

**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: Компьютерные технологии управления в робототехнике и мехатронике

Уровень образования: высшее образование - бакалавриат

Форма обучения: Очная

**Рабочая программа дисциплины**  
**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА**

|  |   |
|--|---|
| <b>Блок:</b>   | <b>Блок 1 «Дисциплины (модули)»</b>   |
| <b>Часть образовательной программы:</b>  | <b>Обязательная</b>   |
| <b>№ дисциплины по учебному плану:</b>   | <b>Б1.О.27</b>  |
| <b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>   | <b>6 семестр - 5;<br/>7 семестр - 5;<br/>всего - 10</b>   |
| <b>Часов (всего) по учебному плану:</b>  | <b>360 часов</b>  |
| <b>Лекции</b>  | <b>6 семестр - 42 часа;<br/>7 семестр - 32 часа;<br/>всего - 74 часа</b>                              |
| <b>Практические занятия</b>  | <b>7 семестр - 16 часов;</b>  |
| <b>Лабораторные работы</b>   | <b>6 семестр - 28 часа;<br/>7 семестр - 16 часов;<br/>всего - 44 часа</b>                             |
| <b>Консультации</b>  | <b>6 семестр - 2 часа;<br/>7 семестр - 18 часов;<br/>всего - 20 часов</b>                             |
| <b>Самостоятельная работа</b>  | <b>6 семестр - 107,5 часов;<br/>7 семестр - 93,2 часа;<br/>всего - 200,7 часа</b>                     |
| <b>в том числе на КП/КР</b>  | <b>7 семестр - 15,7 часов;</b>  |
| <b>Иная контактная работа</b>  | <b>7 семестр - 4 часа;</b>  |
| <b>включая:</b><br><b>Решение задач</b><br><b>Контрольная работа</b><br><b>Лабораторная работа</b> |   |
| <b>Промежуточная аттестация:</b>   |   |
| <b>Экзамен</b><br><b>Защита курсовой работы</b><br><b>Экзамен</b>                                  | <b>6 семестр - 0,5 часа;<br/>7 семестр - 0,3 часа;<br/>7 семестр - 0,5 часа;<br/>всего - 1,3 часа</b> |

**Москва 2019**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**

**Преподаватель**

(должность)

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

(подпись)

**Б.И. Адамов**

(расшифровка подписи)

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель образовательной программы**

(должность, ученая степень, ученое звание)

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

(подпись)

**Б.И. Адамов**

(расшифровка подписи)

**Заведующий выпускающей кафедры**

(должность, ученая степень, ученое звание)

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

(подпись)

**И.В. Меркурьев**

(расшифровка подписи)

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** состоит в изучении численных методов инженерных расчётов и сопутствующего математического аппарата, применяемых при решении задач механики и робототехники, а также освоение способов построения и компьютерной реализации математических моделей механических и робототехнических систем

### Задачи дисциплины

- изучение численных методов решения инженерных задач механики, мехатроники и робототехники;
- освоение навыков численного решения инженерных задач в прикладных математических пакетах;
- изучение алгоритмов кинематики манипуляционных роботов;
- освоение способов построения и компьютерной реализации математических моделей механических и робототехнических систем.

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

| Код и наименование компетенции  | Код и наименование индикатора достижения компетенции                          | Запланированные результаты обучения  |
|---|---|--|
| ОПК-1 Способен применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности | ИД-5 <sub>ОПК-1</sub> Применяет математический аппарат численных методов      | знать:<br>- методы решения систем линейных алгебраических уравнений;<br>- методы решения систем нелинейных уравнений;<br>- методы приближения функций;<br>- методы анализа погрешностей решения уравнений при наличии погрешностей исходных данных;<br>- методы применения основных матричных разложений в задачах линейной алгебры;<br>- методы решения систем линейных алгебраических уравнений с матрицами произвольного вида.<br><br>уметь:<br>- анализировать погрешности решения уравнений при наличии погрешностей исходных данных;<br>- применять методы матричных разложений для решения задач линейной алгебры;<br>- применять алгоритмы аппроксимации функций и табличных зависимостей;<br>- применять алгоритмы численного решения нелинейных уравнений;<br>- применять алгоритмы численного решения линейных уравнений. |
| ОПК-4 Способен понимать принципы работы современных   | ИД-1 <sub>ОПК-4</sub> Использует современные языки и системы программирования | уметь:<br>- использовать программные пакеты для приближения функций, математической обработки данных;  |

| Код и наименование компетенции   | Код и наименование индикатора достижения компетенции  | Запланированные результаты обучения   |
|--|---|---|
| информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности  | для решения профессиональных задач  | - использовать программные пакеты для численного решения линейных уравнений;<br>- использовать программные пакеты для численного решения нелинейных уравнений.  |
| ОПК-4 Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности                                | ИД-2 <sub>ОПК-4</sub> Применяет современные математические пакеты для моделирования и исследования динамики систем, управляемого движения мехатронных и робототехнических устройств   | знать:<br>- методы численного решения обратных задач кинематики манипуляторов.<br><br>уметь:<br>- проводить кинематический анализ и моделирование движения манипуляционных роботов с использованием программных пакетов.  |
| ПК-1 Способен участвовать в проектировании и конструировании экспериментальных макетов мехатронных и робототехнических систем, изделий детской и образовательной робототехники | ИД-1 <sub>ПК-1</sub> Способен выполнять разработку схемотехнических решений и проведения расчетов опытных образцов мехатронных и робототехнических устройств, изделий детской и образовательной робототехники с применением современных компьютерных технологий | знать:<br>- алгоритмы исследования кинематики пространственного движения;<br>- алгоритмы представления кинематики манипуляционных роботов в параметрах Денавита-Хартенберга.<br><br>уметь:<br>- применять типовые алгоритмы анализа кинематики манипуляционных роботов;<br>- проводить кинематический анализ манипуляционных роботов в параметрах Денавита-Хартенберга;<br>- применять методы численного решения обратных задач кинематики манипуляторов. |

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Компьютерные технологии управления в робототехнике и мехатронике (далее – ОПОП), направления подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника, уровень образования: высшее образование - бакалавриат.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать основы линейной алгебры и аналитической геометрии, математического анализа, теоретической механики, дискретной математики, информатики
- уметь составлять простейшие программы на языках высокого уровня

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 10 зачетных единиц, 360 часов.

