

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 $P_{НОМ}$ имеют различные значения частоты вращения $n_{НОМ}$, напряжения питания $U_{НОМ}$, тока якоря $I_{я}$, сопротивления обмотки якоря $R_{я}$, номинального момента $M_{НОМ}$ и момента инерции $J_{ДВ}$. 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 $J_{ДВ}$, 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 $M_{НОМ}$.

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

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

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

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

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

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

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

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

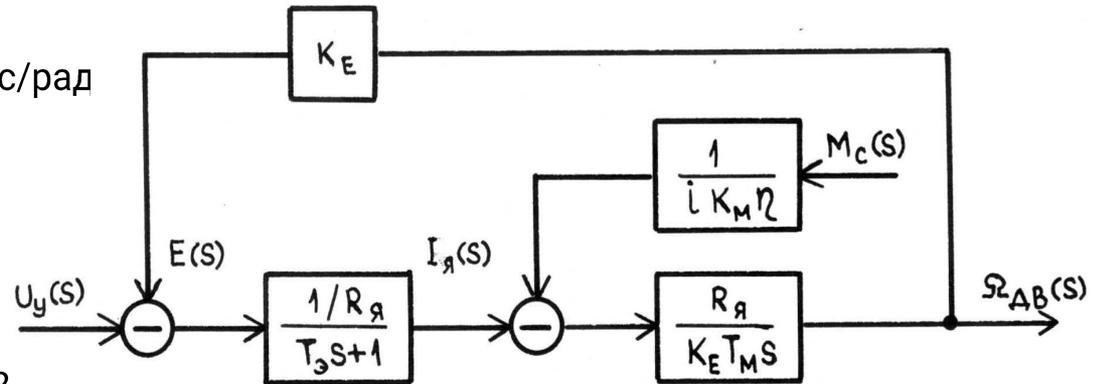
$$K_{\text{M}} = \frac{M_{\text{НОМ}}}{I_{\text{я}}} = \frac{1,2}{8,2} = 0,146 \text{ Н}\cdot\text{м/А.}$$

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

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

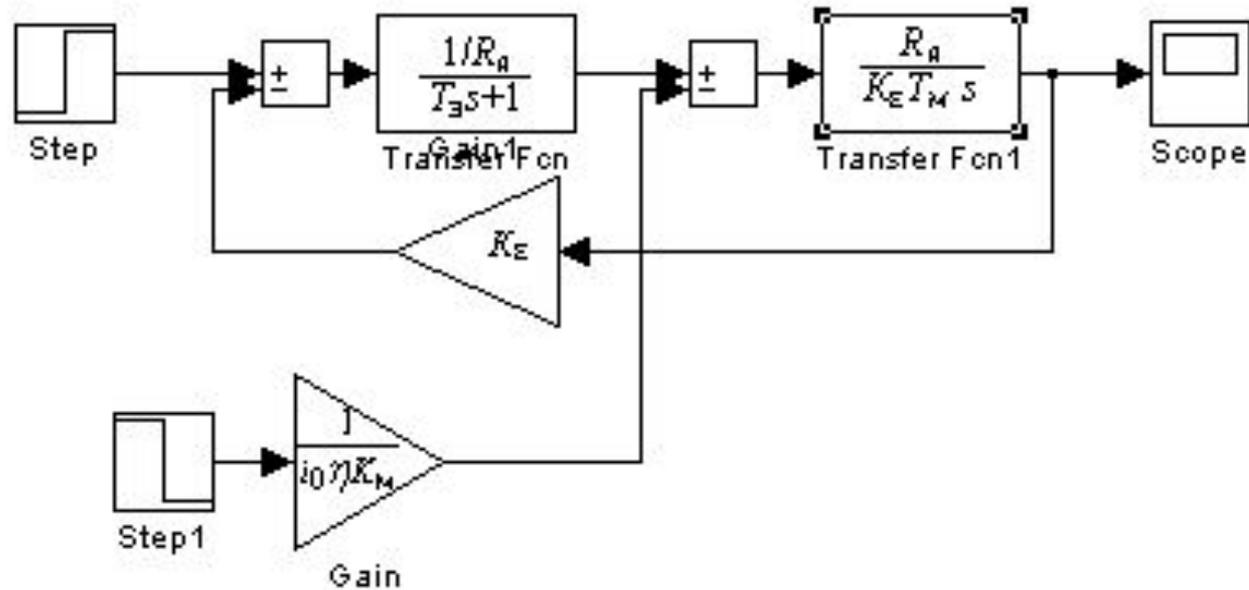
Принимаем $L_{\text{я}} = 0,0006 \text{ Г.}$

