

Национальный исследовательский университет ИТМО  
Факультет систем управления и робототехники

**Отчёт по дисциплине**  
**Электрический привод и подавление личности**  
**Лабораторная №6**  
**«Исследование электропривода на базе СДПМ»**

**Выполнили студенты:**

Демкин Алексей Игоревич

Ле Ван Хынг

Мовчан Игорь Евгеньевич

Будков Ярослав Антонович

**Преподаватель:**

Маматов Александр Геннадьевич

Санкт-Петербург  
2025 г.

# Содержание

<b>1. Силовой расчет манипулятора</b>	<b>2</b>
<b>2. Исследование статических характеристик СДПМ</b>	<b>4</b>
<b>3. Исследование динамических характеристик СДПМ</b>	<b>6</b>
<b>4. Синтез замкнутой системы управления СДПМ</b>	<b>11</b>
Моделирование R-манипулятора . . . . .	12
Моделирование RR-манипулятора . . . . .	14

В данной лабораторной работе будут рассмотрены механические характеристики и способы управления синхронного двигателя с постоянными магнитами в составе манипулятора элементарной кинематики.

Возьмем исходные данные для нашего варианта:

- Массы звеньев:  $m_1 = 2$ ,  $m_2 = 0.45$  кг;
- Длины звеньев:  $l_1 = 0.4$ ,  $l_2 = 0.6$  м;
- Начальные положения звеньев:  $q_{s1} = \frac{\pi}{4}$ ,  $q_{s2} = \frac{\pi}{3}$  рад;
- Конечные положения звеньев:  $q_{e1} = -1.5\pi$ ,  $q_{e2} = 1.8\pi$  рад;
- Время отработки траектории:  $t = 1$  с;
- КПД редуктора:  $\eta = 0.9$ ;

## 1. Силовой расчет манипулятора

На рисунке 1 изображена упрощенная кинематическая схема 2R манипулятора, которая состоит из двух вращательных звеньев.

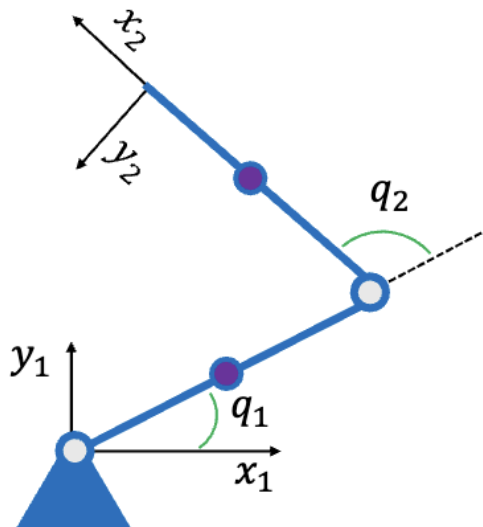


Рис. 1: Упрощенная кинематическая схема 2R манипулятора

Для выполнения силового расчета обратимся к решению обратной задачи динамики, то есть найдем воздействие по заданному набору обобщенных координат скоростей и ускорений:  $(q, \dot{q}, \ddot{q})$ .

Рассчитаем мощность по формуле:

$$P_m = \frac{m}{a} x(|T_i \dot{q}_i|)$$

Получим следующее:

$$P_1 = 79.164 \quad P_2 = 36.5373$$

Выберем подходящие двигатели из каталога и представим их характеристики (рис 2 и 3).

Электродвигатель	Номинальная мощность, Вт	Номинальный момент, Нм	Пиковый момент, Нм	Номинальная скорость, об/мин	Номинальный ток, А <sub>ампл</sub>	Напряжение питания, В <sub>ампл</sub>	Постоянная момента, Нм/А <sub>ампл</sub>	Постоянная ЭДС, В <sub>ампл</sub> /(Коб/мин)	Постоянная электродвигателя, Нм/√Вт	Сопротивление (фаза-фаза), Ом	Индуктивность (фаза-фаза), мГн	Номинальный КПД, %
JCM38x36S	84	0.4	1.2	2000	2.6	48	0.154	19	0.1	3.2	2	84.1
JCM38x18S	42	0.2	0.6	2000	2.6	24	0.077	9.5	0.066	1.8	1.05	81.7

Рис. 2: Характеристики двигателей 1

Электродвигатель		Число пар полюсов	Момент инерции ротора, кг·см <sup>2</sup>	Масса (статор + ротор(ы)), г	Внешний диаметр статора D, мм	Внутренний диаметр ротора d, мм	Диаметр лобовых частей G, мм	Длина ротора l, мм	Длина штырьковых лепестков h, мм	Длина статора L (max), мм
JCM38×36	-H0	7	0.053	200 (150 + 50)	38	18	36,2	39	5	47
	-H1		0.064 (0.053 + 0.011)	210 (150 + 50 + 10)				47 (39 + 8)		
JCM38×18	-H0	7	0.033 (0.022 + 0.011)	112 (82 + 20 + 10)				24 (16 + 8)		
	-H1		0.044 (0.022 + 0.022)	122 (82 + 20 + 20)						

Рис. 3: Характеристики двигателей 2

Рассчитаем передаточное число для каждого выбранного двигателя:

$$j_i = \frac{\omega_i^{nom}}{\max(|\dot{q}_i|)} \Rightarrow$$

$$j_1 = \frac{2000}{10.3} \approx 194 \quad j_2 = \frac{2000}{8.64} \approx 231.5$$

Теперь смоделируем движение, чтобы убедиться в корректности расчетов:

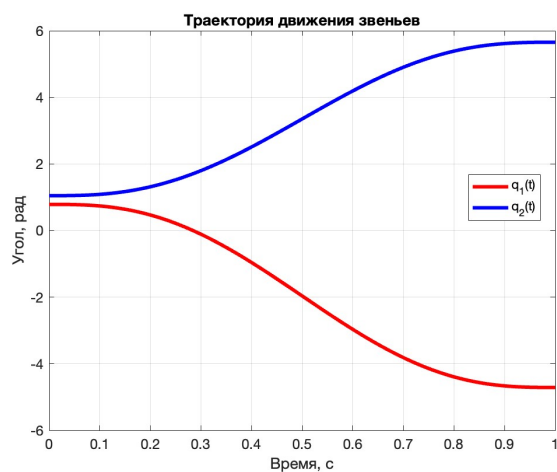


Рис. 4: График траекторий движения

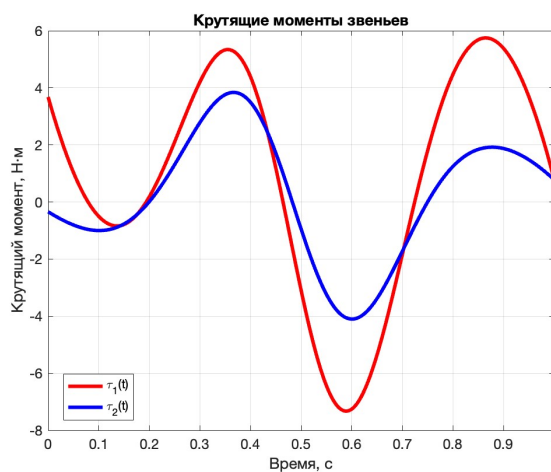


Рис. 5: График моментов

## 2. Исследование статических характеристик СДПМ

Рассмотрим схему замещения явнополюсного синхронного двигателя с постоянными магнитами:

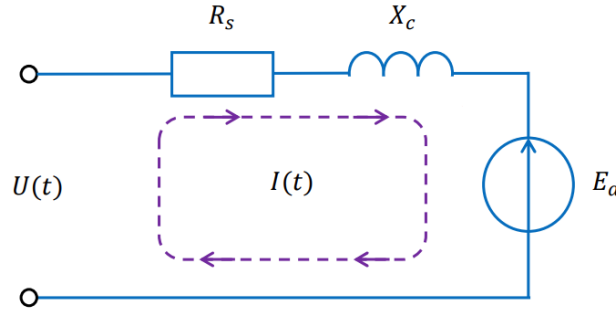


Рис. 6: Схема замещения

Рассмотрим два выражения, первое из которых – выражения для полного тока обмотки статора  $I$ :

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = \\ &= \frac{U}{z_{dq}^2} \sqrt{-2\epsilon (r^2 + x_q^2) \cos \vartheta - (r^2 + x_q^2) + \epsilon^2 (r^2 + x_q^2)} \end{aligned}$$

В качестве второго выражения определим активную мощность  $P$ , потребляемую  $m$ -фазным двигателем:

$$\begin{aligned} P &= mUI \cos \phi = mUI_1 \cos \vartheta - mUI_q \sin \vartheta \Rightarrow \\ &= \frac{mU^2}{z_{dq}^2} \left[ \epsilon (x_q \sin \vartheta - r \cos \vartheta) + \frac{1}{2} (x_d - x_q) \sin 2\vartheta + r \right] \end{aligned}$$

Таким образом получим выражение для электромагнитного момента  $M$ :

$$M = \frac{mz_p U^2 \epsilon}{\omega_1 z_{dq}^4} \left[ (x_d x_q^2 - r^2 x_q + 2r^2 x_d) \sin \vartheta + r (2x_q^2 + r^2 - x_d x_q) \cos \vartheta - \epsilon r (r^2 + x_q^2) \right],$$

где  $z_p$  - количество пар полюсов;  $U$  - действующее напряжение питания;  $\epsilon = E_0/U$  - степень возбужденности ротора;  $E_0$  - ЭДС ротора;  $\omega_1$  - синхронная частота вращения;  $x_d = x_q = x_c$  - полное реактивное сопротивление статора;  $r = R_s$  - активное сопротивление статора;  $z_{dq} = \sqrt{r^2 + x_d x_q}$  - конструктивная величина при условии  $x_d = x_q$ ;  $\vartheta$  - угол нагрузки.

Для построения графиков, возьмем данные соответствующих двигателей из каталога:

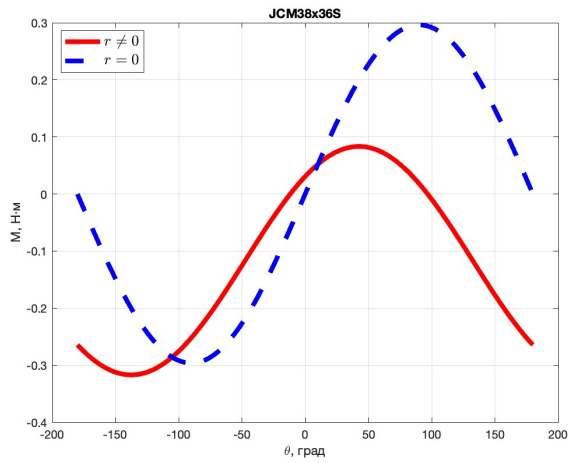


Рис. 7:  $M(\vartheta)$  первого двигателя

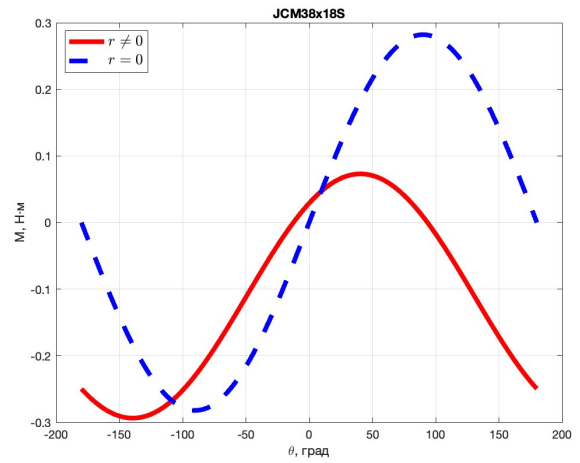


Рис. 8:  $M(\vartheta)$  второго двигателя

Видим, что при учете сопротивления обмотки (т.е.  $r \neq 0$ ) момент снижается и теряет симметрию. Если увеличивать  $r$ , то это изменения станут сильнее. При отсутствии сопротивления обмотки (т.е.  $r = 0$ ) характеристика близка к косинусу.

### 3. Исследование динамических характеристик СДПМ

Для реализации динамической модели СДПМ воспользуемся компонентами библиотек Simscape:

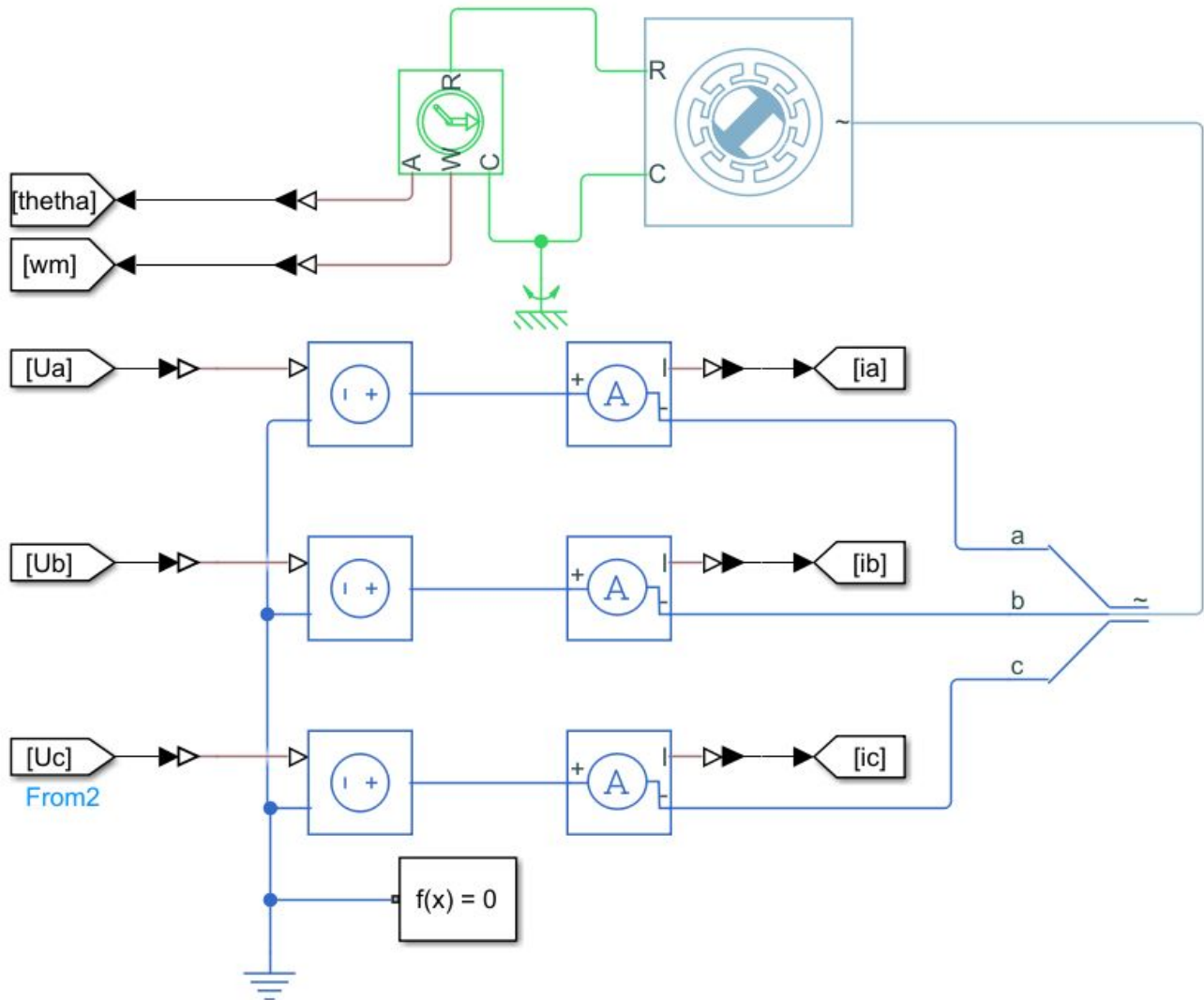


Рис. 9: Модель СДПМ в среде Simscape

Для описания математической модели СДПМ используется переход от трехфазной к двухфазной системам напряжений. Подобный переход называется преобразование Парка:

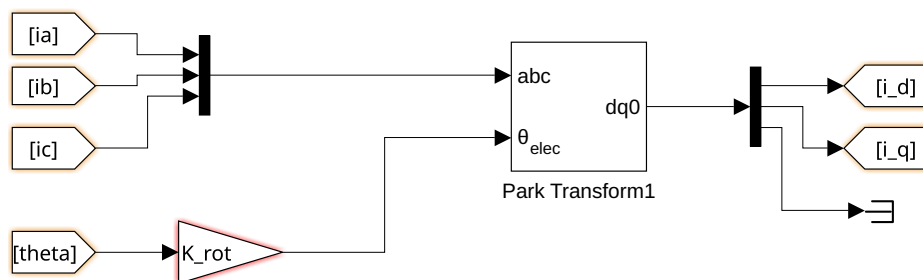


Рис. 10: Реализация преобразования  $abc \rightarrow dq$  в среде Simspace

Но также необходимо обратное преобразование, поэтому тоже реализуем его:

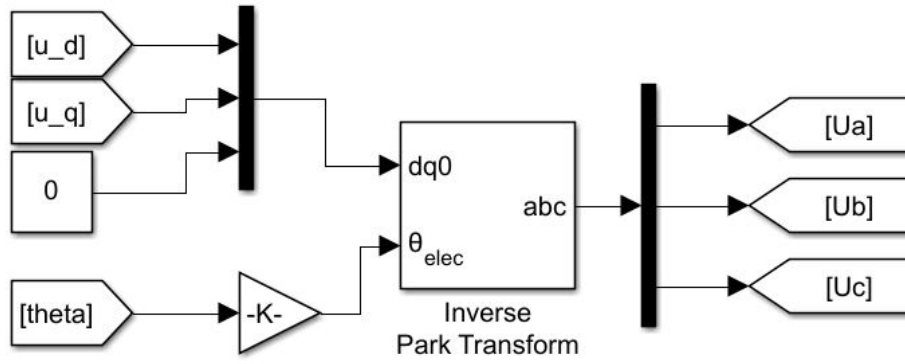
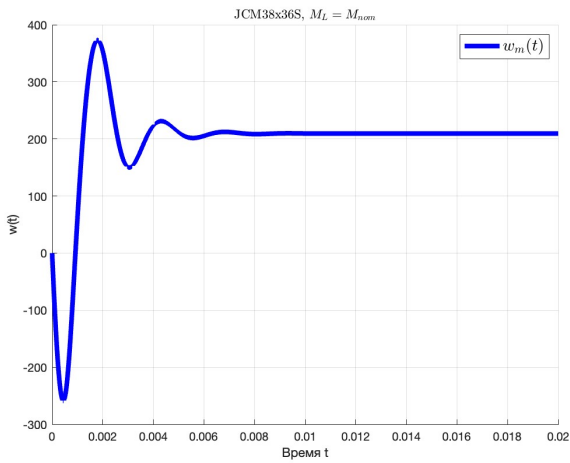
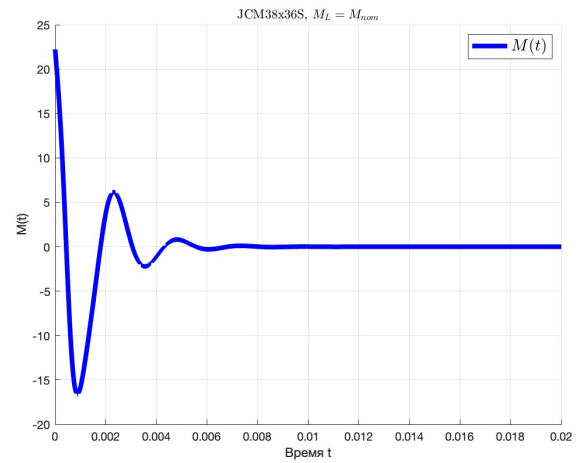


Рис. 11: Реализация преобразования  $dq \rightarrow abc$  в среде Simspace

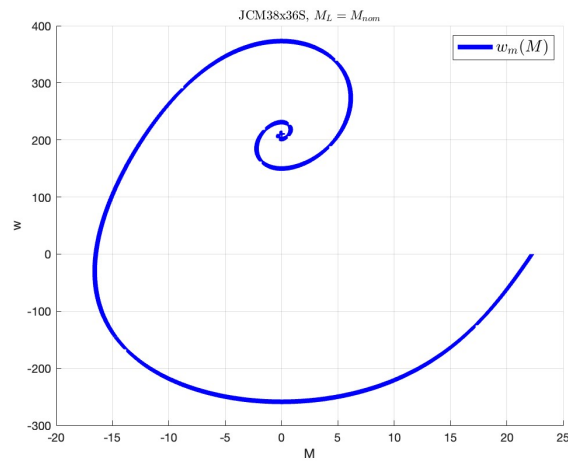
Проведём имитационное моделирование при прямом пуске системы:



(a)  $\omega_m(t)$



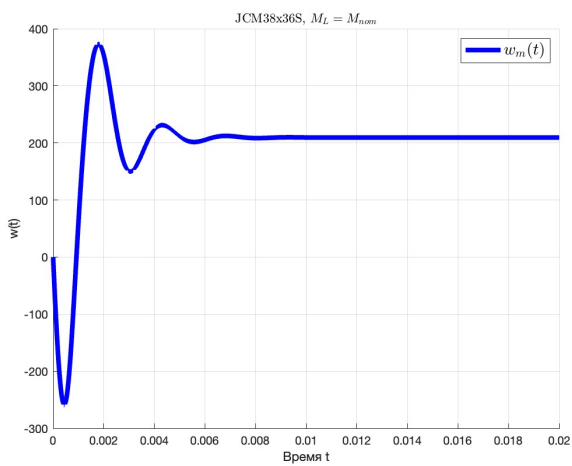
(b)  $M(t)$



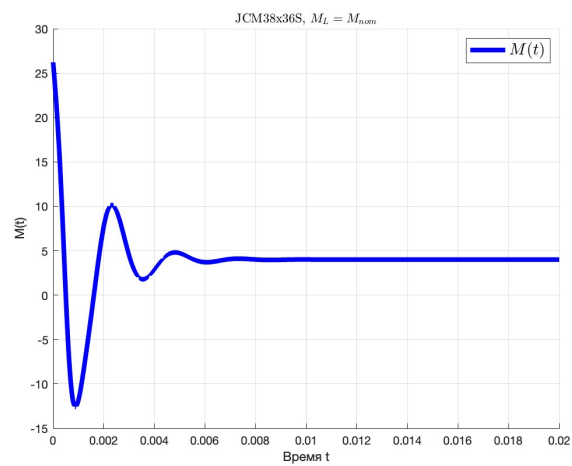
(c)  $\omega_m(M)$

Рис. 12: Динамические характеристики двигателя JCM38x36s без нагрузки

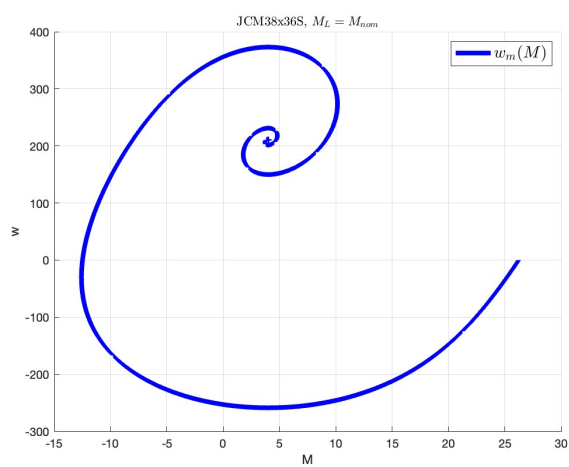




(a)  $\omega_m(t)$

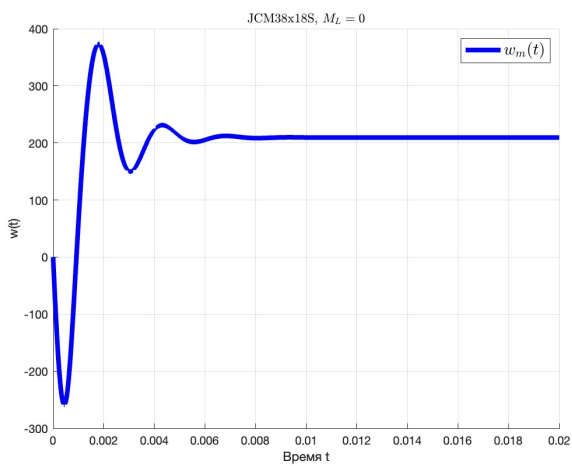


(b)  $M(t)$

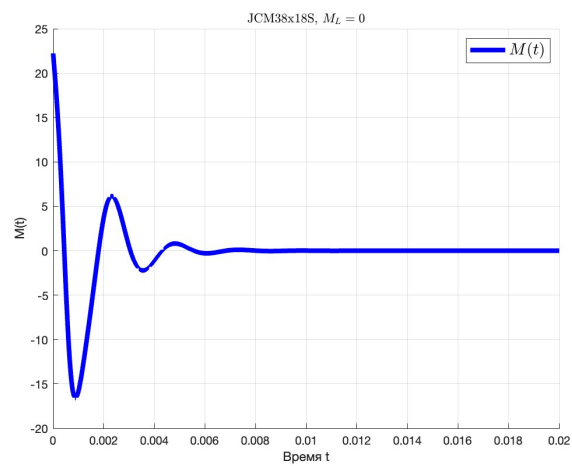


(c)  $\omega_m(M)$

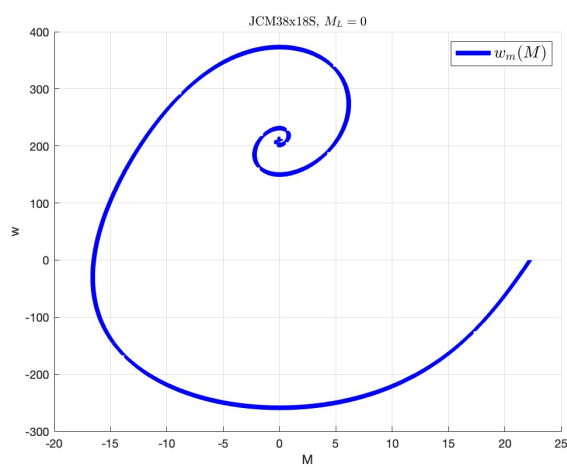
Рис. 13: Динамические характеристики двигателя JCM38x36s с номинальной нагрузкой



