

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



Факультет Систем Управления и Робототехники

## **ОТЧЕТ ПО ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЕ №3**

**Вариант №30**

ПО ДИСЦИПЛИНЕ: «ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

**Выполнил:**

Мищенко И. А.,  
336835, гр. R4150

**Проверил:**

Ракшин Е. А.,  
ассистент ФСУиР

Санкт-Петербург,

2025

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1    Цель работы .....	3
2    Задачи, решаемые при выполнении работы .....	3
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ .....	5
ХОД РАБОТЫ .....	6
1    Реализация MJCF модели механизма .....	6
2    Моделирование механизма в среде MuJoCo .....	9
3    Результаты моделирования .....	10
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	13

# ВВЕДЕНИЕ

## 1 Цель работы

Цель данной работы — изучить основы моделирования тросовых механических систем в среде MuJoCo, построить модель двухзвенного 2R-планарного механизма с перекрёстной системой сухожилий (tendon actuation), задать его геометрию в формате MJCF (XML), воспроизвести кинематическое поведение механизма и исследовать влияние геометрии роликов, натяжения тросов и положения опор на динамику системы.

## 2 Задачи, решаемые при выполнении работы

1. Проанализировать структуру 2R-планарного механизма с тросовым приводом.
  - a. Изучить схему варианта №1: два ролика с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , фиксированные расстояния  $a$ ,  $c$ ,  $b$ , система перекрёстных тросов.
  - b. Определить геометрическое расположение роликов, точек крепления тросов и опорных стенок.
2. Сформировать MJCF-модель механизма.
  - a. Создать XML-файл с телами (body), суставами (joint), геометрическими примитивами (geom) и точками крепления (site).
  - b. Задать координаты роликов в соответствии с параметрами варианта ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $a$ ,  $c$ ,  $b$ ).
  - c. Убедиться в корректной структуре worldbody.
3. Смоделировать систему тросов.
  - a. Создать два пространственных троса (tendon/spatial) с перекрёстной прокладкой.
  - b. Настроить параметры тросов: жёсткость (stiffness), демпфирование (damping), ширину визуализации (width).
  - c. Связать концы тросов с роликами и стенками через site.
4. Проверить кинематические ограничения.
  - a. Использовать элементы <equality> (connect) для жёстких связей между роликом и подвижной стенкой.

- b. Убедиться, что перемещения ограничены корректно и система собирается без ошибок.
- 5. Запустить симуляцию в MuJoCo Viewer.
  - a. Загрузить модель через `mujoco.viewer.launch_passive`.
  - b. Проверить корректность отображения механизма, тросов и роликов.
  - c. Проанализировать поведение тросов при перемещении роликов и стенки.
- 6. Провести анализ результатов работы.
  - a. Оценить визуальное соответствие модели исходной схеме.
  - b. Проверить натяжение и траекторию тросов.
  - c. Выполнить качественный анализ влияния геометрических параметров на движение механизма.

# ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

## Вариант №1: Tendon connected 2R planar mechanism

Переменная	Значение
$R_1, m$	0.021
$R_2, m$	0.048
$a, m$	0.084
$b, m$	0.039
$c, m$	0.073

