

Лабораторная работа 1

ВЫБОР И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ СКОРОСТНОГО СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Выбор и расчёт электродвигателя

В качестве электромеханического преобразователя силового канала следящего скоростного ЭП применен ЭД постоянного тока с управлением по цепи якоря. К достоинствам ЭД постоянного тока следует отнести большой диапазон мощностей, линейность регулировочных и механических характеристик. Основным недостатком ЭД постоянного тока является наличие щеточно-коллекторного узла, создающего дополнительный момент трения и снижающего надежность его работы.

Анализ технических данных показывает, что ЭД различных типов с равными значениями номинальной мощности $P_{\text{НОМ}}$ имеют различные значения частоты вращения $n_{\text{НОМ}}$, напряжения питания $U_{\text{НОМ}}$, тока якоря $I_{\text{я}}$, сопротивления обмотки якоря $R_{\text{я}}$, номинального момента $M_{\text{НОМ}}$ и момента инерции $J_{\text{ДВ}}$. Поэтому при выборе ЭД необходимо принимать инженерные решения, исходя из условий эксплуатации и технической целесообразности. Так, например, для обеспечения конструктивных требований необходимо выбирать быстроходные ЭД с малым значением момента инерции $J_{\text{ДВ}}$, несмотря на увеличение передаточного числа редуктора. Вместе с тем, для выполнения требований по моменту необходимо выбирать менее быстроходный ЭД (с большими габаритами и массой) с большим значением номинального момента $M_{\text{НОМ}}$.

Порядок выбора и расчета ЭД следящего ЭП

1. Расчет требуемой мощности

$$P_{\text{ТР}} = 2(J_{\text{H}} \varepsilon_{\text{H}} + M_{\text{H}} / \eta) \Omega_{\text{H}} \quad (4.1)$$

2. Выбор по справочнику ЭД и определение его технических данных:

номинальной мощности $P_{\text{НОМ}}$, кВт;

номинальной частоты вращения $n_{\text{НОМ}}$, мин⁻¹;

номинального вращающего момента $M_{\text{НОМ}}$, Н·м;

момента инерции двигателя $J_{\text{ДВ}}$, кг·м²;

номинального напряжения $U_{\text{НОМ}}$, В;

тока якоря $I_{\text{Я}}$, А;

сопротивления обмотки якоря $R_{\text{Я}}$, Ом.

3. Расчет оптимального числа редуктора

$$i_0 = \sqrt{\frac{J_{\text{H}} \varepsilon_{\text{H}} \eta + M_{\text{H}}}{J_{\text{ДВ}} \varepsilon_{\text{H}} \eta}} \quad (4.2)$$

4. Проверка выбранного ЭД на соответствие требований по угловой скорости

$$\Omega_{\text{НОМ}} > i_0 \cdot \Omega_{\text{H}} \quad (4.3)$$

где

$$\Omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{30}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

При невыполнении требований по угловой скорости (4.3) необходимо рассчитать новое передаточное число редуктора по формуле

$$i_1 = \frac{\Omega_{\text{НОМ}}}{\Omega_{\text{H}}} \quad (4.4)$$

и далее в расчётах использовать это значение.

5. Расчет требуемого вращающего момента

$$M_{\text{ТР}} = \left(J_{\text{ДВ}} + \frac{J_{\text{H}}}{i_0^2} \right) i_0 \varepsilon_{\text{p}} + \frac{M_{\text{H}}}{i_0 \eta}. \quad (4.5)$$

6. Проверка выбранного ЭД на соответствие требованиям по моменту

$$\frac{M_{\text{ТР}}}{M_{\text{НОМ}}} \leq 2 \quad \frac{M_{\text{H}}}{i_0 \eta} < M_{\text{НОМ}} \quad (4.6)$$

При невыполнении требований по моменту выбрать по таблице более мощный ЭД.

