

**Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

**Направление подготовки/специальность: 15.03.06 Мехатроника и робототехника**

**Наименование образовательной программы: Мехатроника и робототехника**

**Уровень образования: высшее образование - бакалавриат**

**Форма обучения: Очная**

**Оценочные материалы  
по дисциплине  
Управление роботами и мехатронными устройствами**

**Москва  
2023**

## ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Разработчик

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Гавриленко А.Б.
	Идентификатор	Rfc797ba0-GavrilenkoAB-386ea3e

А.Б.  
Гавриленко

## СОГЛАСОВАНО:

Руководитель  
образовательной  
программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Адамов Б.И.
	Идентификатор	R2db20bbf-AdamovBI-4e0d2620

Б.И. Адамов

Заведующий  
выпускающей кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Меркурьев И.В.
	Идентификатор	Rd52c763c-MerkuryevIV-1e4a883f

И.В.  
Меркурьев

## ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Оценочные материалы по дисциплине предназначены для оценки: достижения обучающимися запланированных результатов обучения по дисциплине, этапа формирования запланированных компетенций и уровня освоения дисциплины.

Оценочные материалы по дисциплине включают оценочные средства для проведения мероприятий текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.

Формируемые у обучающегося компетенции:

1. ОПК-4 Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности

ИД-1 Использует современные языки и системы программирования для решения профессиональных задач

ИД-2 Применяет современные математические пакеты для моделирования и исследования динамики систем, управляемого движения мехатронных и робототехнических устройств

2. ОПК-11 Способен разрабатывать и применять алгоритмы и современные цифровые программные методы расчетов и проектирования отдельных устройств и подсистем мехатронных и робототехнических систем с использованием стандартных исполнительных и управляющих устройств, средств автоматизации, измерительной и вычислительной техники в соответствии с техническим заданием, разрабатывать цифровые алгоритмы и программы управления робототехнических систем

ИД-1 Способен проводить синтез алгоритмов управления мехатронными и робототехническими устройствами по заданным характеристикам качества регулирования

3. ПК-1 Способен участвовать в проектировании и конструировании экспериментальных макетов мехатронных и робототехнических систем, изделий детской и образовательной робототехники

ИД-1 Способен выполнять разработку схемотехнических решений и проведения расчетов опытных образцов мехатронных и робототехнических устройств, изделий детской и образовательной робототехники с применением современных компьютерных технологий

и включает:

**для текущего контроля успеваемости:**

Форма реализации: Допуск к лабораторной работе

1. Подготовка к циклу работ по управлению манипулятором youBot (Лабораторная работа)
2. Подготовка к циклу работ по управлению механум-платформой youBot (Лабораторная работа)

Форма реализации: Письменная работа

1. Кинематический анализ мобильного робота с омни-колёсами (Контрольная работа)

Форма реализации: Проверка задания

1. Динамика пространственного манипулятора (Расчетно-графическая работа)
2. Моделирование управляемого движения мобильного робота (Расчетно-графическая работа)

3. Стабилизация программного движения «неполноприводной» системы по линейному приближению (Расчетно-графическая работа)

Форма реализации: Смешанная форма

1. Защита лабораторных работ. Блок «Управление манипуляционным роботом на основе решения обратной задачи о положениях» (Лабораторная работа)
2. Защита лабораторных работ. Блок «Управление манипуляционным роботом на основе решения обратной задачи о скоростях» (Лабораторная работа)
3. Защита лабораторных работ. Блок «Управление мобильным механум-роботом youBot» (Лабораторная работа)

**БРС дисциплины**

7 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %					
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5
	Срок КМ:	3	5	8	12	15
Динамика и управление движением мобильных роботов						
Кинематика омни-роботов			+			
Управление кинематикой омни-роботов		+		+		
Динамика омни-роботов. Управление на уровне динамики					+	
Стабилизация движения мехатронных систем						
Стабилизация движения мехатронных систем						+
Вес КМ:		10	20	20	20	30

8 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %				
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
	Срок КМ:	3	7	10	11
Динамика и управление манипуляционными роботами					
Управление манипуляционным роботом KUKA youBot		+	+	+	
Динамика и управление манипуляционными роботами					+
Вес КМ:		15	25	25	35

§Общая часть/Для промежуточной аттестации§

## СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

### *I. Оценочные средства для оценки запланированных результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций*

Индекс компетенции	Индикатор	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Контрольная точка
ОПК-4	ИД-1 <sub>ОПК-4</sub> Использует современные языки и системы программирования для решения профессиональных задач	Уметь: разрабатывать программное обеспечение для моделирования и реализации алгоритмов управления манипуляционными роботами разрабатывать программное обеспечение для реализации алгоритмов управления мобильными колёсными роботами	Подготовка к циклу работ по управлению механум-платформой youBot (Лабораторная работа) Подготовка к циклу работ по управлению манипулятором youBot (Лабораторная работа)
ОПК-4	ИД-2 <sub>ОПК-4</sub> Применяет современные математические пакеты для моделирования и исследования динамики систем, управляемого движения мехатронных и робототехнических устройств	Уметь: проводить численное моделирование управляемого движения роботов и мехатронных систем в математических пакетах	Моделирование управляемого движения мобильного робота (Расчетно-графическая работа)
ОПК-11	ИД-1 <sub>ОПК-11</sub> Способен проводить синтез алгоритмов управления	Знать: основные принципы и алгоритмы управления	Защита лабораторных работ. Блок «Управление мобильным механум-роботом youBot» (Лабораторная работа) Защита лабораторных работ. Блок «Управление манипуляционным

	мехатронными и робототехническими устройствами по заданным характеристикам качества регулирования	мобильными роботами основные принципы и алгоритмы управления манипуляционными роботами основные методы стабилизации динамики мехатронных систем Уметь: проводить синтез стабилизирующего управления по оценке вектора состояния мехатронной системы разрабатывать алгоритмы управления манипуляторами на кинематическом уровне и проводить экспериментальное исследование управляемого движения разрабатывать алгоритмы управления мобильными роботами и проводить экспериментальное исследование управляемого движения	роботом на основе решения обратной задачи о положениях» (Лабораторная работа) Защита лабораторных работ. Блок «Управление манипуляционным роботом на основе решения обратной задачи о скоростях» (Лабораторная работа) Стабилизация программного движения «неполноприводной» системы по линейному приближению (Расчетно-графическая работа)
ПК-1	ИД-1ПК-1 Способен выполнять разработку схмотехнических решений и проведения расчетов опытных	Знать: основы кинематики и динамики манипуляционных роботов основы кинематики и	Кинематический анализ мобильного робота с омни-колёсами (Контрольная работа) Динамика пространственного манипулятора (Расчетно-графическая работа)