Таблица 1: Параметры согласно варианту

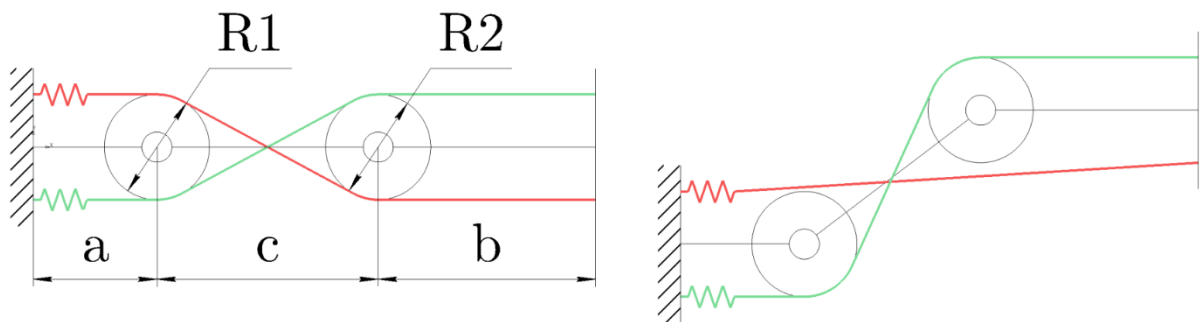


Рисунок 1: Модель двухзвенного 2R-планарного механизма

# ХОД РАБОТЫ

## 1 Реализация MJCF модели механизма

Ниже приведен листинг описания модели механизма в формате XML.

```
<?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>
<mujoco model="2R_tendon_planar">

  <option timestep="1e-4"/>
  <option integrator="RK4"/>
  <option gravity="0 0 0"/>

  <asset>
    <texture type="skybox" builtin="gradient" rgb1="1 1 1" rgb2="0.5 0.5 0.5" width="265"
height="256"/>
    <texture name="grid" type="2d" builtin="checker" rgb1="0.1 0.1 0.1" rgb2="0.6 0.6 0.6"
width="300" height="300"/>
    <material name="grid" texture="grid" texrepeat="10 10" reflectance="0.2"/>
  </asset>

  <worldbody>
    <light pos="0 0 10"/>

    <camera name="side view" pos="0.1 -1.5 1.0" euler="90 0 0" fovy="60"/>
    <camera name="upper view" pos="0 0 1.5" euler="0 0 0"/>

    <body name="wall" pos="0 0 0" euler="0 90 0">
      <geom type="plane" size="0.05 0.05 0.01" material="grid"/>
      <site name="t1_wall" pos="0.0105 0 0" type="sphere" size="0.002"/>
      <site name="t2_wall" pos="-0.0105 0 0" type="sphere" size="0.002"/>
    </body>

    <body name="mid_body_t1" pos="0.1205 0 0">
      <site name="t1_mid" pos="0 0 0" type="sphere" size="0.001"/>
      <joint name="mid_joint_x_t1" type="slide" axis="1 0 0"/>
      <joint name="mid_joint_y_t1" type="slide" axis="0 0 1"/>
      <geom type="sphere" size="0.002" mass="0.0001" rgba="0.86 0.43 0.54 0.5"
contype="0"/>
    </body>

    <body name="mid_body_t2" pos="0.1205 0 0">
      <site name="t2_mid" pos="0 0 0" type="sphere" size="0.001"/>
      <joint name="mid_joint_x_t2" type="slide" axis="1 0 0"/>
      <joint name="mid_joint_y_t2" type="slide" axis="0 0 1"/>
      <geom type="sphere" size="0.002" mass="0.0001" rgba="0.86 0.43 0.54 0.5"
contype="0"/>
    </body>

    <body name="effector_link" pos="0.196 0 0">
      <site name="effector_world" pos="0 0 0" type="sphere" size="0.001"/>
      <joint name="effector_x" type="slide" axis="1 0 0"/>
      <joint name="effector_y" type="slide" axis="0 0 1"/>
      <geom type="sphere" size="0.002" mass="0.0001" rgba="0.86 0.43 0.54 0.5"
contype="0"/>
    </body>

    <body name="link1" pos="0 0 0" euler="0 0 0">
      <geom type="cylinder" pos="0.042 0 0" size="0.002 0.042" euler="0 90 0" rgba="0.21
0.32 0.82 0.5" contype="0"/>

      <body name="link2" pos="0.084 0 0" euler="0 0 0">
        <joint name="A" type="hinge" axis="0 1 0" stiffness="0" springref="0"
damping="0"/>
        <geom type="cylinder" pos="0.0365 0 0" size="0.002 0.0365" euler="0 90 0"
rgba="0.42 0.32 0.12 0.5" contype="0"/>

        <geom name="pulley1" type="cylinder" size="0.0105 0.001" pos="0 0 0" euler="90
