

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Факультет систем управления и робототехники

Электрические машины

Расчетная работа №2

АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Вариант 8 (5A80MB2, m11)

Студент: Кирбаба Д.Д.

Группа: R3338

Преподаватель: Усольцев А.А.

г. Санкт-Петербург

2023

## Задание

Для двигателя 5A80MB2, используя программу Matlab:

- определить параметры схемы замещения
- рассчитать и построить без учёта вытеснения тока и с учётом вытеснения
  - механическую и электромеханическую характеристики
  - рабочие характеристики
- сравнить результаты расчёта со справочными данными

## Исходные данные

Частота сети:  $f = 50$  Гц

Число пар полюсов двигателя:  $2p = 2$

Число фаз:  $m = 3$

Номинальная механическая мощность:  $P_N = 2.2$  кВт

Номинальная частота вращения:  $n_N = 2850$  об/мин

КПД:  $\eta_N = 81\%$

Коэффициент мощности:  $\cos\phi_{1N} = 0.85$

Номинальный ток при 380 В:  $I_N = 4.9$  А

Номинальный момент:  $M_N = 7.4$  Н · м

Отношение пускового момента к номинальному моменту (кратность пускового момента):  $k_s = 2.7$

Отношение пускового тока к номинальному току (кратность пускового тока):  $k_{sI} = 6.5$

Отношение максимального момента к номинальному моменту (кратность максимального момента):  $\lambda = 2.8$

Индекс механической характеристики:  $I$

Динамический момент инерции ротора:  $J_{dyn} = 0.0021$  кг · м<sup>2</sup>

Масса:  $m_1 = 15.5$  кг

Сервис-фактор:  $sf = 1.15$

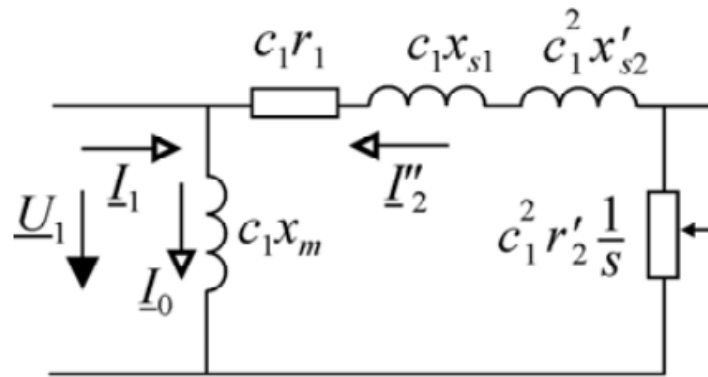


Рисунок 1. Схема замещения асинхронного двигателя.

Активное сопротивление статора определяется по рассеиваемой на нём мощности, которая равна разности потребляемой активной мощности и электромагнитной мощности в номинальном режиме.



## Задание 1

Рассчитаем недостающие значения для определения параметров схемы замещения:

$$U_{1N} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 219.3931 \text{ В}$$

$$I_{1N} = I_N = 4.9 \text{ А}$$

$$\omega_1 = 2\pi f = 314.1593 \text{ рад/с}$$

$$z_p = \frac{2p}{2} = 1$$

$$s_N = 1 - \frac{n_N}{n_1} = 0.05$$

Рассеиваемая мощность  $\Delta P_{1Cu} = m I_{1N}^2 r_1$ , в то же время  $\Delta P_{1Cu} = P_1 - P_{em}$ ,

где  $P_1 = m U_{1N} I_{1N} \cos \phi_{1N}$ ,  $P_{em} = \frac{M_N \omega_1}{z_p}$ .

Теперь с использованием справочным данных вычислим исходные завышенные значения активных сопротивлений статора и ротора соответственно:

$$r_{10} = \frac{U_{1N} \cdot I_{1N} \cdot \cos \phi_{1N} - \frac{M_N \cdot \omega_1}{z_p \cdot m}}{I_{1N}^2} = 5.7828 \text{ Ом}$$

$$r'_{20} = \frac{m \cdot z_p \cdot U_{1N}^2 \cdot s_N}{\omega_1 \cdot M_N} = 3.1057 \text{ Ом}$$

Далее для расчета параметров используем функцию расчета, реализованную в Matlab, которая будет последовательно приближать завышенные значения к реальным.

Приведенный ток ротора при критическом скольжении был рассчитан по Т-образной схеме следующим образом:

$$I'_2(s_m) = \frac{U_{1N}}{\sqrt{\left(k_1 r_{10} + \frac{k_2 r'_{20}}{s_m}\right)^2 + x_{ks}^2}}$$

Все остальные формулы расписаны в приведенной блок-схеме в начале работы.

Программный код:

```
% initialization
TOL = 0.001;
Delta_k = 10^(-4);
N = 10^(6);
k_1 = 1;
k_2 = 1;
mu_m = 1;
delta_mu = 1;
n = 0;

while (delta_mu > TOL) && (n < N)
    k_2 = k_2 - Delta_k;
    delta_n = 1;
    mu_m = 1;
    n = n + 1;
    while (delta_n > TOL) && (n < N)
        k_1 = k_1 - Delta_k;
        n = n + 1;
        % calculate rest paratemers (1a)
        mu_s = mu_m;
        a = k_1 * r_10 / (k_2 * r_20_s);
        A = 1 - 2 * a * s_N * (lambda - 1);
        s_m = s_N * (lambda + sqrt(lambda^2 - A)) / A;
        x_ks = sqrt((k_2 * r_20_s / s_m)^2 - (k_1 * r_10)^2);
        x_s2_s = x_ks / 2;
        x_s1 = x_s2_s;
        b = x_ks / ((k_1 * r_10 + k_2 * r_20_s / s_N)^2 + x_ks^2);
        x_m = 1 / (I_1N * sqrt(1 - cosphi_1N^2)/U_1N - b);
        I_2_s = U_1N / sqrt((k_1 * r_10 + k_2 * r_20_s/s_m)^2 + (x_s1 + x_s2_s)^2);
        mu_m = m * z_p * I_2_s^2 * k_2 * r_20_s / (omega_1 * s_m * M_N);
        delta_n = abs(mu_m - mu_s) / mu_s;
        delta_mu = abs(mu_m - lambda) / lambda;
    end
end

r_1 = k_1 * r_10;
r_2_s = k_2 * r_20_s;
```

В итоге, получим следующие параметры:

Активное сопротивление статора:

$$r_1 = 4.0966 \text{ Ом}$$

Активное сопротивление ротора:

$$r_2' = 2.6529 \text{ Ом}$$

Критическое скольжение:

$$s_m = 0.3786$$

Индуктивное сопротивление ветви короткого замыкания:

$$x_{ks} = 5.6838 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания:

$$x_m = 99.5778 \text{ Ом}$$

Приведенный ток ротора при критическом скольжении:

$$I_2' = 17.5894 \text{ А}$$

Относительное значение момента опрокидывания:

$$\mu_m = 2.7972$$

Сопротивления потоков рассеяния статора и ротора:

$$x_{s1} = x_{s2}' = 2.8419 \text{ Ом}$$

Теперь рассчитаем глубину паза, используя циклический программный код Matlab.