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



Моделирование электродвигателя

Структурная схема динамической модели электродвигателя

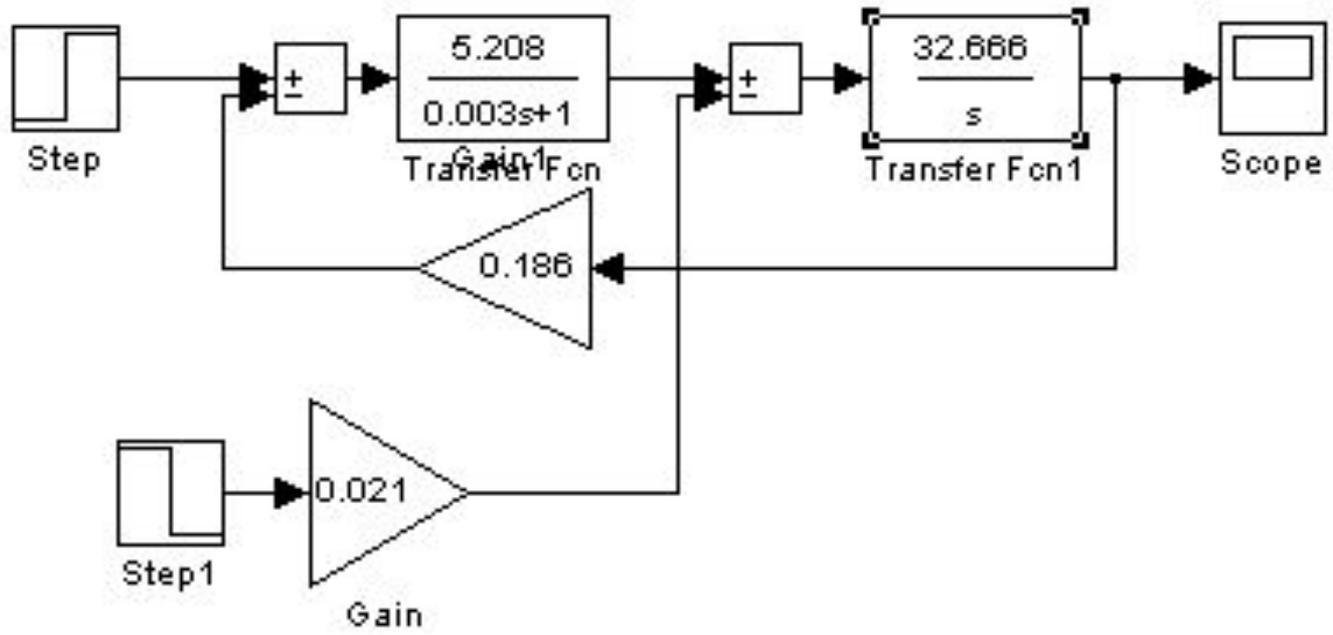


