

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО»  
(УНИВЕРСИТЕТ ИТМО)



Факультет Систем Управления и Робототехники

**ОТЧЁТ О ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЕ №4  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ: "ИМИТАЦИОННОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ РОБОТЕХНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ"**

**Выполнил**

Козлов Андрей Алексеевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>506004, @causeloveAA

**Проверил**

Ракшин Егор Александрович, ассистент

г. Санкт-Петербург  
23 ноября 2025 г.

# 1 Цель работы

Цель работы — Разработка, модификация и управление двумерным сухожильным механизмом в среде MuJoCo, включающим два суставных звена и подвижную опорную стенку. В ходе работы необходимо добавить актуаторы, реализовать управление с помощью PD-регуляторов и задать синусоидальные траектории для суставов механизма, обеспечив стабильное движение в пределах рабочей области. Отдельное внимание уделяется настройке амплитуды и смещения (BIAS) управляющих сигналов, чтобы избежать выхода механизма за физические ограничения модели.

## 2 Задание на работу

В рамках работы требуется:

На основе модели, созданной в предыдущей работе, требуется выполнить следующие действия:

1. Добавить в модель актуаторы и сенсоры, используя контейнеры `<actuator>` и `<sensor>` в XML-файле MuJoCo.
2. Для рассматриваемого механизма:
  - для механизма типа Optimus используется один актуатор  $q_1$ ;
  - для сухожильного механизма используются два актуатора  $q_1$  и  $q_2$ .
3. Определить управляющее воздействие с помощью PD-регулятора, задав желаемую траекторию движения в виде синусоидальной функции:

$$q_{\text{des}}(t) = AMP \cdot \sin(2\pi \cdot FREQ \cdot t) + BIAS.$$

4. Параметры синусоидального сигнала (амплитуда, частота, смещение) выбрать согласно таблице, выданной преподавателем.
5. Если заданная траектория приводит к выходу механизма за пределы рабочего пространства, уменьшить амплитуду и при необходимости скорректировать значение BIAS.
6. Реализовать запуск симуляции, визуализацию движений механизма и получить графики движения суставов во времени.

## 3 Модель системы

В качестве задания и в соответствии с таблицей был взят 1ый вариант: tendon connected 2R planar mechanism. Модифицирован путём добавления двух актуаторов и двух сенсоров. Модель иммет следующее описание в среде Мијосо:

```
1 <?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>
2 <mujoco>
3   <option timestep="1e-4"/>
4   <option gravity="0 0 -9.8"/>
5
6   <asset>
7     <texture type="skybox" builtin="gradient"
```

```

8             rgb1="1 1 1"  rgb2="0.5 0.5 0.5"
9             width="256"  height="256"/>
10            <texture name="grid" type="2d" builtin="checker"
11              rgb1="0.1 0.1 0.1"  rgb2="0.6 0.6 0.6"
12              width="300"  height="300"/>
13            <material name="grid" texture="grid"
14              texrepeat="10 10" reflectance="0.2"/>
15          </asset>
16
17      <worldbody>
18        <light pos="0 0 10"/>
19        <geom type="plane" size="0.5 0.5 0.1" material="grid"/>
20        <camera name="side" pos="0.5 -1.5 1.0" euler="90 0 0" fovy="60"/>
21
22        <body name="WallL" pos="-0.5 0 0.5">
23          <geom type="box" size="0.01 0.01 0.2" rgba="0.5 0.5 0.5 1"/>
24          <site name="sWallLD" size="0.01" pos="0 0 -0.02"/>
25          <site name="sWallLU" size="0.01" pos="0 0 0.02"/>
26
27          <body name="Cylinder1" pos="0.2 0 0">
28            <joint name="Hinge1" type="hinge" axis="0 1 1" range="-90 90"
29            " damping="0.2"/>
30
31            <geom type="cylinder" size="0.02 0.1"
32              pos="0 -0.1 0"
33              rgba="0.2 0.5 0.8 0.8"
34              euler="90 0 0"/>
35
36            <site name="sC1_up" size="0.01" pos="0 -0.2 0.02"/>
37            <site name="sC1_down" size="0.01" pos="0 -0.2 -0.02"/>
38
39            <body name="Cylinder2" pos="0.4 0 0" >
40              <joint name="Hinge2" type="hinge" axis="0 0 1" range="
41              -90 90" damping="0.2"/>
42
43              <geom type="cylinder" size="0.02 0.1"
44                pos="0 -0.1 0"
45                rgba="0.8 0.3 0.2 0.8"
46                euler="90 0 0"/>
47
48              <site name="sC2_up" size="0.01" pos="0 -0.2 0.02"/>
49              <site name="sC2_down" size="0.01" pos="0 -0.2 -0.02"/>
50
51            </body>
52          </body>
53        </body>
54
55        <body name="WallR" pos="0.5 0 0.5">
56          <joint name="WallR_slide" type="slide" axis="0 0 1" limited="
57          true" range="0.4 0.6"/>
58          <geom type="box" size="0.01 0.01 0.2" rgba="0.5 0.5 0.5 1"/>
59          <site name="sWallRD" size="0.01" pos="0 0 -0.02"/>
60          <site name="sWallRU" size="0.01" pos="0 0 0.02"/>
61        </body>
62
63      </worldbody>
64      <equality>
65        <connect site1="sC2_down" site2="sWallRD"/>

