\text{я.ср}} = l_{\text{я}} + 1,3 \cdot \tau_{\text{пол}} = 0,051 + 1,3 \cdot 0,051 = 0,117 \text{ м};$$

Площадь сечения провода

$k_t = 1$ - коэффициент, учитывающий изменение сопротивления обмотки якоря при изменении температуры.

$\rho = 17,85 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ - удельное сопротивление материала проводов при $t = 20^\circ \text{C}$.

$$S_{\text{я}} = \frac{k_t \cdot \rho \cdot L_{\text{я.ср}} \cdot N}{(2a_{\text{я}})^2 \cdot R_{\text{я}}} = \frac{1 \cdot 17,85 \cdot 10^{-9} \cdot 0,117 \cdot 54}{(2 \cdot 1)^2 \cdot 0,004247} = 6,634 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

Отношения толщины провода к его ширине:

$$\frac{a}{b} = 0,05 + \frac{10,4}{Z_{\text{пз}}} + \frac{14}{Z_{\text{пз}}^2} = 0,05 + \frac{10,4}{27} + \frac{14}{27^2} = 0,454;$$

Находим ширину провода:

$$b = \sqrt{\frac{S_{\text{я}}}{a/b}} = \sqrt{\frac{6,634 \cdot 10^{-6}}{0,454}} = 0,00382 \text{ м};$$

Толщина провода:

$$a = b \cdot \frac{a}{b} = 0,00382 \cdot 0,454 = 0,00173 \text{ м};$$

В соответствии с рекомендациями выбираем провод ПММ:

$$a = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$b = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$S_{\text{я}} = 6,837 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Отношение $\frac{a}{b} = 0,45$ находится в рекомендуемых пределах (0,33 ... 0,73).

Плотность тока в обмотке якоря:

$$j_{\text{я}} = \frac{I_{\text{я}}}{2a_{\text{я}} \cdot S_{\text{я}}} = \frac{318,82}{2 \cdot 1 \cdot 6,837 \cdot 10^{-6}} = 23,32 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2;$$

Рассчитанная плотность тока меньше допустимого значения $30 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

Уточненное значение сопротивления обмотки якоря:

$$R_{\text{я}} = \frac{k_t \cdot \rho \cdot L_{\text{я.ср}} \cdot N}{(2a_{\text{я}})^2 \cdot S_{\text{я}}} = \frac{1 \cdot 17,85 \cdot 10^{-9} \cdot 0,117 \cdot 54}{(2 \cdot 1)^2 \cdot 6,837 \cdot 10^{-6}} = 0,00412 \text{ Ом};$$

Отношение $R_{\text{я}}/R_{\text{ст}} = 0,534$ не выходит за рекомендуемые пределы (0,45 ... 0,65).

4. Размеры полузакрытого паза прямоугольной формы.

Полузакрытый паз представлен на рисунке 5.

Радиус закругления провода:

$$\begin{aligned} r_{\text{прв}} &= 1,08 \cdot \sqrt{a \cdot b - S_{\text{я}}} = 1,08 \cdot \sqrt{1,8 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-3} - 6,837 \cdot 10^{-6}} = \\ &= 0,000657 \text{ м;} \end{aligned}$$

Ширина паза ($\Delta_{\text{я}} = 0,0003$ м - толщина изоляции паза):

$$b_{\text{пз}} = a + 2 \cdot (\Delta_{\text{я}} + 0,0003) = 1,8 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot (0,0003 + 0,0003) = 0,003 \text{ м;}$$

Ширина прорези:

$$a_{\text{прз}} = 0,6 \cdot a = 0,6 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3} = 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

Максимальный диаметр второго участка зубцовой зоны:

$$\begin{aligned} D_{2\text{max}} &= D_{\text{я}} - 2 \cdot \left(h_{\text{прз}} + 0,5 \cdot \sqrt{b_{\text{пз}}^2 + a_{\text{прз}}^2} \right) = \\ &= 0,065 - 2 \cdot \left(1 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot \sqrt{(3 \cdot 10^{-3})^2 + (1,08 \cdot 10^{-3})^2} \right) \\ &= 0,06 \text{ м;} \end{aligned}$$

$h_{\text{прз}} = 1 \cdot 10^{-3}$ м - высота прорези.

Высота второго участка зубцовой зоны:

$$\begin{aligned} h_2 &= b_{\text{пз}} + 2 \cdot b - 4 \cdot r_{\text{прв}} - 0,0003 - 0,0566 \cdot \sqrt{b_{\text{пз}} - 2 \cdot r_{\text{прв}} - 0,001} = \\ &= 0,003 + 2 \cdot 0,004 - 4 \cdot 0,000657 - 0,0003 - 0,0566 \\ &\quad \cdot \sqrt{0,003 - 2 \cdot 0,000657 - 0,001} = 0,0066 \text{ м;} \end{aligned}$$

Минимальный диаметр второго участка зубцовой зоны:

$$D_{2\text{min}} = D_{2\text{max}} - 2 \cdot h_2 = 0,06 - 2 \cdot 0,0066 = 0,047 \text{ м;}$$

Расстояние между проводниками в пазе:

$$\begin{aligned} OK &= 0,5 \cdot b_{\text{пз}} - \Delta_{\text{я}} \cdot r_{\text{прв}} - 0,0001 = \\ &= 0,5 \cdot 0,003 - 0,0003 \cdot 0,000657 - 0,0001 = 0,0014 \text{ м}; \end{aligned}$$

$$ON = 0,5 \cdot a - r_{\text{прв}} = 0,5 \cdot 0,0018 - 0,000657 = 0,0002493 \text{ м};$$

$$KN = \sqrt{OK^2 - ON^2} = \sqrt{(0,0014)^2 - (0,0002493)^2} = 0,001377 \text{ м};$$

$$OX = KN + r_{\text{прв}} = 0,001377 + 0,000657 = 0,002034 \text{ м};$$

$$l = h_2 - 2 \cdot (b - OX) = 0,0066 - 2 \cdot (0,004 - 0,00203) = 0,00266 \text{ м};$$

Минимальный диаметр зубцовой зоны:

$$D_{\text{я min}} = D_{2 \text{ min}} - b_{\text{пз}} = 0,047 - 0,003 = 0,044 \text{ м};$$

5. Магнитная система электродвигателя.

