

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук  
(ИПМех РАН)

«Утверждаю»  
Директор ИПМех РАН

 Д.ф.-м.н.  
С.Е. Якуш

« 28 » сентября 2018 г.

Рабочая программа учебной дисциплины (РПУД)  
«Механика робототехнических систем»

Направление подготовки 01.06.01 Математика и механика  
Специальность 01.02.01 Теоретическая механика

Форма подготовки (очная)  
Отдел аспирантуры ИПМех РАН

**Курс 1**

Всего часов – 144, всего зачетных единиц – 4

Аудиторных часов – 144, в том числе:

лекции – 72 часа

семинары – 72 часа

Формы аттестации:

Семестр	Форма контроля	Часы
1	<i>Дифференциальный зачет</i>	72
2	<i>Экзамен</i>	72

Рабочая программа составлена в соответствии с Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки России) от 30 июля 2014 г. № 866 "Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 01.06.01 Математика и механика (уровень подготовки кадров высшей квалификации)".

Составители: зав. лаб., д.ф.-м.н., член-корр. РАН Болотник Н.Н.  
с.н.с., д.ф.-м.н. Костин Г.В.

Заведующий отделом аспирантуры: Щелчкова И.Н.

## 1. Аннотация

Дисциплина «Механика робототехнических систем» предназначена для аспирантов, обучающихся по образовательной программе 01.02.01 Теоретическая механика, и входит в вариативную часть учебного плана.

При разработке рабочей программы учебной дисциплины использованы Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки 01.06.01 Математика и механика, учебный план подготовки аспирантов по специальности 01.02.01 Теоретическая механика.

### 2. Цели и задачи

**Цель дисциплины:** изучение основных понятий робототехники как прикладной научной дисциплины, методов математического моделирования и анализа динамики манипуляционных и мобильных роботов, основных принципов и задач управления робототехническими системами, методов планирования и оптимизации движений манипуляционных и мобильных роботов.

### Задачи дисциплины:

- формирование у студентов представления об основных научных проблемах робототехники как прикладной научной дисциплины и об их связи с фундаментальными физико-математическими дисциплинами;
- освоение студентами дополнительных разделов теоретической механики, связанных с кинематикой и динамикой систем многих тел; формирование у них умения строить математические модели многозвенных систем и исследовать их динамику, пользуясь аналитическими и численными методами;
- ознакомление студентов с основными задачами управления робототехническими системами и методами их решения; формирование у них практических навыков решения задач управления роботами и оптимизации их движений.

## 3. Место дисциплины

### 3.1. Место дисциплины в структуре образовательной программы аспирантуры

Дисциплина «Механика робототехнических систем» включает в себя разделы, которые могут быть отнесены к вариативным частям программы подготовки аспирантов по направлению 01.06.01, в том числе направленные на подготовку к сдаче кандидатского экзамена.

### 3.2. Дисциплина базируется на дисциплинах:

1. Общая физика
2. Математический анализ
3. Дифференциальные уравнения
4. Теоретическая механика
5. Вариационные методы в теоретической механике
6. Нелинейные колебания в механике
7. Устойчивость динамических систем

### 3.3. Дисциплина предшествует изучению дисциплин: –

#### 4. Результаты обучения

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

##### ***Знать:***

- основы кинематики и динамики систем многих тел; методы математического моделирования динамики робототехнических систем;
- основные методы решения задач управления роботами и оптимизации их движений.

##### ***Уметь:***

- составлять уравнения динамики роботов в различных формах; использовать принцип наименьшего принуждения Гаусса для моделирования динамики роботов; учитывать при моделировании упругую податливость звеньев роботов и их сочленений;
- рассчитывать законы управления роботами, обеспечивающие их позиционирование в заданной конфигурации или отслеживание заданного движения; решать задачи оптимального управления роботами по критериям быстродействия и потребления энергии.
- осваивать новые предметные области, связанные с робототехникой и мехатроникой.

##### ***Владеть:***

- навыками освоения большого объема информации;
- культурой математического моделирования динамических процессов в сложных механических, электромеханических и мехатронных системах;
- навыками решения типовых задач и задач повышенной трудности теоретического плана с использованием методов моделирования и анализа динамических процессов, управления и оптимизации;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач.