```

```

65      <connect site1="sC2_up" site2="sWallRU"/>
66  </equality>
67
68  <tendon>
69      <spatial name="tendon1" width="0.005" stiffness="800" damping="20">
70          <site site="sWallLU"/>
71          <site site="sC1_up"/>
72          <site site="sC2_down"/>
73          <site site="sWallRD"/>
74      </spatial>
75
76      <spatial name="tendon2" width="0.005" stiffness="800" damping="20">
77          <site site="sWallRU"/>
78          <site site="sC2_up"/>
79          <site site="sC1_down"/>
80          <site site="sWallLD"/>
81      </spatial>
82  </tendon>
83
84 <sensor>
85     <jointpos name="q1_pos" joint="Hinge1"/>
86     <jointvel name="q1_vel" joint="Hinge1"/>
87
88     <jointpos name="q2_pos" joint="Hinge2"/>
89     <jointvel name="q2_vel" joint="Hinge2"/>
90 </sensor>
91
92 <actuator>
93     <!-- Актуатор q1 -->
94     <motor name="motor1" joint="Hinge1"
95         ctrllimited="true" ctrlrange="-30 30"/>
96
97     <!-- Актуатор q2 -->
98     <motor name="motor2" joint="Hinge2"
99         ctrllimited="true" ctrlrange="-3 3"/>
100
101    <!-- Прежний мотор для стенки -->
102    <motor name="WallR_motor" joint="WallR_slide"
103        ctrllimited="true" ctrlrange="-3000 3000"/>
104 </actuator>
105
106
107 </mjoco>
```

Визуализация модели выглядит следующим образом:

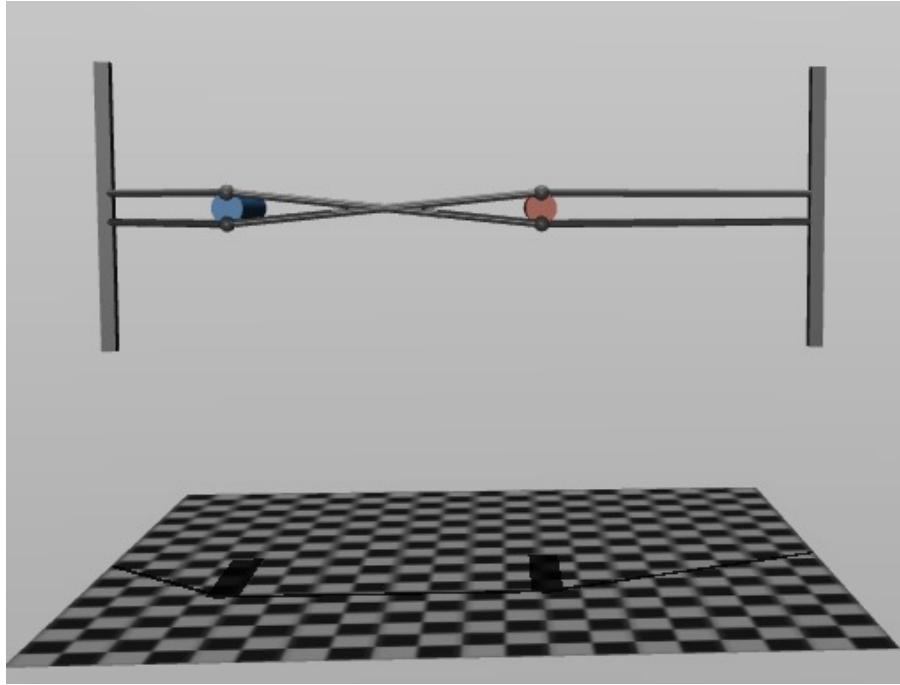


Рис. 1: Визуализация модели в среде Mujooco

## 4 Скрипт для работы с моделью на Python

```

1 import mujoco
2 import mujoco.viewer
3 import numpy as np
4 import matplotlib.pyplot as plt
5
6 xml_path = "tendon_2R2.xml"
7
8 model = mujoco.MjModel.from_xml_path(xml_path)
9 data = mujoco.MjData(model)
10
11
12 motor1_id = model.actuator('motor1').id      # q1
13 motor2_id = model.actuator('motor2').id      # q2
14 wall_motor_id = model.actuator('WallR_motor').id
15
16 joint_q1 = model.joint('Hinge1').id
17 joint_q2 = model.joint('Hinge2').id
18
19 deg2rad = np.pi / 180
20
21 AMP1 = 4.08 * deg2rad
22 FREQ1 = 1.68
23 BIAS1 = -15.7 * deg2rad
24
25 AMP2 = 5.97 * deg2rad
26 FREQ2 = 2.45
27 BIAS2 = 105.2 * deg2rad
28
29 Kp = 0.1
30 Kd = 0.002
31
32 dt = 0.001
33 steps = 4000

```

```

34
35 time = np.arange(steps) * dt
36 q1_log = []
37 q2_log = []
38 q1_des_log = []
39 q2_des_log = []
40
41 for i in range(steps):
42     t = i * dt
43
44     q1_des = AMP1 * np.sin(2 * np.pi * FREQ1 * t) + BIAS1
45     q2_des = AMP2 * np.sin(2 * np.pi * FREQ2 * t) + BIAS2
46
47     q1 = data.qpos[joint_q1]
48     q2 = data.qpos[joint_q2]
49
50     dq1 = data.qvel[joint_q1]
51     dq2 = data.qvel[joint_q2]
52
53     u1 = Kp * (q1_des - q1) - Kd * dq1
54     u2 = Kp * (q2_des - q2) - Kd * dq2
55
56     data.ctrl[motor1_id] = u1
57     data.ctrl[motor2_id] = u2
58
59     data.ctrl[wall_motor_id] = 2000 * np.sin(i * 0.01)
60
61 mujoco.mj_step(model, data)
62
63     q1_log.append(q1)
64     q2_log.append(q2)
65     q1_des_log.append(q1_des)
66     q2_des_log.append(q2_des)
67
68
69 plt.figure(figsize=(10,6))
70 plt.plot(time, q1_log, label="q1")
71 plt.plot(time, q1_des_log, label="q1_des", linestyle='--')
72 plt.title("Joint 1 trajectory")
73 plt.legend()
74 plt.grid(True)
75 plt.xlabel("Time [s]")
76 plt.ylabel("Angle [rad]")
77 plt.show()
78
79 plt.figure(figsize=(10,6))
80 plt.plot(time, q2_log, label="q2")
81 plt.plot(time, q2_des_log, label="q2_des", linestyle='--')
82 plt.title("Joint 2 trajectory")
83 plt.legend()
84 plt.grid(True)
85 plt.xlabel("Time [s]")
86 plt.ylabel("Angle [rad]")
87 plt.show()

```

Для решения задачи были взяты параметры из варианта в соответствии с таблицей преподавателя.