Расчётные диаметры на трёх участках зубцовой зоны (рисунок 7):

$$D_1 = 0,5 \cdot (D_{\text{я}} + D_{2 \text{ max}}) = 0,5 \cdot (0,065 + 0,06) = 0,0625 \text{ м};$$

$$D_{2 \text{ ср}} = 0,5 \cdot (D_{2 \text{ max}} + D_{2 \text{ min}}) = 0,5 \cdot (0,06 + 0,047) = 0,0535 \text{ м};$$

$$D_3 = D_{2 \text{ min}} - 0,5 \cdot b_{\text{пз}} = 0,047 - 0,5 \cdot 0,003 = 0,0445 \text{ м};$$

Высота первого участка зубцовой зоны:

$$h_1 = 0,5 \cdot (D_{\text{я}} - D_{2 \text{ max}}) = 0,5 \cdot (0,065 - 0,06) = 0,0025 \text{ м};$$

Высота третьего участка зубцовой зоны:

$$h_3 = 0,5 \cdot b_{\text{пз}} = 0,5 \cdot 0,003 = 0,0015 \text{ м};$$

Высота зубца:

$$h_z = h_1 + h_2 + h_3 = 0,0025 + 0,0066 + 0,0015 = 0,0101 \text{ м};$$

Зубцовые шаги по наружному диаметру якоря в расчетных сечениях зубца:

$$t_z = \frac{\pi \cdot D_{\text{я}}}{Z_{\text{пз}}} = \frac{3,14 \cdot 0,065}{27} = 0,00756 \text{ м};$$

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_{\text{пз}}} = \frac{3,14 \cdot 0,062}{27} = 0,00726 \text{ м};$$

$$t_{2 \text{ max}} = \frac{\pi \cdot D_{2 \text{ max}}}{Z_{\text{пз}}} = \frac{3,14 \cdot 0,06}{27} = 0,00696 \text{ м};$$

$$t_{2 \text{ ср}} = \frac{\pi \cdot D_{2 \text{ ср}}}{Z_{\text{пз}}} = \frac{3,14 \cdot 0,053}{27} = 0,006191 \text{ м};$$

$$t_{2 \text{ min}} = \frac{\pi \cdot D_{2 \text{ min}}}{Z_{\text{пз}}} = \frac{3,14 \cdot 0,047}{27} = 0,005423 \text{ м};$$

$$t_3 = \frac{\pi \cdot D_3}{Z_{\text{пз}}} = \frac{3,14 \cdot 0,045}{27} = 0,005249 \text{ м};$$

Ширина зубца в расчетных сечениях:

$$b_z = t_z - a_{\text{прз}} = 0,00756 - 0,00108 = 0,00648 \text{ м};$$

$$b_1 = t_1 - \sqrt{b_{\text{пз}}^2 - h_1^2} = 0,00726 - \sqrt{0,003^2 - 0,002594^2} = 0,00594 \text{ м};$$

$$b_{2 \text{ max}} = t_{2 \text{ max}} - b_{\text{пз}} = 0,00696 - 0,003 = 0,00396 \text{ м};$$

$$b_{2 \text{ ср}} = t_{2 \text{ ср}} - b_{\text{пз}} = 0,006191 - 0,003 = 0,003191 \text{ м};$$

$$b_{2 \text{ min}} = t_{2 \text{ min}} - b_{\text{пз}} = 0,005123 - 0,003 = 0,002423 \text{ м};$$

$$b_3 = t_3 - 0,0866 \cdot b_{\text{пз}} = 0,005249 - 0,866 \cdot 0,003 = 0,002651 \text{ м}.$$

Коэффициент заполнения паза принимаем $k_{\text{стл}} = 0,95$.

Магнитные индукции в расчетных сечениях зубца:

$$B_1 = \frac{t_z \cdot B_{\delta}}{k_{\text{стл}} \cdot b_1} = \frac{0,00756 \cdot 0,85}{0,95 \cdot 0,005594} = 1,176 \text{ Тл};$$

$$B_{2 \min} = \frac{t_z \cdot B_\delta}{k_{\text{стл}} \cdot b_{2 \max}} = \frac{0,00756 \cdot 0,85}{0,95 \cdot 0,00396} = 1,709 \text{ Тл};$$

$$B_{2 \text{ ср}} = \frac{t_z \cdot B_\delta}{k_{\text{стл}} \cdot b_{2 \text{ ср}}} = \frac{0,00756 \cdot 0,85}{0,95 \cdot 0,003191} = 2,12 \text{ Тл};$$

$$B_{2 \max} = \frac{t_z \cdot B_\delta}{k_{\text{стл}} \cdot b_{2 \min}} = \frac{0,00756 \cdot 0,85}{0,95 \cdot 0,002423} = 2,793 \text{ Тл};$$

$$B_3 = \frac{t_z \cdot B_\delta}{k_{\text{стл}} \cdot b_3} = \frac{0,00756 \cdot 0,85}{0,95 \cdot 0,002651} = 2,553 \text{ Тл};$$

Значение индукции $B_{2 \max} = 2,793 \text{ Тл}$ не выходит за рекомендуемые пределы 1,8 ... 3,2 Тл.