| № п/п | Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации  | Всего часов на раздел | Семестр | Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы |     |    |              |   |     |    |    |                   |                                   | Содержание самостоятельной работы/ методические указания  |   |
|-------|---|-----------------------|---------|--|-----|----|--------------|---|-----|----|----|-------------------|-----------------------------------|---|---|
|       |   |                       |         | Контактная работа  |     |    |              |   |     |    | СР |                   |                                   |   |   |
|       |   |                       |         | Лек  | Лаб | Пр | Консультация |   | ИКР |    | ПА | Работа в семестре | Подготовка к аттестации /контроль |   |   |
| КПР   | ГК  | ИККП                  | ТК      |  |     |    |              |   |     |    |    |                   |                                   |   |   |
| 1     | 2   | 3                     | 4       | 5  | 6   | 7  | 8            | 9 | 10  | 11 | 12 | 13                | 14                                | 15  |   |
| 1     | Введение в вычислительную линейную алгебру  | 58                    | 6       | 14   | 16  | -  | -            | - | -   | -  | -  | 28                | -                                 | <p><b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b><br/>Повторение материала по разделу "Введение в вычислительную линейную алгебру"</p> <p><b><u>Подготовка к аудиторным занятиям:</u></b><br/>Проработка лекции, выполнение и подготовка к защите лабораторных работ "Основы работы в среде Scilab. Основные матричные операции. Векторные и матричные нормы", "Исследование погрешности решения СЛАУ. Число и степень обусловленности", "Определение числа обусловленности методом статистических испытаний", "Метод Холецкого", "Метод LU-разложения", "Метод сингулярного разложения"</p> <p><b><u>Подготовка к контрольной работе:</u></b><br/>Подготовка к контрольной работе 2 "Решение СЛАУ методом LU-разложения без выбора ведущего элемента"</p> <p><b><u>Подготовка к контрольной работе:</u></b><br/>Подготовка к контрольной работе 1 "Решение СЛАУ методом Холецкого"</p> <p><b><u>Подготовка расчетно-графического задания:</u></b> Выполнение расчетного задания "Исследование обусловленности СЛАУ. Оценка погрешности решения СЛАУ"</p> <p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение</p> |   |
| 1.1   | Исследование погрешностей решения систем линейных алгебраических уравнений при наличии погрешностей исходных данных | 28                    |         | 6  | 6   | -  | -            | - | -   | -  | -  | -                 | 16                                |   | - |
| 1.2   | Решение СЛАУ методами матричных разложений  | 30                    |         | 8  | 10  | -  | -            | - | -   | -  | -  | -                 | 12                                |   | - |

|     |   |    |    |   |   |   |   |   |   |   |    |   |   |
|-----|---|----|----|---|---|---|---|---|---|---|----|---|---|
|     |   |    |    |   |   |   |   |   |   |   |    |   | теоретического материала по задачам вычислительной линейной алгебры<br><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b><br>[1], §§1.1-1.3, §§3.1-3.2<br>[2], §§5.1-5.4, §§5.7-5.8<br>[6], §1.2, §3.7, §§7.1-7.7, §7.7, стр. 267-277   |
| 2   | Приближение функций и математическая обработка данных | 46 | 14 | 6 | - | - | - | - | - | - | 26 | - | <b><u>Подготовка к контрольной работе:</u></b><br>Подготовка к контрольной работе 3 "Применение МНК для аппроксимации табличной зависимости. Степенной базис"   |
| 2.1 | Метод наименьших квадратов                            | 32 | 8  | 4 | - | - | - | - | - | - | 20 | - | <b><u>Подготовка расчетных заданий:</u></b><br>Выполнение расчётного задания "Применение МНК для аппроксимации табличной зависимости. Тригонометрический базис. Сравнительный анализ решения в различных базисах"   |
| 2.2 | Введение в интерполяцию                               | 14 | 6  | 2 | - | - | - | - | - | - | 6  | - | <b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b><br>Повторение материала по разделу "Приближение функций"<br><b><u>Подготовка к аудиторным занятиям:</u></b><br>Проработка лекции, выполнение и подготовка к защите лабораторных работ "Метод наименьших квадратов", "Определение характеристик колебаний по экспериментальным данным с помощью МНК", "Введение в интерполяцию"<br><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение теоретического материала по методам приближения функций<br><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b><br>[1], §§3.5-3.6, §4<br>[2], §11.1, §11.13<br>[6], §§5.1-5.5 |
| 3   | Матрично-операторные методы в кинематике твёрдого     | 40 | 14 | 6 | - | - | - | - | - | - | 20 | - | <b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b><br>Повторение материала по разделу "Матрично-операторные методы в   |

|     |  |       |   |    |    |   |   |   |   |     |       |    |      |  |  |  |  |  |
|-----|--|-------|---|----|----|---|---|---|---|-----|-------|----|------|--|--|--|--|--|
|     | тела   |       |   |    |    |   |   |   |   |     |       |    |      |  |  |  |  |  |
| 3.1 | Матрично-операторные методы в кинематике твёрдого тела               | 40    |   | 14 | 6  | - | - | - | - | -   | -     | 20 | -    |  |  |  |  | <p>кинематике твёрдого тела"</p> <p><b><u>Подготовка к аудиторным занятиям:</u></b><br/>Проработка лекции, выполнение и подготовка к защите лабораторных работ "Решение прямой задачи о положениях с помощью основной формулы геометрии движения", "Решение прямой задачи о положениях методом однородных преобразований", "Задание пространственной ориентации выходного звена манипулятора"</p> <p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение теоретического материала по кинематике пространственного движения</p> <p><b><u>Подготовка расчетных заданий:</u></b><br/>Выполнение расчетного задания "Решение прямой задачи о положениях с помощью основной формулы геометрии движения и метода однородных преобразований"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b><br/>[3], §§1.1-1.2<br/>[5], §§2.1-2.5, §§3.1-3.2</p> |
|     | Экзамен  | 36.0  |   | -  | -  | - | - | 2 | - | -   | 0.5   | -  | 33.5 |  |  |  |  |  |
|     | Всего за семестр   | 180.0 |   | 42 | 28 | - | - | 2 | - | -   | 0.5   | 74 | 33.5 |  |  |  |  |  |
|     | Итого за семестр   | 180.0 |   | 42 | 28 | - | 2 | - | - | 0.5 | 107.5 |    |      |  |  |  |  |  |
| 4   | Математические модели кинематики манипуляционных роботов             | 31    | 7 | 12 | 6  | 4 | - | - | - | -   | -     | 9  | -    |  |  |  |  | <p><b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b><br/>Повторение материала по разделу "Математические модели кинематики манипуляционных роботов"</p> <p><b><u>Проведение исследований:</u></b> Работа выполняется по индивидуальному заданию. Для проведения исследования применяется следующие материалы:</p> <p><b><u>Подготовка к аудиторным занятиям:</u></b><br/>Проработка лекции, выполнение и подготовка к защите лабораторных работ "Описание кинематики манипулятора по</p>   |
| 4.1 | Кинематика манипуляционных роботов в параметрах Денавита-Хартенберга | 22    |   | 8  | 4  | 4 | - | - | - | -   | -     | 6  | -    |  |  |  |  |  |
| 4.2 | Кинематика манипуляционных роботов: задачи о скоростях               | 9     |   | 4  | 2  | - | - | - | - | -   | -     | 3  | -    |  |  |  |  |  |