Начальное приближение  $h_0$  выберем равным 0.5. Так как двигатель маломощный.

Формулы для вычислений аналогичны предоставленным в блок-схеме в начале работы.

Программный код:

```
% calculation of the coefficients for the slot depth
```

```
h_0 = 0.5; % for low-powered machine
% h_0 = 3; % for high-powered machine
```

```
h = h_0;
mu_s = 0;
```

```

n = 0;
delta_s = 1;
Delta_h = Delta_k;

while (delta_s > TOL) && (n < N)
    h = h + Delta_h;
    n = n + 1;
    k_x = 3 / (2 * h) * (sinh(2*h) - sin(2*h))/(cosh(2*h)-cos(2*h));
    k_r = h * (sinh(2*h) + sin(2*h))/(cosh(2*h)-cos(2*h));
    mu_s = m * z_p * U_1N^2 * r_2_s * k_r / (omega_1 * ((r_1 + r_2_s * k_r)^2 + (x_s1
+ x_s2_s * k_x)^2) * M_N);
    delta_s = abs(mu_s - k_s) / k_s;
end

```

В результаты получим следующие значения:

Глубина паза:

$$h = 1.6918$$

Коэффициенты вытеснения:

$$k_r = 1.5579$$

$$k_x = 0.8435$$

Пусковой момент:

$$\mu_s = 2.6973$$

## Задание 2.1

Механическая характеристика без учета вытеснения тока:

$$M(s) = \frac{m \cdot z_p \cdot U_{1N}^2 \cdot r_2'}{\omega_1 \cdot s \cdot \left( \left( \frac{r_1 + r_2'}{s} \right)^2 + (x_{s1} + x_{s2}')^2 \right)}$$

С учетом вытеснения:

$$M_k(s) = \frac{m \cdot z_p \cdot U_{1N}^2 \cdot r_2' \cdot k_r}{\omega_1 \cdot s \cdot \left( \left( \frac{r_1 + r_2'}{s} \right)^2 + (x_{s1} + x_{s2}' \cdot k_x)^2 \right)}$$



Построим графики зависимостей:  $M(s)$ ,  $M_k(s)$ ,  $n(M)$ ,  $n(M_k)$ .

Программный код:

```
%% plots of the mechanical characteristic

% form points arrays
s_data = linspace(-1, 1, 10^6);
n_data = (1 - s_data) .* n_1;

% without displacement current
M = m .* z_p .* U_1N.^2 .* r_2_s ./ (omega_1 .* s_data .* ((r_1 + r_2_s ./ s_data).^2
+ (x_s1 + x_s2_s).^2));

% with displacement current
h_data = h .* abs(s_data);
k_r_data = h_data .* (sinh(2 .* h_data) + sin(2 .* h_data)) ./ (cosh(2 .* h_data) -
cos(2 .* h_data));
k_x_data = 3 ./ (2 .* h_data) .* (sinh(2 .* h_data) - sin(2 .* h_data)) ./ (cosh(2 .*
h_data) - cos(2 .* h_data));
M_k = m .* z_p .* U_1N.^2 .* r_2_s .* k_r_data ./ (omega_1 .* s_data .* ((r_1 +
k_r_data .* r_2_s ./ s_data).^2 + (x_s1 + x_s2_s .* k_x_data).^2));

%% plot M(s) and M_k(s)
plot(s_data, M, '-', s_data, M_k, '--', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('s')
ylabel('M, H \cdot m')
legend('M(s)', 'M_k(s)')

%% plot n(M) and n(M_k)
plot(M, n_data, '-', M_k, n_data, '--', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('M, H \cdot m')
ylabel('n, об/мин')
legend('n(M)', 'n(M_k)')
```

