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: « Расчёт двигателя постоянного тока стартера автомобиля»

ПГУ 3.13.03.02.008 ПЗ

Студент: _____ **Калаев А.С.**

Группа: **14ПЭ2**

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

Работа защищена с оценкой _____

Преподаватель _____

Дата защиты 15.02.18

Пенза 2018 г.

ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Электроэнергетика и электротехника»

ЗАДАНИЕ

На курсовое проектирование по дисциплине

«Электрические машины»

Студенту гр. 14ПЭ2 Калаеву А.С.

Тема проекта: «Расчет двигателя постоянного тока стартера автомобиля»

Исходные данные на проектирование:

Номинальное напряжение: $U_н = 12$ В;

Номинальная мощность: $P_2 = 1700$ Вт;

Частота вращения якоря: $n_я = 1760$ об/мин;

Число полюсов: $2p = 4$;

Коэффициент кратности тока: $k = 0.55$;

Падение напряжения на щетках: $\Delta U_щ = 1.5$ 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 полузакрытого 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 _____ /Исаев С.Г./
(подпись)

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

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.

1. Расчётная мощность. Номинальная ёмкость аккумуляторной батареи.

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

Исходные данные:

$U_н = 12$ В; $P_н = 1700$ Вт; $n_я = 1760$ об/мин; $k = 0,55$; $U_щ = 1,2$ В;

Расчетная электромагнитная мощность:

$$P = \frac{P_н}{\eta_{эм}} = \frac{1700}{0,91} = 1868,13 \text{ Вт};$$

Расчетная ЭДС в обмотке якоря:

$$E_я = \left(U_н - \Delta U_щ\right) \cdot (1 - k) = (12 - 1,25) \cdot (1 - 0,55) = 4,84 \text{ В};$$

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

Сила тока в расчетном режиме работы:

$$I_я = \frac{P}{E_я} = \frac{1868,13}{4,84} = 385,98 \text{ А};$$

Суммарное сопротивление цепи якоря:

$$R_я = \frac{\left(U_н - \Delta U_щ\right)^2 \cdot (1 - k) \cdot k}{P} = 0,0153 \text{ Ом};$$

Максимальная электромагнитная мощность:

$$P_{max} = \frac{P}{4k \cdot (1 - k)} = \frac{1549}{4 \cdot 0,55 \cdot (1 - 0,55)} = 1887 \text{ Вт};$$

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

$$E_{ят} = 0,5 \cdot \left(U_н - \Delta U_щ\right) = 0,5 \cdot (12 - 1,25) = 5,375 \text{ В};$$

$$I_{ят} = \frac{I_я}{2 \cdot k} = \frac{385,98}{2 \cdot 0,55} = 350,1 \text{ А};$$

$$R_{ят} = \frac{\left(U_н - \Delta U_щ\right)^2}{4 \cdot P_{max}} = \frac{(12 - 1{,}25)^2}{4 \cdot 1887} = 0{,}0153 \text{ Ом};$$

$$n_{ят} = \frac{0{,}5 \cdot n_я}{1 - k} = \frac{0{,}5 \cdot 1760}{1 - 0{,}55} = 1955{,}5 \frac{\text{об}}{\text{мин}};$$

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

$$C_{25} = 70\ A \cdot \text{ч};$$

Внутренне сопротивление аккумуляторной батареи:

$$R_б = \frac{a_б \cdot U_н}{C_{25}} = \frac{0{,}05 \cdot 12}{70} = 0{,}0086 \text{ Ом}.$$

2. Расчёт главных размеров электродвигателя.

Соотношение мощности и частоты вращения:

$$Q = \frac{0{,}5 \cdot P}{k \cdot n_я} = \frac{0{,}5 \cdot 1887}{0{,}55 \cdot 1760} = 0{,}965 \text{ Вт/мин}^{-1};$$

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

$$D_я = 0{,}068 \text{ м};$$

Диаметр корпуса:

$$D_j = 1{,}55 \cdot D_я = 1{,}55 \cdot 0{,}068 = 0{,}1 \text{ м};$$

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

Линейную нагрузку якоря: A = 45000 А/м;

Магнитную индукцию: B_δ = 0,86 Тл;

Коэффициент полюсного перекрытия: α_δ = 0,65.

Определяем машинную постоянную:

$$C_A = \frac{6,1}{B_\delta \cdot A \cdot a_\delta} = \frac{6,1}{0,86 \cdot 45000 \cdot 0,65} = 0,00024;$$

Длина пакета якоря:

$$l_я = \frac{C_A \cdot P}{n_я \cdot D_я^2} = \frac{0,00024 \cdot 1868,13}{1760 \cdot (0,068)^2} = 0,056 \text{ м};$$

Отношение $l_я/D_я = 0,82$ находится в рекомендуемых пределах 0,75…1,25.

Полюсное деление:

$$\tau_{пол} = \frac{\pi \cdot D_я}{2 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot 0,068}{2 \cdot 2} = 0,053 \text{ м};$$

Основной магнитный поток на два полюса:

$$Ф = a_\delta \cdot \tau_{пол} \cdot l_я \cdot B_\delta = 0,65 \cdot 0,053 \cdot 0,056 \cdot 0,86 = 0,00166 \text{ Вб};$$

3. Расчёт обмотки якоря.

Число активных проводников обмотки якоря:

$$N = \frac{60 \cdot a_я \cdot E_я}{p \cdot n_я \cdot Ф} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 4,84}{2 \cdot 1760 \cdot 0,00166} = 49,69;$$

Принимаем Число пазов якоря: $Z_{ПЗ}$ = 25.

Число витков в секции обмотки якоря:

$$\omega_я = \frac{0,5 \cdot N}{Z_{пз}} = \frac{0,5 \cdot 49,69}{25} = 0,994.$$

Принимаем $\omega_я = 1$;

Уточняем число активных проводников якоря:

$$N = \frac{\omega_я \cdot Z_{пз}}{0,5} = \frac{1 \cdot 25}{0,5} = 50;$$

Уточняем значение линейной нагрузки якоря:

$$A = \frac{I_я \cdot N}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot D_я} = \frac{385,98 \cdot 50}{2 \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 0,068} = 45192,5 А/м;$$

Уточняем значение длины пакета якоря:

$$l_я = \frac{6,1 \cdot P}{B_\delta \cdot A \cdot a_\delta \cdot n_я \cdot D_я^2} = \frac{6,1 \cdot 1868}{0,86 \cdot 45192,5 \cdot 0,65 \cdot 1760 \cdot (0,068)^2} = 0,055 м;$$

Отношение $l_я/D_я$ = 0,81 находится в рекомендуемых пределах 0,75…1,25.