(a)  $\omega_m(t)$

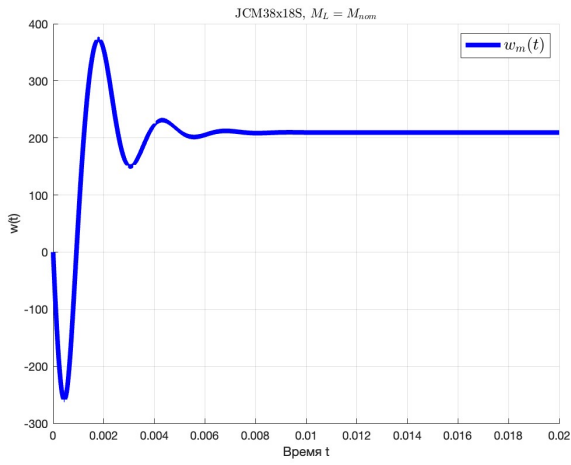


(b)  $M(t)$

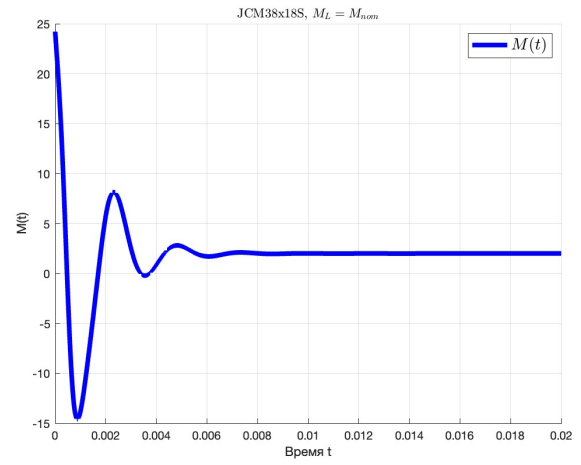


(c)  $\omega_m(M)$

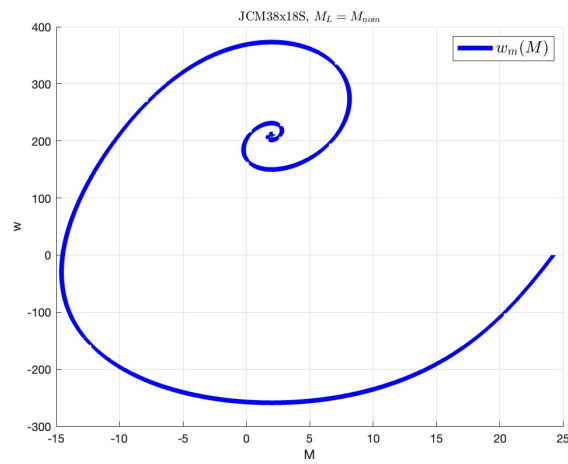
Рис. 14: Динамические характеристики двигателя JCM38x18s без нагрузки



(a)  $\omega_m(t)$



(b)  $M(t)$



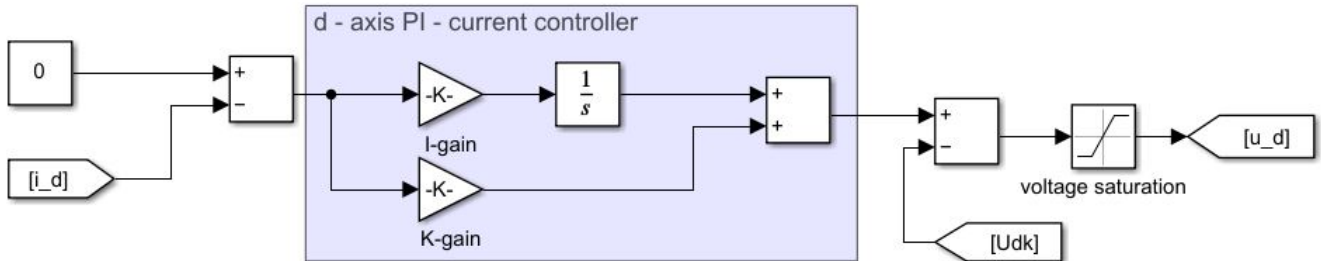
(c)  $\omega_m(M)$

Рис. 15: Динамические характеристики двигателя JCM38x18s с номинальной нагрузкой

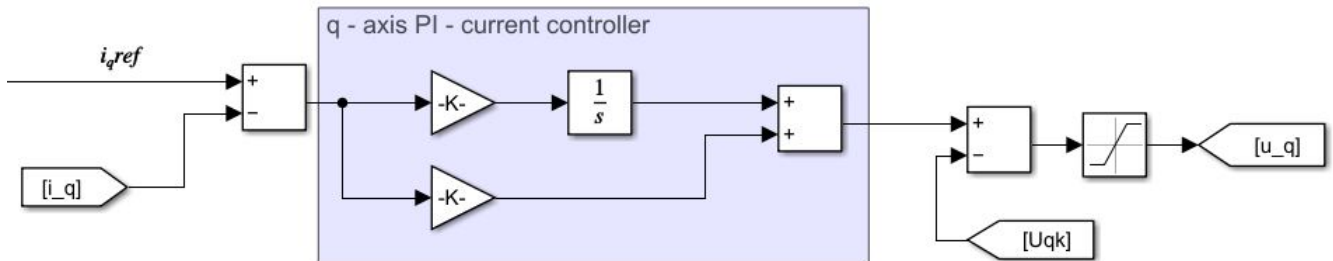
Как при запусках с нагрузкой, так и без, устанавливается номинальная частота вращения. Без нагрузки установившийся момент становится нулевым, а с нагрузкой момент ненулевой. При этом в переходном процессе видим колебания (как скорости, так и момента). Это связано с тем, что для запуска синхронного двигателя необходим асинхронный пуск, то есть разгон ротора с помощью внешнего момента.

## 4. Синтез замкнутой системы управления СДПМ

Синтезируем закон управления для веткторов тока и скорости в системе dq. Необходимо поддерживать ток поперечной оси  $i_d = 0$ , так как он носит только размагничивающий характер, а  $i_q = i_q^{ref}$ . Для управления обоими токами используется ПИ-регулятор, коэффициенты для которого были получены методом настройки на линейный оптимум:



(a) ПИ-регулятор тока по  $d$  оси



(b) ПИ-регулятор тока по  $q$  оси

Рис. 16: Регуляторы тока

Однако между напряжениями  $U_d, U_q$  имеется зависимость через токи  $i_d, i_q$ . Необходимо учесть это явление, добавив блок компенсации перекрестных связей:

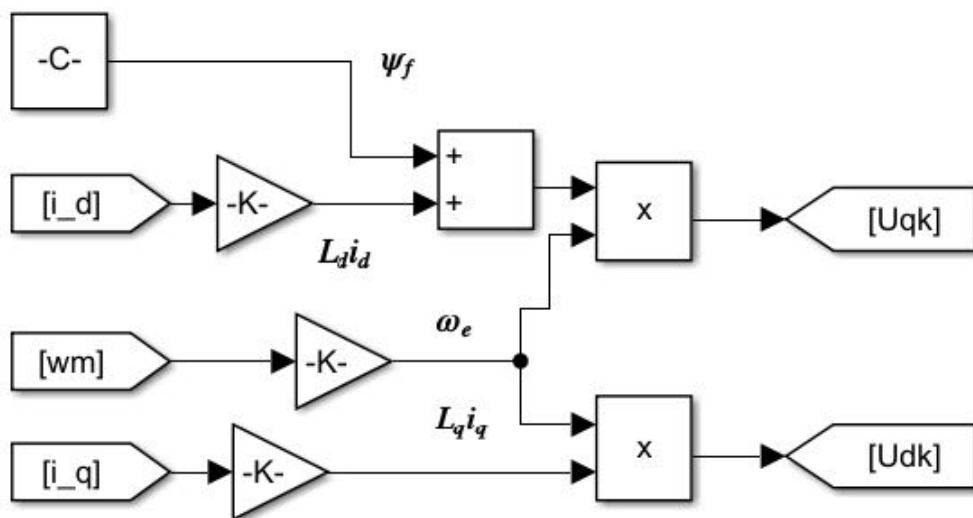


Рис. 17: Блок компенсации перекрестных связей

В качестве следующего контура для регулирования выступает контур скорости. Коэффициенты ИП-регулятора рассчитываются аналогично контуру скорости ДПТ с учетом приведенных моментов инерции нагрузки  $\hat{J}$  с поправкой на технический оптимум:

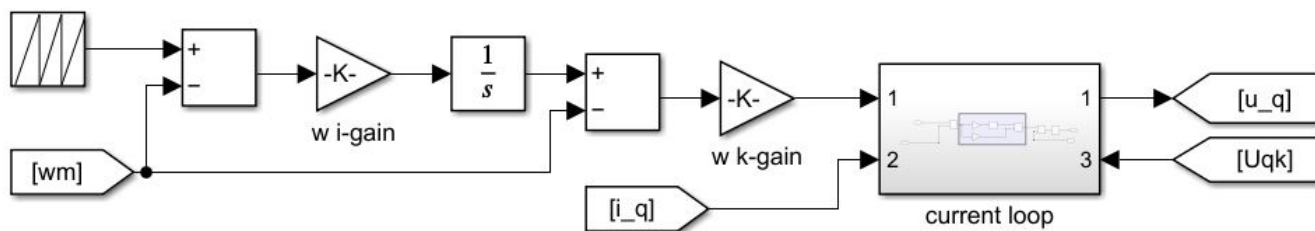


Рис. 18: ИП-регулятор контура скорости

## Моделирование R-манипулятора

Пойдем по заданию, так что начнем с сравнения желаемого угла звена с фактическим:

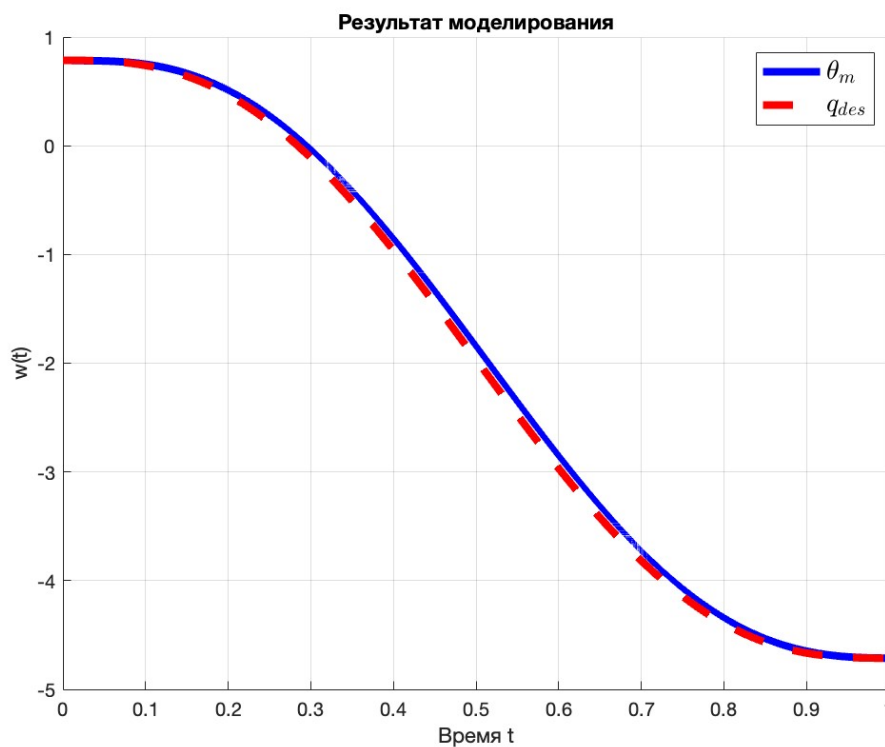


Рис. 19: Сравнение желаемого и фактического угла поворота ротора

Теперь аналогичные графики, но про скорость и момент звена:

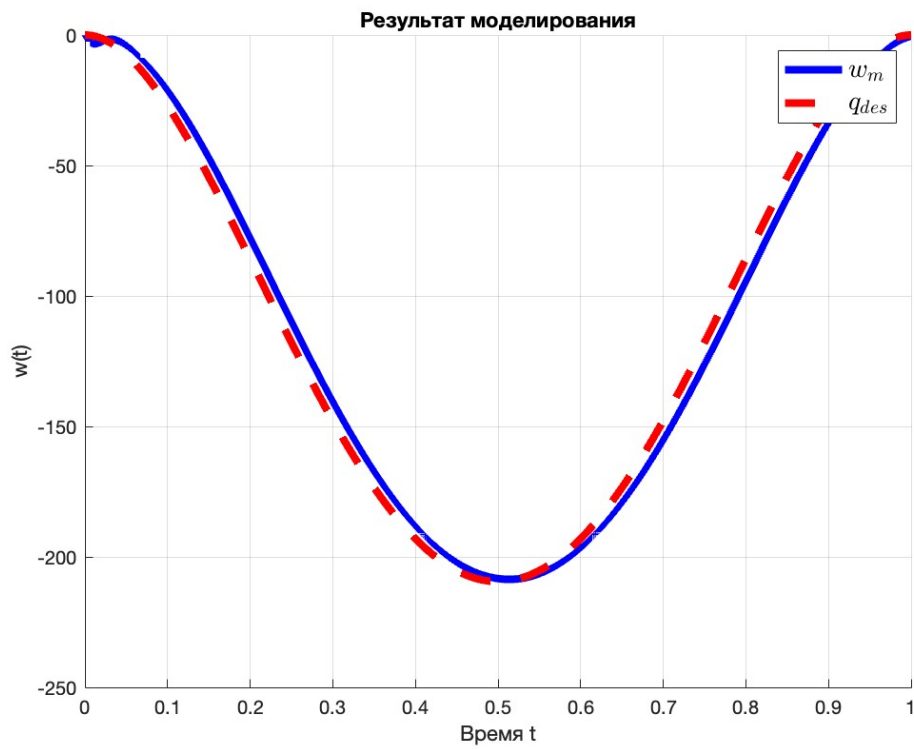


Рис. 20: Сравнение желаемой и фактической скорости поворота ротора

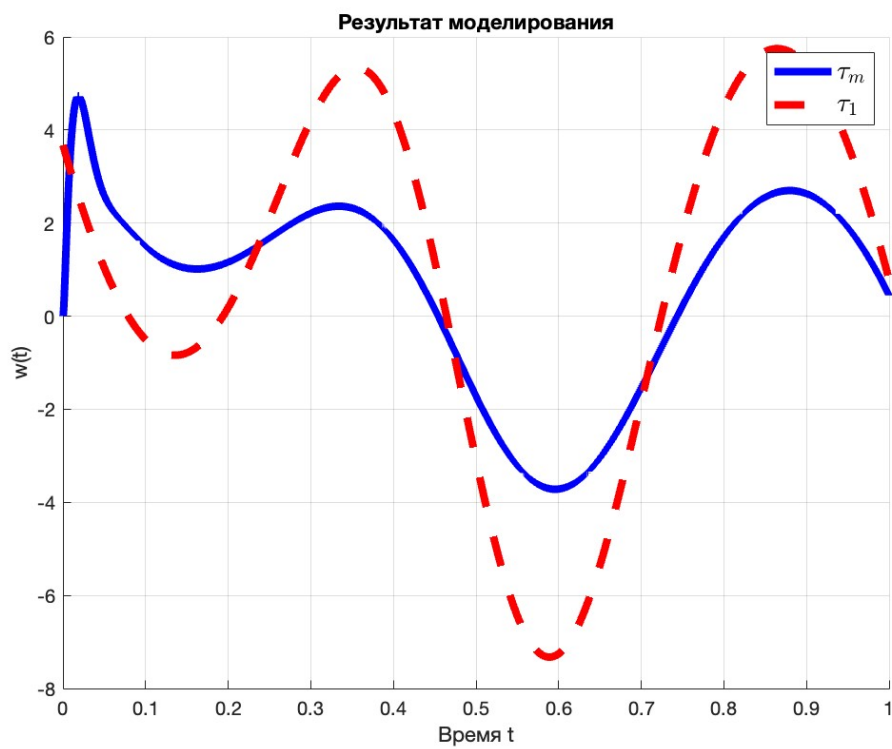


Рис. 21: Сравнение желаемой и фактической скорости поворота ротора

## Моделирование RR-манипулятора

Проведем аналогичное моделирование, но на этот раз для манипулятора состоящего из двух звеньев:

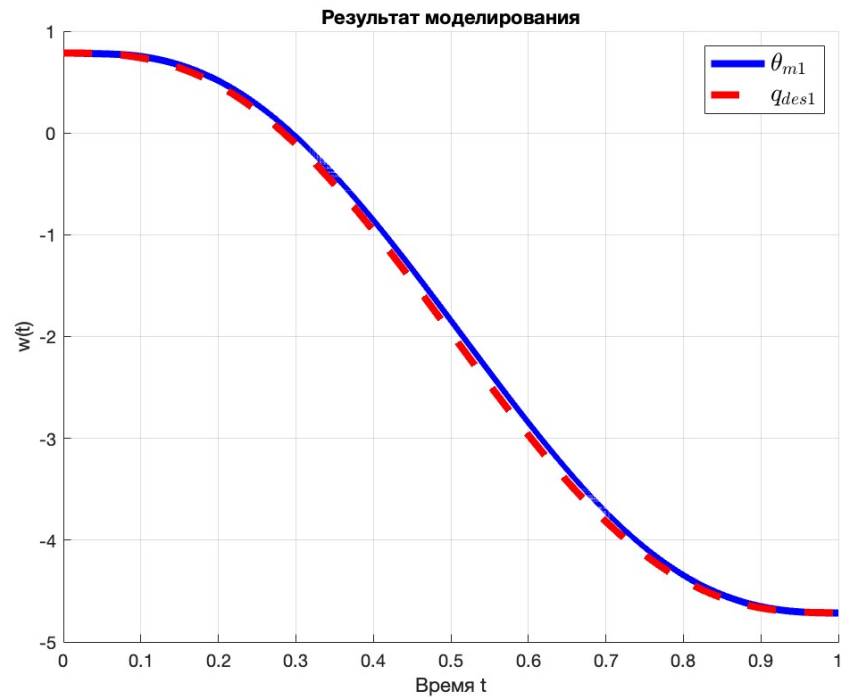


Рис. 22: Сравнение желаемого и фактического угла поворота для первого ротора

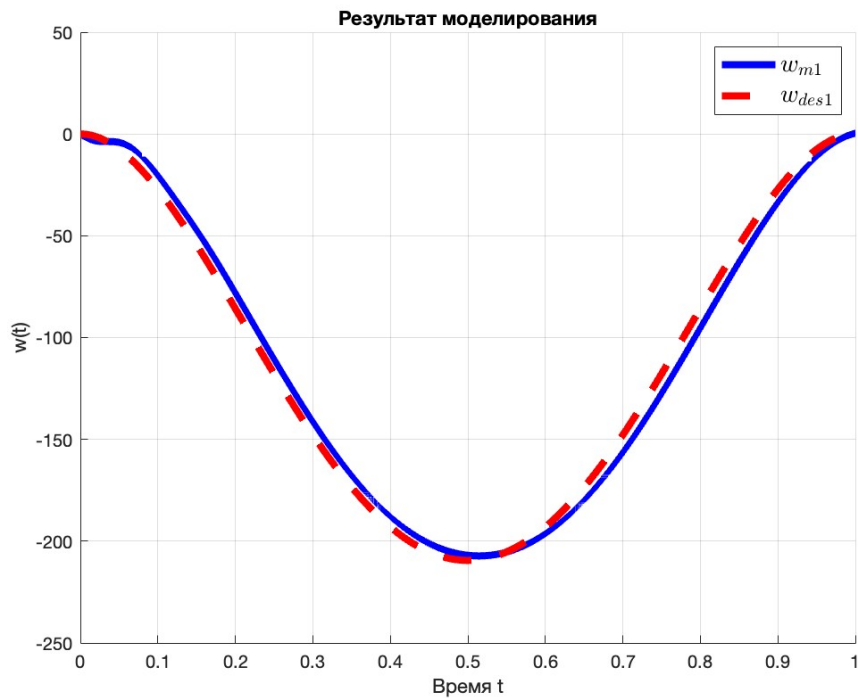


Рис. 23: Сравнение желаемой и фактической скорости поворота для первого ротора

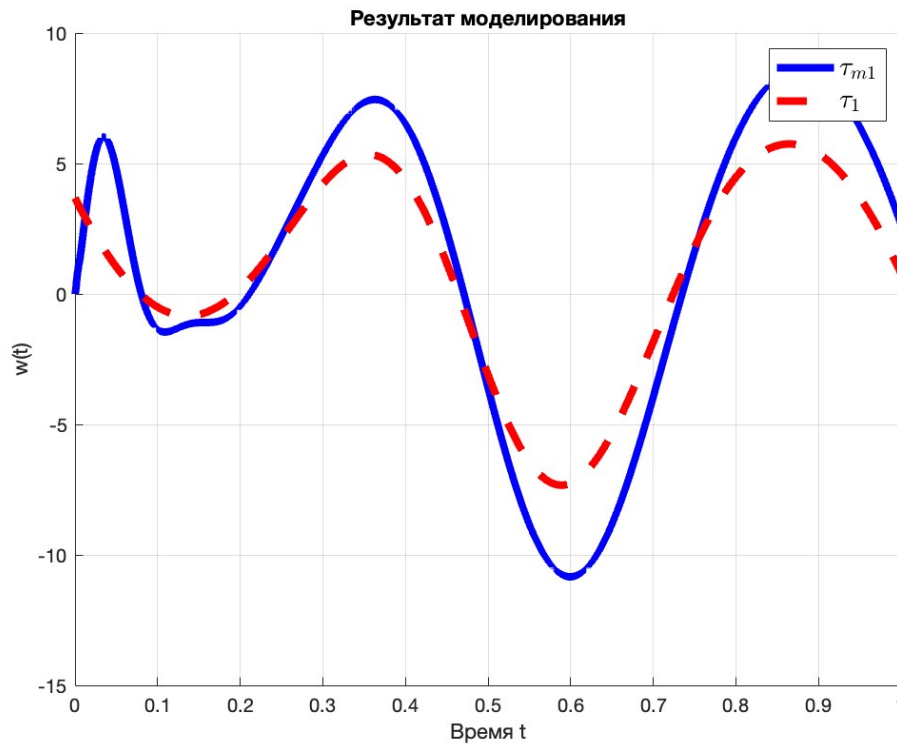


Рис. 24: Сравнение желаемой и фактической скорости поворота для первого ротора

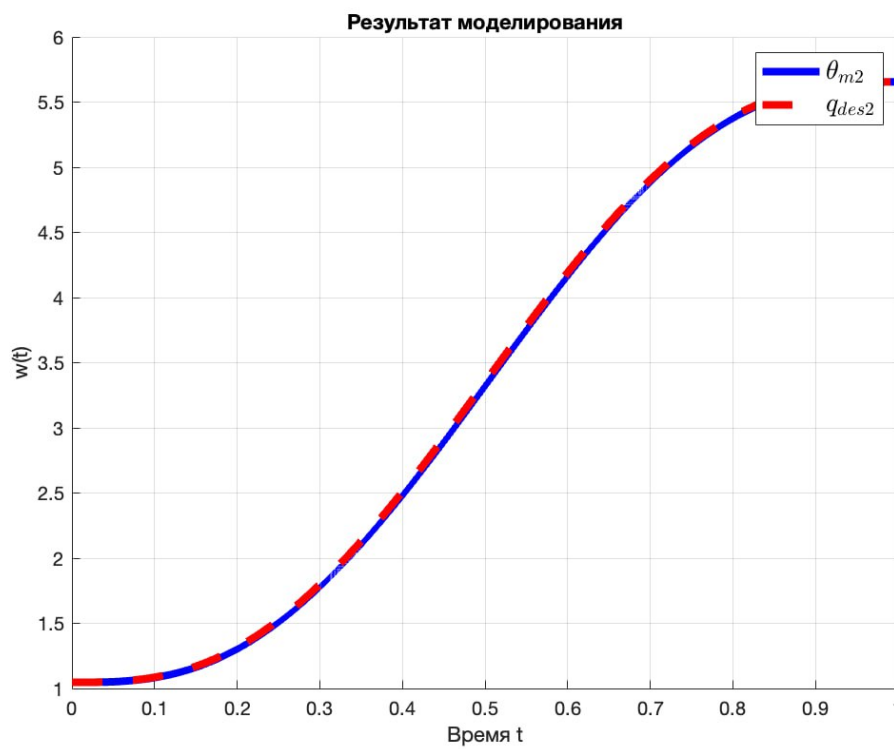


Рис. 25: Сравнение желаемого и фактического угла поворота для второго ротора



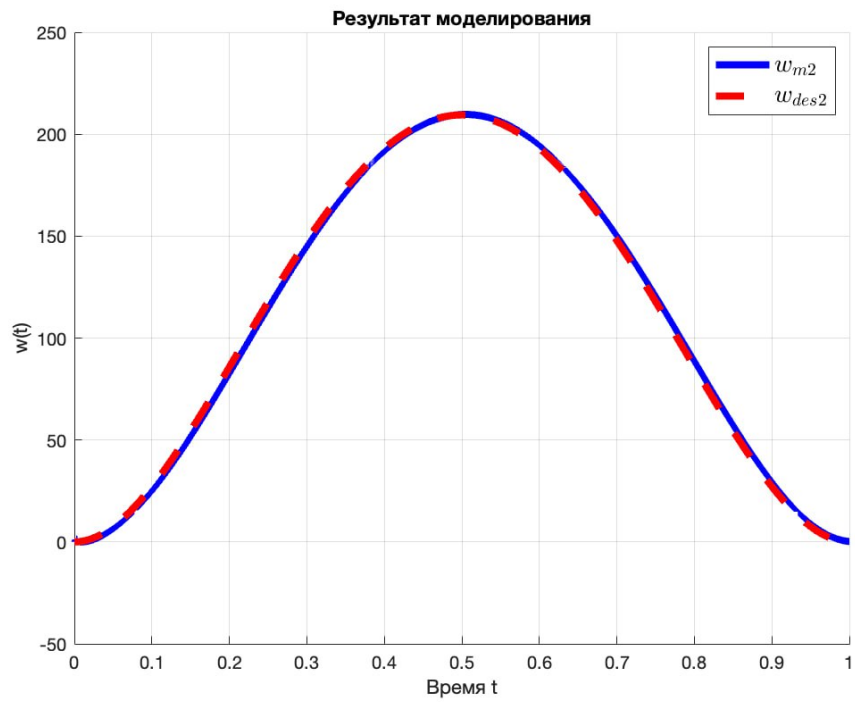


Рис. 26: Сравнение желаемой и фактической скорости поворота для второго ротора

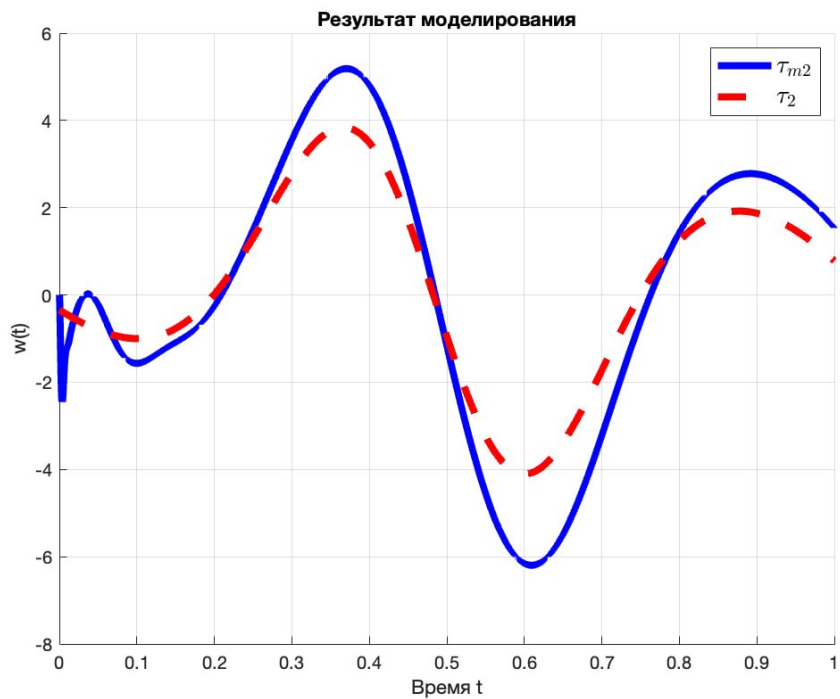


Рис. 27: Сравнение желаемой и фактической скорости поворота для второго ротора

Как можем видеть, система управления показывает хорошие результаты. Повороты двигателей и их угловые скорости совпадают практически полностью. Есть небольшая статическая невязка для момента, при этом форма эталонного сигнала повторяется хорошо.