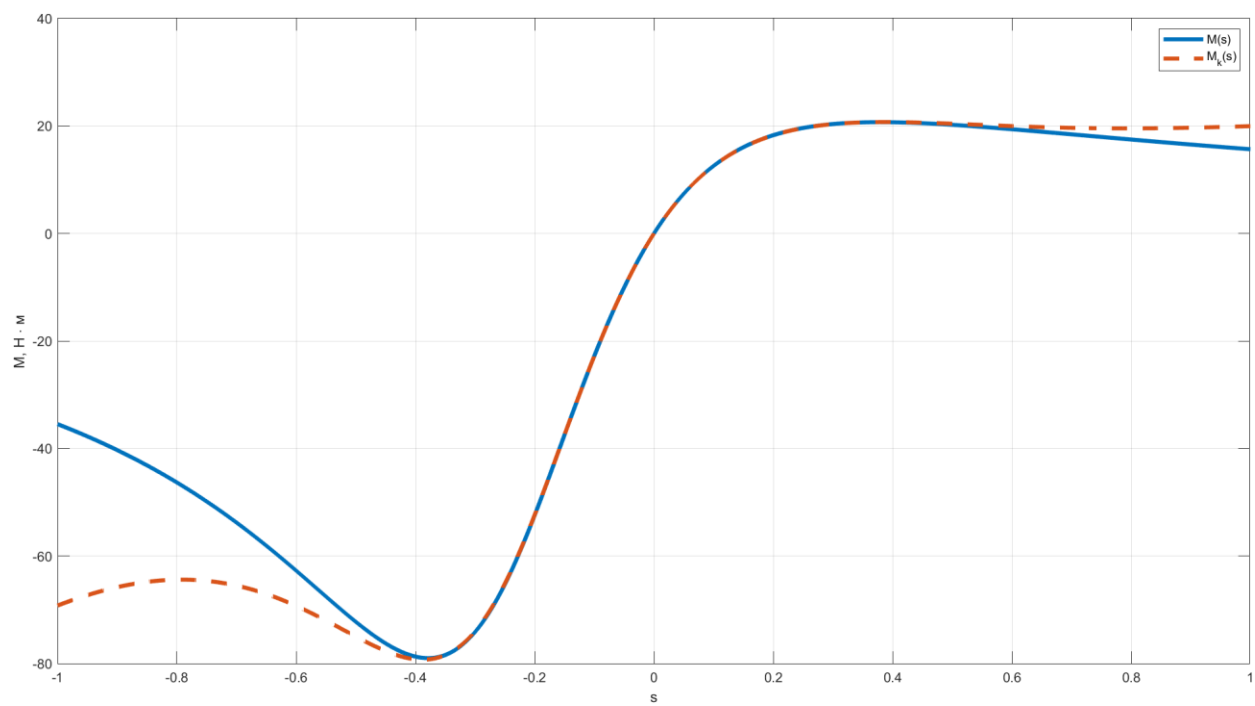


Рисунок 3. Зависимость вращающего момента от скольжения.

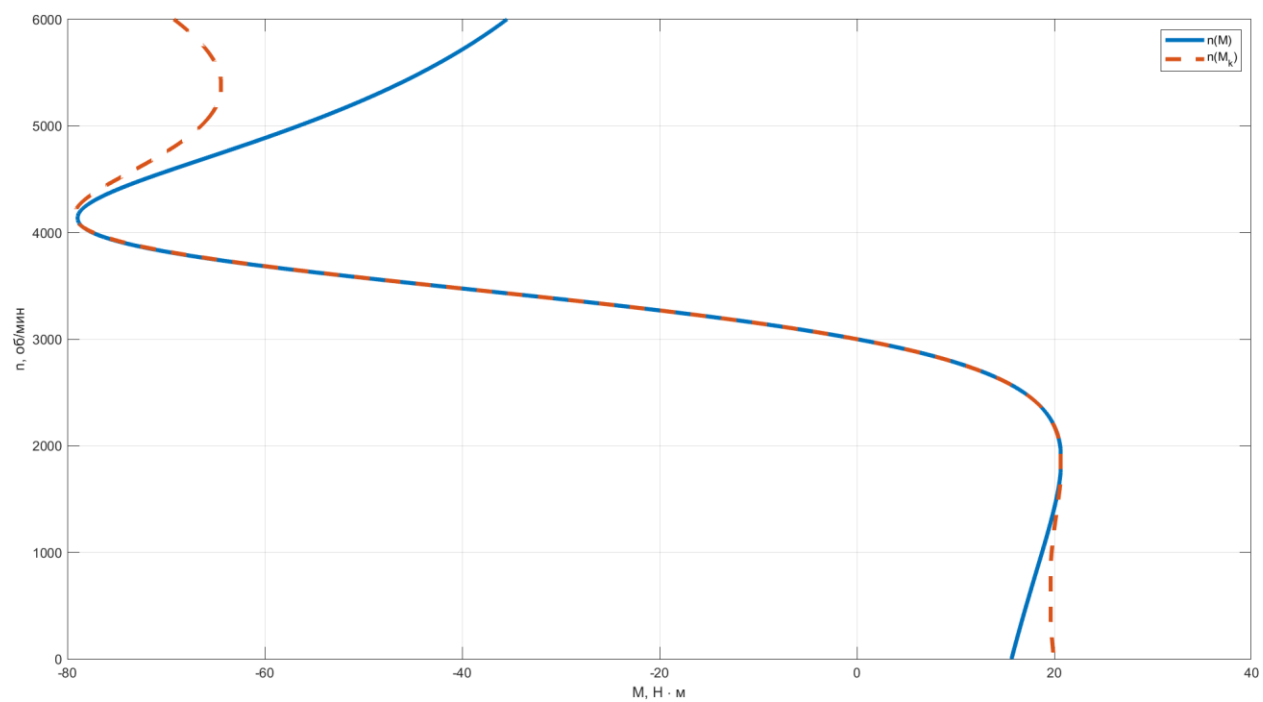


Рисунок 4. Зависимость скорости вращения от вращающего момента.

Электромеханическая характеристика без учета вытеснения тока:

$$I_2(s) = \frac{U_{1N}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_{s1} + x'_{s2})^2}}$$

С учетом вытеснения:

$$I_{2k}(s) = \frac{U_{1N}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{k_r \cdot r'_2}{s}\right)^2 + (x_{s1} + k_x \cdot x'_{s2})^2}}$$

Построим графики зависимостей:  $I_2(s), I_{2k}(s), n(I_2), n(I_{2k})$ .

Программный код:

```
%% plots of the electromechanical characteristic

% without displacement current
I_2 = U_1N ./ sqrt((r_1 + r_2_s ./ s_data).^2 + (x_s1 + x_s2_s)^2);

% with displacement current
I_2k = U_1N ./ sqrt((r_1 + k_r_data .* r_2_s ./ s_data).^2 + (x_s1 + k_x_data .*
x_s2_s).^2);

%% plot I_2(s) and I_2k(s)
plot(s_data, I_2, '-', s_data, I_2k, '--', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('s')
ylabel('I, A')
legend('I_2(s)', 'I_{2k}(s)')

%% plot n(I_2) and n(I_2k)
plot(I_2, n_data, '-', I_2k, n_data, '--', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('I, A')
ylabel('n, об/мин')
legend('n(I_2)', 'n(I_{2k})')
```