|     |  |    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  |
|-----|--|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|
|     |  |    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | <p>алгоритму Денавита-Хартенберга", "Решение прямой задачи о положениях методом однородных преобразований по алгоритму Денавита-Хартенберга", "Построение рабочей области манипулятора", "Решение прямой задачи о скоростях манипулятора".</p> <p><b><u>Подготовка к контрольной работе:</u></b><br/>Изучение материалов по разделу "Математические модели кинематики манипуляционных роботов" и подготовка к контрольной работе 1 "Решение прямой задачи о положениях в параметрах Денавита-Хартенберга"</p> <p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение теоретического материала по разделу "Математические модели кинематики манипуляционных роботов"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b><br/>[3], §§1.3-1.4, §2.1<br/>[4], стр. 39-60<br/>[5], §§5.1-5.8, §§6.1-6.2</p> |
| 5   | Основные матричные разложения: LU-разложение с частичным выбором ведущего элемента и QR-разложение | 19 | 6 | 2 | 4 | - | - | - | - | - | 7 | - | <p><b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b><br/>Повторение материала по разделу "Основные матричные разложения: LU-разложение с частичным выбором ведущего элемента и QR-разложение"</p> <p><b><u>Подготовка к аудиторным занятиям:</u></b><br/>Проработка лекции, выполнение и подготовка к защите лабораторных работ "Метод LU-разложения с частичным выбором ведущего элемента", "Построение QR-разложения методом отражений"</p> <p><b><u>Подготовка к контрольной работе:</u></b><br/>Подготовка к контрольной работе 2 "LU-разложение с частичным выбором ведущего элемента"</p> <p><b><u>Самостоятельное изучение</u></b></p>  |
| 5.1 | Метод LU-разложения с частичным выбором ведущего элемента  | 10 | 2 | - | 4 | - | - | - | - | - | 4 | - |  |
| 5.2 | QR-разложение  | 9  | 4 | 2 | - | - | - | - | - | - | 3 | - |  |



|     |   |    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |   |   |   |
|-----|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|---|---|
|     |   |    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |   |   | <p><b><u>теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по темам LU-разложение с частичным выбором ведущего элемента и QR-разложение</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b><br/>[1], §1.4, §§2.1-2.2<br/>[6], §7.6, §§7.8-7.11</p> |
| 6   | Решения СЛАУ общего вида. Решение обратной задачи кинематики избыточного манипулятора | 30 | 6 | 4 | 4 | - | - | - | - | - | 16 | - | <p><b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b><br/>Повторение материала по разделу "Решения СЛАУ общего вида. Решение обратной задачи кинематики избыточного манипулятора"</p> <p><b><u>Подготовка к аудиторным занятиям:</u></b><br/>Проработка лекции, выполнение и подготовка к защите лабораторных работ "Псевдообратная матрица. Построение нормального псевдорешения СЛАУ", "Решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора".</p> <p><b><u>Проведение эксперимента:</u></b> Работа выполняется по индивидуальному заданию. Для проведения исследования применяется следующее оборудование:</p> <p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Решения СЛАУ общего вида. Решение обратной задачи кинематики избыточного манипулятора"</p> <p><b><u>Подготовка расчетных заданий:</u></b><br/>Выполнение расчетного задания "Решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b><br/>[1], §§3.3-3.4<br/>[2], §5.7, §5.10<br/>[6], §7.12</p> |   |
| 6.1 | Решения СЛАУ общего вида  | 12 | 4 | 2 | 2 | - | - | - | - | - | 4  | - | <p>Проработка лекции, выполнение и подготовка к защите лабораторных работ "Псевдообратная матрица. Построение нормального псевдорешения СЛАУ", "Решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора".</p>  |   |
| 6.2 | Численное решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора                | 18 | 2 | 2 | 2 | - | - | - | - | - | 12 | - | <p>Проработка лекции, выполнение и подготовка к защите лабораторных работ "Псевдообратная матрица. Построение нормального псевдорешения СЛАУ", "Решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора".</p> <p>Работа выполняется по индивидуальному заданию. Для проведения исследования применяется следующее оборудование:</p>  |   |

|     |   |              |   |           |           |           |           |   |          |   |            |              |      |  |
|-----|---|--------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|---|----------|---|------------|--------------|------|--|
| 7   | Численные методы решения нелинейных уравнений и систем нелинейных уравнений | 28           |   | 8         | 4         | 4         | -         | - | -        | - | -          | 12           | -    | <b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b><br>Повторение материала по разделу "Численные методы решения нелинейных уравнений и систем нелинейных уравнений"   |
| 7.1 | Численные методы решения нелинейных уравнений и систем нелинейных уравнений | 20           |   | 6         | 2         | 4         | -         | - | -        | - | -          | 8            | -    | <b><u>Подготовка к аудиторным занятиям:</u></b><br>Проработка лекции, выполнение и подготовка к защитам лабораторных работ "Метод простой итерации", "Методы Ньютона, секущих; методы высокого порядка точности", "Численное решение обратной задачи о положениях манипулятора методом Ньютона".   |
| 7.2 | Численное решение обратной задачи и положениях                              | 8            |   | 2         | 2         | -         | -         | - | -        | - | -          | 4            | -    | <b><u>Подготовка к контрольной работе:</u></b><br>Изучение материалов по разделу "Численные методы решения нелинейных уравнений и систем нелинейных уравнений" и подготовка к контрольной работе 2 "Численное решение нелинейных уравнений"<br><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Численные методы решения нелинейных уравнений и систем нелинейных уравнений"<br><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b><br>[2], §§7.1-7.6<br>[6], гл.2, гл.9 |
|     | Экзамен   | 36.0         |   | -         | -         | -         | -         | 2 | -        | - | 0.5        | -            | 33.5 |  |
|     | Курсовая работа (КР)  | 36.0         |   | -         | -         | -         | 16        | - | 4        | - | 0.3        | 15.7         | -    |  |
|     | Всего за семестр  | 180.0        |   | 32        | 16        | 16        | 16        | 2 | 4        | - | 0.8        | 59.7         | 33.5 |  |
|     | Итого за семестр  | 180.0        |   | 32        | 16        | 16        | 18        |   | 4        |   | 0.8        | 93.2         |      |  |
|     | <b>ИТОГО</b>  | <b>360.0</b> | - | <b>74</b> | <b>44</b> | <b>16</b> | <b>20</b> |   | <b>4</b> |   | <b>1.3</b> | <b>200.7</b> |      |  |

**Примечание:** Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КНР – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

## 3.2 Краткое содержание разделов

### 1. Введение в вычислительную линейную алгебру

1.1. Исследование погрешностей решения систем линейных алгебраических уравнений при наличии погрешностей исходных данных

Задача решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Векторные и матричные нормы. Число и степень обусловленности квадратной матрицы. Теоремы об оценивании погрешностей решения СЛАУ. Плохо обусловленные системы линейных уравнений. Погрешность представления вещественных чисел на компьютере. Машинное эpsilon.

