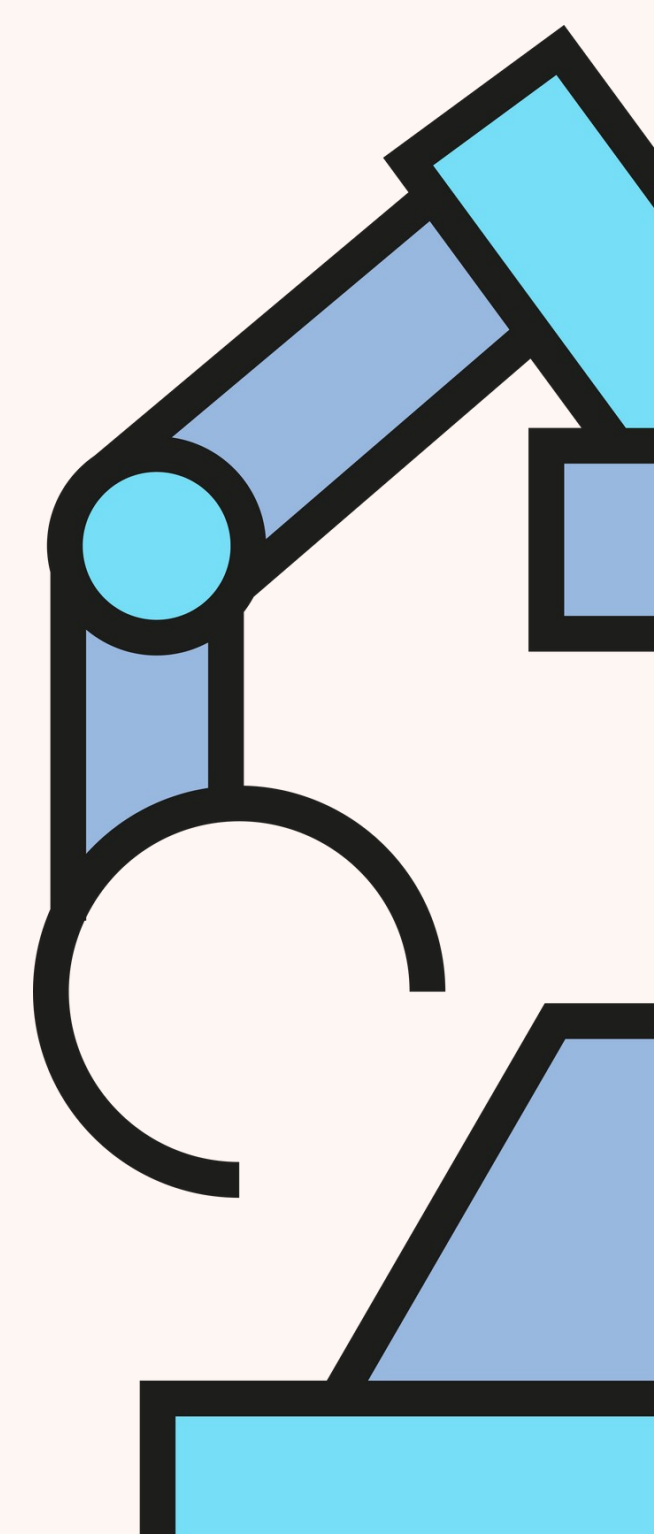
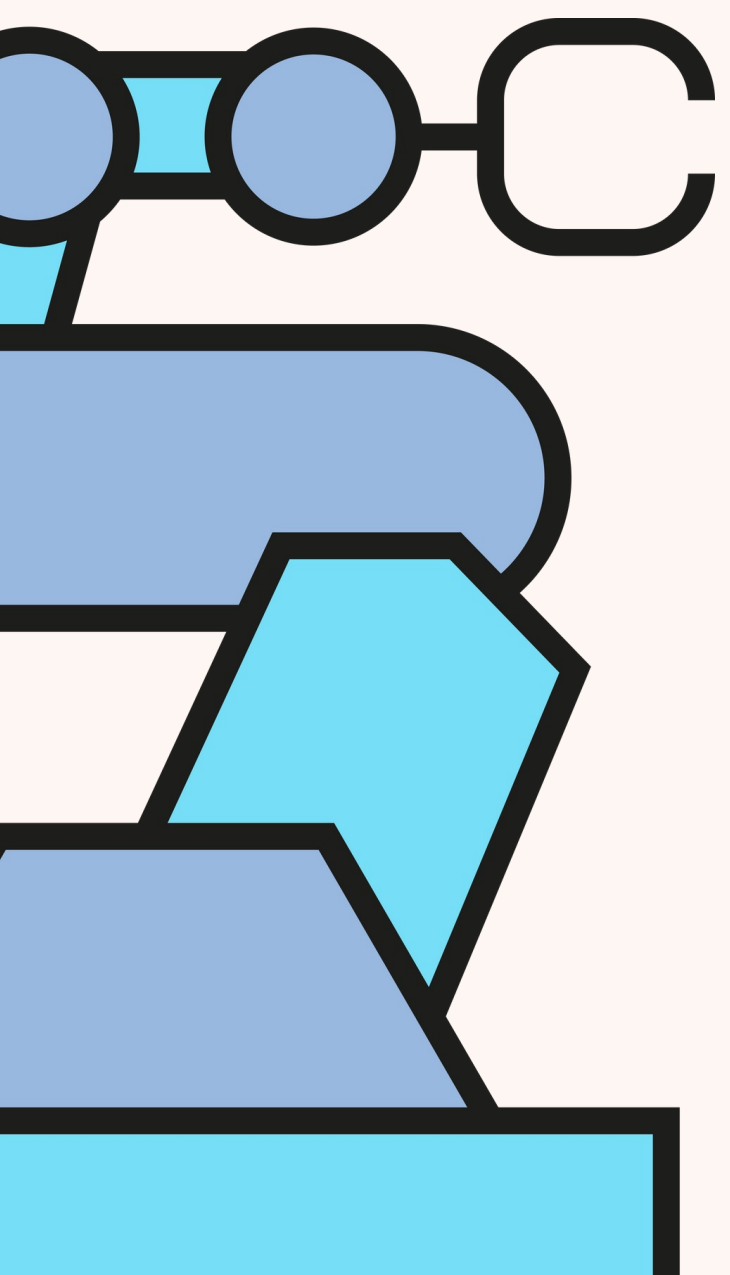