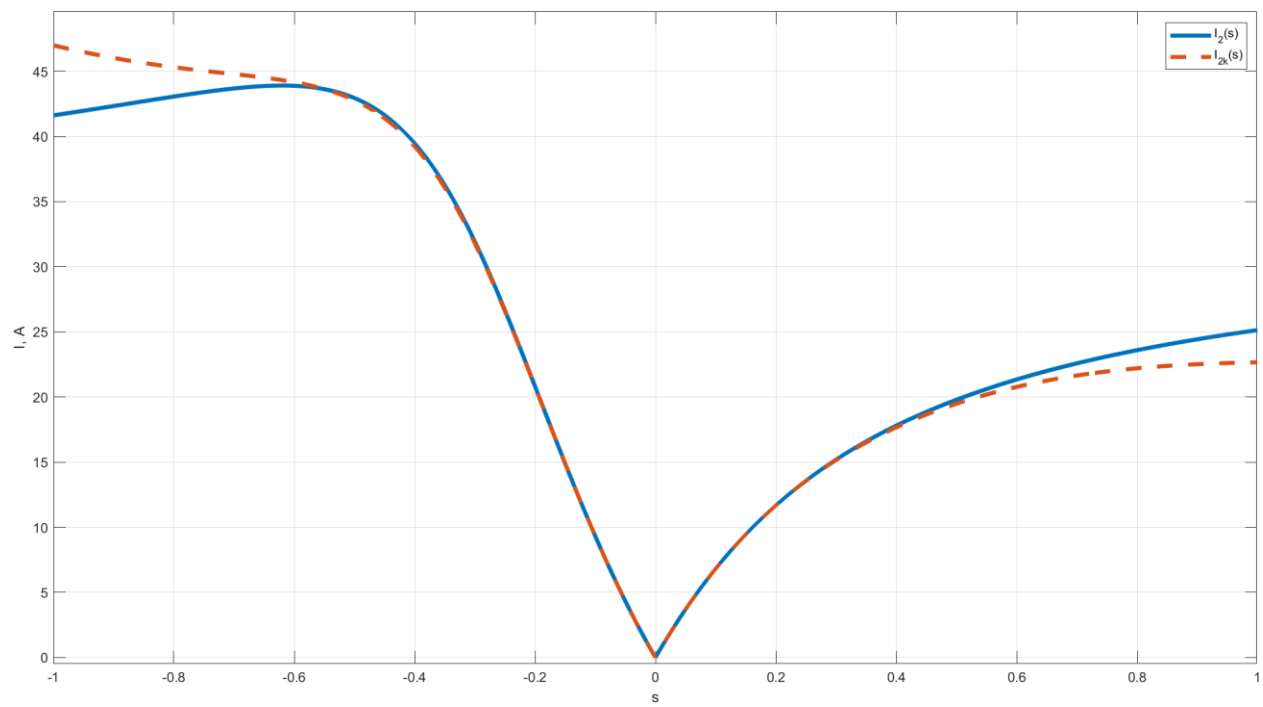


Рисунок 5. Зависимость силы тока ротора от скольжения.

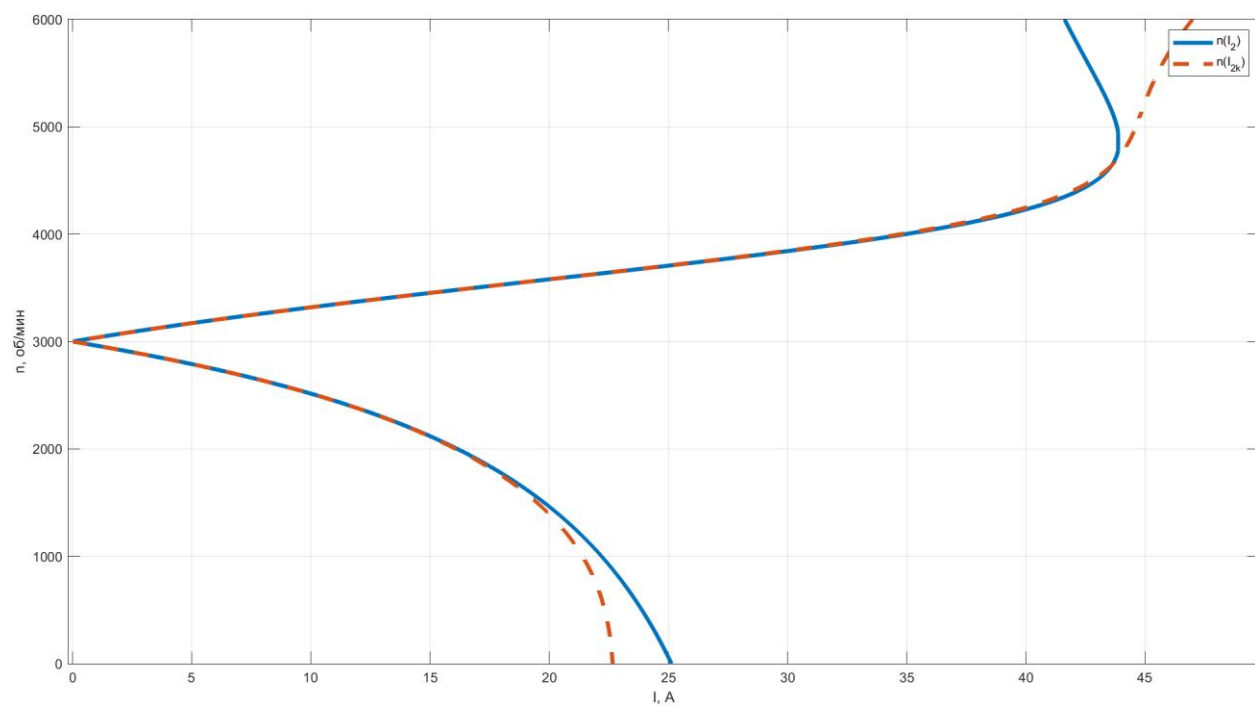


Рисунок 6. Зависимость скорости вращения от силы тока ротора.

## Задание 2.2

Исследуем рабочие характеристики данного асинхронного двигателя.

К рабочим характеристикам относятся следующие зависимости:

$n_2$  – частота вращения

$\eta$  – КПД

$M_2$  – момент на валу

от полезной мощности  $P_2$

$\cos\phi$  – коэффициент мощности

при  $U_1 = \text{const}, f_1 = \text{const}$

$I_1$  – ток статора

$P_1$

Найдем аналитические зависимости:

Знаем, что

$$P_2 = P_{mc} - \Delta P_{mc} - \Delta P_{ex}$$

Но так как

$$\Delta P_{ex}, \Delta P_{1Fe}(s) \approx 0$$

То

$$P_2 = P_{mc} \approx m \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \cdot \frac{1-s}{s}$$

Распишем

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{1Cu} + \Delta P_{1Fe} + \Delta P_{2Cu} \approx P_2 + m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1 + m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r_2'$$

Сила тока статора

$$I_1 = I_2' + \frac{U_{1N}}{c_1 \cdot x_m} = |c_1 = 1| = I_2' + \frac{U_{1N}}{x_m}$$

КПД

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

Скорость вращения ротора:

$$n_2 = n_N \cdot s$$

Коэффициент мощности

$$\cos\phi = \frac{P_1}{3 \cdot U_{1N} \cdot I_{1N}}$$

Теперь с помощью Matlab построим графики.