	образцов мехатронных и робототехнических устройств, изделий детской и образовательной робототехники с применением современных компьютерных технологий	динамики мобильных роботов Уметь: разрабатывать кинематические и динамические модели мобильных роботов на уровне, необходимом для решения задач управления разрабатывать динамические модели манипуляционных роботов	
--	---	---	--

## II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

7 семестр

### КМ-1. Подготовка к циклу работ по управлению механум-платформой youBot

**Формы реализации:** Допуск к лабораторной работе

**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 10

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Преподаватель проверяет правильность написания программы, необходимой для выполнения лабораторных работ цикла.

#### Краткое содержание задания:

Используя youBot API, разработать программу для управления движением платформой, снятия показаний с датчиков и записи данных в файл.

#### Контрольные вопросы/задания:

Уметь: разрабатывать программное обеспечение для реализации алгоритмов управления мобильными колёсными роботами	<ol style="list-style-type: none"><li>1.Используя youBot API, разработать программу для управления вращением колёс платформы.</li><li>2.Используя youBot API, разработать программу для снятия показаний с датчиков поворота колёс, датчиков токов (моментов) двигателей и записи данных в файл.</li><li>3.Разработать команды на языке C++ или Python для формирования программных скоростей платформы.</li><li>4.Разработать команды на языке C++ или Python для обработки информации с датчиков поворота колёс и счисления координат платформы.</li></ol>
---	--

#### Описание шкалы оценивания:

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* Предоставлен полный и корректный код программы.

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* Предоставлен полный код программы, требующий некоторой отладки.

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* Код программы неполный, содержит явные ошибки.

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* Код программы не предоставлен или является неполным.

### КМ-2. Кинематический анализ мобильного робота с омни-колёсами

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

### Вес контрольного мероприятия в БРС: 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Работа проводится в часы практических занятий. Время выполнения работы составляет 90 минут. Необходимо решить индивидуальную задачу и ответить на ряд вопросов.

### Краткое содержание задания:

Выразить скорости вращения колёс через компоненты скорости платформы  $V_L, V_T, \Omega$ . Исследовать законы вращения колёс для простейших движений платформы.

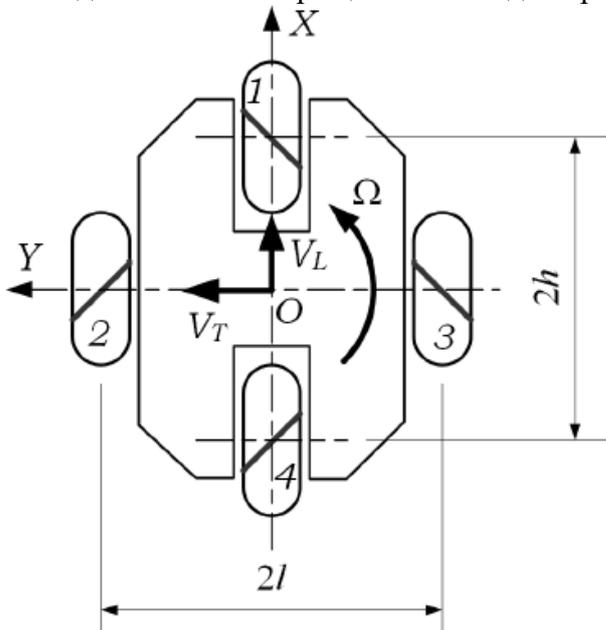


Figure 1 Схема омни-платформы

### Контрольные вопросы/задания:

Знать: основы кинематики и динамики мобильных роботов	1. Какой вид имеют кинематические условия в точке контакта идеальных омни-колёс с опорной поверхностью?  2. Какие формулы кинематики пространственного движения необходимо использовать для решения задачи?
Уметь: разрабатывать кинематические и динамические модели мобильных роботов на уровне, необходимом для решения задач управления	1. Выведите соотношения для скоростей вращения колёс. 2. Запишите выражения для скоростей вращения колёс при выполнении простейших движений платформы.

### Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 90

Описание характеристики выполнения знания: Корректно записаны кинематические условия в точках контакта колёс и кинематические уравнения. Правильно найдены формулы для скоростей вращения всех колёс.

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 75

Описание характеристики выполнения знания: Корректно записаны кинематические условия в точках контакта колёс. Кинематические уравнения могут содержать отдельные ошибки. Правильно найдены формулы для скоростей вращения хотя бы 3 колёс.

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Корректно записаны кинематические условия в точках контакта колёс. Кинематические уравнения содержат ошибки. Правильно найдены формулы для скоростей вращения хотя бы для 1-2 колёс.

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Задание не выполнено или выполнено фрагментарно, или при решении допущены грубые ошибки, в частности некорректно записаны условия в точках контакта колёс.

### КМ-3. Защита лабораторных работ. Блок «Управление мобильным механум-роботом youBot»

**Формы реализации:** Смешанная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Защита проводится в часы лабораторных работ. Студент письменно отвечает на вопросы билета. Преподаватель проверяет ответ и задаёт уточняющие и дополнительные вопросы (2-3 штуки).

**Краткое содержание задания:**

Ответить на вопросы.