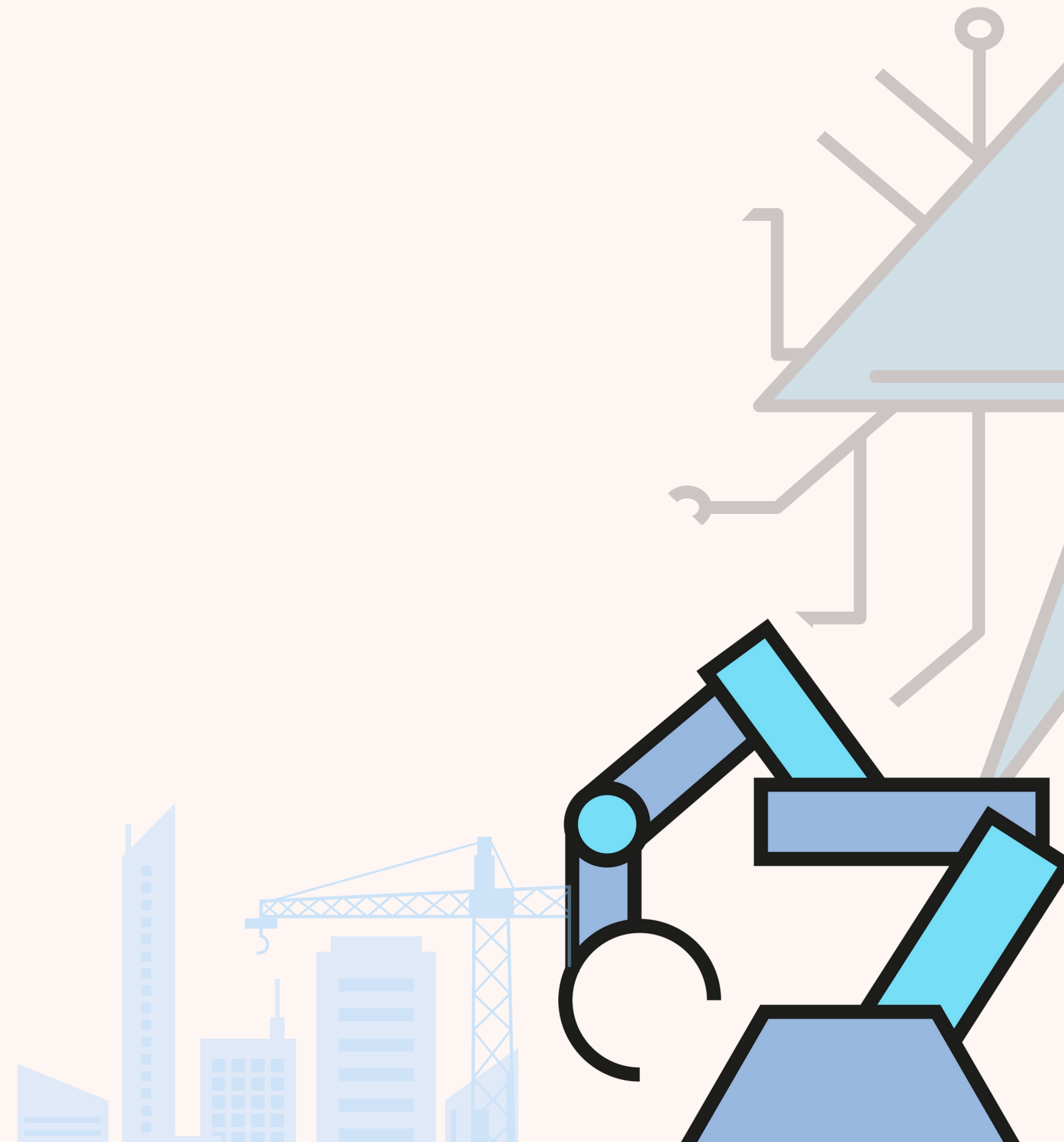
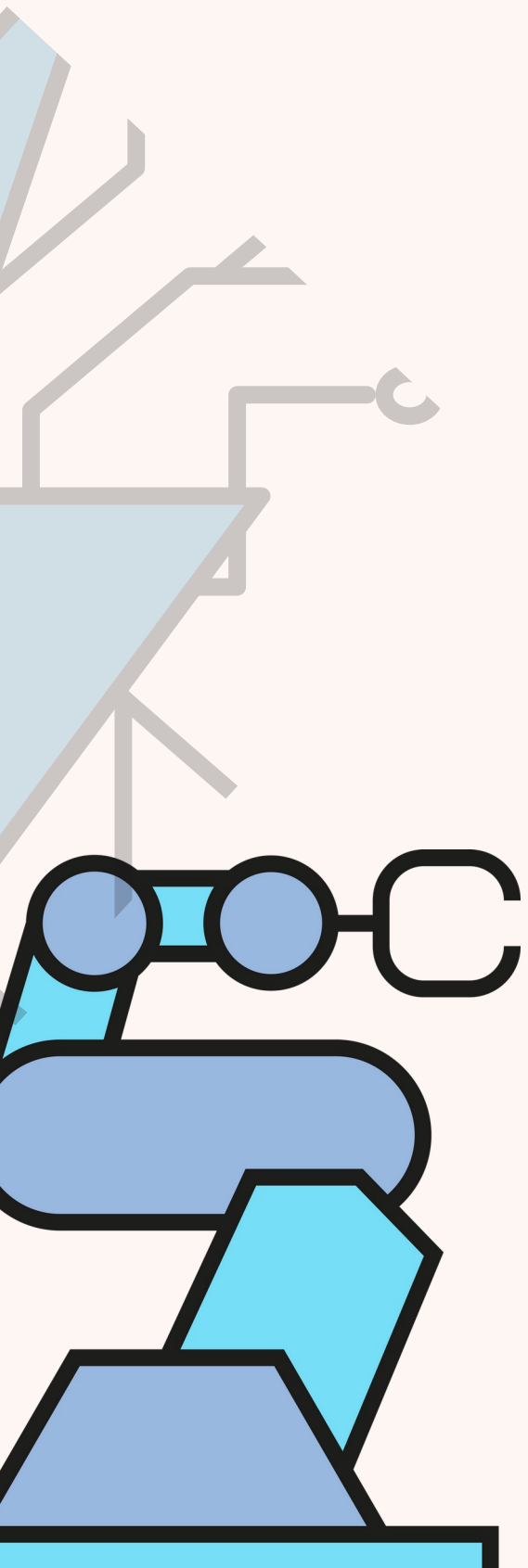