Расчет параметров динамической модели электродвигателя

1. Определение коэффициента противо-ЭДС K_E , В·с/рад

$$K_E = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{Я}} R_{\text{Я}}}{\Omega_{\text{НОМ}}} \quad (4.7)$$

2. Определение коэффициента момента K_M , Н·м/А

$$K_M = \frac{M_{\text{НОМ}}}{I_{\text{Я}}} \quad (4.8)$$

3. Определение электрохимической постоянной времени ЭД T_M , с

$$T_M = \frac{(J_{\text{ДВ}} + \frac{J_{\text{Н}}}{2}) R_{\text{Я}}}{K_E K_M} \quad (4.9)$$

4. Определение электромагнитной постоянной времени ЭД $T_{\text{Э}}$, с

$$T_{\text{Э}} = \frac{L_{\text{Я}}}{R_{\text{Я}}} \quad (4.10)$$

Исходные данные

$$\Omega_H = 50 \text{ град/с};$$

$$\varepsilon_H = 10$$

град/с²;

$$J_H = 50 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

$$M_H = 180 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

$$\eta = 0,9.$$

Решение

1. Переводим угловую скорость поворота рабочего органа в рад/с и угловое ускорение поворота рабочего органа в рад/с²

$$\Omega_H \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right] = \frac{\Omega_H \left[\frac{\text{град}}{\text{с}} \right] 2\pi}{360} = \frac{50 \cdot 2 \cdot 3,14}{360} = 0,87$$

$$\varepsilon_H \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right] = \frac{\varepsilon_H \left[\frac{\text{град}}{\text{с}^2} \right] 2\pi}{360} = \frac{10 \cdot 2 \cdot 3,14}{360} = 0,174$$

2. Рассчитываем требуемую мощность согласно (4.1)

$$P_{\text{ТР}} = 2 \left(J_H \varepsilon_H + \frac{M_H}{\eta} \right) \Omega_H = 2 \cdot \left(50 \cdot 0,174 + \frac{180}{0,9} \right) \cdot 0,87 = 366 \text{ Вт} = 0,366 \text{ кВт}$$

Выбираем ЭД, номинальная мощность на валу которого $P_{\text{НОМ}} \geq P_{\text{ТР}}$.

Таблица 4.1

| Тип двигателя | Мощность на валу $P_{\text{НОМ}}, \text{ кВт}$ | Частота вращения $n_{\text{НОМ}}, \text{ мин}^{-1}$ | Напряжение питания $U_{\text{НОМ}}, \text{ В}$ | Ток якоря $I_{\text{я}}, \text{ А}$ | Сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}, \text{ Ом}$ | Момент номинальный $M_{\text{НОМ}}, \text{ Н}\cdot\text{м}$ | Момент инерции $J_{\text{ДВ}} \cdot 10^{-4}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ |
|---------------|--|---|--|-------------------------------------|--|---|---|
| МИ-22 | 0,37 | 3000 | 60 | 8,2 | 0,192 | 1,2 | 40,8 |

3. Рассчитываем оптимальное передаточное число редуктора, согласно (4.2)

$$i_0 = \sqrt{\frac{J_H \varepsilon_H \eta + M_H}{J_{ДВ} \varepsilon_H \eta}} = \sqrt{\frac{50 \cdot 0,174 \cdot 0,9 + 180}{40,8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,174 \cdot 0,9}} = 540.$$

4. Проверяем выбранный ЭД на соответствие требованиям по скорости (4.3).
определяем номинальную угловую скорость

$$\Omega_{НОМ} = \frac{\pi n_{НОМ}}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314 \text{ рад/с}$$

и приведенную к валу ЭД угловую скорость поворота рабочего органа

$$i_0 \Omega_H = 540 \cdot 0,87 = 473,68 \text{ рад/с}$$

Так как, $314 < 473,68$, то требования по скорости (4.3) не выполняются.