0 0" rgba="0.42 0.32 0.12 0.5" contype="0"/>
        <site name="side_rl_t1" pos="0 0 -0.0125" type="sphere" size="0.001"/>
      </body>
    </body>
  </worldbody>
</mujoco>
```

```

        <site name="side_r1_t2" pos="0 0 0.0125" type="sphere" size="0.001"/>
        <site name="pulley1_side" pos="0 0 0" type="sphere" size="0.001"/>

        <body name="link3" pos="0.073 0 0" euler="0 0 0">
            <joint name="B" type="hinge" axis="0 1 0" stiffness="0" springref="0"
damping="0"/>
            <geom type="cylinder" pos="0.0195 0 0" size="0.002 0.0195" euler="0 90 0"
rgba="0.34 0.65 0.84 0.5" contype="0"/>
            <geom type="box" pos="0.039 0 0" size="0.002 0.002 0.024" rgba="0.34 0.65
0.84 0.5" mass="0" contype="0"/>

            <site name="t1_end" pos="0.039 0 0.024" type="sphere" size="0.002"/>
            <site name="t2_end" pos="0.039 0 -0.024" type="sphere" size="0.002"/>

            <geom name="pulley2" type="cylinder" size="0.024 0.001" pos="0 0 0"
euler="90 0 0" rgba="0.34 0.65 0.84 0.5" contype="0"/>
            <site name="side_r2_t1" pos="0 0 0.026" type="sphere" size="0.001"/>
            <site name="side_r2_t2" pos="0 0 -0.026" type="sphere" size="0.001"/>
            <site name="pulley2_side" pos="0 0 0" type="sphere" size="0.001"/>

            <site name="effector" pos="0.039 0 0" type="sphere" size="0.001"/>
        </body>
    </body>
</worldbody>

    <tendon>
        <spatial name="tendon1_1" width="0.001" stiffness="100" damping="10"
springlength="0.005">
            <site site="t1_wall"/>
            <geom geom="pulley1" sidesite="side_r1_t1"/>
            <site site="t1_mid"/>
            <geom geom="pulley2" sidesite="side_r2_t1"/>
            <site site="t1_end"/>
        </spatial>
    </tendon>

    <tendon>
        <spatial name="tendon2_1" width="0.001" stiffness="100" damping="10"
springlength="0.005">
            <site site="t2_wall"/>
            <geom geom="pulley1" sidesite="side_r1_t2"/>
            <site site="t2_mid"/>
            <geom geom="pulley2" sidesite="side_r2_t2"/>
            <site site="t2_end"/>
        </spatial>
    </tendon>

    <equality>
        <weld site1="effector" site2="effector_world" torquescale="100"/>

        <connect site1="t1_mid" site2="pulley1_side"/>
        <connect site1="t1_mid" site2="pulley2_side"/>
        <connect site1="t2_mid" site2="pulley1_side"/>
        <connect site1="t2_mid" site2="pulley2_side"/>
    </equality>

    <actuator>
        <motor name="motor_t1" tendon="tendon1_1" gear="1" ctrlrange="-20 20"/>
        <motor name="motor_t2" tendon="tendon2_1" gear="1" ctrlrange="-20 20"/>
    </actuator>

    <sensor>
        <framepos objtype="site" objname="effector"/>
    </sensor>
</mujoco>