1.2. Решение СЛАУ методами матричных разложений

Диагональные и треугольные матрицы. Решение СЛАУ с треугольными матрицами. Важнейшие матричные разложения. Разложение для метода Холецкого. Решение СЛАУ при помощи метода Холецкого. Алгоритм построения разложений для метода Холецкого. Решение СЛАУ при помощи метода LU-разложения. Алгоритм построения разложения  $A=LU$ . Условия работоспособности алгоритма LU-разложения без выбора ведущего элемента. Матрицы с диагональным преобладанием. Теорема Леви-Деспланка. Ортогональные и собственные ортогональные матрицы; их свойства. Сингулярное разложение (SVD-разложение) прямоугольной матрицы; решение совместных СЛАУ методом сингулярного разложения. Определение ранга и спектральной нормы матрицы при наличии её сингулярного разложения. СЛАУ с трёхдиагональными матрицами. Метод монотонной прогонки.

### 2. Приближение функций и математическая обработка данных

2.1. Метод наименьших квадратов

Постановка линейной задачи метода наименьших квадратов (МНК). Задача аппроксимации табличной зависимости. Уравнения МНК в нормальной форме. Матрица Грама и её свойства. Задача МНК как задача нахождения псевдорешения переопределённой СЛАУ. Матрица плана. Применение сингулярного разложения матрицы плана для решения линейной задачи МНК. Нормальное число обусловленности матрицы плана. Сравнительный анализ результатов аппроксимации в различных базисах. Полиномиальная аппроксимация в базисе многочленов Чебышёва. Примеры применения МНК в задачах исследования и оценивания динамических систем.

2.2. Введение в интерполяцию

Постановка задач интерполяции. Интерполяционный многочлен Лагранжа. Интерполяция сплайнами. Кубические сплайны. Уравнения для наклонов кубического сплайна. Примеры применения кусочных многочленов в задачах планирования движения роботов.

### 3. Матрично-операторные методы в кинематике твёрдого тела

3.1. Матрично-операторные методы в кинематике твёрдого тела

Матрица направляющих косинусов и её свойства. Матрицы направляющих косинусов для элементарных движений твёрдого тела. Вычисление координат точки твёрдого тела. Основная формула геометрии движения. Рекуррентные формулы для вычисления координат точек манипуляционного механизма. Метод однородных координат. Матрица преобразования однородных координат. Матрицы однородных преобразований для элементарных движений твёрдого тела. Вычисление координат точек манипуляционного

механизма методом однородных преобразований. Описание ориентации тела с помощью углов Эйлера. Углы рысканья, тангажа, крена. Выражение матрицы направляющих косинусов через углы ориентации. Выражение углов ориентации выходного звена манипулятора через координаты в сочленениях. Математические основы 3D-анимации движения манипуляционных роботов.

#### 4. Математические модели кинематики манипуляционных роботов

##### 4.1. Кинематика манипуляционных роботов в параметрах Денавита-Хартенберга

Основные типы кинематических соединений и их математическое описание; подвижность и класс соединения. Кинематические цепи; структурная классификация их звеньев. Системы координат Денавита-Хартенберга. Описание относительных конфигураций смежных звеньев простой кинематической цепи при помощи параметров Денавита-Хартенберга. Выражение матрицы однородного преобразования для смежных звеньев через параметры Денавита-Хартенберга. Постановка прямой и обратной задач о положениях манипулятора. Решение прямой задачи о положениях в параметрах Денавита-Хартенберга.

##### 4.2. Кинематика манипуляционных роботов: задачи о скоростях

Постановка прямой и обратной задач о скоростях манипулятора. Якобиан манипулятора. Физический смысл его столбцов. Построение якобиана манипулятора. Решение прямой задачи о скоростях в параметрах Денавита-Хартенберга.

#### 5. Основные матричные разложения: LU-разложение с частичным выбором ведущего элемента и QR-разложение

##### 5.1. Метод LU-разложения с частичным выбором ведущего элемента

Матрицы перестановок и матрицы транспозиций, их свойства. Массив перестановок и его использование в задаче о перестановке компонент столбца в заданном порядке. Алгоритм построения LU-разложения с частичным выбором ведущего элемента; условия его работоспособности. Получение решения СЛАУ  $Ax=b$  при наличии разложения  $PA=LU$ . Вычислительная устойчивость метода LU-разложения.

##### 5.2. QR-разложение

Понятие о QR-разложении. Матрица отражения. Задача обнуления элементов вектора, размещённых в указанных позициях. Построение QR-разложения методом отражений, его вычислительная сложность. Решение СЛАУ методом QR-разложения.

#### 6. Решения СЛАУ общего вида. Решение обратной задачи кинематики избыточного манипулятора

##### 6.1. Решения СЛАУ общего вида

Постановка задачи решения СЛАУ произвольного вида. Псевдорешение СЛАУ, нормальное псевдорешение. Псевдообратная матрица. Её свойства. Построение псевдообратной матрицы методом сингулярного разложения. Усечение малых сингулярных чисел как способ улучшения обусловленности задачи.

##### 6.2. Численное решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора

Обратная задача о скоростях избыточного манипулятора. Явный вид псевдообратной матрицы для невырожденной конфигурации избыточного манипулятора. Применение

основных матричных разложений для решения обратной задачи о скоростях. Применение МНК с демпфированием для приближённого решения обратной задачи о скоростях.

### 7. Численные методы решения нелинейных уравнений и систем нелинейных уравнений

#### 7.1. Численные методы решения нелинейных уравнений и систем нелинейных уравнений

Аргументные и критериальные задачи численного решения системы нелинейных уравнений. Простые и кратные корни. Итерационные методы нахождения корней систем нелинейных уравнений; скорость сходимости итерационного метода. Критерии останова в задаче нахождения корня нелинейного уравнения и их обоснование. Метод простых итераций. Сжимающие отображения. Теорема об условиях сходимости метода простых итераций. Достаточное условие сжимающего характера отображения. Вывод расчётных формул метода Ньютона. Метод Ньютона как вариант метода простых итераций. Теорема об условиях сходимости метода Ньютона. Метод секущих; метод обратной квадратической интерполяции. Некоторые методы численного решения нелинейных уравнений высокого порядка точности.

#### 7.2. Численное решение обратной задачи и положений

Некоторые численные методы решения обратной задачи о положениях шестизвённого манипулятора; сведение к нелинейной задаче МНК. Метод Гаусса-Ньютона как метод решения переопределённой системы нелинейных уравнений. Численное решение задачи навигации по маякам. Численные методы решения обратной задачи о положениях избыточного манипулятора.