Рассчитываем новое передаточное число редуктора по формуле

$$i_1 = \frac{\Omega_{НОМ}}{\Omega_H} = \frac{314}{0,87} = 358.$$

5. Рассчитываем значение требуемого вращающего момента в соответствии с выражением (4.5).

$$M_{ТР} = (J_{ДВ} + \frac{J_H}{i_1^2}) i_1 \varepsilon_H + \frac{M_H}{i_1 \eta} = (40,8 \cdot 10^{-4} + \frac{50}{358^2}) \cdot 358 \cdot 0,174 + \frac{180}{358 \cdot 0,9} = 0,84 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

6. Проверяем выбранный ЭД на соответствие требованиям по моменту, согласно (4.6)

$$\frac{M_{\text{ТР}}}{M_{\text{НОМ}}} = \frac{0,84}{1,2} = 0,7 \leq 2, \quad \frac{M_{\text{Н}}}{i_1 \eta} = \frac{180}{358 \cdot 0,9} = 0,56 < M_{\text{НОМ}} = 1,2.$$

Расчеты показали, что требования по моменту выполняются.

7. Рассчитываем параметры динамической модели ЭД в соответствии с выражениями (4.7), (4.8), (4.9), (4.10).

$$K_E = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{\Omega_{\text{НОМ}}} = \frac{60 - 8,2 \cdot 0,192}{314} = 0,186 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$$

$$K_M = \frac{M_{\text{НОМ}}}{I_{\text{я}}} = \frac{1,2}{8,2} = 0,146 \text{ Н} \cdot \text{м/А}.$$

$$T_M = \frac{(J_{\text{ДВ}} + \frac{J_{\text{Н}}}{i_1^2}) R_{\text{я}}}{K_E K_M} = \frac{(40,8 \cdot 10^{-4} + \frac{50}{358^2}) \cdot 0,192}{0,186 \cdot 0,146} = 0,0316 \text{ с}$$

$$L_{\text{я}} < \frac{T_M R_{\text{я}}}{4} \quad \frac{T_M R_{\text{я}}}{4} = \frac{0,0316 \cdot 0,192}{4} = 0,0015 \text{ Г},$$

Принимаем $L_{\text{я}} = 0,0006 \text{ Г}.$

Тогда

$$T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \frac{0,0006}{0,192} = 0,003 \text{ с}.$$

$$U_{\text{НОМ}} = 60 \text{ В.} \quad I_{\text{я}} = 8,2 \text{ А.} \quad \eta = 0,9. \quad R_{\text{я}} = 0,192 \text{ Ом.}$$

$$n_{\text{НОМ}} = 3000 \text{ мин}^{-1}. \quad M_{\text{НОМ}} = 1,2 \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad M_{\text{с}} = 180 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

$$J_{\text{ДВ}} = 40,8 \cdot 10^{-4} \text{ кг}\cdot\text{м}^2 \quad J_{\text{н}} = 50 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 \quad \Omega_{\text{н}} = 50 \text{ град/с.}$$

$$\Omega_{\text{н}} \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right] = \frac{\Omega_{\text{н}} \left[\frac{\text{град}}{\text{с}} \right] 2\pi}{360} = \frac{50 \cdot 2 \cdot 3,14}{360} = 0,87.$$

$$\Omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi n_{\text{НОМ}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314 \text{ рад/с} = \frac{\Omega_{\text{НОМ}}}{\Omega_{\text{р}}} = \frac{314}{0,87} = 358.$$

$$K_{\text{E}} = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{\Omega_{\text{НОМ}}} = \frac{60 - 8,2 \cdot 0,192}{314} = 0,186 \text{ В}\cdot\text{с/рад}$$