Зубцовые коэффициенты для расчетных сечений зубца:

$$k_{z1} = \frac{t_1}{k_{\text{стл}} \cdot b_1} - 1 = \frac{0,00726}{0,95 \cdot 0,00594} - 1 = 0,328;$$

$$k_{z2 \min} = \frac{t_{2 \max}}{k_{\text{стл}} \cdot b_{2 \max}} - 1 = \frac{0,00696}{0,95 \cdot 0,00396} - 1 = 0,85;$$

$$k_{z2 \text{ ср}} = \frac{t_{2 \text{ ср}}}{k_{\text{стл}} \cdot b_{2 \text{ ср}}} - 1 = \frac{0,006191}{0,95 \cdot 0,003191} - 1 = 1,042;$$

$$k_{z2 \max} = \frac{t_{2 \min}}{k_{\text{стл}} \cdot b_{2 \min}} - 1 = \frac{0,005423}{0,95 \cdot 0,002423} - 1 = 1,356;$$

$$k_{z3} = \frac{t_3}{k_{\text{стл}} \cdot b_3} - 1 = \frac{0,005249}{0,95 \cdot 0,002651} - 1 = 1,084.$$

Напряженность магнитного поля определяем по зависимостям, приведенным на рисунках 9 и 10.

$$H_1 = 800 \text{ А/м};$$

$$H_{2 \max} = 131000 \text{ А/м};$$

$$H_{2 \min} = 4500 \text{ А/м};$$

$$H_3 = 81000 \text{ А/м};$$

$$H_{2 \text{ ср}} = 26000 \text{ А/м};$$

Средняя напряженность на втором участке:

$$H_2 = \frac{H_{2\min} + 4 \cdot H_{2\text{cp}} + H_{2\max}}{6} = \frac{4500 + 4 \cdot 26000 + 131000}{6} = 39920 \text{ А/м}$$

МДС для первого участка:

$$F_1 = 2 \cdot h_1 \cdot H_1 = 2 \cdot 0,002594 \cdot 800 = 4,151 \text{ А};$$

МДС для второго участка:

$$F_2 = 2 \cdot h_2 \cdot H_2 = 2 \cdot 0,0066 \cdot 39920 = 527 \text{ А};$$

МДС для третьего участка:

$$F_3 = 2 \cdot h_3 \cdot H_3 = 2 \cdot 0,0015 \cdot 81000 = 243 \text{ А};$$

МДС для зубцовой зоны:

$$F_z = F_1 + F_2 + F_3 = 4,15 + 527 + 243 = 774,1 \text{ А}.$$

Принимаем длину воздушного зазора $\delta = 0,0006 \text{ м}$.

Коэффициент воздушного зазора:

$$k_\delta = \frac{t_z + 10 \cdot \delta}{b_z + 10 \cdot \delta} = \frac{0,00756 + 10 \cdot 0,0006}{0,0065 + 10 \cdot 0,0006} = 1,087;$$

МДС для воздушного зазора:

$$F_\delta = \frac{2 \cdot k_\delta \cdot \delta \cdot B_\delta}{\mu_0} = \frac{2 \cdot 1,087 \cdot 0,0006 \cdot 0,85}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 881,91 \text{ А};$$

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

Размеры корпуса

Наружный диаметр:

$$D_j = 1,5 \cdot D_\text{я} = 1,5 \cdot 0,065 = 0,098 \text{ м};$$

Длина корпуса:

$$l_j = 1,8 \cdot l_\text{я} = 1,8 \cdot 0,051 = 0,091 \text{ м};$$

Коэффициент рассеивания магнитного потока $\sigma = 1,15$; площадь расчетного сечения при $B_j = 1,3$ Тл:

$$S_j = \frac{\sigma \cdot \Phi}{2 \cdot B_j} = \frac{1,15 \cdot 0,001431}{2 \cdot 1,3} = 0,000633 \text{ м}^2;$$

Толщина расчетного сечения:

$$h_j = \frac{S_j}{l_j} = \frac{0,000633}{0,091} = 0,006956 \text{ м};$$

Диаметр расточки полюсов:

$$D_i = D_{\text{я}} + 2 \cdot \delta = 0,065 + 2 \cdot 0,0006 = 0,0662 \text{ м};$$

Длина полюсной дуги:

$$b_i = a_{\delta} \cdot \tau_{\text{пол}} + 2 \cdot \delta = 0,65 \cdot 0,051 + 2 \cdot 0,0006 = 0,034 \text{ м};$$

Центральный угол полюсной дуги:

$$\beta = \frac{2 \cdot b_i}{D_{\text{я}}} = \frac{2 \cdot 0,034}{0,065} = 1,058 \text{ рад} = 60^\circ;$$

Размеры полюса

Длина полюса:

$$l_m = l_{\text{я}} - 0,002 = 0,051 - 0,002 = 0,049 \text{ м};$$

Площадь сечения полюса при $B_m = 1,5$ Тл:

$$S_m = \frac{\sigma \cdot \Phi}{B_m} = \frac{1,15 \cdot 0,001431}{1,5} = 0,001097 \text{ м}^2;$$

Ширина полюса:

$$b_m = \frac{S_m}{l_m} = \frac{0,001097}{0,049} = 0,023 \text{ м};$$

Высота полюса:

$$h_m = 0,5 \cdot (D_j - D_i - 2 \cdot h_j) = 0,5 \cdot (0,098 - 0,066 - 2 \cdot 0,006956) = 0,008694 \text{ м.}$$

Высота наконечника:

$$h_{нк} = 0,3 \cdot h_M = 0,3 \cdot 0,008694 = 0,002608 \text{ м.}$$

Длина наконечника:

$$l_{нк} = 0,5 \cdot (b_i - b_M) = 0,5 \cdot (0,034 - 0,023) = 0,005893 \text{ м;}$$

Диаметр вала якоря:

$$D_B = 0,3 \cdot D_{я} = 0,3 \cdot 0,065 = 0,02 \text{ м;}$$

Высота сердечника якоря:

$$h_{я} = 0,5 \cdot (D_{я} - D_B - 2 \cdot h_z) = 0,5 \cdot (0,065 - 0,02 - 2 \cdot 0,011) = 0,012 \text{ м.}$$