Суммарное сопротивление обмотки якоря и последовательной обмотки возбуждения:

$$R_{ст} = R_{яΣ} - R_б = 0,0153 - 0,0086 = 0,0067 Ом;$$

Сопротивление обмотки якоря:

$$R_я = 0,55 \cdot R_{ст} = 0,55 * 0.0067 = 0,004 Ом;$$

Средняя длина проводника:

$$L_{я.ср} = l_я + 1,3 \cdot \tau_{пол} = 0,055 + 1,3 \cdot 0,053 = 0,1239 м;$$

Площадь сечения провода

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

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

$$S_я = \frac{k_t \cdot \rho \cdot L_{я.ср} \cdot N}{(2a_я)^2 \cdot R_я} = \frac{1 \cdot 17{,}85 \cdot 10^{-9} \cdot 0{,}1239 \cdot 50}{(2 \cdot 1)^2 \cdot 0{,}004} = 6{,}9 \cdot 10^{-6}\ м^2;$$

Отношения толщины провода к его ширине:

$$\frac{a}{b} = 0{,}05 + \frac{10{,}4}{Z_{пз}} + \frac{14}{Z_{пз}^2} = 0{,}05 + \frac{10{,}4}{25} + \frac{14}{25^2} = 0{,}4884;$$

Находим ширину провода:

$$b = \sqrt{\frac{S_я}{a/b}} = \sqrt{\frac{6{,}9 \cdot 10^{-6}}{0{,}4884}} = 0{,}00376\ м;$$

Толщина провода:

$$a = b \cdot \frac{a}{b} = 0{,}005 \cdot 0{,}4884 = 0{,}00184\ м;$$

В соответствии с рекомендациями выбираем провод ПММ:

$a = 1{,}8 \cdot 10^{-3}$ м;

$b = 3{,}75 \cdot 10^{-3}$ м;

$S_Я = 6{,}387 \cdot 10^{-6}$ м^2.

Отношение $\frac{a}{b} = 0{,}48$ находится в рекомендуемых пределах (0.33 … 0,73).

Плотность тока в обмотке якоря:

$$j_я = \frac{I_я}{2a_я \cdot S_я} = \frac{385{,}98}{2 \cdot 1 \cdot 6{,}387 \cdot 10^{-6}} = 30 \cdot 10^6\ А/м^2;$$

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

Уточненное значение сопротивления обмотки якоря:

$$R_я = \frac{k_t \cdot \rho \cdot L_{я.ср} \cdot N}{(2a_я)^2 \cdot S_я} = \frac{1 \cdot 17{,}85 \cdot 10^{-9} \cdot 0{,}1239 \cdot 50}{(2 \cdot 1)^2 \cdot 6{,}387 \cdot 10^{-6}} = 0{,}00433\ Ом;$$

Отношение $R_я/R_{ст} = 0{,}646$ не выходит за рекомендуемые пределы (0,45 … 0,65).

4. Размеры полузакрытого паза прямоугольной формы.

Полузакрытый паз представлен на рисунке 5.

Радиус закругления провода:

$$r_{\text{прв}} = 1{,}08 \cdot \sqrt{a \cdot b - S_{\text{я}}} = 1{,}08 \cdot \sqrt{1{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 3{,}75 \cdot 10^{-3} - 6{,}387 \cdot 10^{-6}} = 0{,}00065 \text{ м};$$

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:

$$D_{2max} = D_{\text{я}} - 2 \cdot \left(h_{\text{прз}} + 0{,}5 \cdot \sqrt{b_{\text{пз}}^2 + a_{\text{прз}}^2}\right) = 0{,}068 - 2 \cdot \left(1 \cdot 10^{-3} + 0{,}5 \cdot \sqrt{(3 \cdot 10^{-3})^2 + (1{,}08 \cdot 10^{-3})^2}\right) = 0{,}0632 \text{ м};$$

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

Высота второго участка зубцовой зоны:

$$h_2 = b_{\text{пз}} + 2 \cdot b - 4 \cdot r_{\text{прв}} - 0{,}0003 - 0{,}0566 \cdot \sqrt{b_{\text{пз}} - 2 \cdot r_{\text{прв}} - 0{,}001} = 0{,}003 + 2 \cdot 0{,}0037 - 4 \cdot 0{,}00065 - 0{,}0003 - 0{,}0566 \cdot \sqrt{0{,}003 - 2 \cdot 0{,}00065 - 0{,}001} = 0{,}0061 \text{ м};$$

Минимальный диаметр второго участка зубцовой зоны:

$$D_{2\,min} = D_{2\,max} - 2 \cdot h_2 = 0{,}0632 - 2 \cdot 0{,}0061 = 0{,}051 \text{ м};$$

Расстояние между проводниками в пазе:

$$OK = 0{,}5 \cdot b_{пз} - \Delta_{я} \cdot r_{прв} - 0{,}0001 =$$

$$= 0{,}5 \cdot 0{,}003 - 0{,}0003 \cdot 0{,}000657 - 0{,}0001 = 0{,}0014 \text{ м};$$

$$ON = 0{,}5 \cdot a - r_{прв} = 0{,}5 \cdot 0{,}0018 - 0{,}00065 = 0{,}00025 \text{ м};$$

$$KN = \sqrt{OK^2 - ON^2} = \sqrt{(0{,}0014)^2 - (0{,}00025)^2} = 0{,}00138 \text{ м};$$

$$OX = KN + r_{прв} = 0{,}00138 + 0{,}00065 = 0{,}00203 \text{ м};$$

$$l = h_2 - 2 \cdot (b - OX) = 0{,}0061 - 2 \cdot (0{,}00375 - 0{,}00203) = 0{,}00266 \text{ м};$$

Минимальный диаметр зубцовой зоны:

$$D_{я\,min} = D_{2\,min} - b_{пз} = 0{,}051 - 0{,}003 = 0{,}048 \text{ м};$$

5. Магнитная система электродвигателя.

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

$$D_1 = 0{,}5 \cdot (D_{я} + D_{2\,max}) = 0{,}5 \cdot (0{,}068 + 0{,}0632) = 0{,}0656 \text{ м};$$

$$D_{2ср} = 0{,}5 \cdot (D_{2\,max} + D_{2\,min}) = 0{,}5 \cdot (0{,}0632 + 0{,}051) = 0{,}0571 \text{ м};$$

$$D_3 = D_{2\,min} - 0{,}5 \cdot b_{пз} = 0{,}051 - 0{,}5 \cdot 0{,}003 = 0{,}0495 \text{ м};$$

Высота первого участка зубцовой зоны:

$$h_1 = 0{,}5 \cdot (D_{я} - D_{2\,max}) = 0{,}5 \cdot (0{,}068 - 0{,}051) = 0{,}0024 \text{ м};$$

Высота третьего участка зубцовой зоны:

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

Высота зубца:

$$h_z = h_1 + h_2 + h_3 = 0{,}0024 + 0{,}0061 + 0{,}0015 = 0{,}01 \text{ м};$$

Зубцовые шаги по наружному диаметру якоря в расчетных сечениях зубца:

$$t_z = \frac{\pi \cdot D_я}{Z_{пз}} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}068}{25} = 0{,}00854 \text{ м};$$