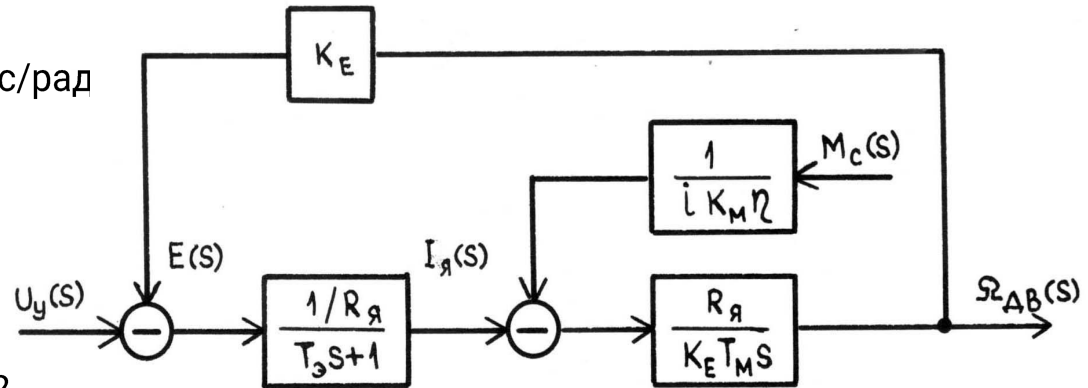
$$K_{\text{M}} = \frac{M_{\text{НОМ}}}{I_{\text{я}}} = \frac{1,2}{8,2} = 0,146 \text{ Н}\cdot\text{м/А.}$$

$$T_{\text{M}} = \frac{(J_{\text{ДВ}} + \frac{J_{\text{н}}}{2}) R_{\text{я}}}{K_{\text{E}} K_{\text{M}}} = \frac{(40,8 \cdot 10^{-4} + \frac{50}{358^2}) \cdot 0,192}{0,186 \cdot 0,146} = 0,0316 \text{ с}$$

$$L_{\text{я}} < \frac{T_{\text{M}} R_{\text{я}}}{4} \quad \frac{T_{\text{M}} R_{\text{я}}}{4} = \frac{0,0316 \cdot 0,192}{4} = 0,0015 \text{ Г,}$$

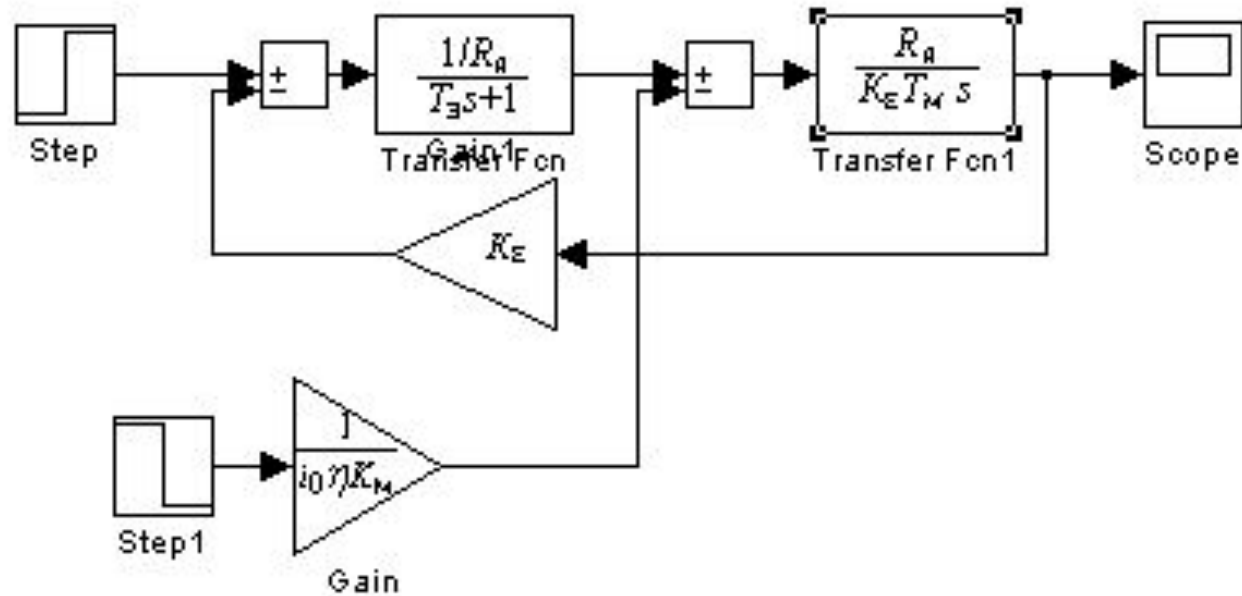
Принимаем $L_{\text{я}} = 0,0006 \text{ Г.}$

$$T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \frac{0,0006}{0,192} = 0,003 \text{ с.}$$