#### **Компетенции выпускника, формируемые в результате изучения дисциплины**

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих универсальных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций аспиранта:

##### ***Универсальные компетенции:***

- УК–1. Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях
- УК–3. Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач
- УК–5. Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития

##### ***Общепрофессиональные компетенции:***

- ОПК–1. Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий
- ОПК–2. Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования

##### ***Профессиональные компетенции:***

- ПК–1. Способность применять аналитические, вычислительные и системно-аналитические методы для решения прикладных задач в области управления объектами и системами объектов техники;
- ПК–2. Способность самостоятельно применять методы аналитической механики и вычислительной математики, теоретические, расчетные и экспериментальные методы

исследований, методы математического и компьютерного моделирования к постановке и решению начально-краевых задач движения механических систем и задач управления их движением;

- ПК–3. Умение использовать системный подход к исследованию технических систем и выработке стратегии научной деятельности в процессе реализации научных и технологических инноваций.
- ПК–4. Способность использовать знания в области математики и теоретической механики для дальнейшего освоения дисциплин в соответствии с профилем подготовки.

## 5. Темы и Разделы

Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам и разделам с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий:

№	Темы дисциплины	Семестр	Лекции	Практич. (семинар.) задания
		(№ семестра)	(часы)	(часы)
1	Кинематика манипуляционных роботов.	1	12	12
2	Динамика манипуляционных роботов с абсолютно жесткими звеньями.	1	12	12
3	Динамика манипуляционных роботов с упругими элементами.	1	12	12
4	Основные принципы и задачи управления роботами.	2	12	12
5	Оптимальное управление электромеханическими манипуляционными роботами.	2	12	12
6	Мобильные роботы, перемещающиеся в сопротивляющихся средах за счет изменения конфигурации и движения внутренних тел.	2	12	12
	Итого (часов)	144	72	72

### Разделы:

#### 1. Кинематика манипуляционных роботов.

- 1.1. Основные понятия кинематики многозвенных манипуляторов.
- 1.2. Обобщенные координаты манипулятора (внутренние координаты) и обобщенные координаты объекта манипулирования (внешние координаты).
- 1.3. Основное уравнение кинематики многозвенного манипулятора.
- 1.4. Прямая и обратная задачи кинематики манипуляторов.
- 1.5. Понятие о кинематической избыточности.
- 1.6. Описание кинематики абсолютно твердого тела с неподвижной точкой в терминах матрицы поворота, определяющей положение тела по отношению к базовой системе координат, условно принятой за неподвижную.
- 1.7. Кососимметрический тензор угловой скорости.
- 1.8. Уравнение Пуассона.