**Контрольные вопросы/задания:**

<p>Знать: основные принципы и алгоритмы управления мобильными роботами</p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1.Опишите конструкцию механум-колеса и конструкцию платформы youBot.</li><li>2.Запишите расчётные формулы для определения скоростей вращения колёс робота youBot при заданных компонентах скорости платформы.</li><li>3.Какой закон используется для регулирования скорости вращения колёс робота youBot?</li><li>4.Информация о каких физических величинах доступна для формирования сигналов управления колёсами робота youBot?</li><li>5.Прокомментируйте указанный преподавателем фрагмент кода управляющей программы робота.</li><li>6.Какие допущения использованы при выводе уравнений движения платформы youBot?</li><li>7.Опишите методику идентификации параметров модели по результатам натуральных экспериментов.</li><li>8.Прокомментируйте результаты идентификации параметров расчётной динамической модели платформы youBot. Насколько точно модель описывает результаты эксперимента?</li></ol>
<p>Уметь: разрабатывать алгоритмы управления мобильными роботами и проводить экспериментальное исследование управляемого движения</p>	<p>1.Для механической системы, заданной уравнениями <math display="block">\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + d\dot{y} = -u_2, \\ \ddot{y} + e\dot{x} + k\dot{y} = u_1, \end{cases}</math> определить, <math display="block">y(0) = x(0) = 0, \dot{y}(0) = 2, \dot{x}(0) = 0;</math> какие данные необходимо получить в результате эксперимента для определения параметров <math>m, c, d, e, k</math> и записать блоки, из которых будут состоять матрицы в методе МНК.</p>

	<p>2. Для механической системы, описываемой уравнениями движения <math>\begin{cases} \ddot{x} + 2\dot{x} - 3y = 0, \\ y - 6x + 3y = 2u; \end{cases}</math> найти управление <math>u</math> в виде ПИ-регулятора по скоростям <math>\dot{x}, \dot{y}</math>. Коэффициенты усиления определить из условия максимальной степени устойчивости характеристического полинома: <math>(p + 2)^4</math>.</p>
--	---

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* Даны полные, корректные ответы на все заданные вопросы.

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* Даны в целом полные и корректные ответы на все заданные вопросы.

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* Даны неполные и/или некорректные ответы на вопросы.

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* Ответы содержат грубые ошибки, фрагментарны. Ответы не даны. Лабораторные работы не выполнены в срок.

**КМ-4. Моделирование управляемого движения мобильного робота**

**Формы реализации:** Проверка задания

**Тип контрольного мероприятия:** Расчетно-графическая работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Студент сдаёт выполненную и должным образом оформленную работу на проверку преподавателю. По результатам проверки преподаватель выставляет оценку за работу.

**Краткое содержание задания:**

Провести численное моделирование движения механум-платформы youBot вдоль заданной траектории, используя результаты экспериментального исследования динамики системы.

**Контрольные вопросы/задания:**

<p>Уметь: проводить численное моделирование управляемого движения роботов и мехатронных систем в математических пакетах</p>	<p>1. Составьте программу для численного моделирования динамики управляемого движения механум-платформы KUKA youBot. В программе должно производиться численное решение дифференциальных уравнений движения системы с величинами физических параметров, определённых в результате экспериментов.</p> <p>2. Подберите коэффициенты усиления в законах регулирования скоростями вращения колёс для следования вдоль траектории с заданной скоростью и удовлетворительной точностью.</p>
---	---

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа полностью правильно выполнена и сдана преподавателю с первой попытки.

*Оценка:* 4

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа полностью правильно выполнена и сдана преподавателю со второй попытки.

*Оценка:* 3

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа полностью правильно выполнена и сдана преподавателю с третьей попытки.

*Оценка:* 2

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа не выполнена в срок.

### **КМ-5. Стабилизация программного движения «неполноприводной» системы по линейному приближению**

**Формы реализации:** Проверка задания

**Тип контрольного мероприятия:** Расчетно-графическая работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 30

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Студент сдаёт выполненную и должным образом оформленную работу на проверку преподавателю. По результатам проверки преподаватель выставляет оценку за работу.

#### **Краткое содержание задания:**

Динамика объекта управления в линейном приближении описывается системой

уравнений  $\dot{x} = Ax + Bu$ ,  $y = Cx$ , где  $x$  - вектор состояния,  $u$  - управление,  $y$  - измеряемая величина. Матрицы  $A, B, C$  заданы.

#### **Контрольные вопросы/задания:**

<p>Знать: основные методы стабилизации динамики мехатронных систем</p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Зачем проводится исследование управляемости и наблюдаемости системы?</li><li>2. В чём состоит постановка задачи модальной стабилизации?</li><li>3. В чём состоит постановка задачи оптимальной стабилизации?</li><li>4. В чём состоит назначение наблюдателя вектора состояния в составе системы управления?</li></ol>
<p>Уметь: проводить синтез стабилизирующего управления по оценке вектора состояния мехатронной системы</p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Исследовать систему на управляемость.</li><li>2. Исследовать систему на наблюдаемость.</li><li>3. Провести синтез стабилизирующего модального управления в виде обратной связи.</li><li>4. Провести синтез стабилизирующего управления в виде обратной связи, решив линейно-квадратичную задачу оптимального управления.</li><li>5. Провести численное моделирование процессов управления по вектору состояния в математическом пакете.</li><li>6. Произвести синтез асимптотического наблюдателя для рассматриваемой динамической системы.</li><li>7. Провести численное моделирование процессов управления по оценке состояния в математическом пакете.</li></ol>

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа полностью правильно выполнена и сдана преподавателю с первой попытки.

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа полностью правильно выполнена и сдана преподавателю со второй попытки.

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа полностью правильно выполнена и сдана преподавателю с третьей попытки.

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа не выполнена в срок.

**8 семестр****КМ-1. Подготовка к циклу работ по управлению манипулятором youBot**

**Формы реализации:** Допуск к лабораторной работе

**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 15

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Преподаватель проверяет правильность написания программы, необходимой для выполнения лабораторных работ цикла.

**Краткое содержание задания:**

Используя youBot API, разработать программу для позиционирования звеньев манипулятора, снятия показаний с датчиков и записи данных в файл.

**Контрольные вопросы/задания:**

<p>Уметь: разрабатывать программное обеспечение для моделирования и реализации алгоритмов управления манипуляционными роботами</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Используя youBot API, разработать программу для позиционирования звеньев платформы на заданный угол с проверкой попадания величины угла в допустимый диапазон.</li> <li>Используя youBot API, разработать программу для снятия показаний с датчиков поворота звеньев, датчиков токов (моментов) двигателей и записи данных в файл.</li> <li>Разработать команды на языке C++ или Python для формирования углов в сочленениях при выполнении траекторного движения.</li> <li>Разработать программу в MATLAB или Scilab для проверки корректности расчётов углов поворота звеньев при выполнении траекторного движения.</li> </ol>
--	---

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* Предоставлен полный и корректный код программы.