Программный код:

```
%% performance criteria

% form points arrays
s_data = linspace(0, s_N + 10^(-3), 10^6);
n_data = (1 - s_data) .* n_1;
h_data = h .* abs(s_data);
k_r_data = h_data .* (sinh(2 .* h_data) + sin(2 .* h_data)) ./ (cosh(2 .* h_data) - cos(2 .* h_data));
k_x_data = 3 ./ (2 .* h_data) .* (sinh(2 .* h_data) - sin(2 .* h_data)) ./ (cosh(2 .* h_data) - cos(2 .* h_data));

% formulas without displacement current
M = m .* z_p .* U_1N.^2 .* r_2_s ./ (omega_1 .* s_data .* ((r_1 + r_2_s ./ s_data).^2 + (x_s1 + x_s2_s).^2));
I_2_s = U_1N ./ sqrt((r_1 + r_2_s ./ s_data).^2 + (x_s1 + x_s2_s).^2);
I_1 = I_2_s + U_1N ./ x_m;
P_2 = m .* I_2_s.^2 .* r_2_s .* (1 - s_data) ./ s_data;
P_1 = P_2 + m .* I_1.^2 .* r_1 + m .* I_2_s.^2 .* r_2_s;
eta = P_2 ./ P_1 .* 100;
cosphi = P_1 ./ (3 .* U_1N .* I_1N);

% formulas with displacement current
M_k = m .* z_p .* U_1N.^2 .* r_2_s .* k_r_data ./ (omega_1 .* s_data .* ((r_1 + k_r_data .* r_2_s ./ s_data).^2 + (x_s1 + x_s2_s .* k_x_data).^2));
I_2k_s = U_1N ./ sqrt((r_1 + r_2_s .* k_r_data ./ s_data).^2 + (x_s1 + x_s2_s .* k_x_data).^2);
I_1k = I_2k_s + U_1N ./ x_m;
P_2k = m .* I_2k_s.^2 .* r_2_s .* (1 - s_data) ./ s_data;
P_1k = P_2k + m .* I_1k.^2 .* r_1 + m .* I_2k_s.^2 .* r_2_s;
eta_k = P_2k ./ P_1k .* 100;
cosphi_k = P_1k ./ (3 .* U_1N .* I_1N);
```

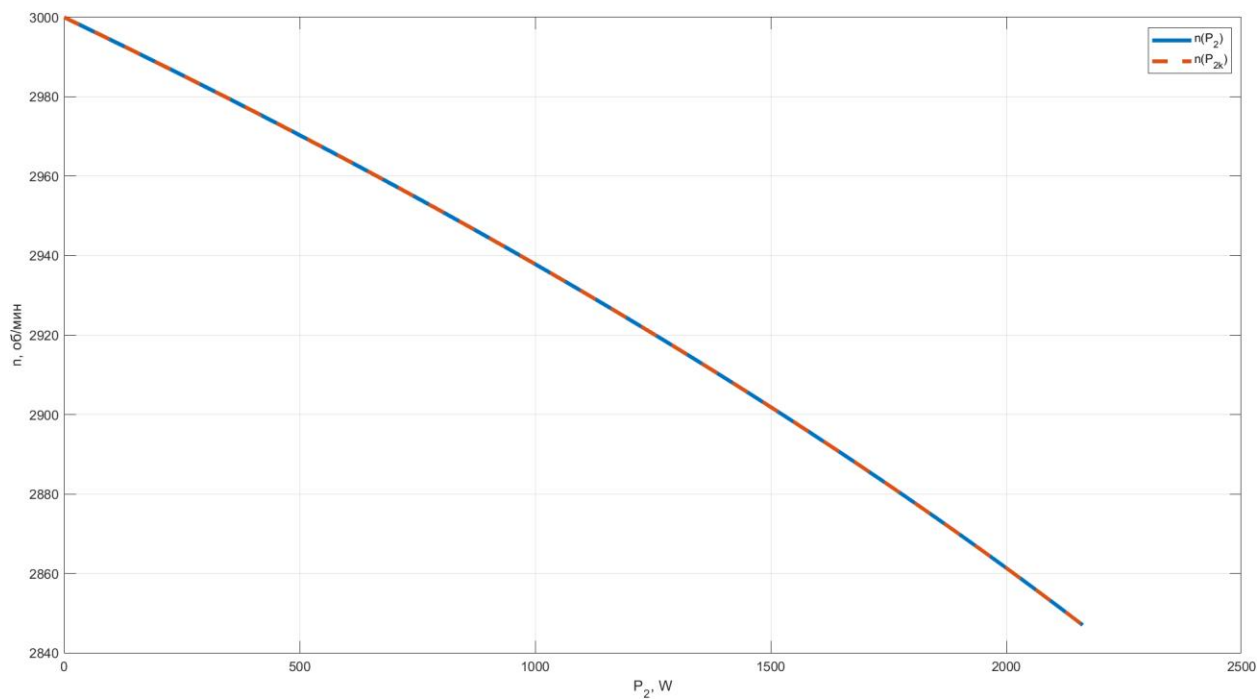


Рисунок 7. Графики  $n(P_2)$  и  $n(P_{2k})$ .