- 1.9. Дифференцирование тензора второго ранга в подвижной системе координат.
- 1.10. Описание кинематики произвольного движения абсолютно твердого тела при помощи  $4 \times 4$ -матриц преобразований однородных координат.
- 1.11. Описание кинематики системы связанных тел в терминах матриц преобразований однородных координат.
- 1.12. Приложения к задачам робототехники.
2. ***Динамика манипуляционных роботов с абсолютно жесткими звеньями.***
  - 2.1. Механические связи, их классификация.
  - 2.2. Голономные и неголономные механические системы.
  - 2.3. Активные силы и силы реакции.
  - 2.4. Уравнения Ньютона-Эйлера.
  - 2.5. Уравнения Лагранжа первого и второго рода.
  - 2.6. Уравнения Аппеля и Маджи.
  - 2.7. Выражения для кинетической энергии абсолютно твердого тела, отвечающие различным способам описания его кинематики.
  - 2.8. Различные формы тензора инерции твердого тела. Связь между ними.
  - 2.9. Критерий возможности симметричной  $3 \times 3$ -матрицы быть тензором инерции твердого тела.
  - 2.10. Формулировка и доказательство принципа наименьшего принуждения. Его использование для моделирования динамики механических систем со связями.
  - 2.11. Связь принципа наименьшего принуждения с уравнениями Лагранжа первого рода.
  - 2.12. Применение принципа наименьшего принуждения для моделирования динамики робототехнических систем.
  - 2.13. Элементарная теория редукторных электроприводов с двигателями постоянного тока.
  - 2.14. Электромеханическая система с одной степенью свободы, ее характеристики.
  - 2.15. Электромагнитная и электромеханическая постоянные времени.
  - 2.16. Уравнения движения многозвеного манипулятора с электроприводами.
3. ***Динамика манипуляционных роботов с упругими элементами.***
  - 3.1. Вывод соотношения для момента сил упругости относительно оси, проходящей через центр поперечного сечения стержня перпендикулярно плоскости изгиба (основное уравнение элементарной теории изгиба балки).
  - 3.2. Условия применимости элементарной теории изгиба балки.
  - 3.3. Вывод выражения для упругой потенциальной энергии изогнутого стержня.
  - 3.4. Вывод уравнений вращения упругого стержня относительно неподвижной оси под действием управляющего момента, приложенного к этой оси.
  - 3.5. Интегро-дифференциальная и дифференциальная форма уравнений движения, связь между ними. Краевые условия.
  - 3.6. Постановка и решение задачи управления поворотом упругого стержня (руки манипулятора) на заданный угол с гашением его колебаний с помощью момента, ограниченного по абсолютной величине.
4. ***Основные принципы и задачи управления роботами.***
  - 4.1. Задача позиционирования.
  - 4.2. Задача отслеживания траектории манипулятора.
  - 4.3. Задача отслеживания траектории объекта манипулирования.
  - 4.4. Задача отслеживания движения манипулятора.
  - 4.5. Основные методы решения задачи позиционирования.
  - 4.6. Пропорционально-дифференциальный регулятор (ПД-регулятор).
  - 4.7. Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор).

- 4.8. Управление позиционированием и отслеживанием движения при помощи управления с «компенсирующей» обратной связью, приводящей к линеаризации уравнений движения.
- 4.9. Локальная оптимизация движений манипуляторов с кинематической избыточностью. Псевдообращение матриц.
5. **Оптимальное управление электромеханическими манипуляционными роботами.**
  - 5.1. Задача оптимизации траектории движения (двухточечная задача).
  - 5.2. Задача оптимального управления движением вдоль заданной траектории.
  - 5.3. Оптимизация по быстродействию и энергозатратам.
  - 5.4. Синтез оптимального по быстродействию управления позиционированием электромеханической системы с одной степенью свободы при ограничениях на управляющее напряжение и ток в обмотке якоря электродвигателя.
  - 5.5. Синтез оптимального управления позиционированием электромеханической системы с одной степенью свободы по комплексному критерию, учитывающему быстродействие и энергозатраты.
  - 5.6. Квазиоптимальное управление многозвенным электромеханическим манипулятором с редукторными приводами в шарнирах.
6. **Мобильные роботы, перемещающиеся в сопротивляющихся средах за счет изменения конфигурации и движения внутренних тел.**
  - 6.1. Многозвенные мобильные механизмы с вращательными и поступательными шарнирами. Физический механизм их перемещения в сопротивляющихся средах.
  - 6.2. Квазистатические и динамические режимы движения.
  - 6.3. Обзор постановок задач оптимального управления и результатов их решения (по публикациям последних лет).
  - 6.4. Оптимальное управление прямолинейным движением мобильного механизма с одним и двумя внутренними телами по критерию максимальной средней скорости в средах с различными законами сопротивления.

## **6. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

- Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: компьютер и мультимедийное оборудование (проектор, интерактивная доска).
- Необходимое программное обеспечение: программный комплекс *Maple*.

## **7. Учебно-методическое и информационное обеспечение**

### **7.1. Основная литература:**

1. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Управление роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
2. Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкевич С.Л. Манипуляционные роботы. Динамика и алгоритмы. М.: Наука, 1978.
3. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Манипуляционные роботы. Динамика, управление, оптимизация. М.: Наука, 1989.

### **7.2. Дополнительная литература:**

4. Коловский М.З., Слоущ А.В. Основы динамики промышленных роботов. М.: Наука, 1988.