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* Предоставлен полный код программы, требующий некоторой отладки.

*Оценка:* 3

*Описание характеристики выполнения знания:* Код программы неполный, содержит явные ошибки.

*Оценка:* 2

*Описание характеристики выполнения знания:* Код программы не предоставлен или является неполным.

## **КМ-2. Защита лабораторных работ. Блок «Управление манипуляционным роботом на основе решения обратной задачи о положениях»**

**Формы реализации:** Смешанная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 25

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Защита проводится в часы лабораторных работ. Студент письменно отвечает на вопросы билета. Преподаватель проверяет ответ и задаёт уточняющие и дополнительные вопросы (2-3 штуки).

### **Краткое содержание задания:**

Ответить на вопросы.

### **Контрольные вопросы/задания:**

Знать: основные принципы и алгоритмы управления манипуляционными роботами	<ol style="list-style-type: none"><li>1.Каков принцип управления манипулятором по положению?</li><li>2.Сформулируйте постановку обратной задачи о положениях.</li><li>3.В чём преимущества и недостатки аналитических и численных методов решения обратной задачи о положениях?</li><li>4.Какие численные методы решения обратной задачи о положениях Вам известны?</li></ol>
Уметь: разрабатывать алгоритмы управления манипуляторами на кинематическом уровне и проводить экспериментальное исследование управляемого движения	<ol style="list-style-type: none"><li>1.Напишите фрагмент кода программы для аналитического решения обратной задачи о положениях робота youBot.</li><li>2.Напишите фрагмент кода программы для численного решения обратной задачи о положениях робота youBot методом Ньютона. Показания каких датчиков необходимы для реализации метода?</li><li>3.Выведите расчётные формулы для аналитического решения обратной задачи о положениях манипулятора youBot.</li></ol>

### **Описание шкалы оценивания:**

*Оценка:* 5

*Описание характеристики выполнения знания:* Даны полные, корректные ответы на все заданные вопросы.

*Оценка:* 4

*Описание характеристики выполнения знания:* Даны в целом полные и корректные ответы на все заданные вопросы.

Оценка: 3

Описание характеристики выполнения знания: Даны неполные и/или некорректные ответы на вопросы.

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Ответы содержат грубые ошибки, фрагментарны. Ответы не даны. Лабораторные работы не выполнены в срок.

**КМ-3. Защита лабораторных работ. Блок «Управление манипуляционным роботом на основе решения обратной задачи о скоростях»**

**Формы реализации:** Смешанная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 25

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Защита проводится в часы лабораторных работ. Студент письменно отвечает на вопросы билета. Преподаватель проверяет ответ и задаёт уточняющие и дополнительные вопросы (2-3 штуки).

**Краткое содержание задания:**

Ответить на вопросы.

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: основные принципы и алгоритмы управления манипуляционными роботами	<ol style="list-style-type: none"><li>1.Сформулируйте принцип управления манипулятором по вектору скорости.</li><li>2.Сформулируйте постановку обратной задачи о скоростях манипулятора.</li><li>3.Запишите расчётные формулы для решения обратной задачи о скоростях манипулятора youBot.</li><li>4.Объясните методику использования управления по вектору скорости в задача реализации программного движения схвата.</li><li>5.Какие методы численного интегрирования используются в работе для вычисления углов в сочленениях?</li></ol>
Уметь: разрабатывать алгоритмы управления манипуляторами на кинематическом уровне и проводить экспериментальное исследование управляемого движения	<ol style="list-style-type: none"><li>1.Напишите фрагмент кода программы для задания скорости поворота звена манипулятора с проверкой попадания прогнозируемого значения угла поворота в допустимый диапазон.</li><li>2.Напишите фрагмент кода программы для формирования компонент скорости схвата с обратной связью по ошибке позиционирования.</li><li>3.Докажите работоспособность используемого метода стабилизации программного движения схвата с помощью обратной связи по ошибкам позиционирования.</li></ol>

**Описание шкалы оценивания:**

Оценка: 5

Описание характеристики выполнения знания: Даны полные, корректные ответы на все заданные вопросы.

Оценка: 4

*Описание характеристики выполнения знания:* Даны в целом полные и корректные ответы на все заданные вопросы.

*Оценка:* 3

*Описание характеристики выполнения знания:* Даны неполные и/или некорректные ответы на вопросы.

*Оценка:* 2

*Описание характеристики выполнения знания:* Ответы содержат грубые ошибки, фрагментарны. Ответы не даны. Лабораторные работы не выполнены в срок.

#### КМ-4. Динамика пространственного манипулятора

**Формы реализации:** Проверка задания

**Тип контрольного мероприятия:** Расчетно-графическая работа

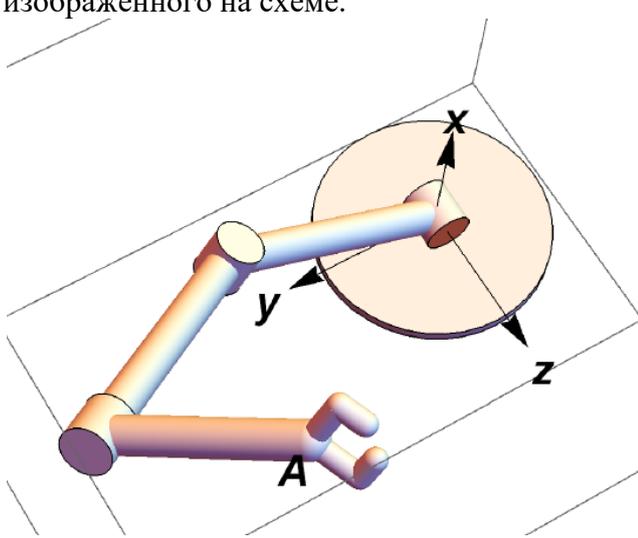
**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 35

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Студент сдаёт выполненную и должным образом оформленную работу на проверку преподавателю. По результатам проверки преподаватель выставляет оценку за работу.