9-лекция. Моделирование системы управления роботов. Динамика манипуляторов

Исабеков Жанібек

План занятия

- Структура системы управления
- Математическая модель движения
- Переменные состояния манипулятора
- Использование SimMechanics
- Динамика манипулятора
- Пример двухзвенного манипулятора
- Управляющие воздействия
- ПИД-регулятор
- Применение моделирования



Введение



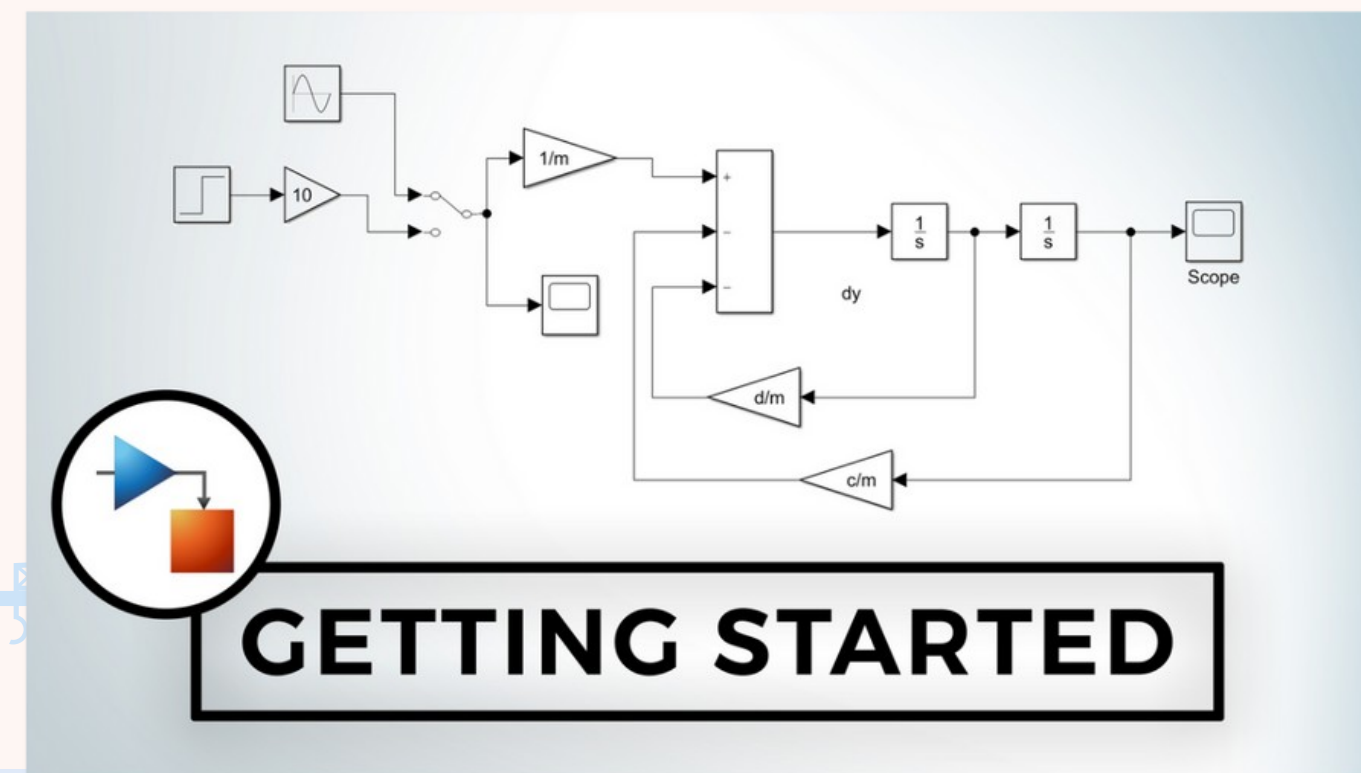
Робототехника активно развивается и находит применение в различных отраслях: промышленности, медицине, строительстве, научных исследованиях. Современные роботы выполняют сложные задачи, требующие высокой точности и надёжности.