Моделирование электродвигателя

Структурная схема динамической модели электродвигателя

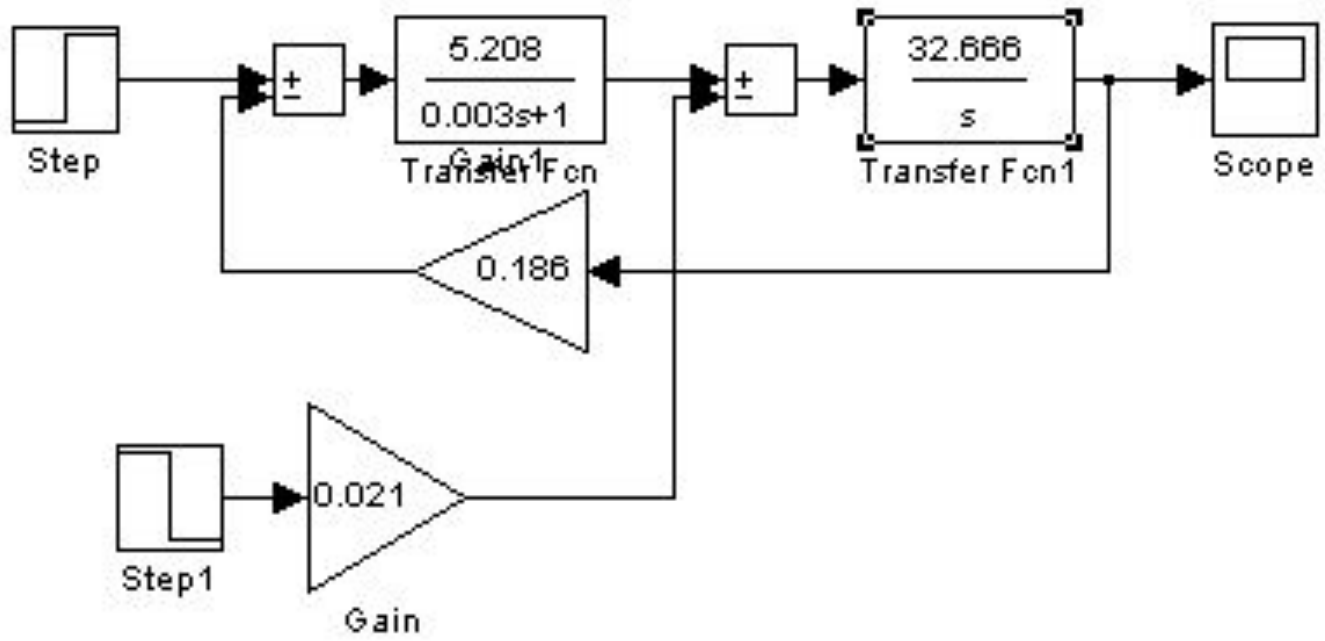


$$\frac{1}{R_{\text{я}}} = \frac{1}{0,192} = 5,208 \text{ Ом}^{-1};$$

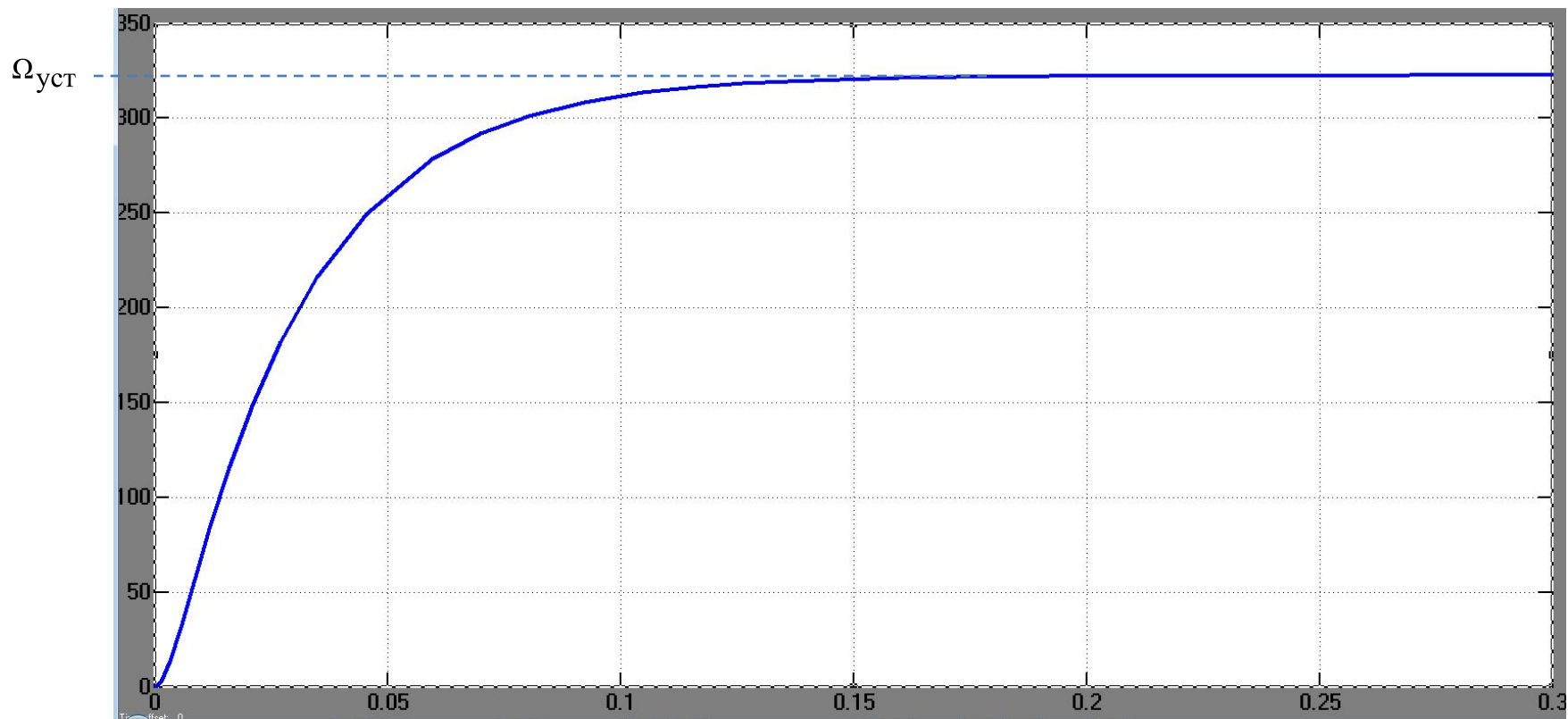
$$\frac{1}{i_0 \eta K_M} = \frac{1}{358 \cdot 0,9 \cdot 0,146} = 0,021 \text{ А/Н} \cdot \text{м};$$

$$\frac{R_{\text{я}}}{K_{\text{Э}} T_M} = \frac{0,192}{0,186 \cdot 0,0316} = 32,666 \text{ рад/А} \cdot \text{с}^2.$$