**Краткое содержание задания:**

Вывести уравнения динамики пространственного манипулятора, используя уравнения Лагранжа II рода

**Контрольные вопросы/задания:**

<p>Знать: основы кинематики и динамики манипуляционных роботов</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Запишите формулу для вычисления кинетической энергии манипулятора.</li> <li>2. Запишите формулу для вычисления обобщённых сил.</li> <li>3. Запишите уравнения Лагранжа II рода.</li> </ol>
<p>Уметь: разрабатывать динамические модели манипуляционных роботов</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Составьте уравнения движения манипулятора, изображённого на схеме.</li> </ol>  <p><b>Figure 2</b> Схема манипулятора</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. По заданным законам изменения обобщённых координат манипулятора определите требуемые величины моментов двигателей.</li> </ol>

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка:* 5

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа полностью правильно выполнена и сдана преподавателю с первой попытки.

*Оценка:* 4

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа полностью правильно выполнена и сдана преподавателю со второй попытки.

*Оценка:* 3

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа полностью правильно выполнена и сдана преподавателю с третьей попытки.

*Оценка:* 2

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа не выполнена в срок.

# СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

7 семестр

Форма промежуточной аттестации: Экзамен

Пример билета

1. Простейшая модель омни-колёса. Кинематический анализ простейших движений робота *KUKA youBot*.
2. Решение задачи идентификации параметров модели механум-платформы и численного моделирования её движения в математических пакетах.

### 3. Задача

Решите задачу модального управления системой  $\dot{x} = Ax + bu$ , где  $x = (x_1 \ x_2)^T$ .

$$A = \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ -1 & -2 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} -3 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Требуемый вид характеристического полинома  $p_d(\lambda) = (\lambda + 3)^2$ .

Figure 3 Пример задачи

### 4. Задача

Решите линейно-квадратичную задачу оптимального управления:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = u, \end{cases} \quad J = \int_0^{\infty} (4x_1^2 + 5x_2^2 + u^2) dt \rightarrow \min$$

Figure 4 Пример задачи

## Процедура проведения

Экзамен проводится по билетам в устной форме. Время на подготовку ответа составляет 90 минут. При необходимости экзаменатор может задать студенту уточняющие вопросы по билету и дополнительные вопросы из экзаменационной программы.

### *1. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины*

**1. Компетенция/Индикатор:** ИД-1<sub>ОПК-4</sub> Использует современные языки и системы программирования для решения профессиональных задач

### Вопросы, задания

1. Возможности youBot API для управления движением мобильной механум-платформы и получения информации с датчиков.

### Материалы для проверки остаточных знаний

1. Для каких целей используется следующий фрагмент программного кода для управления механум-платформой youBot (с использованием youBot API):

```
myYouBotBase->getBaseJoint(1).getData(sensedAngle);  
phi1 =-(sensedAngle.angle)/radian;  
myYouBotBase->getBaseJoint(2).getData(sensedAngle);  
phi2 =(sensedAngle.angle)/radian;  
myYouBotBase->getBaseJoint(3).getData(sensedAngle);  
phi3 =-(sensedAngle.angle)/radian;  
myYouBotBase->getBaseJoint(4).getData(sensedAngle);  
phi4 =(sensedAngle.angle)/radian;
```

Ответы:

- 1) Измерения углов поворота звеньев манипулятора
- 2) Измерения углов поворота колёс платформы
- 3) Измерения скоростей вращения колёс платформы

4) Задания величин углов поворота колёс платформы в градусах

Верный ответ: 2)

**2. Компетенция/Индикатор:** ИД-2<sub>ОПК-4</sub> Применяет современные математические пакеты для моделирования и исследования динамики систем, управляемого движения мехатронных и робототехнических устройств

### Вопросы, задания

1. Решение задачи идентификации параметров модели механум-платформы и численного моделирования её движения в математических пакетах.

### Материалы для проверки остаточных знаний

1. Для каких целей используется следующий фрагмент программного кода в пакете Wolfram Mathematica:

```
Vd = 0.6 ;
e = Vd - V[t];
u = KP e + KI Int[t] + KD D[e, t];
|дифференцировать
U = Sat[u, Umax];
tf = 1;
slv = NDSolve[{
|численно решить ДУ
m V'[t] + g V[t] + F1/R Sgn[V[t]] == (C1 U - C2 V[t]/R) / R,
int'[t] == e,
int[0] == 0, V[0] == 0
} /. {KP -> kP, KD -> kD, KI -> kI, Umax -> Um},
{V, int}, {t, 0, tf}, Method -> {"EquationSimplification" -> "Residual"}
|метод
] {}];
|-----|
```

Ответы:

- 1) Численное моделирование динамики продольного движения колёсной платформы с ПИД-регулятором по углам поворота колёс
- 2) Численное моделирование динамики продольного движения колёсной платформы с ПИД-регулятором по скорости вращения колёс
- 3) Численное моделирование динамики продольного движения колёсной платформы с ПИД-регулятором по скорости платформы
- 4) Численное моделирование динамики продольного движения колёсной платформы с ПИД-регулятором по координате платформы

Верный ответ: 3)

**3. Компетенция/Индикатор:** ИД-1<sub>ОПК-11</sub> Способен проводить синтез алгоритмов управления мехатронными и робототехническими устройствами по заданным характеристикам качества регулирования

### Вопросы, задания

1. Обзор методов навигации мобильных роботов. Алгоритм одометрической навигации механум-платформы.
2. Идентификация параметров модели поступательного движения механум-платформы с помощью МНК.
3. Управление поступательным движением колёсной платформы с помощью ПИД-регулятора. Условие устойчивости. Астатизм ПИД-регулятора.
4. Алгоритмы управления вращением колёс робота *KUKA youBot*.
5. Полная управляемость линейной системы. Полная наблюдаемость линейных систем. Критерии Калмана полной управляемости и полной наблюдаемости стационарных систем.
6. Исследование управляемости и наблюдаемости линеаризованной системы уравнений движения  $x_1 = x_2, x_2 = 2x_1 + 4u, x_3 = -x_1 - u, y = x_2 - x_3$ .
7. Задача модального управления. Модальная стабилизация. Формула Аккермана.