## 5 Обоснование выбора параметров синусоидальных сигналов для $q_1$ и $q_2$

Для управления суставами механизма использовался синусоидальный закон вида

$$q_{\text{des}}(t) = AMP \cdot \sin(2\pi \cdot FREQ \cdot t) + BIAS, \quad (1)$$

где  $AMP$  — амплитуда угловых колебаний,  $FREQ$  — частота сигнала,  $BIAS$  — угловое смещение, а  $t$  — время.

Первоначальные значения параметров приводили к выходу механизма за пределы рабочей области и нарушению кинематических ограничений. Поэтому параметры были скорректированы.

### 5.1 Параметры для сустава $q_1$ (Hinge1)

Исходные параметры:  $AMP = 28.08^\circ$ ,  $FREQ = 1.68 \text{ Гц}$ ,  $BIAS = 28.7^\circ$ .

Скорректированные значения приведены в таблице:

Параметр	Значение ( $^\circ$ )	Значение (рад)
$AMP_1$	4.08	0.0713
$FREQ_1$	1.68	—
$BIAS_1$	-15.7	-0.274

Таблица 1: Корректированные параметры для сустава  $q_1$ .

### 5.2 Параметры для сустава $q_2$ (Hinge2)

Исходные параметры:  $AMP = 49.97^\circ$ ,  $FREQ = 2.45 \text{ Гц}$ ,  $BIAS = 11.2^\circ$ .

Корректировка дала следующие значения:

Параметр	Значение ( $^\circ$ )	Значение (рад)
$AMP_2$	5.97	0.1042
$FREQ_2$	2.45	—
$BIAS_2$	105.2	1.836

Таблица 2: Корректированные параметры для сустава  $q_2$ .

### 5.3 Общая логика корректировки

- Амплитуды уменьшены для предотвращения выхода звеньев за пределы допустимого рабочего пространства.
- Смещения  $BIAS$  выбраны таким образом, чтобы начальная конфигурация механизма была устойчивой.
- Частоты  $FREQ$  оставлены без изменений, поскольку динамические ограничения модели удовлетворяются.
- Приведённые углы даны в градусах для удобства анализа; в симуляции используются радианные значения.

## 5.4 Вывод

Коррекция параметров обеспечила корректную и устойчивую работу механизма без нарушения геометрии и кинематических связей.

После выполнения программы был получен следующий результат:

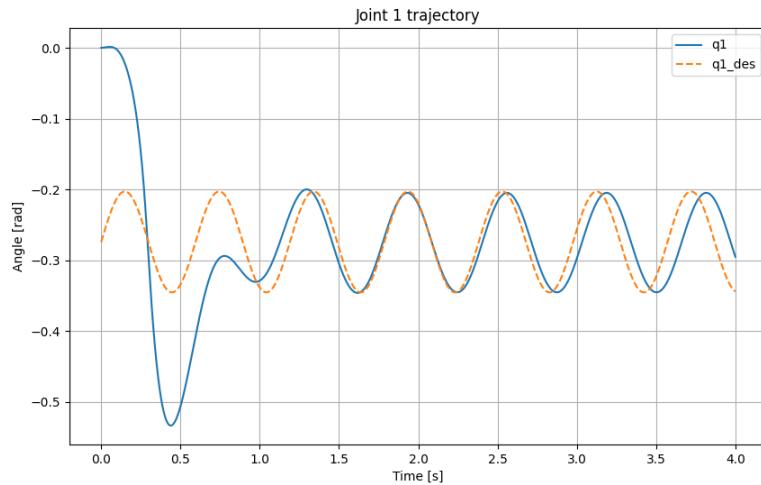


Рис. 2: Результат моделирования для  $q_1$

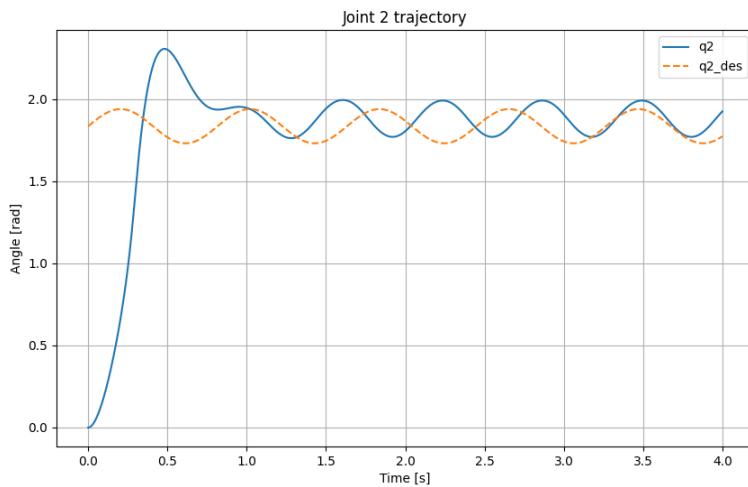


Рис. 3: Результат моделирования для  $q_2$

На основе полученных графиков движения цилиндров и подвижной стенки по оси  $Z$  можно сделать вывод о корректной работе механизма при подаче синусоидальных управляющих сигналов. Траектории цилиндров  $C_1$  и  $C_2$  имеют периодический характер, соответствующий заданным частотам колебаний суставов  $q_1$  и  $q_2$ . Амплитуда движения остаётся стабильной на всём интервале моделирования, что указывает на отсутствие выхода элементов системы за пределы рабочей области.

Траектория цилиндра  $C_1$  характеризуется меньшей амплитудой и более плавным характером движения, что согласуется с меньшей амплитудой управляющего сигнала сустава  $q_1$ . Движение цилиндра  $C_2$  имеет более выраженные колебания, что связано с повышенной амплитудой и смещением сигнала для  $q_2$ .

В целом, анализ графиков подтверждает устойчивую динамику системы: траектории являются гладкими, не содержат скачков или артефактов, геометрические ограничения сохраняются, а кинематические связи не нарушаются. Таким образом, выбранные параметры управляющих воздействий обеспечивают корректное функционирование модели в процессе всего моделирования.

Графики позволяют визуально оценить кинематическую реакцию системы, динамическое взаимодействие цилиндров с сухожилями и эффективность передачи движения через механическую цепочку.

## 6 Вывод

В ходе выполненной работы была разработана и модифицирована динамическая модель механизма с сухожильным приводом в среде MuJoCo. На основе исходной кинематической структуры были добавлены актуаторы, сенсоры и реализовано управление суставами с использованием синусоидальных управляющих сигналов, описываемых параметрами амплитуды, частоты и смещения.

Корректировка параметров управляющих воздействий позволила обеспечить устойчивое функционирование механизма, исключить выход элементов системы за пределы рабочей области и предотвратить нарушение геометрических связей. На основе результатов моделирования установлено, что траектории движения цилиндров и подвижной стенки имеют гладкий периодический характер, полностью согласующийся с заданными управляющими сигналами.

Полученные графики демонстрируют отсутствие резких динамических переходов, артефактов и нестабильности, что подтверждает корректность выбранной модели, адекватность настроек актуаторов и успешное функционирование сухожильного механизма под управлением PD-регулятора.

Таким образом, поставленные цели работы были достигнуты: модель успешно дополнена исполнительными устройствами, параметры управления синусоидальными сигналами откалиброваны, а динамическое поведение системы подтверждено численным экспериментом и оптимизации.