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_{пз}} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}0656}{25} = 0{,}00824 \text{ м};$$

$$t_{2\,max} = \frac{\pi \cdot D_{2\,max}}{Z_{пз}} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}0632}{25} = 0{,}00794 \text{ м};$$

$$t_{2ср} = \frac{\pi \cdot D_{2ср}}{Z_{пз}} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}0571}{25} = 0{,}00710 \text{ м};$$

$$t_{2\,min} = \frac{\pi \cdot D_{2\,min}}{Z_{пз}} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}051}{27} = 0{,}00641 \text{ м};$$

$$t_3 = \frac{\pi \cdot D_3}{Z_{пз}} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}0495}{25} = 0{,}00621 \text{ м};$$

Ширина зубца в расчетных сечениях:

$$b_z = t_z - a_{прз} = 0{,}00854 - 0{,}00108 = 0{,}00746 \text{ м};$$

$$b_1 = t_1 - \sqrt{b_{пз}^2 - h_1^2} = 0{,}00824 - \sqrt{0{,}003^2 - 0{,}0024^2} = 0{,}00644 \text{ м};$$

$$b_{2\,max} = t_{2\,max} - b_{пз} = 0{,}00794 - 0{,}003 = 0{,}00494 \text{ м};$$

$$b_{2\,ср} = t_{2\,ср} - b_{пз} = 0{,}00710 - 0{,}003 = 0{,}00410 \text{ м};$$

$$b_{2\,min} = t_{2\,min} - b_{пз} = 0{,}00641 - 0{,}003 = 0{,}00341 \text{ м};$$

$$b_3 = t_3 - 0{,}866 \cdot b_{пз} = 0{,}00621 - 0{,}866 \cdot 0{,}003 = 0{,}00329 \text{ м}.$$

Коэффициент заполнения паза принимаем $k_{СТЛ} = 0{,}95$.

Магнитные индукции в расчетных сечениях зубца:

$$B_1 = \frac{t_z \cdot B_\delta}{k_{стл} \cdot b_1} = \frac{0{,}00854 \cdot 0{,}86}{0{,}95 \cdot 0{,}00644} = 1{,}2 \text{ Тл};$$

$$B_{2\,min} = \frac{t_z \cdot B_\delta}{k_{стл} \cdot b_{2\,max}} = \frac{0{,}00854 \cdot 0{,}86}{0{,}95 \cdot 0{,}00494} = 1{,}57 \text{ Тл};$$

$$B_{2\,ср} = \frac{t_z \cdot B_\delta}{k_{стл} \cdot b_{2\,ср}} = \frac{0{,}0084 \cdot 0{,}86}{0{,}95 \cdot 0{,}00410} = 1{,}94 \text{ Тл};$$

$$B_{2\,max} = \frac{t_z \cdot B_\delta}{k_{стл} \cdot b_{2\,min}} = \frac{0{,}00854 \cdot 0{,}86}{0{,}95 \cdot 0{,}00341} = 2{,}46 \text{ Тл};$$

$$B_3 = \frac{t_z \cdot B_\delta}{k_{стл} \cdot b_3} = \frac{0{,}00854 \cdot 0{,}86}{0{,}95 \cdot 0{,}00329} = 2{,}38 \text{ Тл};$$

Значение индукции B_{2max} = 2,46 Тл не выходит за рекомендуемые пределы 1,8 ... 3,2 Тл.

Зубцовые коэффициенты для расчетных сечений зубца:

$$k_{z1} = \frac{t_1}{k_{стл} \cdot b_1} - 1 = \frac{0{,}00824}{0{,}95 \cdot 0{,}00644} - 1 = 0{,}347;$$

$$k_{z2\,min} = \frac{t_{2\,max}}{k_{стл} \cdot b_{2\,max}} - 1 = \frac{0{,}00794}{0{,}95 \cdot 0{,}00494} - 1 = 0{,}692;$$

$$k_{z2\,ср} = \frac{t_{2\,ср}}{k_{стл} \cdot b_{2ср}} - 1 = \frac{0{,}0071}{0{,}95 \cdot 0{,}0041} - 1 = 0{,}82;$$

$$k_{z2\,max} = \frac{t_{2\,min}}{k_{стл} \cdot b_{2\,min}} - 1 = \frac{0{,}00641}{0{,}95 \cdot 0{,}00341} - 1 = 0{,}95;$$

$$k_{z3} = \frac{t_3}{k_{стл} \cdot b_3} - 1 = \frac{0{,}00621}{0{,}95 \cdot 0{,}00329} - 1 = 1{,}05.$$

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

H_1 = 1000 А/м;

H_{2max} = 90000 А/м;

H_{2min} = 2500 А/м;

H_3 = 78000 А/м;

H_{2cp} = 13000 А/м;

Средняя напряженность на втором участке:

$$H_2 = \frac{H_{2\,min} + 4 \cdot H_{2\,ср} + H_{2\,max}}{6} = \frac{2500 + 4 \cdot 13000 + 900000}{6} = 24080 \text{ А/м}$$

МДС для первого участка:

$$F_1 = 2 \cdot h_1 \cdot H_1 = 2 \cdot 0{,}0024 \cdot 1000 = 4{,}8 \text{ А};$$

МДС для второго участка:

$$F_2 = 2 \cdot h_2 \cdot H_2 = 2 \cdot 0{,}0061 \cdot 29000 = 294 \text{ А};$$

МДС для третьего участка:

$$F_3 = 2 \cdot h_3 \cdot H_3 = 2 \cdot 0{,}0015 \cdot 78000 = 234 \text{ А};$$

МДС для зубцовой зоны:

$$F_z = F_1 + F_2 + F_3 = 533 \text{ А}.$$

Принимаем длину воздушного зазора δ = 0,0006 м.

Коэффициент воздушного зазора:

$$k_\delta = \frac{t_z + 10 \cdot \delta}{b_z + 10 \cdot \delta} = \frac{0{,}00854 + 10 \cdot 0{,}0006}{0{,}00746 + 10 \cdot 0{,}0006} = 1{,}08;$$

МДС для воздушного зазора:

$$F_\delta = \frac{2 \cdot k_\delta \cdot \delta \cdot B_\delta}{\mu_0} = \frac{2 \cdot 1{,}08 \cdot 0{,}0006 \cdot 0{,}86}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-7}} = 887{,}13 \text{ А};$$

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

Размеры корпуса

Наружный диаметр:

$$D_j = 1{,}5 \cdot D_я = 1{,}5 \cdot 0{,}068 = 0{,}102 \text{ м};$$

Длина корпуса:

$$l_j = 1{,}8 \cdot l_я = 1{,}8 \cdot 0{,}055 = 0{,}099 \text{ м};$$

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

$$S_j = \frac{\sigma \cdot \Phi}{2 \cdot B_j} = \frac{1{,}15 \cdot 0{,}00166}{2 \cdot 1{,}3} = 0{,}00073 \text{ м}^2;$$

Толщина расчетного сечения:

$$h_j = \frac{S_j}{l_j} = \frac{0{,}00073}{0{,}099} = 0{,}0073 \text{ м};$$

Диаметр расточки полюсов:

$$D_i = D_я + 2 \cdot \delta = 0{,}068 + 2 \cdot 0{,}0006 = 0{,}0692 \text{ м};$$