Для достижения этих характеристик необходимо учитывать динамику манипулятора — его массу, инерцию, силы трения и гравитации. Моделирование систем управления позволяет заранее анализировать поведение робота, оптимизировать алгоритмы управления и повысить эффективность работы.

Цель работы

Целью данной работы является исследование процессов моделирования системы управления роботом с учётом динамики манипулятора. В рамках работы планируется:

- Проанализировать математические модели, описывающие движение манипулятора.
- Исследовать влияние параметров системы на точность позиционирования.
- Реализовать модель в среде MATLAB/Simulink и оценить её поведение.



Основные задачи

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- Описать структуру системы управления роботом, включая её основные компоненты.
- Вывести уравнения движения манипулятора на основе динамики.

1

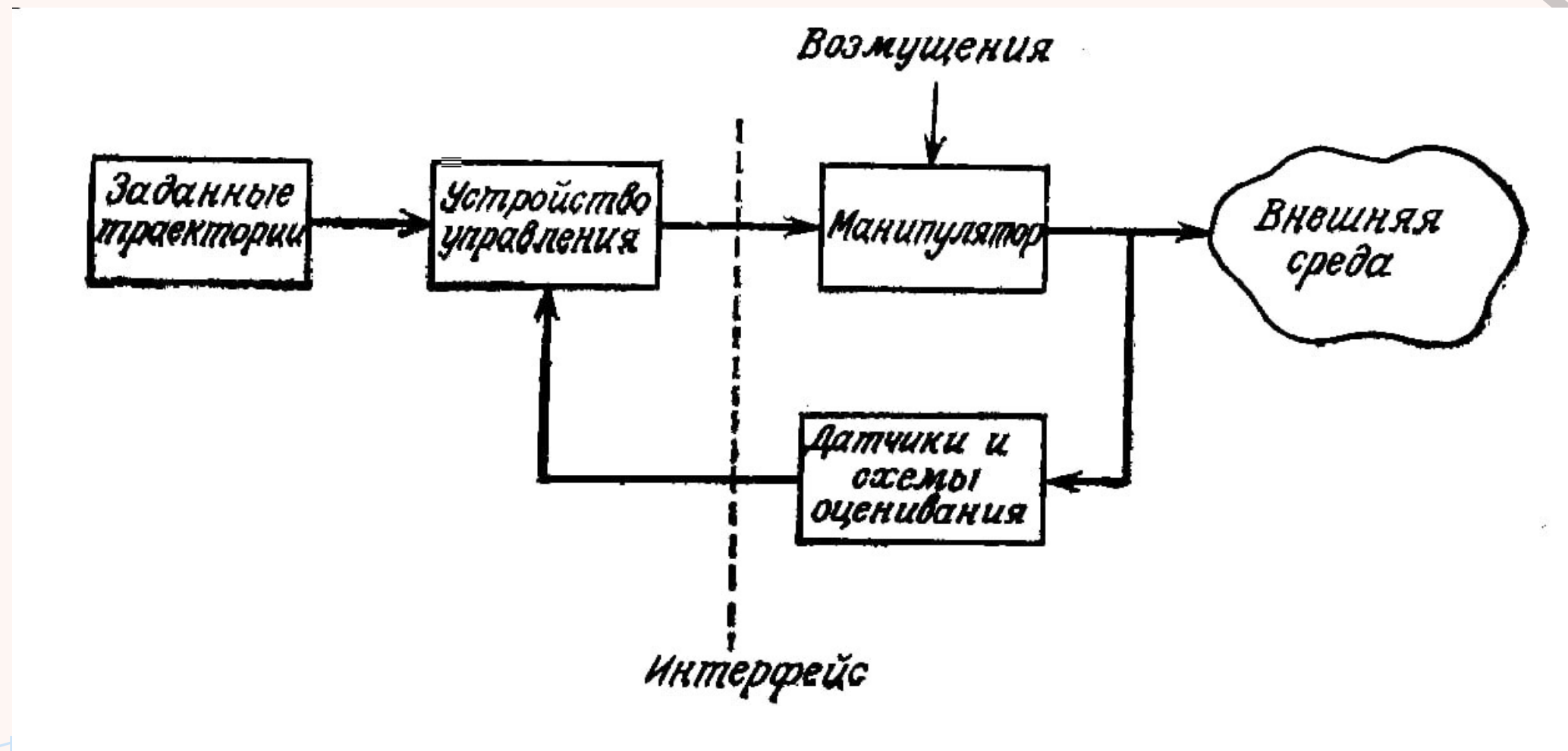
2

- Построить математическую модель и реализовать её в программной среде.
- Провести имитационное моделирование различных режимов работы.
- Оценить устойчивость системы и качество управления.

Структура системы управления роботом

Основные компоненты:

- Контроллер — вычислительное устройство, формирующее управляющие сигналы (ПИД, адаптивный, нечеткий и т.п.).
- Датчики — измеряют параметры: положение, скорость, ускорение, усилие, момент.
- Приводы — преобразуют электрическую или гидравлическую энергию в движение звеньев.
- Манипулятор — механическая часть с несколькими степенями свободы, выполняющая движение в пространстве.