Магнитная индукция якоря

В сердечнике:

$$B_{я} = \frac{a_{\delta} \cdot \tau_{пол} \cdot B_{\delta}}{2 \cdot k_{стл} \cdot h_{я}} = \frac{0,65 \cdot 0,051 \cdot 0,85}{2 \cdot 0,95 \cdot 0,012} = 1,231 \text{ Тл;}$$

В полюсе:

$$B_M = \frac{\sigma \cdot a_{\delta} \cdot \tau_{пол} \cdot l_{я} \cdot B_{\delta}}{l_M \cdot b_M} = \frac{1,15 \cdot 0,65 \cdot 0,051 \cdot 0,051 \cdot 0,85}{0,049 \cdot 0,023} = 1,495 \text{ Тл;}$$

В корпусе:

$$B_j = \frac{\sigma \cdot a_{\delta} \cdot \tau_{пол} \cdot l_{я} \cdot B_{\delta}}{2 \cdot l_j \cdot h_j} = \frac{1,15 \cdot 0,65 \cdot 0,051 \cdot 0,051 \cdot 0,85}{2 \cdot 0,091 \cdot 0,006956} = 1,295 \text{ Тл;}$$

Магнитные индукции $B_{я}$, B_M , B_j в расчетном режиме не выходят за рекомендуемые пределы 1,0 ... 1,7 Тл.

Длина средних магнитных линий якоря

В сердечнике:

$$L_{\text{я}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{в}} + h_{\text{я}})}{2 \cdot p} + h_{\text{я}} - 0,5 \cdot b_{\text{м}} = \\ = \frac{3,14 \cdot (0,02 + 0,012)}{4} + 0,012 - 0,5 \cdot 0,023 = 0,026 \text{ м}$$

В корпусе:

$$L_{\text{к}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{к}} + h_{\text{к}})}{2 \cdot p} + h_{\text{к}} - 0,5 \cdot b_{\text{м}} = \\ = \frac{3,14 \cdot (0,098 + 0,00695)}{4} + 0,006956 - 0,5 \cdot 0,023 = 0,078 \text{ м};$$

Напряженности магнитного поля в сердечнике якоря, в полюсе и в корпусе определяют по характеристикам намагничивания (рисунок 9).

$$H_{\text{я}} = 950 \text{ А/м};$$

$$H_{\text{м}} = 2000 \text{ А/м};$$

$$H_{\text{к}} = 1250 \text{ А/м}.$$

МДС для сердечника:

$$F_{\text{я}} = L_{\text{я}} \cdot H_{\text{я}} = 0,026 \cdot 950 = 24,26 \text{ А};$$

МДС для корпуса:

$$F_{\text{к}} = L_{\text{к}} \cdot H_{\text{к}} = 0,078 \cdot 1250 = 97,12 \text{ А};$$

МДС для полюса:

$$F_{\text{м}} = 2 \cdot h_{\text{м}} \cdot H_{\text{м}} = 2 \cdot 0,008694 \cdot 2000 = 34,77 \text{ А};$$

МДС для воздушного зазора в стыке полюса с корпусом:

$\delta_{\text{СТК}}$ - воздушный зазор в стыке полюса с корпусом ($\delta_{\text{СТК}} = 0,05 \cdot 10^{-3}$ м.);

$$F_{\delta_{\text{СТК}}} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot a_{\delta} \cdot \tau_{\text{пол}} \cdot l_{\text{я}} \cdot B_{\delta} \cdot \delta_{\text{СТК}}}{\mu_0 \cdot l_{\text{м}} \cdot b_{\text{м}}} =$$
$$= \frac{2 \cdot 1,15 \cdot 0,65 \cdot 0,051 \cdot 0,85 \cdot 0,052 \cdot 0,05 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 0,049 \cdot 0,023} = 118,93 \text{ А};$$

Суммарная МДС на два полюса в расчетном рабочем режиме:

$$F = F_z + F_{\delta} + F_{\text{я}} + F_m + F_j + F_{\delta_{\text{СТК}}}$$
$$= 774,15 + 881,91 + 24,26 + 34,77 + 97,12 + 118,93 = 1931 \text{ А}.$$

Аналогично рассчитываем МДС на два полюса и для других значений магнитной индукции B_{δ} в пределах 0,1...1,0 Тл. Результаты расчета заносим в таблицу 1, характеристика намагничивания стартерного электродвигателя в режиме холостого хода изображена на рисунке 1 (Приложение 3).

Таблица 1

B_{δ} , ТЛ	0,1	0,3	0,45	0,6	0,75	0,85	1
B_1 , ТЛ	0,138	0,415	0,623	0,829	1,038	1,176	1383
B_{2min} , ТЛ	0,201	0,603	0,905	1,206	1,508	1,709	2,011
B_{2cp} , ТЛ	0,249	0,748	1,123	1,497	1,871	2,12	2,495
B_{2max} , ТЛ	0,329	0,986	1,478	1,971	2,464	2,793	3,285
B_3 , ТЛ	0,03	0,901	1,352	1,802	2,253	2,553	3,003
H_1 , А/м	120	230	350	450	610	800	1600
H_{2min} , А/м	155	340	500	930	2000	4500	17000
H_{2cp} , А/м	178	400	760	2000	9300	26000	83000
H_{2max} , А/м	205	600	1950	1600	56000	131000	220000
H_2 , А/м	179	423	915	4155	15870	39920	97830
H_3 , А/м	195	500	1400	7400	33000	81000	196000
F_1 , А	0,62	1,193	1,816	2,335	3,165	4,151	8,302
F_2 , А	2,36	5,58	12,08	54,85	209,48	527	1252
F_3 , А	0,59	1,5	4,2	22,2	99	243	588
F_z , А	3,57	8,28	18,1	79,4	311,6	774,18	1848
F_{δ} , А	103,8	311	466,9	622,5	778,6	881,9	1038
$B_{я}$, ТЛ	0,145	0,435	0,652	0,869	1,087	1,231	1,449
B_m , ТЛ	0,176	0,527	0,791	1,055	1,319	1,495	1,758
B_j , ТЛ	0,152	0,457	0,686	0,914	1,143	1,295	1,524
$H_{я}$, А/м	120	236	360	450	600	950	1750
H_m , А/м	145	300	450	650	1220	2000	6000
H_j , А/м	130	240	370	510	770	1250	2100
$F_{я}$, А	3,065	5,874	9,194	11,492	15,323	24,262	44,692
F_m , А	2,521	5,22	7,824	11,3	21,21	34,78	104,32
F_j , А	10,101	18,65	28,75	39,62	59,83	97,12	163,16
$F_{\delta \text{ стк}}$, А	14	42	63	84	105	119	140
F , А	137	391,3	593,7	848,3	1291	1931	3338