Длина полюсной дуги:

$$b_i = a_\delta \cdot \tau_{пол} + 2 \cdot \delta = 0{,}65 \cdot 0{,}053 + 2 \cdot 0{,}0006 = 0{,}0692 \text{ м};$$

Центральный угол полюсной дуги:

$$\beta = \frac{2 \cdot b_i}{D_я} = \frac{2 \cdot 0{,}03565}{0{,}068} = 1{,}048 \text{ рад} = 60^o;$$

Размеры полюса

Длина полюса:

$$l_m = l_я - 0{,}002 = 0{,}055 - 0{,}002 = 0{,}053 \text{ м};$$

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

$$S_m = \frac{\sigma \cdot Ф}{B_m} = \frac{1{,}15 \cdot 0{,}00166}{1{,}5} = 0{,}001273 \text{ м}^2;$$

Ширина полюса:

$$b_m = \frac{S_m}{l_m} = \frac{0{,}001273}{0{,}053} = 0{,}024 \text{ м};$$

Высота полюса:

$$h_m = 0{,}5 \cdot (D_j - D_i - 2 \cdot h_j) = 0{,}5 \cdot (0{,}102 - 0{,}0692 - 2 \cdot 0{,}00072) = 0{,}0157 \text{ м}.$$

Высота наконечника:

$$h_{нк} = 0{,}3 \cdot h_M = 0{,}3 \cdot 0{,}0157 = 0{,}0047 \text{ м}.$$

Длина наконечника:

$$l_{нк} = 0{,}5 \cdot (b_i - b_M) = 0{,}5 \cdot (0{,}03565 - 0{,}024) = 0{,}006 \text{ м};$$

Диаметр вала якоря:

$$D_В = 0{,}3 \cdot D_Я = 0{,}3 \cdot 0{,}068 = 0{,}0204 \text{ м};$$

Высота сердечника якоря:

$$h_Я = 0{,}5 \cdot (D_Я - D_B - 2 \cdot h_z) = 0{,}5 \cdot (0{,}068 - 0{,}0204 - 2 \cdot 0{,}01) = 0{,}0138 \text{ м}.$$

Магнитная индукция якоря

В сердечнике:

$$B_{\text{Я}} = \frac{a_\delta \cdot \tau_{\text{пол}} \cdot B_\delta}{2 \cdot k_{\text{стл}} \cdot h_{\text{я}}} = \frac{0{,}65 \cdot 0{,}053 \cdot 0{,}86}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}0138} = 1{,}13 \text{ Тл};$$

В полюсе:

$$B_M = \frac{\sigma \cdot a_\delta \cdot \tau_{\text{пол}} \cdot l_{\text{Я}} \cdot B_\delta}{l_{\text{м}} \cdot b_{\text{м}}} = \frac{1{,}15 \cdot 0{,}65 \cdot 0{,}053 \cdot 0{,}055 \cdot 0{,}86}{0{,}053 \cdot 0{,}024} = 1{,}46 \text{ Тл};$$

В корпусе:

$$B_j = \frac{\sigma \cdot a_\delta \cdot \tau_{\text{пол}} \cdot l_{\text{Я}} \cdot B_\delta}{2 \cdot l_j \cdot h_j} = \frac{1{,}15 \cdot 0{,}65 \cdot 0{,}053 \cdot 0{,}055 \cdot 0{,}86}{2 \cdot 0{,}099 \cdot 0{,}0073} = 1{,}314 \text{ Тл};$$

Магнитные индукции $B_я$, $B_м$, B_j в расчетном режиме не выходят за рекомендуемые пределы 1,0 ... 1,7 Тл.

Длина средних магнитных линий якоря

В сердечнике:

$$L_{\text{я}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{В}} + h_{\text{Я}})}{2 \cdot p} + h_{\text{Я}} - 0{,}5 \cdot b_{\text{м}} =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot (0{,}0204 + 0{,}0138)}{4} + 0{,}0138 - 0{,}5 \cdot 0{,}024 = 0{,}0286 \text{ м}$$

В корпусе:

$$l_j = \frac{\pi \cdot (D_j + h_j)}{2 \cdot p} + h_j - 0{,}5 \cdot b_{\text{м}} =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot (0{,}102 + 0{,}0073)}{4} + 0{,}0073 - 0{,}5 \cdot 0{,}024 = 0{,}081 \text{ м};$$

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

$$H_{я} = 770 \text{ А/м};$$

$$H_{m} = 2000 \text{ А/м};$$

$$H_{j} = 1280 \text{ А/м}.$$

МДС для сердечника:

$$F_{я} = L_{я} \cdot H_{я} = 0{,}0286 \cdot 770 = 22{,}02 \text{ А};$$

МДС для корпуса:

$$F_{j} = L_{j} \cdot H_{j} = 0{,}081 \cdot 1280 = 103{,}8 \text{ А};$$

МДС для полюса:

$$F_{m} = 2 \cdot h_{m} \cdot H_{m} = 2 \cdot 0{,}0157 \cdot 2000 = 62{,}8 \text{ А};$$

МДС для воздушного зазора в стыке полюса с корпусом:

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

$$F_{\delta стк} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot a_{\delta} \cdot \tau_{пол} \cdot l_{я} \cdot B_{\delta} \cdot \delta_{стк}}{\mu_0 \cdot l_{м} \cdot b_{м}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 1{,}15 \cdot 0{,}65 \cdot 0{,}053 \cdot 0{,}86 \cdot 0{,}055 \cdot 0{,}05 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-7} \cdot 0{,}053 \cdot 0{,}024} = 119{,}37 \text{ А};$$

Суммарная МДС на два полюса в расчетном рабочем режиме:

$$F = F_Z + F_{\delta} + F_{я} + F_{m} + F_{j} + F_{\delta стк} = 1728{,}070 \ A.$$

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 в приложении 3 на рисунке 1.

Таблица 1

B_δ, Тл	0.1	0,30	0,50	0,70	0,86	1,00
B_1, Тл	0.140	0,419	0,698	0,977	1,200	1,396
B_{2min}, Тл	0.182	0,546	0,910	1,274	1,565	1,820
$B_{2ср}$, Тл	0.226	0,678	1,129	1,581	1,942	2,259
B_{2max}, Тл	0.286	0,859	1,431	2,003	2,461	2,862
B_3,Тл	0.277	0,832	1,387	1,942	2,386	2,775
H_1, А/м	120	240	390	600	1000	1600
H_{2min}, А/м	140	350	490	1200	2500	7500
$H_{2ср}$, А/м	160	400	620	2000	13000	29000
H_{2max},А/м	190	490	1700	3500	90000	225000
H_2, А/м	161,667	406,667	778,333	2116,667	24083,333	58083,333
H_3, А/м	180	470	1500	1400	78000	220000
F_1, А	0,576	1,152	1,872	2,880	4,800	7,680
F_2, А	1,972	4,961	9,496	25,823	293,817	708,617
F_3, А	0,540	1,410	4,500	4,200	234,000	660,000
F_z, А	3,088	7,523	15,868	32,903	532,617	1376,297
F_δ, А	103,207	309,622	516,037	722,452	887,584	1032,074
$B_я$,Тл	0,131	0,394	0,657	0,920	1,130	1,314
B_m,Тл	0,174	0,523	0,872	1,220	1,499	1,743
B_j,Тл	0,153	0,459	0,764	1,070	1,314	1,528
$H_я$, А/м	120	200	400	510	770	1280
H_m, А/м	150	320	480	950	2000	5000
H_j , А/м	140	240	440	580	1280	2200
$F_я$, А	3,432	5,720	11,440	14,586	22,022	36,608
F_m, А	4,710	10,048	15,072	29,830	62,800	157,000
F_j, А	11,340	19,440	35,640	46,980	103,680	178,200
$F_{\delta стк}$, А	13,880	41,640	69,400	97,160	119,367	138,799
F, А	139,658	393,993	663,456	943,911	1728,070	2918,978

6. Расчёт параметров обмотки возбуждения.