$$\frac{1}{R_{\text{я}}} = \frac{1}{0,192} = 5,208 \text{ Ом}^{-1};$$

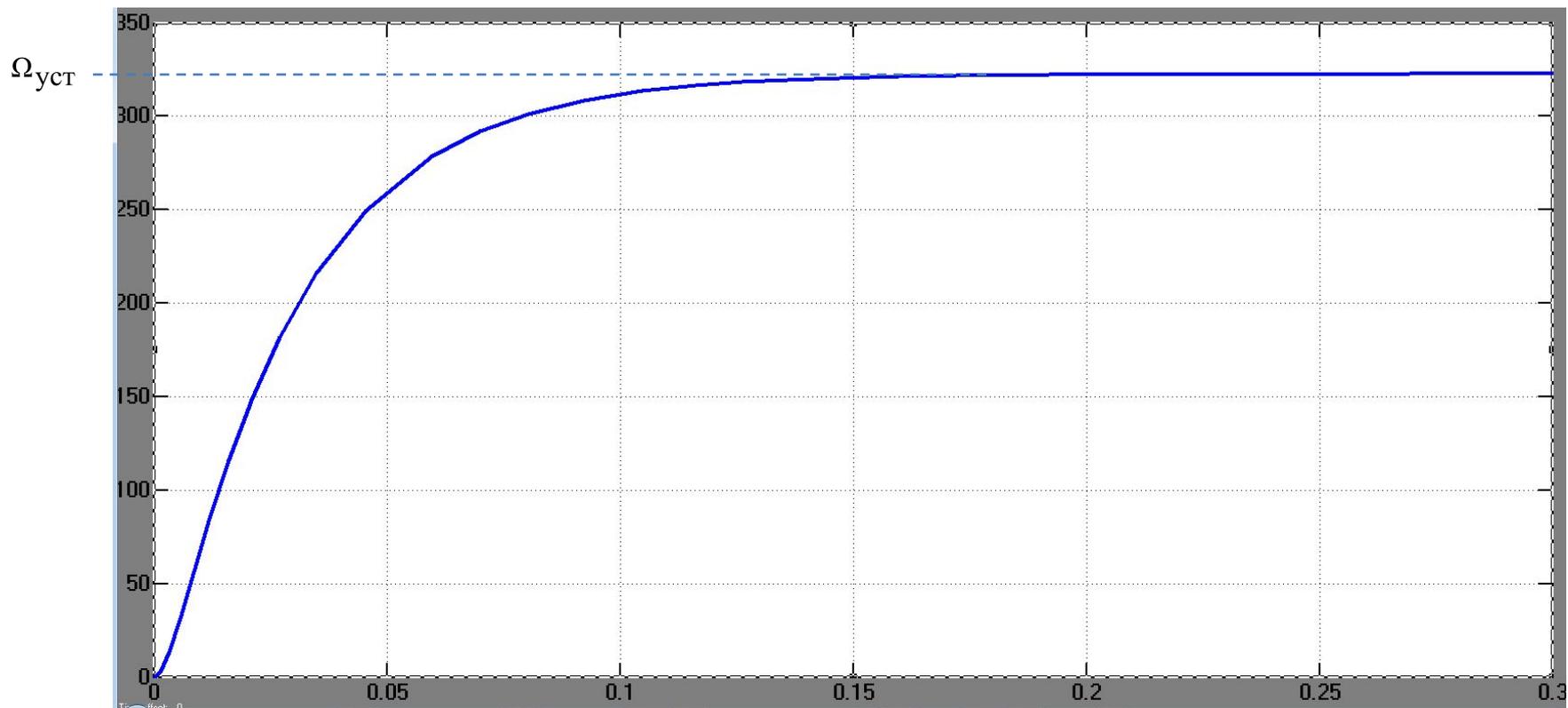
$$\frac{1}{i_0 \eta K_M} = \frac{1}{358 \cdot 0,9 \cdot 0,146} = 0,021 \text{ А/Н} \cdot \text{м};$$