6. Расчёт параметров обмотки возбуждения.

С учетом размагничивающего действия реакции якоря МДС возбуждения должна превышать МДС расчетного рабочего режима.

$$F_{вз} = 1,3 \cdot F = 1,3 \cdot 1931 = 2510 \text{ А.}$$

Выбираем схему стартерного электродвигателя с последовательным возбуждением и попарно параллельным соединением катушек ($a_c = 2$).

В этом случае число витков в катушке:

$$\omega_{к.с.} = \frac{F_{вз} \cdot a_c}{2 \cdot I_{я}} = \frac{2510 \cdot 2}{2 \cdot 318,817} = 7,87;$$

$a_c = 2$ - число попарно параллельно соединенных катушек.

Сопротивление последовательной обмотки возбуждения:

$$R_c = R_{ст} - R_{я} = 0,00772 - 0,004121 = 0,003601 \text{ Ом;}$$

Сопротивление катушки:

$$R_{к.с.} = \frac{a_c^2 R_c}{n} = \frac{2^2 \cdot 0,003601}{4} = 0,003601 \text{ Ом;}$$

$n = 4$ - число катушек последовательной катушки возбуждения.

Максимально возможная ширина катушки:

$$\begin{aligned} b_k^* &= \frac{\pi \cdot (D_{я} + 2 \cdot \delta + 2 \cdot h_{нк})}{4 \cdot p} - 0,5 \cdot (b_m + d_{\delta} - 0,002) = \\ &= \frac{3,14 \cdot (0,065 + 2 \cdot 0,0006 + 2 \cdot 0,002608)}{4 \cdot 2} - 0,5 \\ &\cdot (0,023 + 0,016 - 0,002) = 0,009621 \text{ м;} \end{aligned}$$

$$d_{\delta} = 0,25 \cdot D_{я} = 0,25 \cdot 0,065 = 0,016 \text{ м.}$$

Средняя длина витка катушки:

$$L_{\text{к.ср}} = 2 \cdot l_m + 2 \cdot b_m + \pi \cdot b_k^* = 2 \cdot 0,049 + 2 \cdot 0,023 + 3,14 \cdot 0,009621 = 0,173 \text{ м.}$$

Площадь сечения провода обмотки возбуждения:

$$S_c = \frac{L_{\text{к.ср}} \cdot \rho \cdot k_t \cdot \omega_{\text{к.с.}}}{R_{\text{к.с.}}} = \frac{0,173 \cdot 17,85 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 7,874}{0,003601} = 6,734 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

Высота катушки возбуждения:

$$h_k = h_m - h_{\text{нк}} = 0,008694 - 0,002608 = 0,006086 \text{ м};$$

Ширина провода катушки возбуждения:

$$b = h_k - 2 \cdot \Delta_{\text{вн}} = 0,006086 - 2 \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} = 0,006083 \text{ м.}$$

В соответствии с рекомендациями выбираем провод ПММ:

шириной $b = 0,0063 \text{ м};$

толщиной $a = 0,00112 \text{ м};$

площадь сечения $S = 6,841 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$

Действительная ширина катушки:

$$\begin{aligned} b_k &= a \cdot \omega_{\text{к.с.}} + \Delta_{\text{из}} \cdot (\omega_{\text{к.с.}} - 1) + 2 \cdot \Delta_{\text{вн}} = \\ &= 0,00112 \cdot 7,8 + 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot (7,8 - 1) + 2 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,012 \text{ м}; \end{aligned}$$

$\Delta_{\text{из}} = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - толщина межвитковой изоляции.

Уточненные значения

Сопротивления катушки:

$$R_{\text{к.с.}} = \frac{L_{\text{к.ср}} \cdot \rho \cdot k_t \cdot \omega_{\text{к.с.}}}{S_c} = \frac{0,173 \cdot 17,85 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 7,8}{6,841 \cdot 10^{-6}} = 0,003545 \text{ Ом};$$

Сопротивления обмотки:

$$R_c = \frac{z_c \cdot R_{\text{к.с.}}}{a_c^2} = \frac{4 \cdot 0,003545}{2^2} = 0,003545 \text{ Ом};$$

Плотность тока в обмотке возбуждения:

$$j_c = \frac{I_{\text{я}}}{2 \cdot a_c \cdot S_c} = \frac{318,817}{2 \cdot 2 \cdot 6,841 \cdot 10^{-6}} = 1,165 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2;$$

Плотность тока меньше допустимого значения $3 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$.

Уточненное значение суммарного сопротивления:

Обмотки якоря:

$$R_{\text{ст}} = R_{\text{я}} + R_c = 0,00412 + 0,003545 = 0,00766 \text{ Ом};$$

Цепи якоря:

$$R_{\text{я}\Sigma} = R_{\text{ст}} + R_{\text{б}} = 0,00766 + 0,011 = 0,019 \text{ Ом}.$$

7. Рабочие характеристики.