8. Линейно-квадратичная задача оптимального управления. Стационарный случай. Структура закона управления. Алгебраическое уравнение Риккати.
9. Асимптотический наблюдатель вектора состояния линейной системы. Критерий выбора коэффициентов наблюдателя. Фильтр Калмана.
10. Управление по оценке состояния. Структурная схема. Теорема о разделении.

### Материалы для проверки остаточных знаний

1. Какие задачи из перечисленных решает навигационная система мобильного робота? (Укажите все варианты)

Ответы:

- 1) Построение маршрута движения
- 2) Расчёт управляющих напряжений
- 3) Расчёт задающих значений скоростей платформы для следования вдоль траектории
- 4) Определение положения робота в пространстве

Верный ответ: 1), 4)

2. Для регулирования скорости вращения колеса робота можно использовать ПИД-регулятор по ошибке скорости вращения колеса. Каково назначение интегральной обратной связи в законе регулирования?

Ответы:

- 1) Улучшение запаса устойчивости системы
- 2) Повышение точности регулирования за счёт компенсации постоянно действующих возмущений
- 3) Обеспечение астатизма 2 порядка
- 4) Снижение энергозатрат на регулирование

Верный ответ: 2)

3. Что такое “неполноприводный” робот (underactuated robot)?

Ответы:

- 1) Робот, у которого число степеней свободы меньше числа управляющих воздействий
- 2) Робот, у которого число степеней свободы превышает число управляющих воздействий
- 3) Робот, имеющий резервные источники питания
- 4) Робот, не имеющий резервных источников питания

Верный ответ: 2)

4. С какой целью проводится исследование наблюдаемости динамической системы?

Ответы:

- 1) Чтобы определить, возможно ли произвольным образом менять переменные состояния с помощью имеющихся управляющих воздействий
- 2) Чтобы определить время, необходимое для оценивания переменных состояния
- 3) Чтобы определить, можно ли получить точные оценки всех переменных состояния при наличии безошибочных измерений с имеющихся датчиков
- 4) Исследовать устойчивость фильтра Калмана

Верный ответ: 3)

5. С какой целью используются наблюдатели вектора состояния, такие, как фильтр Калмана?

Ответы:

- 1) Для расчёта управляющих воздействий
- 2) Для нахождения оценок переменных состояния
- 3) Для исследования управляемости системы
- 4) Для исследования наблюдаемости системы

Верный ответ: 2)

6. Перечисленные формулы

$$u = -Kx, K = R^{-1}B^T P, PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$$

используются для:

Ответы:

- 1) Решения задачи модальной стабилизации неустойчивой системы
- 2) Решения задачи оптимальной стабилизации стационарной линейной системы
- 3) Оценивания вектора состояния системы
- 4) Исследования наблюдаемости

Верный ответ: 2)

7. Полная управляемость линейной стационарной системы позволяет: (укажите все ответы)

Ответы:

- 1) Оценить все переменные состояния
- 2) Стабилизировать систему
- 3) Получить решение задачи модального управления
- 4) Менять переменные состояния произвольным образом

Верный ответ: 2), 3), 4)

8. Решение задачи оптимальной стабилизации требует решения матричного уравнения Риккати. Как оно выглядит?

Ответы:

- 1)  $PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P - Q = 0$
- 2)  $PA + A^T P + PBR^{-1}B^T P + Q = 0$
- 3)  $PA - A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$
- 4)  $PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$

Верный ответ: 4)

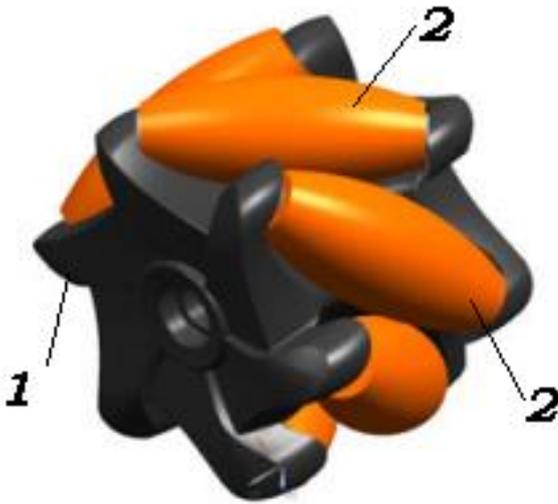
**4. Компетенция/Индикатор:** ИД-1ПК-1 Способен выполнять разработку схемотехнических решений и проведения расчетов опытных образцов мехатронных и робототехнических устройств, изделий детской и образовательной робототехники с применением современных компьютерных технологий

#### Вопросы, задания

1. Классификация омни-колёс. Сферы применения мобильных систем с омни-колёсами. Простейшие кинематические модели омни-колёс.
2. Простейшая модель механум-колеса. Кинематический анализ четырёхколёсной механум-платформы робота *KUKA youBot*.
3. Простейшая модель омни-колёса. Кинематический анализ простейших движений робота *KUKA youBot*.
4. Восстановление компонент скорости механум-платформы по измерениям скоростей вращения колёс.
5. Кинематический алгоритм стабилизации программного движения мобильной платформы *KUKA youBot*.
6. Исследование кинематики поступательного движения механум-платформы *youBot* с учётом вращения роликов.
7. Исследование динамики поступательного движения механум-платформы *youBot* с учётом сухого трения на валах колёс и осях роликов.
8. Неполноприводные роботы (underactuated robots). Примеры. Транспортное средство segway как неполноприводная система. Линеаризация уравнений динамики segway.