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

$$F_{\text{вз}} = 1{,}3 \cdot F = 1{,}3 \cdot 1728 = 2246 \text{ А}.$$

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

В этом случае число витков в катушке:

$$\omega_{\text{к.с.}} = \frac{F_{\text{вз}} \cdot a_c}{2 \cdot I_{\text{я}}} = \frac{2246 \cdot 2}{2 \cdot 385{,}98} = 5{,}82;$$

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

Сопротивление последовательной обмотки возбуждения:

$$R_{\text{с}} = R_{\text{ст}} - R_{\text{я}} = 0{,}0067 - 0{,}00433 = 0{,}00237 \text{ Ом};$$

Сопротивление катушки:

$$R_{\text{к.с.}} = \frac{a_c^2 R_c}{n} = \frac{2^2 \cdot 0{,}00237}{4} = 0{,}00237 \text{ Ом};$$

n = 4 - число катушек последовательной катушки возбуждения.

Максимально возможная ширина катушки:

$$b_{\text{к}}^{*} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{я}} + 2 \cdot \delta + 2 \cdot h_{\text{нк}})}{4 \cdot p} - 0{,}5 \cdot (b_m + d_\delta - 0{,}002) =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot (0{,}068 + 2 \cdot 0{,}0006 + 2 \cdot 0{,}003)}{4 \cdot 2} - 0{,}5$$

$$\cdot (0{,}024 + 0{,}01725 - 0{,}002) = 0{,}01157 \text{ м};$$

$$d_\delta = 0{,}25 \cdot D_{\text{я}} = 0{,}25 \cdot 0{,}069 = 0{,}01725 \text{ м}.$$

Средняя длина витка катушки:

$$L_{\text{к.ср}} = 2 \cdot l_m + 2 \cdot b_m + \pi \cdot b_k^* = 2 \cdot 0{,}053 + 2 \cdot 0{,}024 + 3{,}14 \cdot 0{,}01157 = \\ = 0{,}19 \text{ м}.$$

Площадь сечения провода обмотки возбуждения:

$$S_c = \frac{L_{\text{к.ср}} \cdot \rho \cdot k_t \cdot \omega_{\text{к.с.}}}{R_{\text{к.с.}}} = \frac{0{,}19 \cdot 17{,}85 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 5{,}82}{0{,}00237} = 8{,}33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

Высота катушки возбуждения:

$$h_{\text{к}} = h_m - h_{\text{нк}} = 0{,}01568 - 0{,}0047 = 0{,}011 \text{ м};$$

Ширина провода катушки возбуждения:

$$b = h_{\text{к}} - 2 \cdot \Delta_{\text{вн}} = 0{,}011 - 2 \cdot 1{,}1 \cdot 10^{-3} = 0{,}0088 \text{ м}.$$

В соответствии с рекомендациями выбираем провод ПММ:

шириной b = 0,008 м;

толщиной a = 0,0012 м;

площадь сечения S= 8,745·10^{-6} м^2.

Действительная ширина катушки:

$$b_{\text{к}} = a \cdot \omega_{\text{к.с.}} + \Delta_{\text{из}} \cdot (\omega_{\text{к.с.}} - 1) + 2 \cdot \Delta_{\text{вн}} = \\ = 0{,}008 \cdot 5{,}82 + 0{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot (5{,}82 - 1) + 2 \cdot 1{,}1 \cdot 10^{-3} \\ = 0{,}049 \text{ м};$$

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

Уточненные значения:

Средняя длина витка катушки:

$$L_{\text{к.ср}} = 2 \cdot l_m + 2 \cdot b_m + \pi \cdot b_k^* = 2 \cdot 0{,}053 + 2 \cdot 0{,}024 + 3{,}14 \cdot 0{,}049 = 0{,}3 \text{ м.}$$

Сопротивления катушки:

$$R_{\text{к.с.}} = \frac{L_{\text{к.ср}} \cdot \rho \cdot k_t \cdot \omega_{\text{к.с.}}}{S_{\text{с}}} = \frac{0{,}3 \cdot 17{,}85 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 5{,}82}{8{,}745 \cdot 10^{-6}} = 0{,}00356 \text{ Ом;}$$

Сопротивления обмотки:

$$R_c = \frac{z_c \cdot R_{\text{к.с.}}}{a_c^2} = \frac{4 \cdot 0{,}00356}{2^2} = 0{,}00356 \text{ Ом;}$$

Плотность тока в обмотке возбуждения:

$$j_c = \frac{I_{\text{я}}}{2 \cdot a_c \cdot S_c} = \frac{385{,}98}{2 \cdot 2 \cdot 8{,}745 \cdot 10^{-6}} = 11{,}03 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 ;$$

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

Уточненное значение суммарного сопротивления:

Обмотки якоря:

$$R_{\text{ст}} = R_{\text{я}} + R_{\text{с}} = 0{,}00433 + 0{,}00356 = 0{,}00789 \text{ Ом;}$$

Цепи якоря:

$$R_{\text{я}\Sigma} = R_{\text{ст}} + R_{\text{б}} = 0{,}00789 + 0{,}0086 = 0{,}0165 \text{ Ом.}$$

7. Рабочие характеристики.

Сила тока в режиме торможения:

$$I_{\text{к.с.}} = \frac{U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{щ}}}{R_{\text{я}\Sigma}} = \frac{12 - 1{,}25}{0{,}0165} = 651{,}5 \text{ А;}$$

Сила тока в режиме максимальной электромагнитной мощности:

$$I_{ям} = \frac{I_{к.с.}}{2} = \frac{651,5}{2} = 325,75 \text{ А};$$

Максимальная электромагнитная мощность:

$$P_{max} = \frac{(U_н - \Delta U_щ)^2}{4 \cdot R_{яΣ}} = \frac{(12 - 1,25)^2}{4 \cdot 0,0165} = 1750,9 \text{ Вт};$$

Параметры, необходимые для построения рабочих характеристик, определяем для нескольких значений силы тока стартера. Ниже приведены результаты расчета для силы тока $I_{ят} = 325,75$ А.