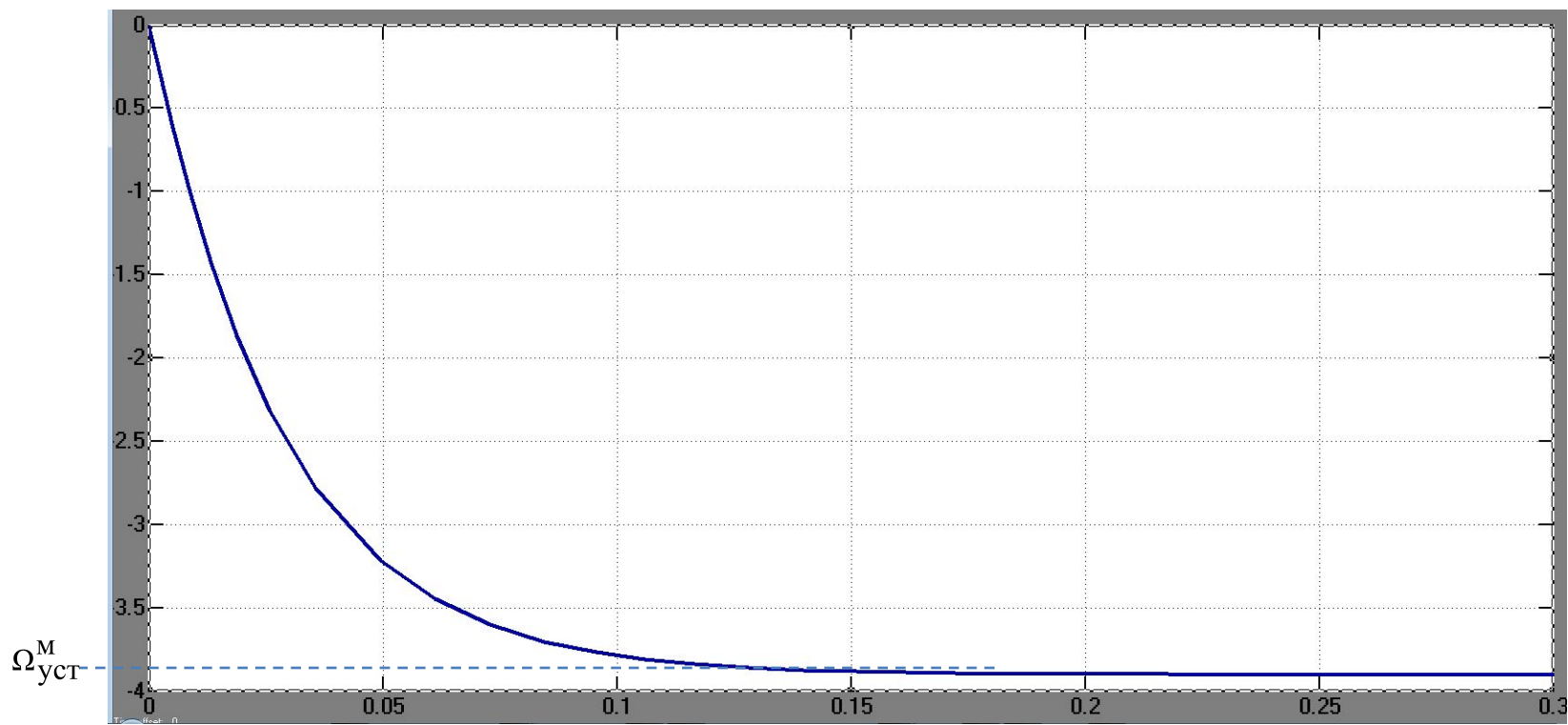
Структурная схема динамической модели электродвигателя с числовыми значениями



Переходная характеристика двигателя по управляющему воздействию



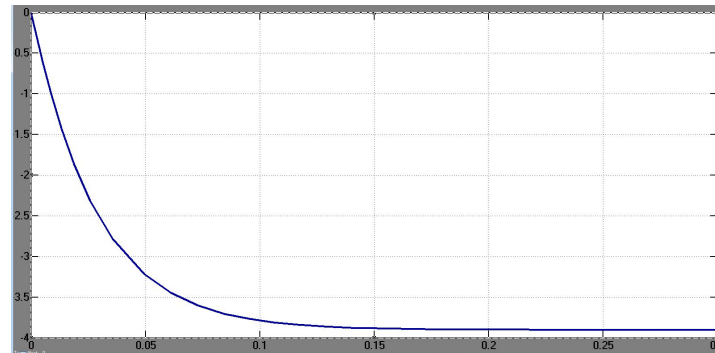
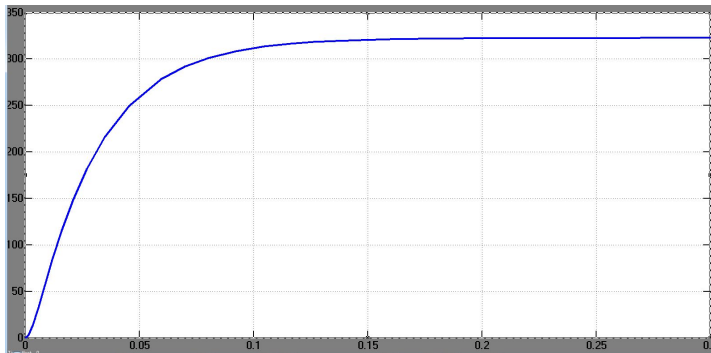
Переходная характеристика двигателя по моменту сопротивления