5. Вукобратович М., Стокич Д. Управление манипуляционными роботами: теория и приложения. М.: Наука, 1985.
6. Бербюк В.Е. Динамика и оптимизация робототехнических систем. Киев: Наукова думка, 1989.

### **7.3. Учебно-методическая литература:**

–

### **7.4. Перечень ресурсов сети интернет:**

1. <http://lib.mipt.ru/> – электронная библиотека МФТИ
2. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
3. <http://benran.ru> –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.
4. <http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/> – электронная библиотека портала Eqworld.
5. <http://teormech.fizteh.ru> – Сайт кафедры теоретической механики МФТИ.

## **9. Методические указания**

Успешное освоение курса требует большой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы,
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, семинаров, учебной и научной литературе);
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях,
- подготовку к контрольным, самостоятельным работам и тестам.

Руководство и проверка самостоятельной работой студента осуществляется в результате анализа итогов контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также индивидуальных консультаций.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять теоретические знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач.

## **10. Фонд оценочных средств**

### **Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

#### ***Порядок проведения контрольных работ/тестов:***

Во время проведения контрольных работ/тестов обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, калькуляторами.

#### ***Порядок проведения дифференцированного зачета:***

Дифференцированный зачет проводится по итогам текущей успеваемости: по результатам контрольных, самостоятельных работ/тестов по каждой теме.

#### ***Порядок проведения устного экзамена:***

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.

Во время проведения экзамена при подготовке ответов на билеты обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, конспектами лекций, семинаров и любой другой литературой.

Во время проведения экзамена при ответе обучающегося на вопросы по билету или по программе дисциплины, он не может пользоваться конспектами лекций и семинаров и любой другой литературой.

### **Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков**

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме дифференциального зачета (устного), итоговая аттестация – в форме экзамена (устного).

Текущий контроль осуществляется в форме самостоятельных работ или тестов в письменной форме по каждой теме. Каждое задание в самостоятельных и тестовых работах оценивается определенным количеством баллов в конце условия каждого задания. По итогам набранных баллов выставляется оценка.

Примеры экзаменационных билетов (заданий, тестов и др. материалов, используемых для проведения зачета, экзамена):

### **Примеры тестовых вопросов к дифференциальному зачету:**

#### **ВАРИАНТ № 1**

1. Элементарная теория редукторных электроприводов с двигателями постоянного тока. Электромеханическая система с одной степенью свободы, ее характеристики. Электромагнитная и электромеханическая постоянные времени.
2. Формулировка основных задач управления манипуляционными роботами: задачи позиционирования, задачи отслеживания траектории манипулятора, задачи отслеживания траектории объекта манипулирования, задачи отслеживания движения манипулятора.

#### **ВАРИАНТ № 2**

1. Основные методы решения задачи позиционирования. Пропорционально-дифференциальный регулятор (ПД-регулятор). Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор).
2. Вывод уравнения плоского вращения упругой балки (упругой руки манипулятора) вокруг неподвижной оси. Интегро-дифференциальная и дифференциальная формы уравнения. Краевые условия.

#### **ВАРИАНТ № 3**

1. Управление позиционированием и отслеживанием движения при помощи управления с «компенсирующей» обратной связью, приводящей к линеаризации уравнений движения.
2. Математическая модель многосвязного электромеханического манипулятора с электродвигателями постоянного тока. Уравнения движения.

#### **ВАРИАНТ № 4**

1. Локальная оптимизация движений манипуляторов с кинематической избыточностью. Псевдообращение матриц.
2. Задача об оптимальном по быстродействию управлении позиционированием электромеханической системы с одной степенью свободы при ограничениях, налагаемых на управляющее напряжение и ток в цепи якоря электродвигателя. Синтез оптимального управления на основе принципа максимума.



## ВАРИАНТ № 5

1. Синтез оптимального управления позиционированием электромеханической системы с одной степенью свободы по комплексному критерию, учитывающему быстродействие и энергозатраты (тепловые потери в обмотке якоря электродвигателя).
2. Многозвенные мобильные механизмы с вращательными и поступательными шарнирами. Физический механизм их перемещения в сопротивляющихся средах. Квазистатические и динамические режимы движения. Мобильные системы с подвижными внутренними телами (вибрационные роботы).