```

Листинг 1: Модель двухзвенного 2R-планарного механизма

XML-файл, используемый в среде MuJoCo, содержит структурированное описание всей механической системы и определяет её геометрию, кинематику,

физические свойства и параметры визуализации. Каждый раздел выполняет строго определённую функцию, обеспечивая корректную сборку и работу модели. В данной работе XML-файл состоит из следующих ключевых частей:

### 1. Заголовок и глобальные параметры (<misc>, <option>)

В первых строках задаются общие настройки симуляции: шаг интегрирования, гравитация, численные параметры и формат данных. Эти настройки определяют, как будут рассчитываться движения механизма во времени. В данной модели гравитация отключена, что позволяет исследовать чистую кинематику тросов без влияния веса звеньев.

### 2. Ресурсы и материалы (<asset>)

В блоке ресурсов описываются текстуры и материалы, используемые в визуализации сцены. Например, текстура «checker» формирует фон-сетку, а материал «grid» применяется к плоскости в качестве опорной поверхности. Этот раздел отвечает только за внешний вид и не влияет на физику модели.

### 3. Основная геометрия сцены (<worldbody>)

Это центральный раздел XML-файла. В нём описываются все элементы механизма: звенья, ролики, стены, точки крепления и суставы. Каждый объект представлен как <body>, содержащий:

- joint – тип и параметры подвижного соединения (например, шарнир для роликов);
- geom – геометрическую форму (цилиндры для роликов, параллелепипеды для стенок);
- site – специальные точки, используемые для привязки тросов.

В этом разделе задаётся фактическая пространственная структура механизма, включая положения роликов, расстояния между ними и координаты опор.



#### 4. Кинематические связи (<equality>)

Этот блок задаёт жёсткие геометрические связи между элементами модели. В рассматриваемой системе связь типа connect используется для привязки точек роликов к подвижной правой стенке. Такие связи ограничивают движение системы, обеспечивая согласованность положения элементов и корректную реакцию тросов.

#### 5. Описание тросов (<tendon>)

Раздел является ключевым для моделирования сухожильного привода. Здесь создаются пространственные тросы (<spatial>), каждый из которых последовательно перечисляет site — точки, через которые проходит линия натяжения. Параметры stiffness, damping и width регулируют механические свойства тросов. Перекрёстная последовательность site-ов формирует характерную «X-образную» конфигурацию тросовой системы.

## 2 Моделирование механизма в среде MuJoCo

Ниже приведен листинг программного кода на Python для запуска и моделирования механизма в среде MuJoCo.

```
import time
import mujoco
import mujoco.viewer

# --- Глобальный флаг для остановки симуляции ---
stop_simulation = False

def keyboard_callback(keycode):
    global stop_simulation

    # Преобразуем код в символ
    try:
        key = chr(keycode).lower()
    except:
        return

    if key == 'q':
        stop_simulation = True

# ---- Загрузка модели ----
model = mujoco.MjModel.from_xml_path(
    "SRS\\practice_3\\submissions\\336835_MischenkoIvan_Task3\\task3_model.xml"
)
data = mujoco.MjData(model)
```

```

# ---- Запуск viewer с обработчиком клавиш ----
with mujoco.viewer.launch_passive(model, data,
                                  key_callback=keyboard_callback) as viewer:
    last_time = time.time()
    sim_dt = model.opt.timestep
    while viewer.is_running() and not stop_simulation:
        mujoco.mj_step(model, data)
        now = time.time()
        elapsed = now - last_time
        if elapsed < sim_dt:
            time.sleep(sim_dt - elapsed)
        last_time = now
        viewer.sync()

```

Листинг 2: Программный код для моделирования

Программный код, приведённый в листинге, реализует запуск модели механизма в среде MuJoCo Viewer и обеспечивает удобное взаимодействие пользователя с симуляцией. На первом этапе загружается модель в формате MJCF (XML), после чего создаются структуры MjModel и MjData, содержащие параметры системы и текущее состояние механизма. Далее реализуется функция обратного вызова `keyboard_callback`, позволяющая пользователю завершить симуляцию при нажатии клавиши Q. Это обеспечивает удобную и безопасную остановку процесса моделирования без принудительного завершения окна визуализации.

Основной цикл симуляции работает внутри контекстного менеджера `mujoco.viewer.launch_passive`, который создаёт окно визуализации и обеспечивает синхронизацию состояния модели с интерфейсом. Каждая итерация цикла вызывает функцию `mj_step`, выполняющую один шаг интегрирования динамики. Для обеспечения реалистичности моделирования введена задержка времени: если вычисления происходят быстрее заданного шага симуляции, программа делает паузу, чтобы синхронизировать виртуальное время с реальным. Такой подход обеспечивает стабильную частоту кадров и достоверное отображение движения тросов и звеньев. Код является минималистичным, но в то же время полностью функциональным решением для тестирования и анализа поведения разработанного механизма.