### **3.3. Темы практических занятий**

#### 1. Семестр 7

№1 Описание кинематики манипулятора по алгоритму Денавита-Хартенберга

№2 Решение прямой задачи о положениях в параметрах Денавита-Хартенберга (контрольная работа)

№3 Метод LU-разложения с частичным выбором ведущего элемента

№4 LU-разложение с частичным выбором ведущего элемента (контрольная работа)

№5 Решение СЛАУ общего вида с помощью QR-разложения

№6 Решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора

№7 Методы простой итерации и Ньютона

№8 Численное решение нелинейных уравнений (контрольная работа).

### **3.4. Темы лабораторных работ**

#### 1. Семестр 6

№1 Основы работы в MATLAB и Scilab. Основные матричные операции. Векторные и матричные нормы

№2 Исследование погрешности решения СЛАУ. Число и степень обусловленности

№3 Определение числа обусловленности методом статистических испытаний

№4 Методы Холецкого и LDLT-разложения

№5 Метод Холецкого (контрольная работа)

№6 Метод LU-разложения

№7 Метод LU-разложения (контрольная работа)

№8 Методы Холецкого, LU- и SVD-разложений

№9 Метод наименьших квадратов

№10 Метод наименьших квадратов (контрольная работа)

№11 Введение в интерполяцию

- №12 Описание пространственного движения манипуляционных роботов
- №13 Решение прямой задачи о положениях манипулятора с помощью основной формулы геометрии движения
- №14 Решение прямой задачи о положениях манипулятора методом однородных преобразований;
2. Семестр 7
- №1 Решение прямой задачи о положениях методом однородных преобразований по алгоритму Денавита-Хартенберга
- №2 Построение рабочей области манипулятора
- №3 Решение прямой задачи о скоростях манипулятора
- №4 Построение QR-разложения методом отражений
- №5 Псевдообратная матрица. Построение нормального псевдорешения СЛАУ
- №6 Решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора методом МНК с демпфированием
- №7 Методы Ньютона, секущих; методы высокого порядка точности
- №8 Численное решение обратной задачи о положениях манипулятора методом Ньютона.

### 3.5 Консультации

#### Аудиторные консультации по курсовому проекту/работе (КПР)

1. Консультации направлены на выполнение разделов курсового проекта под руководством преподавателя. В рамках часов на групповые консультации разбирается выполнение разделов курсовой работы: - Составление кинематической схемы манипулятора. Параметризация кинематики манипулятора по алгоритму Денавита-Хартенберга. - Решение прямой задачи о положениях манипулятора. Построение рабочей области манипулятора. - Планирование траектории выходного звена в рабочей области. - Составление уравнений кинематики манипулятора. Моделирование траекторного движения.
2. Консультации направлены на выполнение разделов курсового проекта под руководством преподавателя. В рамках часов на групповые консультации разбирается выполнение разделов курсовой работы: - Численное решение обратной задачи о положениях. Моделирование траекторного движения

#### Групповые консультации по разделам дисциплины (ГК)

1. Обсуждение материалов по разделу "Введение в вычислительную линейную алгебру"
2. Обсуждение материалов по разделу "Приближение функций"
3. Обсуждение материалов по разделу "Матрично-операторные методы в кинематике твёрдого тела"
4. Обсуждение материалов по разделу "Математические модели кинематики манипуляционных роботов"
5. Обсуждение материалов по разделу "Основные матричные разложения: LU-разложение с частичным выбором ведущего элемента и QR-разложение"
6. Обсуждение материалов по разделу "Решения СЛАУ общего вида. Решение обратной задачи кинематики избыточного манипулятора"
7. Обсуждение материалов по разделу "Численные методы решения нелинейных уравнений и систем нелинейных уравнений"

#### Индивидуальные консультации по курсовому проекту /работе (ИККП)

1. Консультации проводятся по разделу "Математические модели кинематики манипуляционных роботов"

2. Консультации проводятся по разделу курсовой работы: - Численное решение обратной задачи о положениях. Моделирование траекторного движения  
*Текущий контроль (ТК)*
1. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Введение в вычислительную линейную алгебру"
  2. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Приближение функций"
  3. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Матрично-операторные методы в кинематике твёрдого тела"
  4. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Математические модели кинематики манипуляционных роботов"
  5. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Основные матричные разложения: LU-разложение с частичным выбором ведущего элемента и QR-разложение"
  6. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Решения СЛАУ общего вида. Решение обратной задачи кинематики избыточного манипулятора"
  7. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Численные методы решения нелинейных уравнений и систем нелинейных уравнений"

### 3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ

#### 7 Семестр

Курсовая работа (КР)

Темы:

- Моделирование движения манипулятора KUKA KR 6 R900 sixx WP (KR AGILUS)
- Моделирование движения манипулятора Step SR20 WE
- Численное моделирование движения манипулятора Kawasaki MS005N
- Моделирование движения манипулятора Panasonic YS-080G3
- Моделирование кинематики манипулятора Gudel RF-4-125/1.8
- Численное моделирование кинематики манипулятора KUKA KR 30 JET

#### График выполнения курсового проекта

| Неделя                                  | 1 - 4 | 5 - 6 | 7 - 8 | 9 - 13 | 14 - 15 | Зачетная                 |
|---|-------|-------|-------|--------|---------|--------------------------|
| Раздел курсового проекта                | 1     | 1     | 2     | 3      | 4       | Защита курсового проекта |
| Объем раздела, %                        | 8     | 32    | 16    | 26     | 18      | -                        |
| Выполненный объем нарастающим итогом, % | 8     | 40    | 56    | 82     | 100     | -                        |

| Номер раздела | Раздел курсового проекта   |
|---------------|--|
| 1             | Описание кинематики манипулятора в параметрах Денавита-Хартенберга |
| 2             | Решение прямой задачи о положениях. Анализ рабочей области         |
| 3             | Уравнения кинематики манипулятора в скоростях. Моделирование       |

|   |  |
|---|--|
|   | траекторного движения  |
| 4 | Решение обратной задачи о положениях манипулятора. Моделирование траекторного движения |