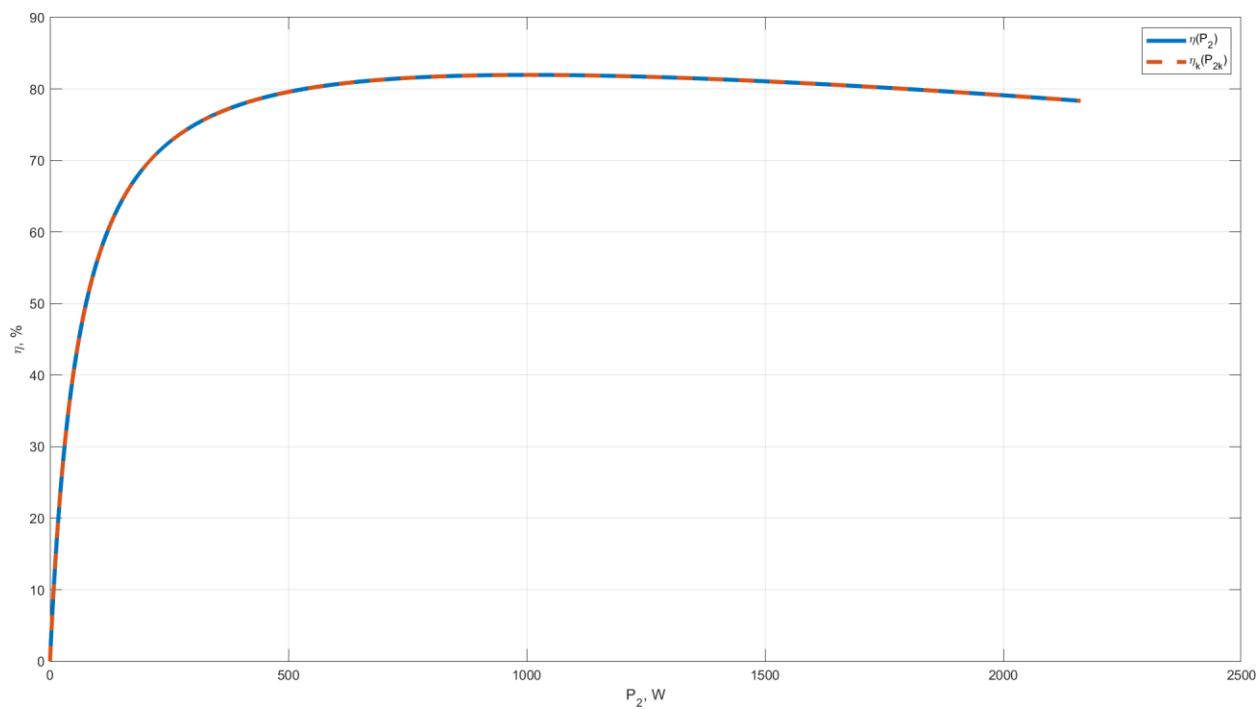


Рисунок 8. Графики  $\eta(P_2)$  и  $\eta_k(P_{2k})$ .

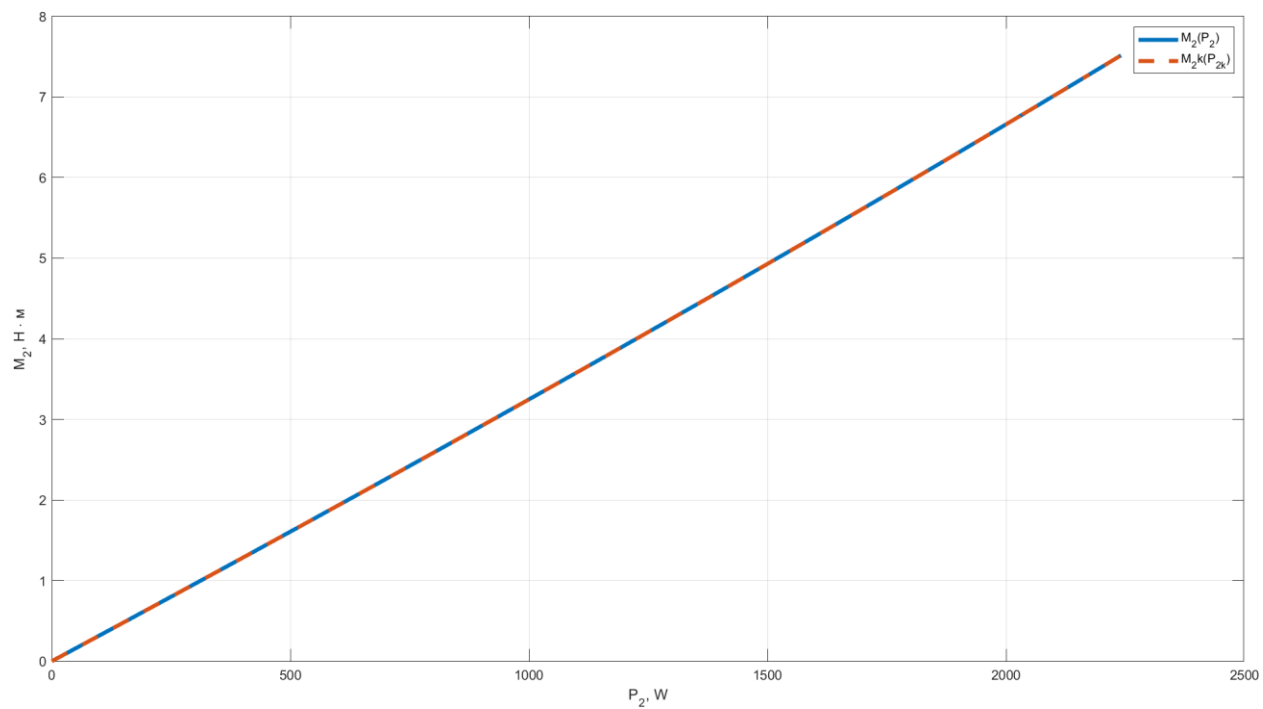


Рисунок 9. Графики  $M_2(P_2)$  и  $M_{2k}(P_{2k})$ .