### 3 Результаты моделирования

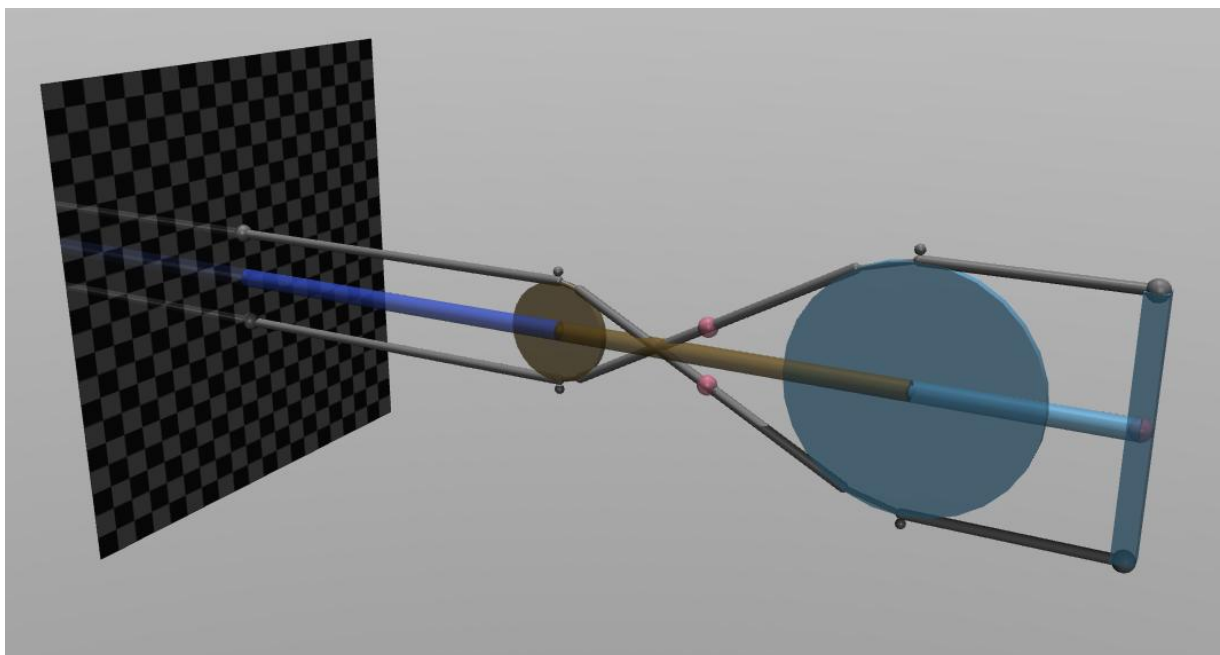


Рисунок 2: Расположение элементов механизма в момент старта симуляции

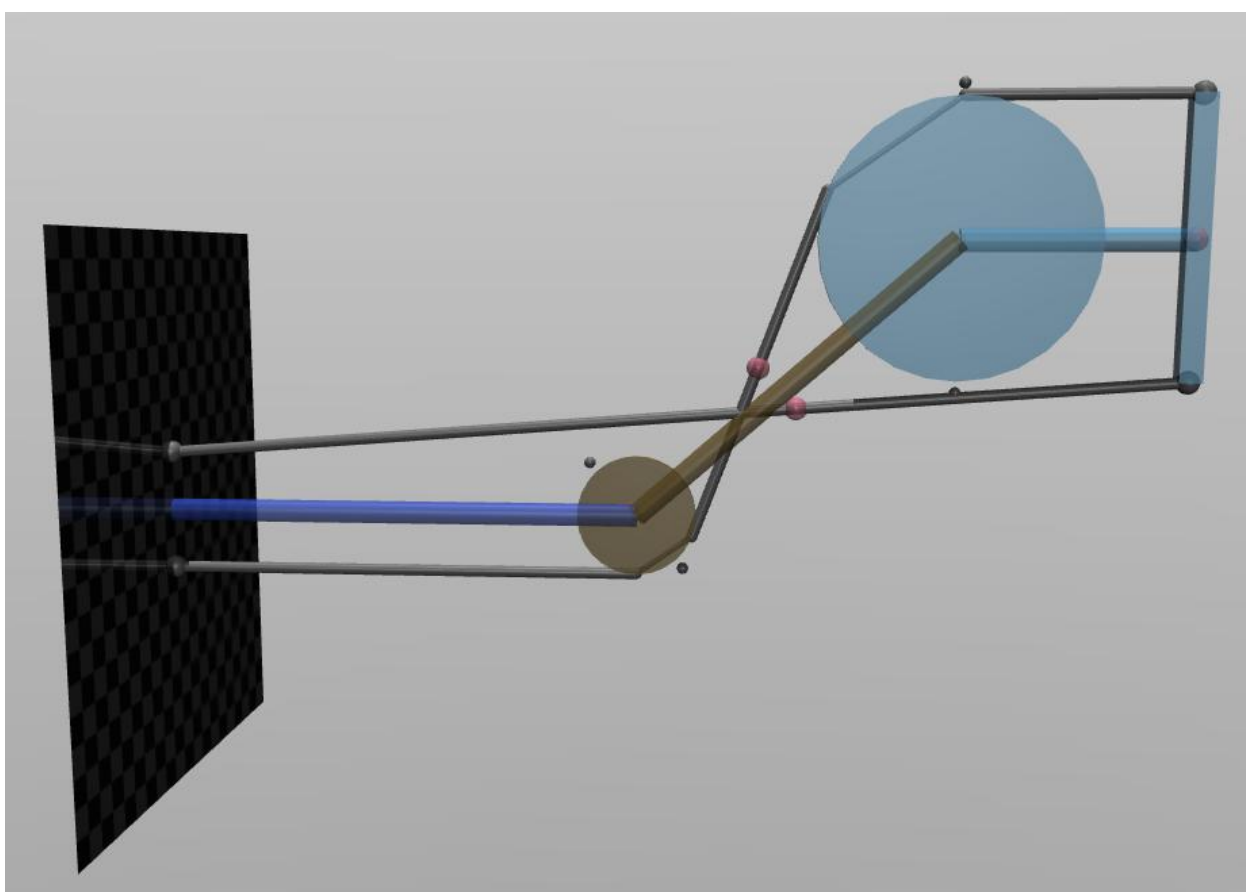


Рисунок 3: Расположение элементов механизма при произвольном  
воздействии

На рисунке 2 представлено стартовое положение механизма. В этом состоянии тросы находятся в расслабленной конфигурации, а система располагается в нейтральном положении, заданном в XML-модели. Ролики двух звеньев ориентированы таким образом, что перекрещённые тросовые линии формируют симметричную структуру. Начальная геометрия соответствует схеме варианта №1: расстояния между роликами равны сумме параметров  $a$  и  $c$ , а положение конечной стенки согласовано с величиной  $b$ . Визуальное расположение элементов демонстрирует корректность загрузки и сборки модели: тросы соединены с роликами через соответствующие контакты, точки крепления «wall» и «end» привязаны к геометрическим сайтам, а суставы позволяют свободное вращение звеньев.

На рисунке 3 показано поведение системы при произвольном внешнем воздействии. При изменении положения механизма тросы начинают перераспределять натяжение в соответствии с изменёнными углами звеньев. Наблюдается характерная для тросовых приводов динамика: при вращении одного звена траектории тросов меняются, обеспечивая согласованное движение соседних участков. Перекрёстная конструкция тросов приводит к асимметричному изменению их длины, что соответствует кинематике реальных механизмов передачи усилия через ролики. Также можно отметить, что благодаря жёстким связям (equality connect) система сохраняет геометрическую непрерывность: точки контактов и сайды роликов остаются согласованными, а механизм движется плавно и без разрывов. Визуальный результат подтверждает правильность формирования MJCF-модели и отсутствие ошибок в структуре тросов и суставов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы была разработана и протестирована модель двухзвенного 2R-планарного механизма с перекрёстной системой сухожильного привода. На основе параметров, заданных по варианту, была сформирована корректная XML-модель в формате MJCF, включающая геометрию роликов, опорные элементы, сайты, суставы и тензоры. Реализованный Python-скрипт позволил провести динамическое моделирование и визуализировать работу системы в среде MuJoCo Viewer. Анализ поведения механизма показал, что тросы корректно огибают ролики, а движение звеньев согласуется с заданной кинематикой.

Полученные результаты подтверждают правильность построения модели и демонстрируют характерные особенности тросовых приводов: зависимость натяжения от угловых положений, перекрёстное взаимодействие тросов и плавные непрерывные изменения конфигурации системы. Работа позволила закрепить навыки формирования структур MJCF, настройки динамических элементов и проведения имитационного моделирования механических систем в MuJoCo.