Сила тока в режиме торможения:

$$I_{\text{к.с.}} = \frac{U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{щ}}}{R_{\text{я}\Sigma}} = \frac{12 - 1,5}{0,019} = 581,43 \text{ А};$$

Сила тока в режиме максимальной электромагнитной мощности:

$$I_{\text{ям}} = \frac{I_{\text{к.с.}}}{2} = \frac{581,43}{2} = 290,7 \text{ А};$$

Максимальная электромагнитная мощность:

$$P_{max} = \frac{(U_H - \Delta U_{щ})^2}{4 \cdot R_{я\Sigma}} = \frac{(12 - 1,5)^2}{4 \cdot 0,019} = 1570 \text{ Вт};$$

Параметры, необходимые для построения рабочих характеристик, определяем для нескольких значений силы тока стартера. Ниже приведены результаты расчета для силы тока $I_{я\pi} = 387,62 \text{ А}$.

Напряжение на выводах стартера:

$$U_{ст} = U_H - R_{я} \cdot I_{я} = 12 - 0,00412 \cdot 387,62 = 10,4 \text{ В}.$$

Расчет зависимости напряжения на выводах аккумуляторной батареи от тока якоря представлен в таблице 2, а график зависимости - на рисунке 2 (Приложение 3).

Таблица 2

$I_{я}, \text{ А}$	0	50	100	150	200	250	300	350	387,6
$U_{ст}, \text{ В}$	12	11,79	11,58	11,38	11,17	10,97	10,76	10,55	10,4

МДС возбуждения на два полюса:

$$F_{вз} = \frac{2 \cdot \omega_{к.с.} \cdot I_{я}}{a} = \frac{2 \cdot 7,8 \cdot 318,87}{2} = 2511 \text{ А};$$

Линейная нагрузка якоря:

$$A = \frac{N \cdot I_{я}}{2 \cdot a_{я} \cdot \pi \cdot D_{я}} = \frac{54 \cdot 318,87}{2 \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 0,065} = 42160 \text{ А/м};$$

МДС поперечной реакции якоря:

$$F_q = a_{\delta} \cdot \tau_{пол} \cdot A = 0,65 \cdot 0,051 \cdot 42160 = 1399 \text{ А};$$

$B_{\delta}^* = 0,642$ Тл - магнитная индукция в воздушном зазоре с учетом размагничивающего действия реакции якоря.

Магнитный поток:

$$\Phi = a_{\delta} \cdot \tau_{\text{пол}} \cdot l_{\text{я}} \cdot B_{\delta}^* = 0,65 \cdot 0,051 \cdot 0,051 \cdot 0,642 = 0,001077 \text{ Вб};$$

ЭДС в обмотке якоря:

$$E_{\text{я}} = U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{щ}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}\Sigma} = 12 - 1,5 - 318,87 \cdot 0,019 = 4,877 \text{ В};$$

Частота вращения:

$$n_{\text{я}} = \frac{60 \cdot a_{\text{я}} \cdot E_{\text{я}}}{p \cdot N \cdot \Phi} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 4,877}{2 \cdot 54 \cdot 0,001077} = 2516 \text{ об/мин};$$

Расчет зависимости частоты вращения якоря двигателя от тока якоря в таблице 3, а график зависимости - на рисунке 3 (Приложение 3).

Таблица 3

$I_{\text{я}}, \text{ А}$	30	100	200	300	400	500	600
$n_{\text{я}}, \text{ об/мин}$	5284	4613	3655	2697	1738	780	0

Электромагнитная мощность:

$$P = E_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}} = 4,877 \cdot 318,87 = 1555 \text{ Вт};$$

Потери мощности на трение в подшипниках:

$$\Delta P_{\text{под}} = \frac{0,03 \cdot P_{\text{max}} \cdot n_{\text{я}}}{n_{\text{ят}}} = \frac{0,03 \cdot 1570 \cdot 2516}{2111} = 56,1 \text{ Вт};$$

Линейная скорость коллектора:

$$v_{\text{кол}} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot D_{\text{я}} \cdot n_{\text{я}}}{3 \cdot 60} = \frac{3,14 \cdot 2 \cdot 0,065 \cdot 2516}{3 \cdot 60} = 5,709 \text{ м/с};$$

$K_{\text{тр}} = 0,25$ - коэффициент трения;

$F_{\text{щ}} = 2$ МПа - удельное нажатие;

$N_{\text{щ}} = 4$ - число щеток.

Потери мощности на трение между щетками и коллектором:

$$\Delta P_{\text{щ}} = k_{\text{тр}} \cdot F_{\text{щ}} \cdot N_{\text{щ}} \cdot v_{\text{пол}} = 0,25 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 5,709 = 11,4 \text{ Вт};$$

Суммарные механические потери:

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{под}} + \Delta P_{\text{щ}} = 56,1 + 11,4 = 67,5 \text{ Вт};$$

Для определения магнитных потерь предварительно рассчитывают следующие параметры:

Частота перемагничивания стали:

$$f = \frac{p \cdot n_{\text{я}}}{60} = \frac{2 \cdot 2516}{60} = 83,87 \text{ Гц};$$

Диаметр якоря на 1/3 высоты трапециoidalного участка зубца от основания:

$$D_{1/3} = D_{2\text{min}} + \frac{2}{3} \cdot h_2 = 0,047 + \frac{2}{3} \cdot 0,0066 = 0,051 \text{ м};$$

Зубцовый шаг:

$$t_{1/3} = \frac{\pi \cdot D_{1/3}}{Z_{\text{пз}}} = \frac{3,14 \cdot 0,051}{27} = 0,0059 \text{ м};$$