### 3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

| Запланированные результаты обучения по дисциплине<br>(в соответствии с разделом 1)           | Коды индикаторов      | Номер раздела дисциплины<br>(в соответствии с п.3.1) |   |   |   |   |   |   | Оценочное средство<br>(тип и наименование) |  |
|--|-----------------------|--|---|---|---|---|---|---|--|--|
|  |                       | 1  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |  |  |
| <b>Знать:</b>  |                       |  |   |   |   |   |   |   |  |  |
| методы решения систем линейных алгебраических уравнений с матрицами произвольного вида       | ИД-5 <sub>ОПК-1</sub> |  |   |   |   |   |   | + |  | Лабораторная работа/Защита лабораторных работ. Блок "Решение СЛАУ общего вида. Решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора" |
| методы применения основных матричных разложений в задачах линейной алгебры                   | ИД-5 <sub>ОПК-1</sub> | +  |   |   |   |   |   |   |  | Лабораторная работа/Защита лабораторных работ. Блок "Решение СЛАУ методами матричных разложений"   |
| методы анализа погрешностей решения уравнений при наличии погрешностей исходных данных       | ИД-5 <sub>ОПК-1</sub> | +  |   |   |   |   |   |   |  | Лабораторная работа/Защита лабораторных работ. Блок "Исследование погрешностей решения СЛАУ"   |
| методы приближения функций   | ИД-5 <sub>ОПК-1</sub> |  | + |   |   |   |   |   |  | Лабораторная работа/Защита лабораторных работ. Блок "Приближение функций и математическая обработка данных"                                  |
| методы решения систем нелинейных уравнений   | ИД-5 <sub>ОПК-1</sub> |  |   |   |   |   |   |   | +  | Лабораторная работа/Защита лабораторных работ. Блок "Численное решение нелинейных уравнений"   |
| методы решения систем линейных алгебраических уравнений                                      | ИД-5 <sub>ОПК-1</sub> |  |   |   |   |   | + |   |  | Лабораторная работа/Защита лабораторных работ. Блок "Методы LU- и QR-разложений"   |
| методы численного решения обратных задач кинематики манипуляторов                            | ИД-2 <sub>ОПК-4</sub> |  |   |   |   |   |   |   | +  | Лабораторная работа/Защита лабораторных работ. Блок "Решение СЛАУ общего вида. Решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора" |
| алгоритмы исследования кинематики пространственного движения                                 | ИД-1 <sub>ПК-1</sub>  |  |   | + |   |   |   |   |  | Лабораторная работа/Защита лабораторных работ. Блок "Матрично-операторные методы в кинематике твёрдого тела"                                 |
| алгоритмы представления кинематики манипуляционных роботов в параметрах Денавита-Хартенберга | ИД-1 <sub>ПК-1</sub>  |  |   |   | + |   |   |   |  | Лабораторная работа/Защита лабораторных работ. Блок "Кинематика манипуляционных роботов"   |

| Уметь:  |                       |   |   |   |  |   |  |   |   |  |
|---|-----------------------|---|---|---|--|---|--|---|---|--|
| применять алгоритмы численного решения линейных уравнений   | ИД-5 <sub>ОПК-1</sub> |   |   |   |  |   |  | + |   | Контрольная работа/LU-разложение с частичным выбором ведущего элемента<br>Лабораторная работа/Защита лабораторных работ. Блок "Методы LU- и QR-разложений" |
| применять алгоритмы численного решения нелинейных уравнений   | ИД-5 <sub>ОПК-1</sub> |   |   |   |  |   |  |   | + | Контрольная работа/Численное решение нелинейных уравнений  |
| применять алгоритмы аппроксимации функций и табличных зависимостей  | ИД-5 <sub>ОПК-1</sub> |   | + |   |  |   |  |   |   | Контрольная работа/Применение МНК для аппроксимации табличной зависимости. Степенной базис   |
| применять методы матричных разложений для решения задач линейной алгебры  | ИД-5 <sub>ОПК-1</sub> | + |   |   |  |   |  |   |   | Контрольная работа/Решение СЛАУ методом LU-разложения без выбора ведущего элемента<br>Контрольная работа/Решение СЛАУ методом Холецкого                    |
| анализировать погрешности решения уравнений при наличии погрешностей исходных данных                                  | ИД-5 <sub>ОПК-1</sub> | + |   |   |  |   |  |   |   | Решение задач/Исследование обусловленности СЛАУ. Оценка погрешности решения СЛАУ   |
| использовать программные пакеты для приближения функций, математической обработки данных                              | ИД-1 <sub>ОПК-4</sub> |   | + |   |  |   |  |   |   | Решение задач/Применение МНК для аппроксимации табличной зависимости. Тригонометрический базис. Сравнительный анализ решения в различных базисах           |
| использовать программные пакеты для численного решения линейных уравнений   | ИД-1 <sub>ОПК-4</sub> | + |   |   |  |   |  |   |   | Лабораторная работа/Защита лабораторных работ. Блок "Решение СЛАУ методами матричных разложений"   |
| использовать программные пакеты для численного решения нелинейных уравнений   | ИД-1 <sub>ОПК-4</sub> |   |   |   |  |   |  |   | + | Лабораторная работа/Защита лабораторных работ. Блок "Численное решение нелинейных уравнений"   |
| проводить кинематический анализ и моделирование движения манипуляционных роботов с использованием программных пакетов | ИД-2 <sub>ОПК-4</sub> |   |   |   |  | + |  |   |   | Лабораторная работа/Защита лабораторных работ. Блок "Кинематика манипуляционных роботов"   |
| применять типовые алгоритмы анализа   | ИД-1 <sub>ПК-1</sub>  |   |   | + |  |   |  |   |   | Решение задач/Решение прямой задачи о  |

|   |          |  |  |  |   |  |   |  |  |
|---|----------|--|--|--|---|--|---|--|--|
| кинематики манипуляционных роботов  |          |  |  |  |   |  |   |  | положения с помощью основной формулы геометрии движения и метода однородных преобразований |
| проводить кинематический анализ манипуляционных роботов в параметрах Денавита-Хартенберга | ИД-1ПК-1 |  |  |  | + |  |   |  | Контрольная работа/Решение прямой задачи о положениях в параметрах Денавита-Хартенберга    |
| применять методы численного решения обратных задач кинематики манипуляторов               | ИД-1ПК-1 |  |  |  |   |  | + |  | Решение задач/Решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора                 |

#### **4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)**

##### **4.1. Текущий контроль успеваемости**

###### **6 семестр**

###### Форма реализации: Письменная работа

1. Применение МНК для аппроксимации табличной зависимости. Степенной базис (Контрольная работа)
2. Решение СЛАУ методом Холецкого (Контрольная работа)
3. Решение СЛАУ методом LU-разложения без выбора ведущего элемента (Контрольная работа)

###### Форма реализации: Проверка задания

1. Исследование обусловленности СЛАУ. Оценка погрешности решения СЛАУ (Решение задач)
2. Применение МНК для аппроксимации табличной зависимости. Тригонометрический базис. Сравнительный анализ решения в различных базисах (Решение задач)
3. Решение прямой задачи о положениях с помощью основной формулы геометрии движения и метода однородных преобразований (Решение задач)

###### Форма реализации: Смешанная форма

1. Защита лабораторных работ. Блок "Исследование погрешностей решения СЛАУ" (Лабораторная работа)
2. Защита лабораторных работ. Блок "Матрично-операторные методы в кинематике твёрдого тела" (Лабораторная работа)
3. Защита лабораторных работ. Блок "Приближение функций и математическая обработка данных" (Лабораторная работа)
4. Защита лабораторных работ. Блок "Решение СЛАУ методами матричных разложений" (Лабораторная работа)