Напряжение на выводах стартера:

$$U_{ст} = U_н - R_я \cdot I_я = 12 - 0,00433 \cdot 325,75 = 10,59 \text{ В}.$$

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

Таблица 2

$I_я$, А	0	50	100	150	200	250	300	350	387,6
$U_{ст}$, В	12	11,784	11,567	11,351	11,134	10,918	10,701	10,485	10,268

МДС возбуждения на два полюса:

$$F_{вз} = \frac{2 \cdot \omega_{к.с.} \cdot I_я}{a} = \frac{2 \cdot 5,82 \cdot 385,98}{2} = 2246,4 \text{ А};$$

Линейная нагрузка якоря:

$$A = \frac{N \cdot I_я}{2 \cdot a_я \cdot \pi \cdot D_я} = \frac{50 \cdot 385,98}{2 \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 0,068} = 45192 \text{ А/м};$$

МДС поперечной реакции якоря:

$$F_q = a_\delta \cdot \tau_{\text{пол}} \cdot \text{А} = 0{,}65 \cdot 0{,}053 \cdot 45192 = 1556 \text{ А};$$

$B_\delta^* = 0{,}84$ Тл - магнитная индукция в воздушном зазоре с учетом размагничивающего действия реакции якоря.

Магнитный поток:

$$\Phi = a_\delta \cdot \tau_{\text{пол}} \cdot l_{\text{я}} \cdot B_\delta^* = 0{,}65 \cdot 0{,}053 \cdot 0{,}055 \cdot 0{,}84 = 0{,}0016 \text{ Вб};$$

ЭДС в обмотке якоря:

$$E_{\text{я}} = U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{щ}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}\Sigma} = 12 - 1{,}25 - 385{,}98 \cdot 0{,}0165 = 4{,}38 \text{ В};$$

Частота вращения:

$$n_{\text{я}} = \frac{60 \cdot a_{\text{я}} \cdot E_{\text{я}}}{p \cdot N \cdot \Phi} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 4{,}38}{2 \cdot 50 \cdot 0{,}0016} = 1643 \text{ об/мин};$$

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

Таблица 3

$I_{\text{я}}$, А	0	50	100	200	300	400	500	600	650
$n_{\text{я}}$, об/мин	∞	29775	13650	5588	2900	1556	268	53	1

Электромагнитная мощность:

$$P = E_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}} = 4{,}38 \cdot 385{,}98 = 1691 \text{ Вт};$$

Потери мощности на трение в подшипниках:

$$\Delta P_{\text{под}} = \frac{0{,}03 \cdot P_{max} \cdot n_{\text{я}}}{n_{\text{я}m}} = \frac{0{,}03 \cdot 1887 \cdot 1643}{1956} = 48 \text{ Вт};$$

Линейная скорость коллектора:

$$\upsilon_{\text{кол}} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot D_{\text{я}} \cdot n_{\text{я}}}{3 \cdot 60} = \frac{3{,}14 \cdot 2 \cdot 0{,}068 \cdot 1643}{3 \cdot 60} = 3{,}9 \text{м/с};$$

$K_{тр}$ = 0,25 - коэффициент трения;

$F_{щ}$ = 2 МПа - удельное нажатие;

$N_{щ}$ = 4 - число щеток.

Потери мощности на трение между щетками и коллектором:

$$\Delta P_{щ} = k_{тр} \cdot F_{щ} \cdot N_{щ} \cdot \upsilon_{пол} = 0{,}25 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 3{,}9 = 7{,}8 \text{Вт};$$

Суммарные механические потери:

$$\Delta P_{мех} = \Delta P_{под} + \Delta P_{щ} = 48 + 7{,}8 = 55{,}8 \text{ Вт};$$

Для определения магнитных потерь предварительно рассчитывают следующие параметры:

Частота перемагничивания стали:

$$f = \frac{p \cdot n_{я}}{60} = \frac{2 \cdot 1643}{60} = 55 \text{ Гц};$$

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

$$D_{1/3} = D_{2min} + \frac{2}{3} \cdot h_2 = 0{,}051 + \frac{2}{3} \cdot 0{,}0061 = 0{,}055 \text{ м};$$

Зубцовый шаг:

$$t_{1/3} = \frac{\pi \cdot D_{1/3}}{Z_{пз}} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}055}{25} = 0{,}0069 \text{ м};$$

Ширина зубца:

$$b_{1/3} = t_{1/3} - b_{пз} = 0{,}0069 - 0{,}003 = 0{,}0039 \text{ м};$$

Магнитная индукция в сечении зубца:

$$B_{1/3} = \frac{t_z \cdot B_{\delta}^{*}}{k_{стл} \cdot b_{1/3}} = \frac{0{,}00854 \cdot 0{,}84}{0{,}95 \cdot 0{,}0039} = 1{,}224 \text{ Тл};$$

Магнитная индукция в сердечнике якоря:

$$B_{\text{я}} = \frac{a_{\delta} \cdot \tau_{\text{пол}} \cdot B_{\delta}^{*}}{2 \cdot k_{\text{стл}} \cdot h_{\text{я}}} = \frac{0{,}65 \cdot 0{,}053 \cdot 0{,}84}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}0138} = 1{,}1 \text{ Тл};$$

$\gamma_{\text{СТЛ}} = 7850$ кг/м^2.

Масса зубцового слоя:

$$M_z = \gamma_{\text{стл}} \cdot k_{\text{стл}} \cdot l_{\text{я}} \cdot (0{,}25 \cdot \pi \cdot (D_{\text{я}}^2 - D_{2min}^2 - Z_{\text{пз}} \cdot (b_{\text{пз}} \cdot h_2 + 0{,}25 \cdot \pi \cdot b_{\text{пз}}^2 + h_{\text{прз}} \cdot a_{\text{прз}}))) =$$

$$= 7850 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}055 \cdot (0{,}25 \cdot 3{,}14 \cdot (0{,}068^2 - 0{,}051^2 - 25 \cdot (0{,}003 \cdot 0{,}0061 + 0{,}25 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}003^2 + 0{,}001 \cdot 0{,}00108))) =$$

$$= 0{,}438 \text{ кг};$$

Масса сердечника якоря:

$$M_{\text{я}} = 0{,}25 \cdot \pi \cdot \gamma_{\text{стл}} \cdot k_{\text{стл}} \cdot l_{\text{я}} \cdot \left(D_{2min}^2 - D_{\text{в}}^2\right) =$$

$$= 0{,}25 \cdot 3{,}14 \cdot 7850 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}055 \cdot (0{,}051^2 - 0{,}0204^2) = 0{,}7 \text{ кг};$$

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

В зубцовом слое:

$$\Delta P_z = 2 \cdot B_{1/3}^2 \cdot M_z \cdot (0{,}044 \cdot f + 2240 \cdot \Delta^2 \cdot f^2) =$$

$$= 2 \cdot 1{,}224^2 \cdot 0{,}438 \cdot (0{,}044 \cdot 55 + 2240 \cdot 0{,}0012^2 \cdot 55^2) = 16 \text{ Вт};$$