Математическая модель движения

- Основное уравнение динамики:

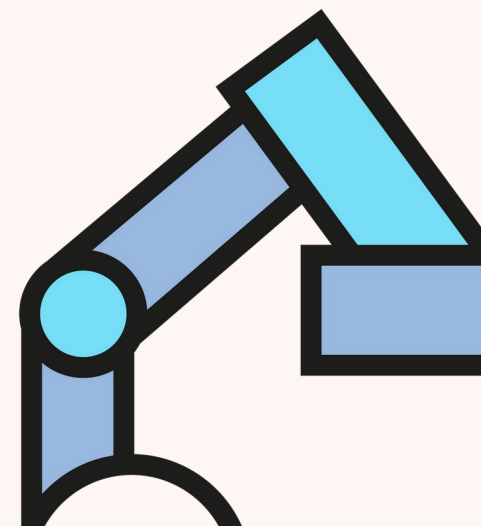
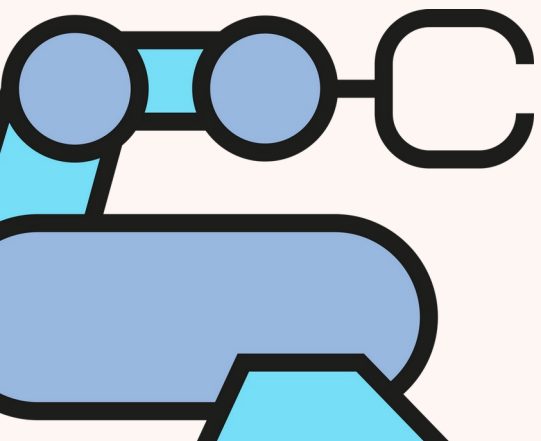
$$M(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + G(q) = \tau$$

Где:

- $M(q)$ — показывает, как масса и инерция звеньев влияют на движение.
- $C(q, \dot{q})$ — учитывает силы, возникающие при вращении звеньев (кориолисовы и центробежные).
- $G(q)$ — силы тяжести, действующие на звенья.
- τ — моменты, создаваемые приводами.
- $q, \dot{q}, \ddot{q}$ — положение, скорость и ускорение звеньев.

Зачем нужно:

- Помогает рассчитать, какие усилия должны создавать приводы. Используется при моделировании робота в Simulink. Нужна для проверки устойчивости и точности управления



Переменные состояния манипулятора

Модель манипулятора часто представляют в форме вход-состояние-выход (State-Space), что упрощает анализ и моделирование.

Основные переменные

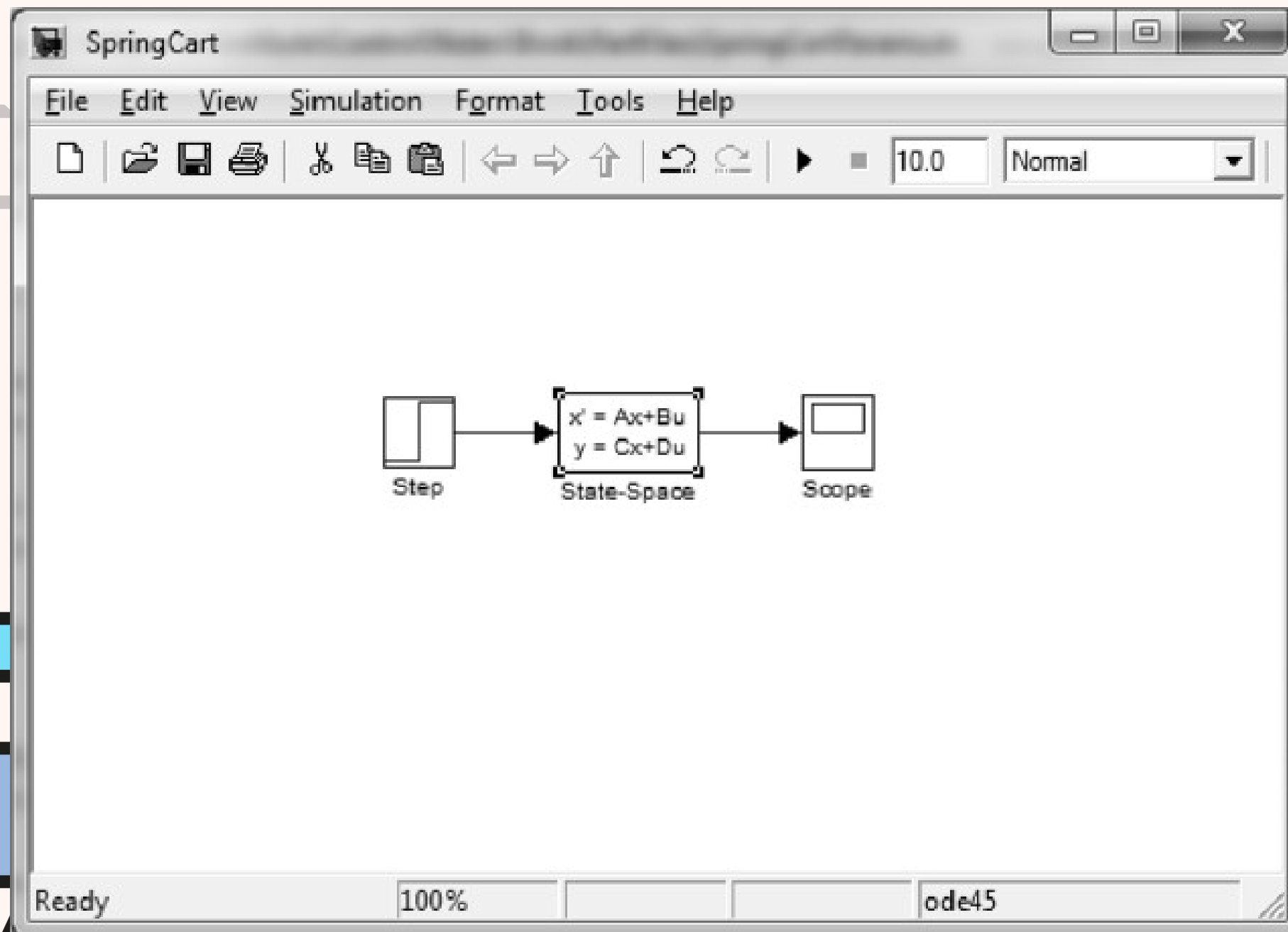
- q — обобщённые координаты
- (углы поворота или линейные смещения звеньев).
- $\dot{q} = dq/dt$ — обобщённые скорости, характеризуют скорость изменения координат.
- $\ddot{q} = d^2q/dt^2$ — обобщённые ускорения.
- τ — управляющий момент или сила, создаваемая приводом
- y — вектор выходных переменных (например, координаты рабочего органа или конца манипулятора).
- Математическая форма