## ВАРИАНТ № 6

1. Оптимальное управление прямолинейным движением мобильного механизма с внутренним телом по критерию максимальной средней скорости в средах с различными законами сопротивления.
2. Квазиоптимальное по быстродействию управление многозвенным электромеханическим манипулятором с редукторными приводами в шарнирах.

### **Примеры экзаменационных билетов:**

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

1. Основные понятия кинематики многозвенных манипуляторов. Обобщенные координаты манипулятора (внутренние координаты) и обобщенные координаты объекта манипулирования (внешние координаты). Основное уравнение кинематики многозвенного манипулятора. Прямая и обратная задачи кинематики манипуляторов. Понятие о кинематической избыточности.
2. Принцип наименьшего принуждения (Гаусса). Его формулировка и доказательство. Применение для моделирования динамики робототехнических систем.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 2

1. Описание кинематики абсолютно твердого тела с неподвижной точкой в терминах матрицы поворота, определяющей положение тела по отношению к базовой системе координат, условно принятой за неподвижную. Кососимметрический тензор угловой скорости. Уравнение Пуассона.
2. Вывод уравнения плоского вращения упругой балки (упругой руки манипулятора) вокруг неподвижной оси. Интегро-дифференциальная и дифференциальная формы уравнения. Краевые условия.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 3

1. Матрицы однородных преобразований координат. Их использование для описания сложного движения абсолютно твердого тела и систем твердых тел. Применение в задачах механики роботов.
2. Различные формы выражения для кинетической энергии абсолютно твердого тела с неподвижной точкой и в случае произвольного движения (в терминах вектора угловой скорости, тензора угловой скорости и матриц однородных преобразований координат). Тензоры инерции, связанные с различными формами выражений для кинетической энергии.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 4

1. Решение задачи о плоском повороте упругой балки (упругой руки манипулятора) вокруг неподвижной оси под действием управляющего момента сил, приложенного к оси вращения. Метод Гринберга.
2. Вывод выражения для матрицы поворота твердого тела вокруг произвольной неподвижной оси. Теорема Эйлера о конечном повороте твердого тела относительно неподвижной точки.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 5

1. Вывод формулы для производной тензора второго ранга. Связь между абсолютной (относительно неподвижной системы отсчета) и относительной (относительно вращающейся системы отсчета) производными. Вывод динамического уравнения Эйлера для твердого тела с неподвижной точкой на основе этой формулы.
2. Механические связи, их классификация. Голономные и неголономные связи. Принцип освобождения от связей. Активные силы и силы реакции. Вывод кинематических уравнений движения колесной пары при условии непроскальзывания колес. Доказательство неголономности связи, определяемой условием непроскальзывания колес.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 6

1. Постановка задачи управления поворотом упругой балки (руки манипулятора) на заданный угол с гашением его колебаний с помощью момента, ограниченного по абсолютной величине. Построение управления, гасящего главную моду упругих колебаний. Оценка остаточных колебаний.
2. Вывод уравнений движения механической системы с идеальными связями исходя из принципа наименьшего принуждения (Гаусса). Связь принципа Гаусса с уравнениями Лагранжа первого рода (с множителями).

#### Критерии оценивания

- **оценка «отлично (10)»** выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;
- **оценка «отлично (9)»** выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;
- **оценка «отлично (8)»** выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;
- **оценка «хорошо (7)»** выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он твердо знает материал экзаменационного билета, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;
- **оценка «хорошо (6)»** выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал экзаменационного билета, по суще-

ству излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе много неточностей;

- **оценка «хорошо (5)»** выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал экзаменационного билета, излагает его, умеет применять полученные знания на практике, не допускает в ответе грубых ошибок;
- **оценка «удовлетворительно (4)»** выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал фрагментарный, характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения;
- **оценка «удовлетворительно (3)»** выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушение логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;
- **оценка «неудовлетворительно (2-1)»** выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета, он показал что не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.