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

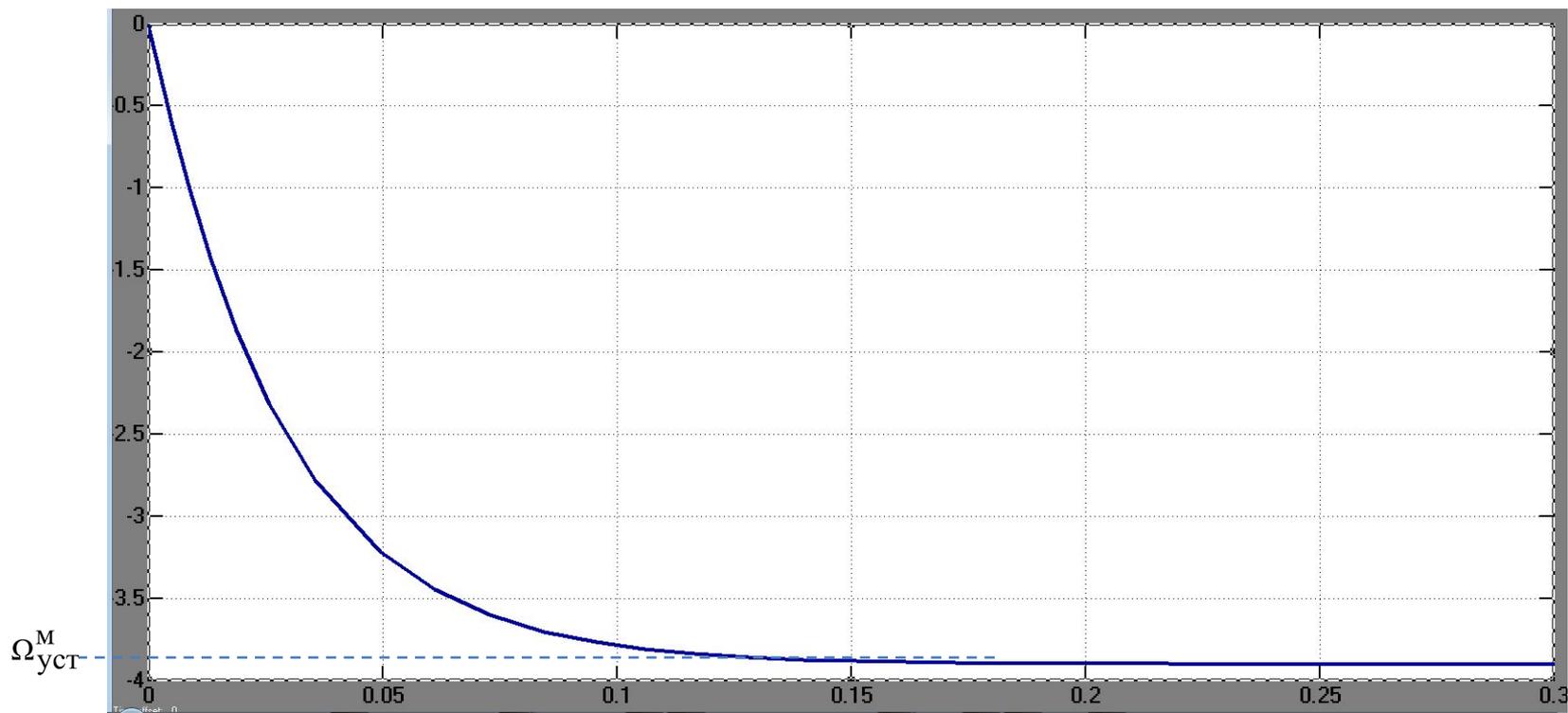
Структурная схема динамической модели электродвигателя с числовыми значениями



Переходная характеристика двигателя по управляющему воздействию



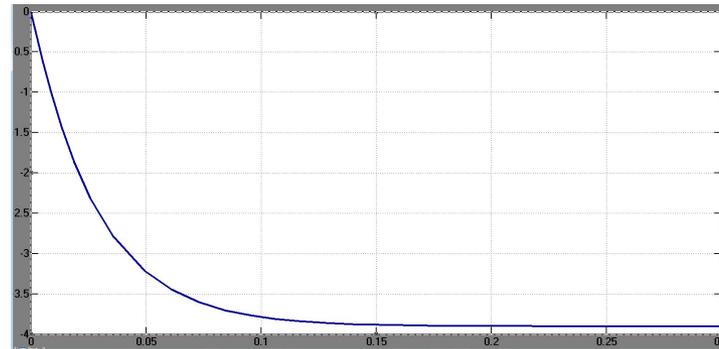
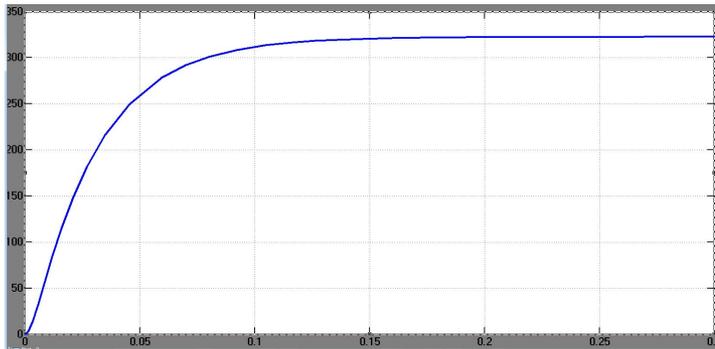
Переходная характеристика двигателя по моменту сопротивления



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