В сердечнике якоря:

$$\Delta P_{\text{я}} = 2 \cdot B_{\text{я}}^2 \cdot M_{\text{я}} \cdot (0{,}044 \cdot f + 2240 \cdot \Delta^2 \cdot f^2) =$$

$$= 2 \cdot 1{,}1^2 \cdot 0{,}7 \cdot (0{,}044 \cdot 55 + 2240 \cdot 0{,}0012^2 \cdot 55^2) = 21 \text{ Вт};$$

Суммарные магнитные потери:

$$\Delta P_{\text{маг}} = \Delta P_z + \Delta P_{\text{я}} = 16 + 21 = 37 \text{ Вт};$$

Сумма механических и магнитных потерь:

$$\Delta P_{\text{м}} = \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{маг}} = 55{,}8 + 37 = 92{,}8 \text{ Вт};$$

Полезная мощность:

$$P_2 = P - \Delta P_м = 1691 - 92{,}8 = 1598{,}2 \text{ Вт};$$

Мощность, подводимая к стартеру:

$$P_1 = U_{ст} \cdot I_я = 385{,}98 \cdot 10{,}59 = 4088 \text{ Вт};$$

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

Таблица 4

$I_я$, А	0	100	200	300	400	500	600	650
P_2, Вт	0	655,10	1299,94	1606,54	1574,88	1204,97	496,82	15,89

КПД стартерного электродвигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1598}{4088} = 0{,}39;$$

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

Таблица 5

$I_я$, А	0	50	100	150	200	300	400	500	600	650
η, %	0	39	62	65	62	51	38	23	8	0

Электромагнитный момент:

$$M = \frac{9{,}55 \cdot P}{n_я} = \frac{9{,}55 \cdot 1691}{1643} = 9{,}83 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Полезный момент на валу:

$$M_2 = \frac{9{,}55 \cdot P_2}{n_я} = \frac{9{,}55 \cdot 1598}{1643} = 9{,}29 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

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	300	400	500	600	650
М, Н·м	0	1,83	4,44	7,05	9,66	12,27	14,88	16,19

Вывод

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

Полезная мощность $P_2 = 1444$ Вт;

Номинальная ёмкость аккумуляторной батареи $C_{25} = 70\ A \cdot ч$;

Частота вращения якоря $n_я = 1955{,}5$ об/мин;

Полезный момент на валу $M = 9{,}29$ Н·м;

КПД $\eta = 0{,}39$;

Диаметр якоря: $D_я = 0{,}068$ м;

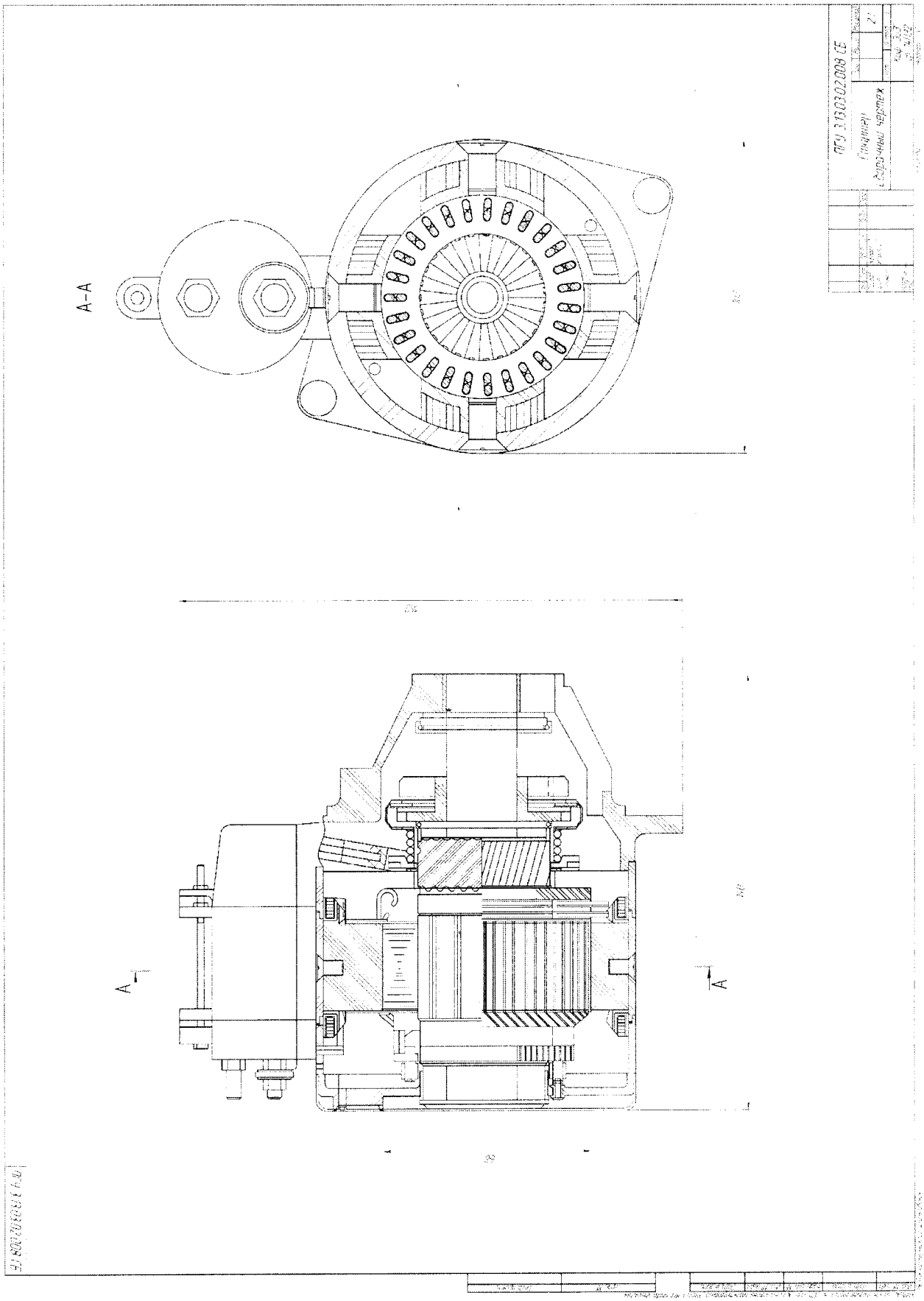
Длина пакета якоря $l_я = 0{,}055$ м;

Диаметр корпуса: $D_j = 0{,}102$ м.