#### Материалы для проверки остаточных знаний

1. На рисунке изображено:



Ответы:

- 1) Универсальное омни-колесо
- 2) Меканум-колесо
- 3) Сферическое колесо

Верный ответ: 2)

2. На рисунке изображено:



Ответы:

- 1) Универсальное омни-колесо
- 2) Меканум-колесо
- 3) Сферическое колесо

Верный ответ: 1)

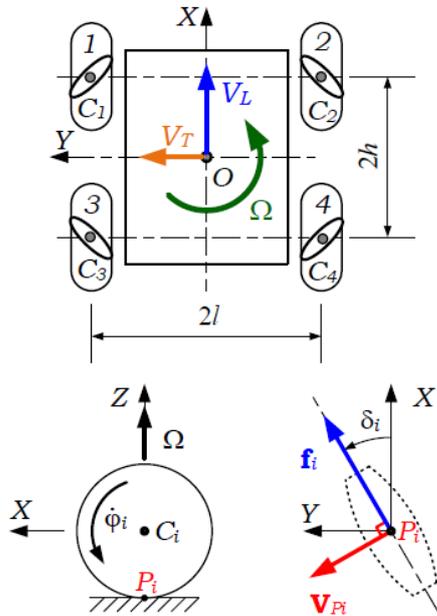
3. Меканум- и омни-колёса оснащены периферийными пассивными роликами. Для чего используются такие колёса? (Указать все варианты ответа)

Ответы:

- 1) Движения мобильных роботов по пересечённой местности
- 2) Движения робота по поверхностям с плохим сцеплением
- 3) Реализации движения по произвольной траектории с произвольной угловой ориентацией
- 4) В качестве рояльных колёс
- 5) В составе приводов сферических колёс

Верный ответ: 3), 4), 5)

4. На схеме изображена меканум-платформа. Направления овалов на колёсах характеризуют расположение контактирующих с полом роликов.



Найдите скорости вращения колёс  $\varphi_{1,2,3,4}$  при поступательном движении платформы вбок:  $V_L = 0, V_T = V, \Omega = 0$

Ответы:

- 1)  $\varphi_1 = -\frac{V}{R}, \varphi_2 = -\frac{V}{R}, \varphi_3 = -\frac{V}{R}, \varphi_4 = -\frac{V}{R}$
- 2)  $\varphi_1 = -\frac{V}{R}, \varphi_2 = \frac{V}{R}, \varphi_3 = \frac{V}{R}, \varphi_4 = -\frac{V}{R}$
- 3)  $\varphi_1 = -\frac{V}{R}, \varphi_2 = \frac{V}{R}, \varphi_3 = -\frac{V}{R}, \varphi_4 = \frac{V}{R}$
- 4)  $\varphi_1 = -\frac{V}{R}, \varphi_2 = \frac{V}{R}, \varphi_3 = \frac{V}{R}, \varphi_4 = \frac{V}{R}$

Верный ответ: 2)

## II. Описание шкалы оценивания

Оценка: 5

Описание характеристики выполнения знания: Даны полные правильные обоснованные ответы на все вопросы билета и дополнительные вопросы

Оценка: 4

Описание характеристики выполнения знания: Даны полные и правильные ответы три вопроса билета из четырёх, на оставшийся вопрос дан либо неполны, либо частично правильный ответ.

Оценка: 3

Описание характеристики выполнения знания: Даны неполные, частично ошибочные ответы на два теоретических вопроса. Правильно решена хотя бы одна задача

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Ответы на вопросы не даны или фрагментарны или содержат грубые ошибки

### III. Правила выставления итоговой оценки по курсу

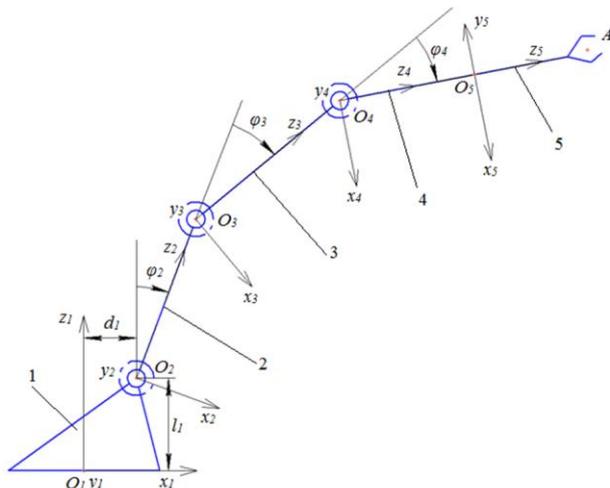
Оценка за экзамен определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ» на основании семестровой и экзаменационной составляющих.

#### 8 семестр

Форма промежуточной аттестации: Экзамен

#### Пример билета

1. Аналитическое и численное решение обратной задачи о положениях манипулятора *KUKA youBot* в вертикальной плоскости.
2. Алгоритмы управления манипуляторами с компенсацией гравитационных сил, перекрёстных связей.
3. Найти якобиан манипулятора



#### Процедура проведения

Экзамен проводится по билетам в устной форме. Время на подготовку ответа составляет 90 минут. При необходимости экзаменатор может задать студенту уточняющие вопросы по билету и дополнительные вопросы из экзаменационной программы.

#### I. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины

**1. Компетенция/Индикатор:** ИД-1опк-4 Использует современные языки и системы программирования для решения профессиональных задач

#### Вопросы, задания

1. Возможности youBot API для управления движением звеньев манипулятора, пальцев устройства захвата и получения информации с датчиков.

#### Материалы для проверки остаточных знаний

1. Для каких целей используется следующий фрагмент программного кода для управления роботом youBot (с использованием youBot API):  
`desiredJointAngle.angle = -0.11 * radian;`  
`myYouBotManipulator->getArmJoint(3).setData(desiredJointAngle);`

```
desiredJointAngle.angle = 0.11 * radian;  
myYouBotManipulator->getArmJoint(4).setData(desiredJointAngle);  
barSpacing1.barSpacing = 0.02 * meter;  
myYouBotManipulator->getArmGripper().setData(barSpacing1);
```

Ответы:

- 1) Задания углов поворота во всех сочленениях манипулятора
- 2) Задания угловых скоростей поворота всех звеньев манипулятора
- 3) Задания углов поворота звеньев 3 и 4
- 4) Задания углов поворота звеньев 3 и 4, а также расстояния между пальцами манипулятора

Верный ответ: 4)

2. Для каких целей используется следующий фрагмент программного кода для управления роботом youBot (с использованием youBot API):

```
myYouBotManipulator->getArmJoint(2).getData(sensedTorque);  
trq2 =(sensedTorque.torque)/newton_meter;  
myYouBotManipulator->getArmJoint(3).getData(sensedTorque);  
trq3 =(sensedTorque.torque)/newton_meter;  
myYouBotManipulator->getArmJoint(2).getData(sensedAngle);  
phi2q =-1.1345+(sensedAngle.angle)/radian;  
myYouBotManipulator->getArmJoint(3).getData(sensedAngle);  
phi3q = 2.5654+(sensedAngle.angle)/radian;
```

Ответы:

- 1) Измерения углов и моментов во втором и третьем сочленениях манипулятора
- 2) Измерения углов и моментов во сочленениях манипулятора
- 3) Задания углов и моментов во сочленениях манипулятора
- 4) Задания угловых скоростей во втором и третьем сочленениях манипулятора

Верный ответ: 1)

**2. Компетенция/Индикатор:** ИД-2<sub>ОПК-4</sub> Применяет современные математические пакеты для моделирования и исследования динамики систем, управляемого движения мехатронных и робототехнических устройств

### Вопросы, задания

1. Численное моделирование траекторного движения манипулятора youBot при различных способах управления в математических пакетах.