###### **7 семестр**

###### Форма реализации: Письменная работа

1. Решение прямой задачи о положениях в параметрах Денавита-Хартенберга (Контрольная работа)
2. Численное решение нелинейных уравнений (Контрольная работа)
3. LU-разложение с частичным выбором ведущего элемента (Контрольная работа)

###### Форма реализации: Проверка задания

1. Решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора (Решение задач)

###### Форма реализации: Смешанная форма

1. Защита лабораторных работ. Блок "Кинематика манипуляционных роботов" (Лабораторная работа)
2. Защита лабораторных работ. Блок "Методы LU- и QR-разложений" (Лабораторная работа)
3. Защита лабораторных работ. Блок "Решение СЛАУ общего вида. Решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора" (Лабораторная работа)
4. Защита лабораторных работ. Блок "Численное решение нелинейных уравнений" (Лабораторная работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.  
Балльно-рейтинговая структура курсовой работы является приложением Б.

#### **4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине**

##### Экзамен (Семестр №6)

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

##### Экзамен (Семестр №7)

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

##### Курсовая работа (КР) (Семестр №7)

Оценка за курсовую работу определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ».

В диплом выставляется оценка за 7 семестр.

**Примечание:** Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

### **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

#### **5.1 Печатные и электронные издания:**

1. Адамов, Б. И. Применение основных матричных разложений в задачах механики и робототехники : учебное пособие по курсам "Вычислительная механика", "Численные методы в робототехнике", "Вычислительные методы компьютерного моделирования в механике", "Основы мехатроники и робототехники" по направлению "Мехатроника и робототехника" / Б. И. Адамов, А. Н. Маслов, Н. В. Осадченко, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" (НИУ"МЭИ") . – М. : Изд-во МЭИ, 2019 . – 84 с. - ISBN 978-5-7046-2150-8 .  
[http://elib.mpei.ru/action.php?kt\\_path\\_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=10865](http://elib.mpei.ru/action.php?kt_path_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=10865);
2. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченова Н. В.- "Вычислительные методы", (4-е изд., стер.), Издательство: "Лань", Санкт-Петербург, 2014 - (672 с.)  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=42190](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=42190);
3. Корецкий, А. В. Компьютерное моделирование кинематики манипуляционных роботов : Методическое пособие по курсу "Вычислительная механика" по специальности "Роботы и робототехнические системы " / А. В. Корецкий, Н. В. Осадченко, Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Изд-во МЭИ, 2000 . – 48 с.;
4. Машков К. Ю., Рубцов В. И., Рубцов И. В.- "Состав и характеристики мобильных роботов", Издательство: "МГТУ им. Н.Э. Баумана", Москва, 2014 - (75 с.)  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=58390](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=58390);
5. Лесков А. Г., Бажинова К. В., Селиверстова Е. В.- "Кинематика и динамика исполнительных механизмов манипуляционных роботов", Издательство: "МГТУ им. Н.Э. Баумана", Москва, 2017 - (104 с.)  
<https://e.lanbook.com/book/103405>;
6. Квасов Б. И.- "Численные методы анализа и линейной алгебры. Использование Matlab и Scilab", Издательство: "Лань", Санкт-Петербург, 2021 - (328 с.)  
<https://e.lanbook.com/book/168887>.

## **5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:**

1. СДО "Прометей";
2. Office / Российский пакет офисных программ;
3. Windows / Операционная система семейства Linux;
4. Майнд Видеоконференции;
5. Антиплагиат ВУЗ;
6. Scilab;
7. Libre Office;
8. GNU Octave.

## **5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:**

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>
2. ЭБС "Университетская библиотека онлайн" - [http://biblioclub.ru/index.php?page=main\\_ub\\_red](http://biblioclub.ru/index.php?page=main_ub_red)
3. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>
4. База данных ВИНТИ online - <http://www.viniti.ru/>
5. База данных журналов издательства Elsevier - <https://www.sciencedirect.com/>
6. Электронные ресурсы издательства Springer - <https://link.springer.com/>
7. База данных Web of Science - <http://webofscience.com/>
8. База данных Scopus - <http://www.scopus.com>
9. Национальная электронная библиотека - <https://rusneb.ru/>
10. ЭБС "Консультант студента" - <http://www.studentlibrary.ru/>
11. Журналы American Chemical Society - <https://www.acs.org/content/acs/en.html>
12. Журналы American Institute of Physics - <https://www.scitation.org/>
13. Журналы American Physical Society - <https://journals.aps.org/about>
14. База данных издательства Annual Reviews Science Collection - <https://www.annualreviews.org/>
15. База данных Association for Computing Machinery Digital Library - <https://dl.acm.org/about/content>
16. Журналы издательства Cambridge University Press - <https://www.cambridge.org/core>
17. База данных IEL издательства IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) - <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp?reload=true>
18. База данных Computers & Applied Sciences Complete (CASC) - <http://search.ebscohost.com>
19. База данных INSPEC на платформе компании EBSCO Publishing - <http://search.ebscohost.com>
20. Журналы Institute of Physics (IOP), Великобритания - <https://iopscience.iop.org/>
21. Журналы научного общества Optical Society of America (OSA) - <https://www.osapublishing.org/about.cfm>
22. Патентная база Orbit Intelligence компании Questel - <https://www.orbit.com/>
23. Журналы издательства Oxford University Press - <https://academic.oup.com/journals/>
24. База данных диссертаций ProQuest Dissertations and Theses Global - <https://search.proquest.com/pqdtglobal/index>
25. Журналы Журналы Royal Society of Chemistry - <https://pubs.rsc.org/>
26. Журналы издательства SAGE Publication (Sage) - <https://journals.sagepub.com/>
27. Журнал Science - <https://www.sciencemag.org/>
28. Журналы научного общества Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Digital Library - <https://www.spiedigitallibrary.org/>
29. Коллекция журналов Taylor & Francis Group - <https://www.tandfonline.com/>