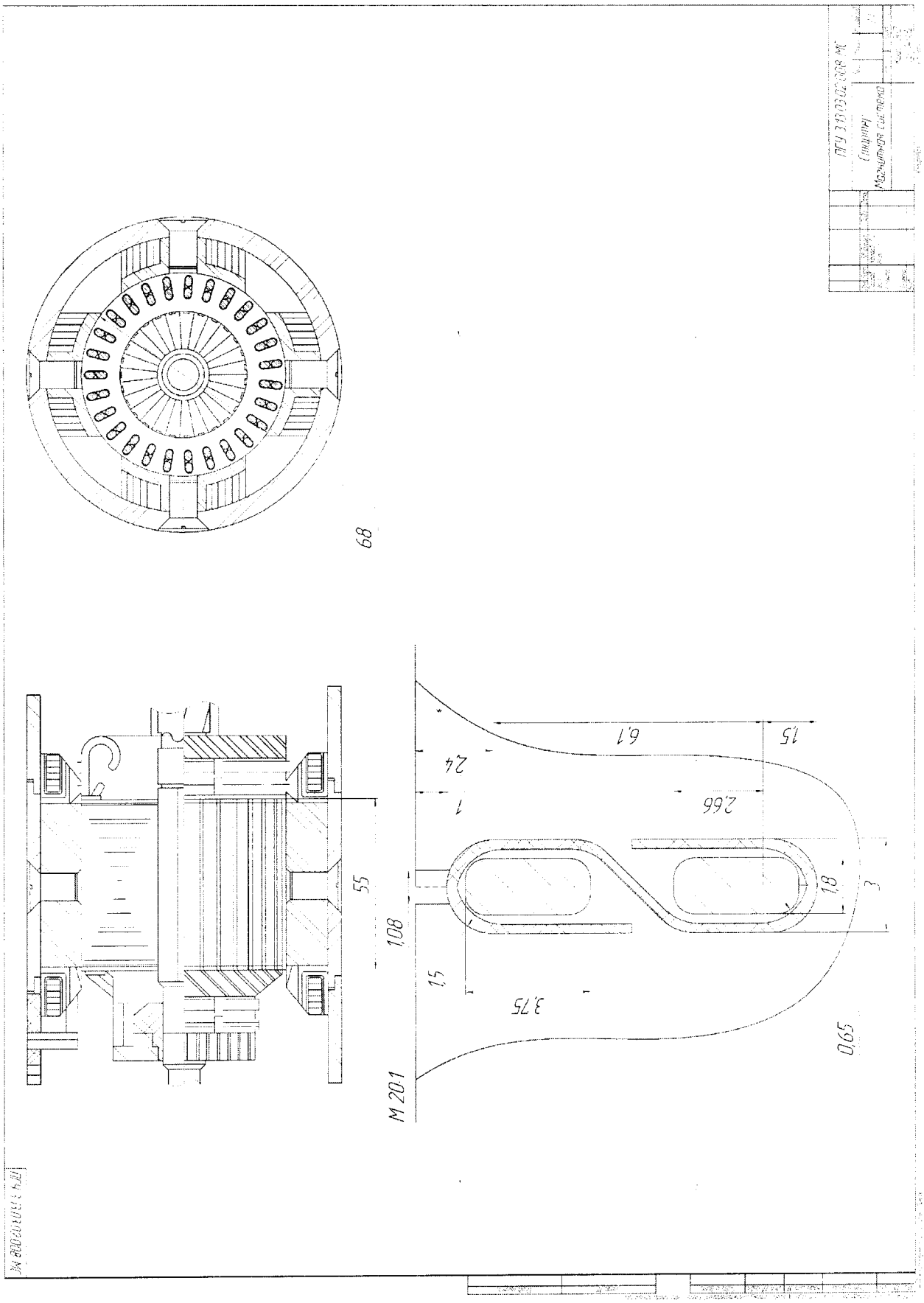
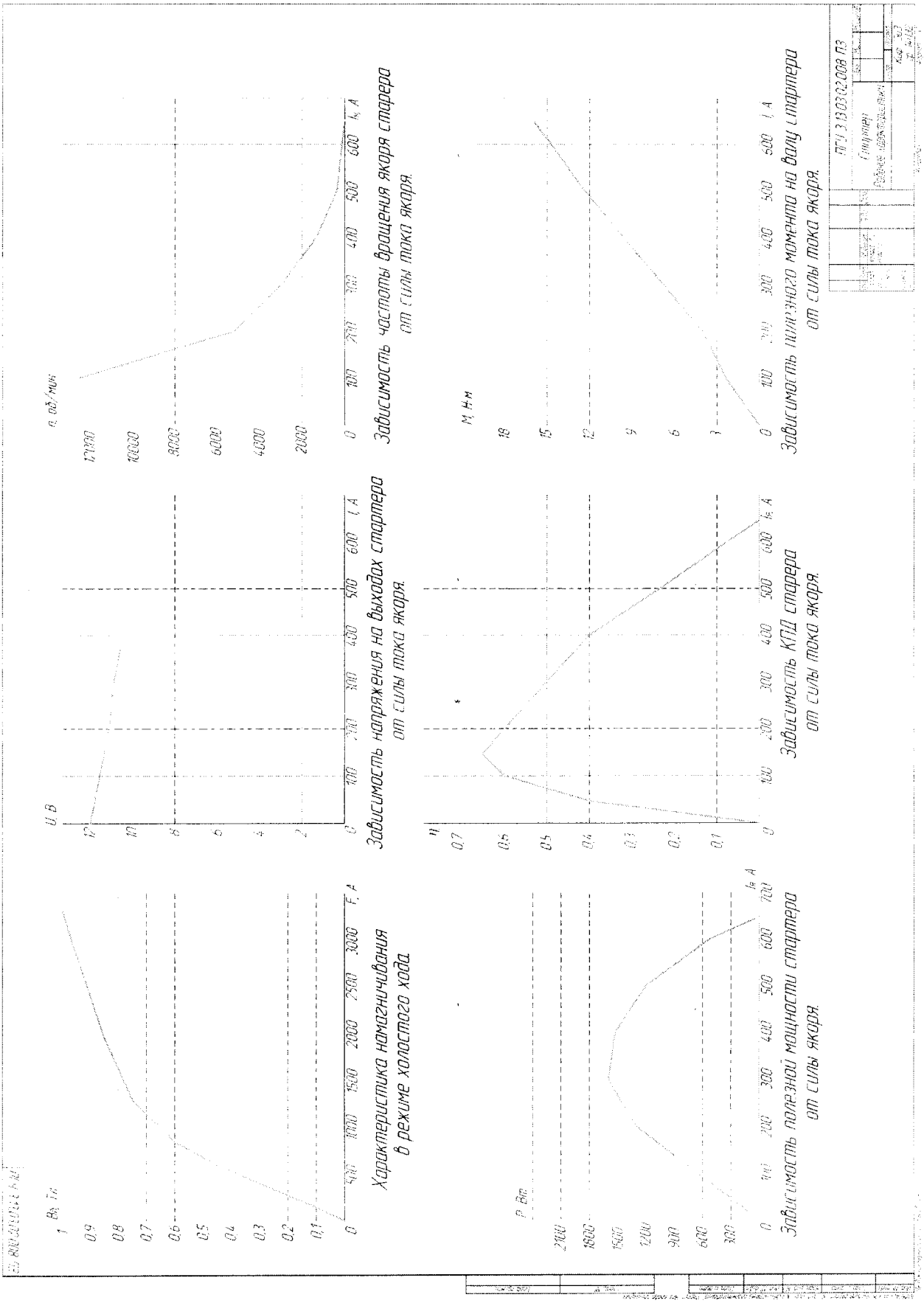
Список литературы

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

Приложение 1. Чертеж общего вида стартера.



Приложение 2. Чертеж магнитной системы стартера.



Приложение 3. Характеристики стартерного двигателя.