Апериодический характер графиков подтверждает правильность расчёта постоянных времени T_M и T_Ω .

Установившиеся значения скорости вращения ЭД при наличии управляющего воздействия и момента сопротивления составляют, соответственно,

$$\Omega_{уст} = 322,56 \text{ рад/с} \quad \text{и} \quad \Omega_{уст}^M = 3,942 \text{ рад/с}$$



Паспортное номинальное значение угловой скорости вращения ЭД МИ-22 составляет $\Omega_{уст} = 314$ рад/с и незначительно отличается от результатов моделирования ($\Omega_{уст} = 322,56$ рад/с). Это позволяет сделать вывод о правильности проведённых расчётов.

Определим относительную погрешность по формуле

$$\Delta = \frac{\Omega_{уст}^M}{\Omega_{уст}} \cdot 100\% = 1,222\%$$

Полученное значение характеризует наклон механической характеристики ЭД за счёт наличия моментной составляющей погрешности $\Omega_{уст}^M = 3,942$ рад/с.

Исходные данные

| № п/п | J_H , кг · м ² | M_H , Н · м | Ω_H , град/с | E_H град/с | η |
|-------|-----------------------------|---------------|---------------------|--------------|--------|
| 1 | 142 | 250 | 10 | 6 | 0,80 |
| 2 | 345 | 155 | 18 | 3 | 0,85 |
| 3 | 48 | 60 | 70 | 25 | 0,90 |
| 4 | 251 | 65 | 60 | 24 | 0,90 |
| 5 | 254 | 90 | 97 | 25 | 0,90 |
| 6 | 57 | 75 | 100 | 37 | 0,92 |
| 7 | 160 | 80 | 62 | 25 | 0,82 |
| 8 | 263 | 85 | 84 | 30 | 0,88 |
| 9 | 366 | 80 | 16 | 14 | 0,90 |
| 10 | 269 | 95 | 48 | 11 | 0,85 |
| 11 | 172 | 100 | 80 | 42 | 0,90 |
| 12 | 375 | 105 | 23 | 5 | 0,92 |
| 13 | 78 | 10 | 100 | 80 | 0,88 |
| 14 | 81 | 15 | 72 | 20 | 0,85 |
| 15 | 184 | 120 | 33 | 15 | 0,90 |
| 16 | 187 | 125 | 86 | 15 | 0,92 |
| 17 | 100 | 130 | 38 | 9 | 0,80 |
| 18 | 205 | 135 | 41 | 8 | 0,85 |
| 19 | 110 | 140 | 52 | 11 | 0,82 |
| 20 | 115 | 145 | 54 | 18 | 0,90 |
| 21 | 120 | 150 | 56 | 16 | 0,80 |
| 22 | 126 | 160 | 60 | 12 | 0,87 |
| 23 | 132 | 170 | 58 | 17 | 0,80 |
| 24 | 138 | 180 | 53 | 6 | 0,85 |
| 25 | 144 | 190 | 50 | 23 | 0,90 |
| 26 | 151 | 200 | 47 | 22 | 0,95 |
| 27 | 155 | 190 | 44 | 21 | 0,90 |
| 28 | 159 | 185 | 40 | 20 | 0,92 |
| 29 | 163 | 180 | 42 | 8 | 0,82 |
| 30 | 160 | 170 | 38 | 10 | 0,88 |