Ширина зубца:

$$b_{1/3} = t_{1/3} - b_{\text{пз}} = 0,0059 - 0,003 = 0,0029 \text{ м};$$

Магнитная индукция в сечении зубца:

$$B_{1/3} = \frac{t_z \cdot B_{\delta}^*}{k_{\text{стл}} \cdot b_{1/3}} = \frac{0,00756 \cdot 0,642}{0,95 \cdot 0,0029} = 1,74 \text{ Тл};$$

Магнитная индукция в сердечнике якоря:

$$B_{\text{я}} = \frac{a_{\delta} \cdot \tau_{\text{пол}} \cdot B_{\delta}^*}{2 \cdot k_{\text{стл}} \cdot h_{\text{я}}} = \frac{0,65 \cdot 0,051 \cdot 0,642}{2 \cdot 0,95 \cdot 0,012} = 0,93 \text{ Тл};$$

$$\gamma_{\text{стл}} = 7850 \text{ кг/м}^2.$$

Масса зубцового слоя:

$$\begin{aligned} M_z &= \gamma_{\text{стл}} \cdot k_{\text{стл}} \cdot l_{\text{я}} \cdot (0,25 \cdot \pi \cdot (D_{\text{я}}^2 - D_{2\text{min}}^2 - Z_{\text{пз}} \cdot (b_{\text{пз}} \cdot h_2 + 0,25 \cdot \pi \cdot b_{\text{пз}}^2 \\ &\quad + h_{\text{прз}} \cdot a_{\text{прз}}))) = \\ &= 7850 \cdot 0,95 \cdot 0,051 \cdot (0,25 \cdot 3,14 \cdot (0,065^2 - 0,047^2 - 27 \\ &\quad \cdot (0,003 \cdot 0,0066 + 0,25 \cdot 3,14 \cdot 0,003^2 + 0,001 \cdot 0,00108))) = \\ &= 0,384 \text{ кг}; \end{aligned}$$

Масса сердечника якоря:

$$\begin{aligned} M_{\text{я}} &= 0,25 \cdot \pi \cdot \gamma_{\text{стл}} \cdot k_{\text{стл}} \cdot l_{\text{я}} \cdot (D_{2\text{min}}^2 - D_{\text{в}}^2) = \\ &= 0,25 \cdot 3,14 \cdot 7850 \cdot 0,95 \cdot 0,051 \cdot (0,047^2 - 0,02^2) = 0,531 \text{ кг}; \end{aligned}$$

Соответствующие магнитные потери (при $\Delta = 0,0012 \text{ м}$):

В зубцовом слое:

$$\begin{aligned} \Delta P_z &= 2 \cdot B_{1/3}^2 \cdot M_z \cdot (0,044 \cdot f + 2240 \cdot \Delta^2 \cdot f^2) = \\ &= 2 \cdot 1,74^2 \cdot 0,384 \cdot (0,044 \cdot 83,9 + 2240 \cdot 0,0012^2 \cdot 83,9^2) = \\ &= 61,5 \text{ Вт}; \end{aligned}$$

В сердечнике якоря:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{я}} &= 2 \cdot B_{\text{я}}^2 \cdot M_{\text{я}} \cdot (0,044 \cdot f + 2240 \cdot \Delta^2 \cdot f^2) = \\ &= 2 \cdot 0,93^2 \cdot 0,531 \cdot (0,044 \cdot 83,9 + 2240 \cdot 0,0012^2 \cdot 83,9^2) = \\ &= 24,2 \text{ Вт}; \end{aligned}$$

Суммарные магнитные потери:

$$\Delta P_{\text{маг}} = \Delta P_z + \Delta P_{\text{я}} = 61,5 + 24,2 = 85,7 \text{ Вт};$$

Сумма механических и магнитных потерь:

$$\Delta P_{\text{м}} = \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{маг}} = 67,5 + 85,7 = 153,2 \text{ Вт};$$

Полезная мощность:

$$P_2 = P - \Delta P_M = 1555 - 153,2 = 1402 \text{ Вт};$$

Мощность, подводимая к стартеру:

$$P_1 = U_{\text{ст}} \cdot I_{\text{я}} = 318,87 \cdot 10,55 = 3367 \text{ Вт};$$

Расчет зависимости полезной мощности от тока якоря представлен в таблице 4, а график зависимости - на рисунке 4 (Приложение 3).

Таблица 4

$I_{\text{я}}, \text{А}$	0	100	200	318,9	400	500	600	700
$P_2, \text{Вт}$	-153	334	822	1402	1798	2285	2773	3261

КПД стартерного электродвигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1402}{3367} = 0,416;$$

Расчет зависимости КПД от тока якоря представлен в таблице 5, а график зависимости - на рисунке 5 (Приложение 3).

Таблица 5

$I_{\text{я}}, \text{А}$	0	100	200	318,9	400	500	600	700
η	0	0,317	0,389	0,416	0,426	0,433	0,438	0,441

Электромагнитный момент:

$$M = \frac{9,55 \cdot P}{n_{\text{я}}} = \frac{9,55 \cdot 1555}{2516} = 5,9 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Полезный момент на валу:

$$M_2 = \frac{9,55 \cdot P_2}{n_{\text{я}}} = \frac{9,55 \cdot 1402}{2516} = 5,32 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Расчет зависимости электромагнитного момента от тока якоря представлен в таблице 6, а график зависимости - на рисунке 6 (Приложение 3).

Таблица 6

I _я , А	0	100	200	318,9	400	500	600	700
M, Н·м	-0,582	1,857	3,7	5,9	7,4	9,2	11,1	12,9

Вывод

При расчете стартерного двигателя постоянного тока, были установлены следующие основные параметры и размеры стартера:

Полезная мощность $P_2 = 1402$ Вт;

Частота вращения якоря $n_{\text{я}} = 2516$ об/мин;

Полезный момент на валу $M = 5,321$ Н·м;

КПД $\eta = 0,416$;

Диаметр якоря: $D_{\text{я}} = 0,065$ м;

Длина пакета якоря $l_{\text{я}} = 0,051$ м;

Диаметр корпуса: $D_{\text{ж}} = 0,101$ м.