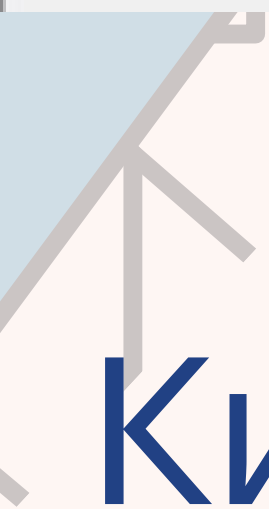
$$\dot{x} = Ax + Bu, y = Cx + Du$$

$$u \dot{x} = Ax + Bu, y = Cx + Du$$

Назначение

- Упрощает моделирование в MATLAB/Simulink
- Позволяет анализировать устойчивость
- Используется при проектировании регуляторов





Идеология моделирования: В SimMechanics блоки имитируют механическое движение одной части механизма относительно другой. Соединительные линии между блоками имитируют жесткие соединения

Динамика манипулятора

Динамическая модель — это совокупность дифференциальных (или гибридных, дифференциальных, интегро-дифференциальных и других) уравнений, описывающих поведение исследуемой системы на заданном временном интервале.

Уравнения для манипуляторов: Движение манипулятора может быть описано с помощью уравнения Лагранжа-Эйлера или Ньютона-Эйлера

$$\frac{\partial f}{\partial y} - \frac{d}{dx} \frac{\partial f}{\partial y} = 0,$$

Пример двухзвенного манипулятора

Уравнения Лагранжа второго рода:

$$d/dt(\partial L/\partial \dot{q}_i) - \partial L/\partial q_i = \tau_i$$

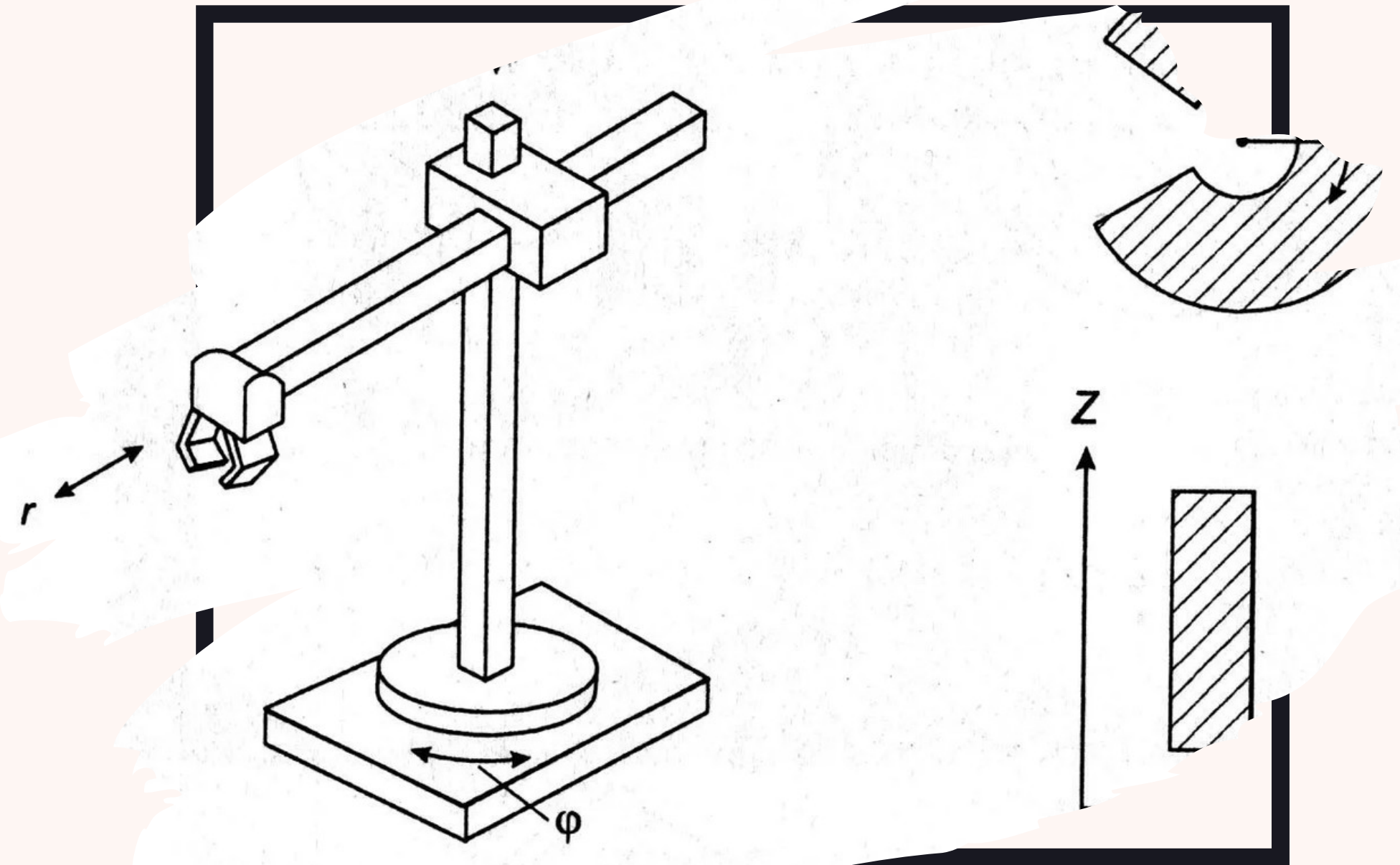
где $L = T - U$

L — Лагранжиан (разность
кинетической и потенциальной
энергий)

q_i — обобщённая координата (угол или
смещение)

$\dot{q}_i$ — скорость изменения координаты

τ_i — момент или сила, действующая на i -
е звено





Управляющие воздействия

Основная задача СУ: преобразование внешних и внутренних сигналов в управляющие воздействия. Управляющие моменты и силы должны обеспечивать максимально приближенное к заданной траектории движение

Виды управления движением (по траектории)

1. Управление движением сочленений манипулятора
2. Программное управление в декартовом пространстве (по скорости, ускорению и силе)
3. Адаптивное управление

ПИД-Регулятор

ПИД-регулятор — один из самых распространённых способов управления динамическими системами, включая роботы-манипуляторы.

- Три компоненты:
- P (пропорциональная): уменьшает текущую ошибку
- $\tau_p = K_p \cdot e(t)$
- I (интегральная): устраняет накопленную систематическую ошибку
- $\tau_i = K_i \cdot \int e(t) dt$
- D (дифференциальная): компенсирует изменение ошибки (реакция на скорость изменения)
- $\tau_d = K_d \cdot de(t)/dt$



Применение моделирования

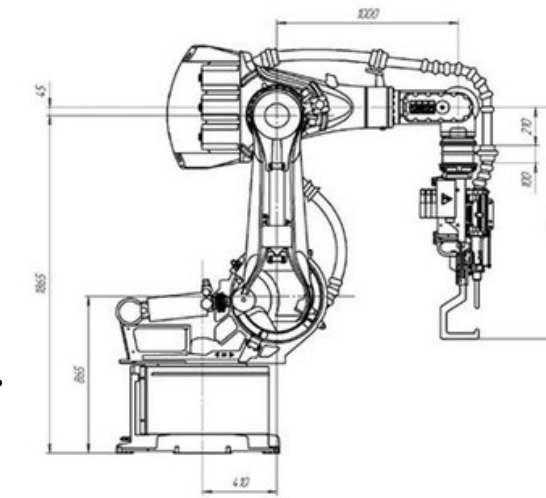
1. Проектирование промышленных роботов

1. Проектирование промышленных роботов

- Проверка кинематической и динамической схемы до физического прототипа.
- Оптимизация длин звеньев, расположения приводов, усилий и скоростей.
- Анализ точности и энергопотребления на этапе разработки.

2. Медицинская робототехника (хирургические манипуляторы)

- Отработка алгоритмов высокой точности и плавности движения.
- Моделирование взаимодействия с мягкими тканями и ограничениями рабочей зоны.
- Проверка безопасности и устойчивости к помехам.



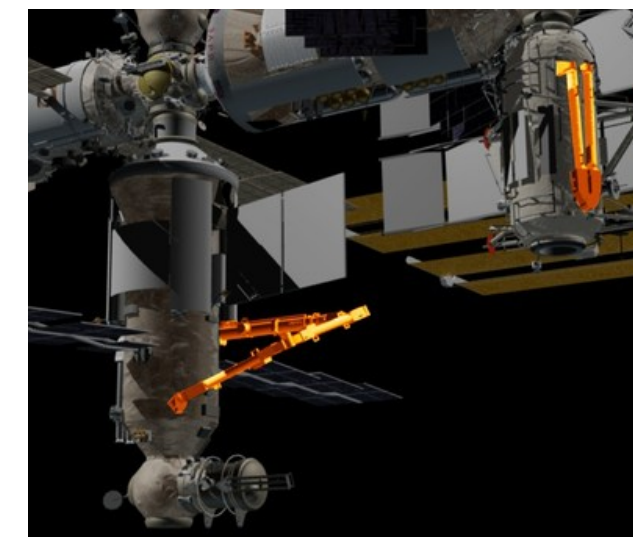
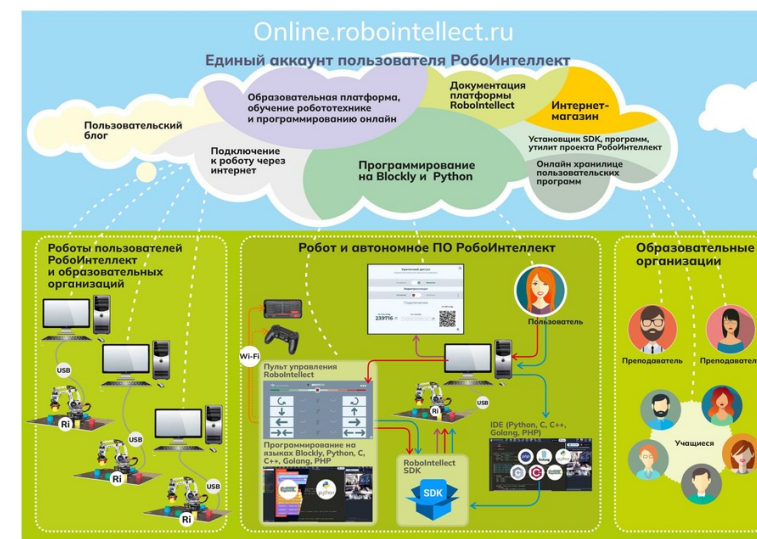
3. Космические и подводные системы