### Материалы для проверки остаточных знаний

1. Для каких целей используется следующий фрагмент программного кода в пакете Wolfram Mathematica:

```

d1 = 0.033;
l1 = 0.075;
l2 = 0.155;
l3 = 0.135;
l4 = 0.081;
l5 = 0.137;
l45 = l4 + l5;
par = {D1 → d1, L1 → l1, L2 → l2, L3 → l3, L45 → l45, ωmax → 1.5};
x1A0 = D1 + L2 Sin[φ2] + L3 Sin[φ2 + φ3] + L45 Sin[φ2 + φ3 + φ4];
z1A0 = L1 + L2 Cos[φ2] + L3 Cos[φ2 + φ3] + L45 Cos[φ2 + φ3 + φ4];
x1A = x1A0 / . par;
z1A = z1A0 / . par;
θ = φ2 + φ3 + φ4;
q = {φ2, φ3, φ4};
X = {x1A0, z1A0, θ};
J = D[X, {q}];

```

Ответы:

- 1) Вычисления скоростей рабочего органа манипулятора
- 2) Вычисления координат рабочего органа плоского манипулятора и его якобиана
- 3) Вычисления координат и скоростей рабочего органа плоского манипулятора
- 4) Решения обратной задачи о положениях манипулятора

Верный ответ: 2)

**3. Компетенция/Индикатор:** ИД-1<sub>ОПК-11</sub> Способен проводить синтез алгоритмов управления мехатронными и робототехническими устройствами по заданным характеристикам качества регулирования

#### Вопросы, задания

1. Алгоритмы позиционирования звеньев манипулятора *KUKA youBot*.
2. Управление звеном манипулятора (статическая модель электропривода, ПИ-закон формирования управляющего напряжения). Устойчивость системы управления. Точность позиционирования при постоянном и переменном задающем воздействии, влияние интегральной обратной связи.
3. Управление звеном манипулятора с учётом динамики электропривода (ПИ-закон формирования управляющего напряжения). Устойчивость системы управления. Точность позиционирования.
4. Управление по вектору положения, скорости, силы.
5. Алгоритмы управления манипуляторами с компенсацией гравитационных сил, перекрёстных связей.

**4. Компетенция/Индикатор:** ИД-1<sub>ПК-1</sub> Способен выполнять разработку схмотехнических решений и проведения расчетов опытных образцов мехатронных и робототехнических устройств, изделий детской и образовательной робототехники с применением современных компьютерных технологий

#### Вопросы, задания

1. Манипулятор робота *KUKA youBot*. Кинематическая схема. Решение прямой задачи кинематики манипулятора (в вертикальной плоскости).
2. Аналитическое и численное решение обратной задачи о положениях манипулятора *KUKA youBot* в вертикальной плоскости.
3. Динамика манипуляционных роботов. Уравнения Лагранжа II рода.
4. Силовой якобиан. Управление по вектору силы

#### Материалы для проверки остаточных знаний

1. Управление манипулятором по вектору скорости требует решения:

Ответы:

- 1) Обратной задачи о положениях
- 2) Прямой задачи о скоростях
- 3) Обратной задачи о скоростях
- 4) Прямой задачи о положениях

Верный ответ: 3)

2. Уравнения динамики манипулятора можно составить, пользуясь уравнениями Лагранжа второго рода (уравнениями Эйлера-Лагранжа). Какая формула их определяет?

Ответы:

- 1)  $\frac{\partial S}{\partial \vec{\pi}} = \vec{\Pi}$
- 2)  $H^T \left( \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\vec{q}}} - \frac{\partial T}{\partial \vec{q}} \right) = \vec{\Pi}, \dot{\vec{q}} = H \vec{\pi}$
- 3)  $\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\vec{q}}} - \frac{\partial T}{\partial \vec{q}} = \vec{Q}$
- 4)  $\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\vec{q}}} + \frac{\partial T}{\partial \vec{q}} = -\vec{Q}$

Верный ответ: 3)

3. Управление манипулятором по вектору положения требует решения:

Ответы:

- 1) Обратной задачи о положениях
- 2) Прямой задачи о скоростях
- 3) Обратной задачи о скоростях
- 4) Прямой задачи о положениях

Верный ответ: 1)

4. В задач управления манипуляторами по вектору силы используется силовой якобиан. Как можно получить эту матрицу?

Ответы:

- 1) Обращением якобиана скоростей
- 2) Транспонированием якобиана скоростей
- 3) Как  $J^T J$ , где J - якобиан скоростей
- 4) Как  $J J^T$ , где J - якобиан скоростей

Верный ответ: 2)

## II. Описание шкалы оценивания

Оценка: 5

Описание характеристики выполнения знания: Даны полные правильные обоснованные ответы на все вопросы билета и дополнительные вопросы

Оценка: 4

Описание характеристики выполнения знания: Ответы на все вопросы билета и дополнительные вопросы правильные и обоснованные, содержат неточности или небольшое количество ошибок

Оценка: 3

Описание характеристики выполнения знания: Ответы в целом правильные, содержат неточности и ошибки. Решена задача

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Ответы на вопросы не даны или фрагментарны или содержат грубые ошибки

### ***III. Правила выставления итоговой оценки по курсу***

Оценка за экзамен определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ» на основании семестровой и экзаменационной составляющих.