Список литературы

1. Регода О.Н. «Расчёт и моделирование электрических цепей» - *Учебное пособие*, Пенза, Издательство ПГУ, 2013 г.
2. Регода В.В., Регода О.Н. «Изучение курса ТЭЦ с использованием систем автоматизации инженерных расчётов» – Пенза, 2010 г.
3. Ашанин В.Н., Чапаев В.С. «Расчет стартерного электрического двигателя» - *Методические указания по выполнению курсовой работы*, Пенза, Издательство ПГУ, 2011 г.
4. Костенко М.П. Электрические машины / М. П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – М.: Высшая школа, 1989 г. – 480 с.
5. Кокорев А.С. Справочник обмотчика электрических машин. – 7-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1994 г. – 175 с.
6. Брускин Д.Э. Электрические машины и микромашины / Д.Э. Брускин. – М.: Высшая школа, 1985 г. - 432 с.

Technical drawing of a motor assembly, showing a cross-section (A-A) and a front view.

Dimensions:

- Overall width: 260
- Overall height: 120
- Overall depth: 101

Section A-A: Shows the internal components of the motor, including the stator, rotor, and shaft.

Front View: Shows the external features of the motor, including the mounting feet and the terminal box.

Title Block:

Лист № 001		Лист № 002		Лист № 003		Лист № 004		Лист № 005		Лист № 006		Лист № 007		Лист № 008		Лист № 009		Лист № 010		Лист № 011		Лист № 012		Лист № 013		Лист № 014		Лист № 015		Лист № 016		Лист № 017		Лист № 018		Лист № 019		Лист № 020		Лист № 021		Лист № 022		Лист № 023		Лист № 024		Лист № 025		Лист № 026		Лист № 027		Лист № 028		Лист № 029		Лист № 030		Лист № 031		Лист № 032		Лист № 033		Лист № 034		Лист № 035		Лист № 036		Лист № 037		Лист № 038		Лист № 039		Лист № 040		Лист № 041		Лист № 042		Лист № 043		Лист № 044		Лист № 045		Лист № 046		Лист № 047		Лист № 048		Лист № 049		Лист № 050		Лист № 051		Лист № 052		Лист № 053		Лист № 054		Лист № 055		Лист № 056		Лист № 057		Лист № 058		Лист № 059		Лист № 060		Лист № 061		Лист № 062		Лист № 063		Лист № 064		Лист № 065		Лист № 066		Лист № 067		Лист № 068		Лист № 069		Лист № 070		Лист № 071		Лист № 072		Лист № 073		Лист № 074		Лист № 075		Лист № 076		Лист № 077		Лист № 078		Лист № 079		Лист № 080		Лист № 081		Лист № 082		Лист № 083		Лист № 084		Лист № 085		Лист № 086		Лист № 087		Лист № 088		Лист № 089		Лист № 090		Лист № 091		Лист № 092		Лист № 093		Лист № 094		Лист № 095		Лист № 096		Лист № 097		Лист № 098		Лист № 099		Лист № 100		Лист № 101		Лист № 102		Лист № 103		Лист № 104		Лист № 105		Лист № 106		Лист № 107		Лист № 108		Лист № 109		Лист № 110		Лист № 111		Лист № 112		Лист № 113		Лист № 114		Лист № 115		Лист № 116		Лист № 117		Лист № 118		Лист № 119		Лист № 120		Лист № 121		Лист № 122		Лист № 123		Лист № 124		Лист № 125		Лист № 126		Лист № 127		Лист № 128		Лист № 129		Лист № 130		Лист № 131		Лист № 132		Лист № 133		Лист № 134		Лист № 135		Лист № 136		Лист № 137		Лист № 138		Лист № 139		Лист № 140		Лист № 141		Лист № 142		Лист № 143		Лист № 144		Лист № 145		Лист № 146		Лист № 147		Лист № 148		Лист № 149		Лист № 150		Лист № 151		Лист № 152		Лист № 153		Лист № 154		Лист № 155		Лист № 156		Лист № 157		Лист № 158		Лист № 159		Лист № 160		Лист № 161		Лист № 162		Лист № 163		Лист № 164		Лист № 165		Лист № 166		Лист № 167		Лист № 168		Лист № 169		Лист № 170		Лист № 171		Лист № 172		Лист № 173		Лист № 174		Лист № 175		Лист № 176		Лист № 177		Лист № 178		Лист № 179		Лист № 180		Лист № 181		Лист № 182		Лист № 183		Лист № 184		Лист № 185		Лист № 186		Лист № 187		Лист № 188		Лист № 189		Лист № 190		Лист № 191		Лист № 192		Лист № 193		Лист № 194		Лист № 195		Лист № 196		Лист № 197		Лист № 198		Лист № 199		Лист № 200		Лист № 201		Лист № 202		Лист № 203		Лист № 204		Лист № 205		Лист № 206		Лист № 207		Лист № 208		Лист № 209		Лист № 210		Лист № 211		Лист № 212		Лист № 213		Лист № 214		Лист № 215		Лист № 216		Лист № 217		Лист № 218		Лист № 219		Лист № 220		Лист № 221		Лист № 222		Лист № 223		Лист № 224		Лист № 225		Лист № 226		Лист № 227		Лист № 228		Лист № 229		Лист № 230		Лист № 231		Лист № 232		Лист № 233		Лист № 234		Лист № 235		Лист № 236		Лист № 237		Лист № 238		Лист № 239	
------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--	------------	--

[illegible]

[illegible]

Приложение 3. Характеристики стартерного двигателя.