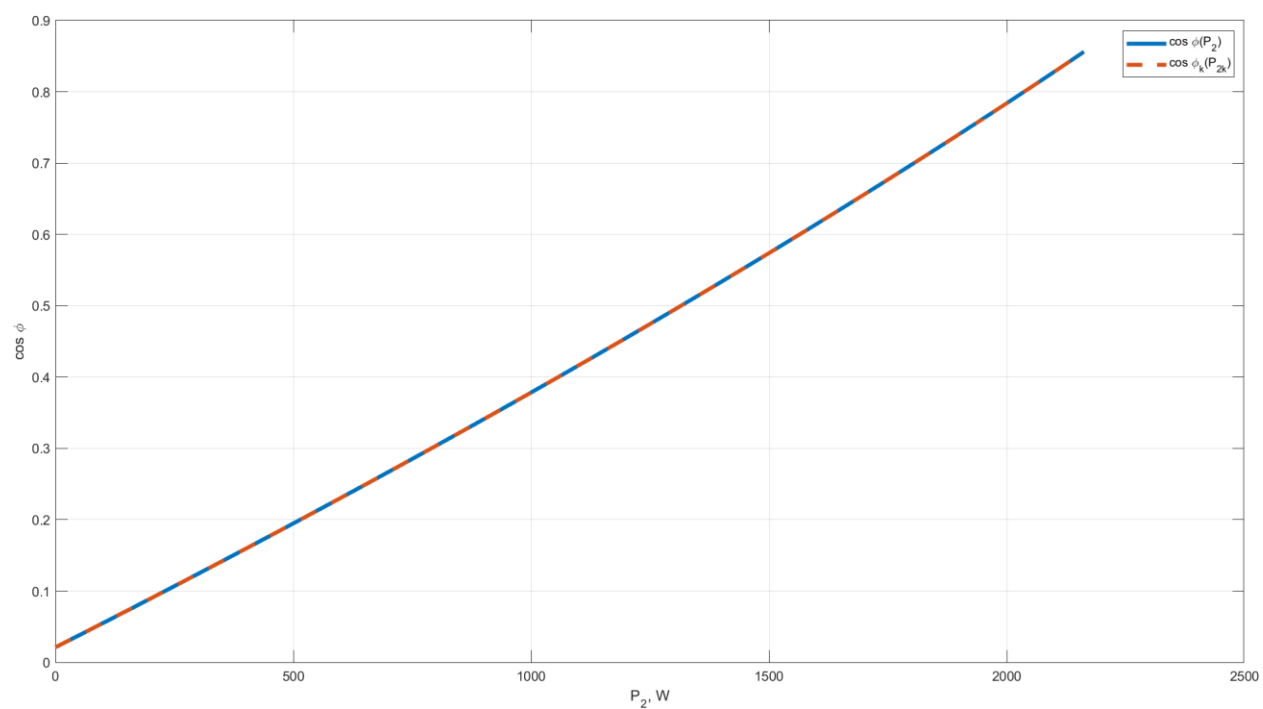


Рисунок 10. Графики  $\cos \phi(P_2)$  и  $\cos \phi_k(P_{2k})$ .



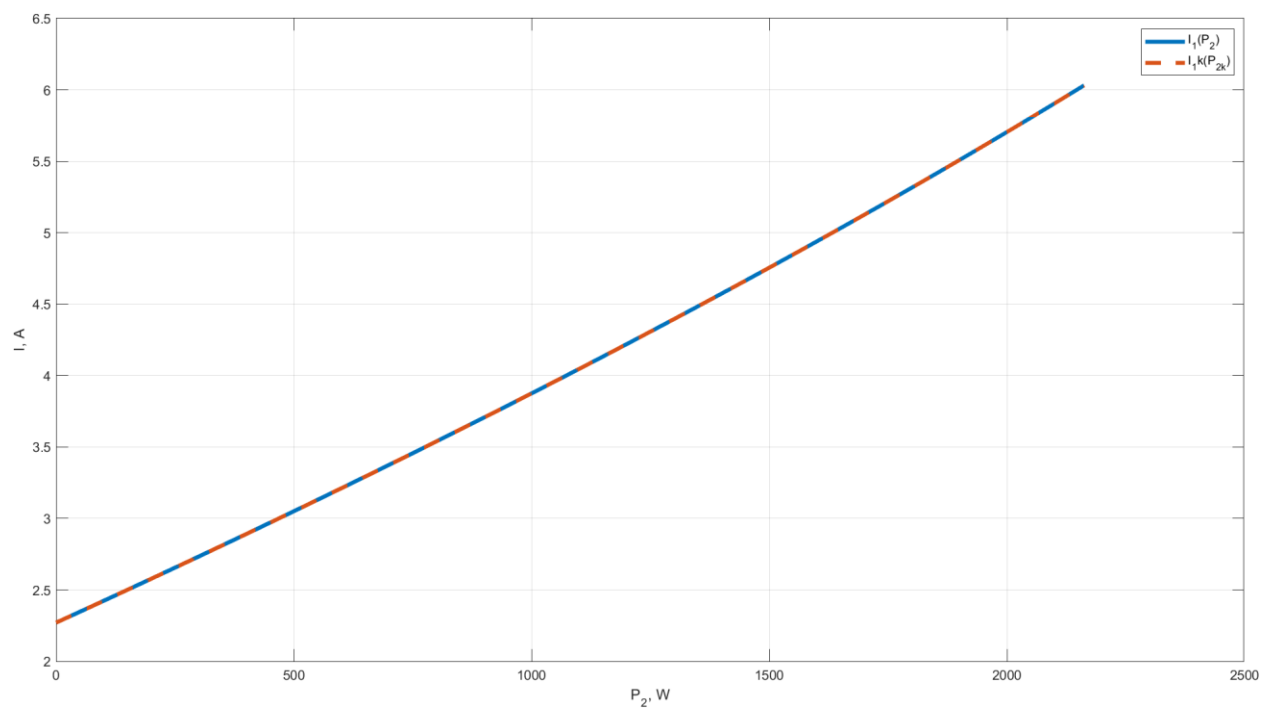


Рисунок 11. Графики  $I_1(P_2)$  и  $I_{1k}(P_{2k})$ .