- Симуляция в условиях невесомости или повышенного сопротивления среды.
- Анализ влияния внешних сил (инерции, течений, микрогравитации).
- Оптимизация управления при ограниченной обратной связи.



4. Обучение и исследование алгоритмов управления

- Отработка PID-, LQR-, адаптивных и нейросетевых регуляторов.
 - Проверка устойчивости системы при изменении параметров.
 - Безопасное обучение операторов и тестирование новых стратегий без риска повреждения оборудования.
- Online.robointellect.ru



Вывод

В представленной работе обобщена информация по теме моделирования системы управления роботом с учётом динамики манипулятора. Рассмотрены основные принципы построения кинематических и динамических моделей, а также влияние инерционных и гравитационных факторов на поведение системы управления.

Отмечено, что моделирование позволяет исследовать характеристики робота без создания физического прототипа, что значительно повышает эффективность проектирования. Использование среды MATLAB/Simulink обеспечивает удобные средства для анализа, визуализации и проверки алгоритмов управления.

Таким образом, моделирование динамики манипуляторов является важным инструментом при разработке и оптимизации робототехнических систем, позволяя повысить точность, надёжность и предсказуемость их работы.

Контрольные вопросы

1. Что описывает кинематическая модель манипулятора?

- A) Взаимосвязь между силами и ускорениями звеньев
- B) Геометрическую зависимость между координатами звеньев
- C) Влияние гравитации на движение
- D) Изменение момента инерции

Правильный ответ: B

Контрольные вопросы

2. Что решает задача обратной кинематики?

A) Определяет силы, действующие на звенья

B) Определяет, где находится конец манипулятора

C) Находит углы поворота звеньев для достижения заданной точки

D) Рассчитывает энергию звеньев

Правильный ответ: C

Контрольные вопросы

3. Что означает символ τ_i в уравнении Лагранжа?

- A) Скорость звена
- B) Момент (сила), действующий на звено
- C) Масса звена
- D) Ускорение

Правильный ответ: B

Контрольные вопросы

4. Что представляет собой матрица $M(q)$ в динамической модели манипулятора?

A) Матрица управления

B) Матрица инерции

C) Матрица трения

D) Матрица гравитации

Правильный ответ: B

Контрольные вопросы

5. Что обозначает буква L в уравнении Лагранжа второго рода?

A) Потенциальная энергия

B) Кинетическая энергия

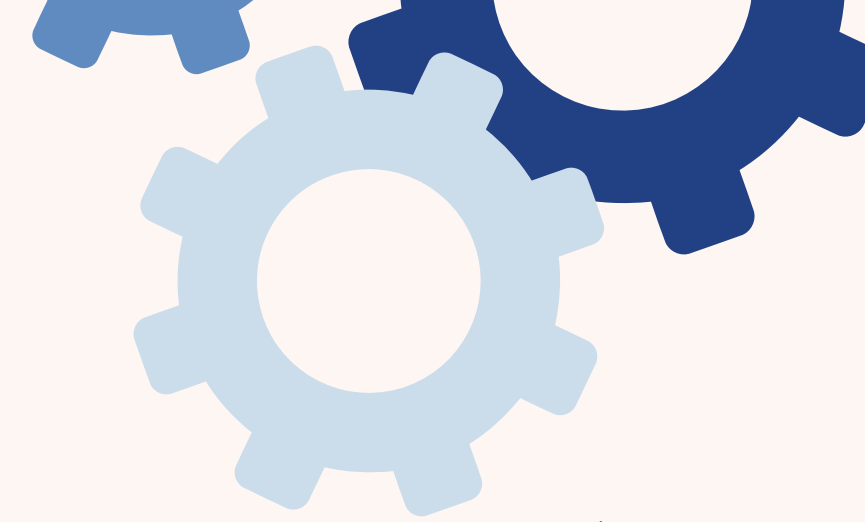
C) Разность кинетической и потенциальной энергий

D) Импульс системы

Правильный ответ: C

Список литературы

1. Spong M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M., Robot modeling and control. Wiley New York, 2006.
2. О.И. Борисов, В.С. Громов, А.А. Пыркин МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ ПРИЛОЖЕНИЯМИ. Санкт-Петербург 2016.
3. Добрачев А.А. Кинематические схемы, структуры и расчёт параметров лесопромышленных манипуляторных машин: монография / А.А. Добрачев, Л.Т. Раевская, А.В. Швец. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2014.
4. Лекция номер 9.
5. Синтез системы управления для плоского 2R робота открытой кинематики, <https://youtu.be/QsxpFHhE8uk?si=jeBavVwI7xITryNB>



Thank
You