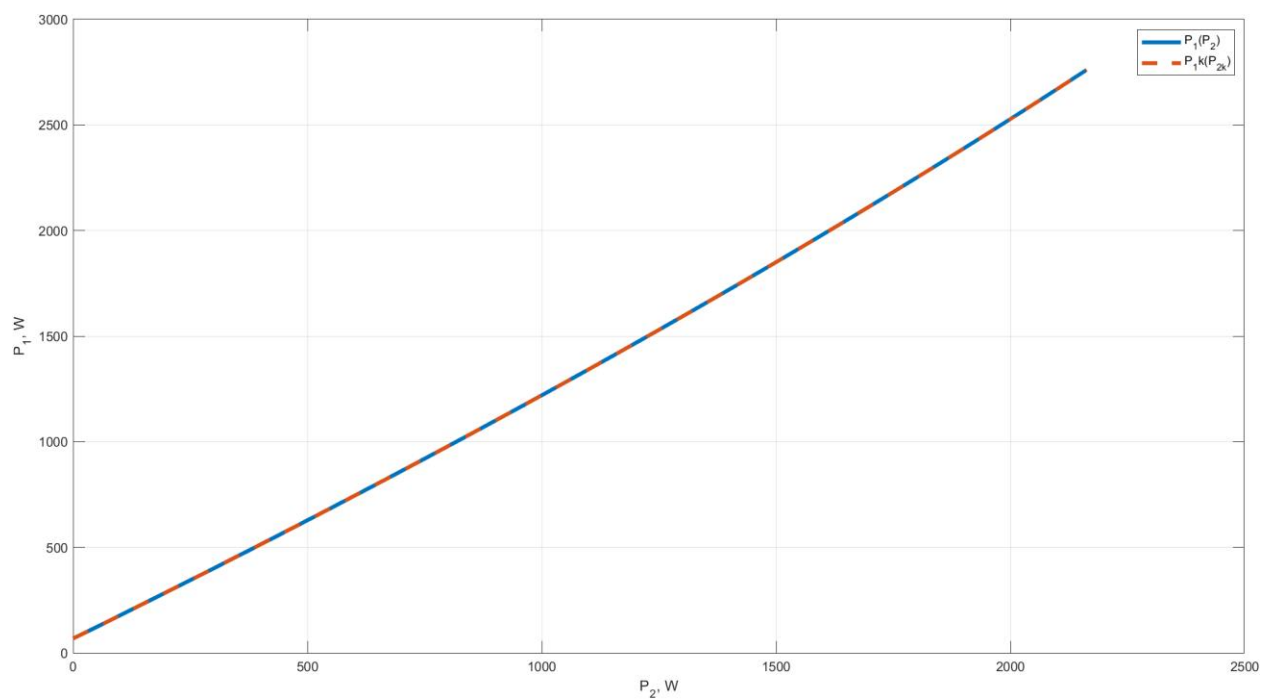


Рисунок 12. Графики  $P_1(P_2)$  и  $P_{1k}(P_{2k})$ .

### Задание 3

Чтобы сравнить результат расчетов со справочными данными проанализируем полученную механическую характеристику:

По документации:

$k_s = 2.7$  – кратность пускового момента

$\lambda = 2.8$  – кратность максимального момента

$M_N = 7.4 \text{ Н} \cdot \text{м}$  – номинальный момент

Отметим точки пускового и максимального моментов на графике:

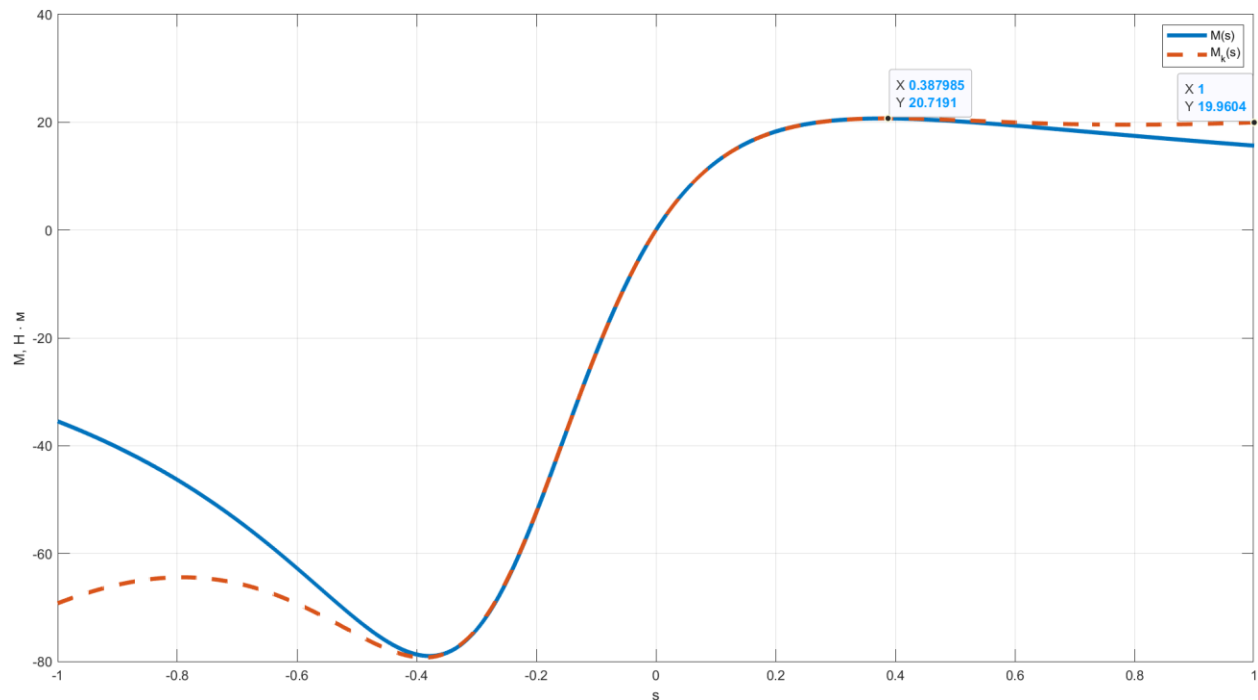


Рисунок 13. Механическая характеристика с отмеченными точками пускового и максимального моментов.

$$M_{launch} = 19.9604 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad M_{max} = 20.7191 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Вычислим эти же значения исходя из справочных данных:

$$M_{launch} = M_N \cdot k_s = 19.98 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{max} = M_N \cdot \lambda = 20.72 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Так как значения равны с некоторой погрешностью, то значит работа выполнена верно.

## Выводы

В данной расчетной работе были определены параметры схемы замещения двигателя 5A80MB2 с помощью циклической программы Matlab (m11).

Расчет производился с заданной погрешностью и значения последовательно приближались к реальным.

Затем, по определенным параметрам были построены механическая, электромеханическая и рабочие характеристики двигателя.

В конце, было произведено сравнение результатов расчетов со справочными данными, а именно по полученной механической характеристике были рассчитаны пусковой и максимальный момент двигателя, который достаточно хорошо приближают значения, заданные производителем. Исходя из этого был сделан вывод, что произведенные расчеты в данной работе верны.