30. Журналы по химии **Thieme Chemistry Package** компании **Georg Thieme Verlag KG** - <https://www.thieme-connect.com/products/all/home.html>
31. Журналы издательства **Wiley** - <https://onlinelibrary.wiley.com/>
32. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>
33. Портал открытых данных Российской Федерации - <https://data.gov.ru>
34. База открытых данных Министерства труда и социальной защиты РФ - <https://rosmintrud.ru/opendata>
35. База открытых данных профессиональных стандартов Министерства труда и социальной защиты РФ - <http://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/>
36. База открытых данных Министерства экономического развития РФ - <http://www.economy.gov.ru>
37. База открытых данных Росфинмониторинга - <http://www.fedsfm.ru/opendata>
38. Электронная открытая база данных "Polpred.com Обзор СМИ" - <https://www.polpred.com>
39. Информационно-справочная система «Кодекс/Техэксперт» - [Http://proinfosoft.ru; http://docs.cntd.ru/](Http://proinfosoft.ru;http://docs.cntd.ru/)
40. Национальный портал онлайн обучения «Открытое образование» - <https://openedu.ru>
41. Официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии - <http://protect.gost.ru/>
42. Открытая университетская информационная система «РОССИЯ» - <https://uisrussia.msu.ru>
43. Официальный сайт Министерства науки и высшего образования Российской Федерации - <https://minobrnauki.gov.ru>
44. Официальный сайт Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки - <https://obrnadzor>
45. Федеральный портал "Российское образование" - <http://www.edu.ru>
46. Информо - <https://www.informio.ru/>

## 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

| Тип помещения   | Номер аудитории, наименование           | Оснащение  |
|---|---|--|
| Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля | С-215, Учебная аудитория                | стол, стул, доска меловая  |
|   | Ж-120, Машинный зал ИВЦ                 | сервер, кондиционер  |
|   | Б-415, Учебная аудитория                | стол преподавателя, стол, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, экран, доска маркерная |
|   | Б-407, Учебная аудитория                | стол преподавателя, стол, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, экран, доска маркерная |
| Учебные аудитории для проведения лабораторных занятий                   | С-200, Компьютерный класс каф. "РМДиПМ" | стол, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, экран, компьютер персональный              |
|   | С-215, Учебная аудитория                | стол, стул, доска меловая  |
|   | Ж-120, Машинный зал ИВЦ                 | сервер, кондиционер  |
| Учебные аудитории для проведения  | С-215, Учебная аудитория                | стол, стул, доска меловая  |

|  |   |  |
|--|---|--|
| промежуточной аттестации                                 | Ж-120, Машинный зал ИВЦ                 | сервер, кондиционер  |
|  | Б-415, Учебная аудитория                | стол преподавателя, стол, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, экран, доска маркерная   |
| Помещения для самостоятельной работы                     | НТБ-303, Компьютерный читальный зал     | стол компьютерный, стул, стол письменный, вешалка для одежды, компьютерная сеть с выходом в Интернет, компьютер персональный, принтер, кондиционер |
|  | С-200, Компьютерный класс каф. "РМДиПМ" | стол, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, экран, компьютер персональный  |
| Помещения для консультирования                           | С-214, Кабинет сотрудников              | стол, стул, компьютер персональный, принтер  |
| Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря | С-114/1, Массажная                      |  |



## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

### Вычислительная механика

(название дисциплины)

#### 6 семестр

**Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:**

- КМ-1 Исследование обусловленности СЛАУ. Оценка погрешности решения СЛАУ (Решение задач)
- КМ-2 Решение СЛАУ методом Холецкого (Контрольная работа)
- КМ-3 Решение СЛАУ методом LU-разложения без выбора ведущего элемента (Контрольная работа)
- КМ-4 Защита лабораторных работ. Блок "Исследование погрешностей решения СЛАУ" (Лабораторная работа)
- КМ-5 Защита лабораторных работ. Блок "Решение СЛАУ методами матричных разложений" (Лабораторная работа)
- КМ-6 Применение МНК для аппроксимации табличной зависимости. Степенной базис (Контрольная работа)
- КМ-7 Применение МНК для аппроксимации табличной зависимости. Тригонометрический базис. Сравнительный анализ решения в различных базисах (Решение задач)
- КМ-8 Защита лабораторных работ. Блок "Приближение функций и математическая обработка данных" (Лабораторная работа)
- КМ-9 Решение прямой задачи о положениях с помощью основной формулы геометрии движения и метода однородных преобразований (Решение задач)
- КМ-10 Защита лабораторных работ. Блок "Матрично-операторные методы в кинематике твёрдого тела" (Лабораторная работа)

**Вид промежуточной аттестации – Экзамен.**

| Номер раздела | Раздел дисциплины   | Индекс КМ: | КМ -1 | КМ -2 | КМ -3 | КМ -4 | КМ -5 | КМ -6 | КМ -7 | КМ -8 | КМ -9 | КМ -10 |
|---------------|---|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|               |   | Неделя КМ: | 4     | 5     | 7     | 8     | 9     | 10    | 12    | 12    | 13    | 13     |
| 1             | Введение в вычислительную линейную алгебру  |            |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
| 1.1           | Исследование погрешностей решения систем линейных алгебраических уравнений при наличии погрешностей исходных данных |            | +     |       |       | +     |       |       |       |       |       |        |
| 1.2           | Решение СЛАУ методами матричных разложений  |            |       | +     | +     |       | +     |       |       |       |       |        |

|            |  |   |    |    |   |   |   |    |    |    |    |
|------------|--|---|----|----|---|---|---|----|----|----|----|
| 2          | Приближение функций и математическая обработка данных  |   |    |    |   |   |   |    |    |    |    |
| 2.1        | Метод наименьших квадратов                             |   |    |    |   |   | + | +  | +  |    |    |
| 2.2        | Введение в интерполяцию                                |   |    |    |   |   |   | +  | +  |    |    |
| 3          | Матрично-операторные методы в кинематике твёрдого тела |   |    |    |   |   |   |    |    |    |    |
| 3.1        | Матрично-операторные методы в кинематике твёрдого тела |   |    |    |   |   |   |    |    | +  | +  |
| Вес КМ, %: |  | 8 | 10 | 10 | 8 | 9 | 9 | 14 | 12 | 10 | 10 |

### 7 семестр

#### Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:

- КМ-1 Решение прямой задачи о положениях в параметрах Денавита-Хартенберга (Контрольная работа)
- КМ-2 Защита лабораторных работ. Блок "Кинематика манипуляционных роботов" (Лабораторная работа)
- КМ-3 LU-разложение с частичным выбором ведущего элемента (Контрольная работа)
- КМ-4 Защита лабораторных работ. Блок "Методы LU- и QR-разложений" (Лабораторная работа)
- КМ-5 Решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора (Решение задач)
- КМ-6 Защита лабораторных работ. Блок "Решение СЛАУ общего вида. Решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора" (Лабораторная работа)
- КМ-7 Численное решение нелинейных уравнений (Контрольная работа)
- КМ-8 Защита лабораторных работ. Блок "Численное решение нелинейных уравнений" (Лабораторная работа)

#### Вид промежуточной аттестации – Экзамен.

| Номер раздела | Раздел дисциплины   | Индекс КМ: | КМ-1 | КМ-2 | КМ-3 | КМ-4 | КМ-5 | КМ-6 | КМ-7 | КМ-8 |
|---------------|---|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|               |   | Неделя КМ: | 4    | 6    | 7    | 8    | 11   | 12   | 14   | 15   |
| 1             | Математические модели кинематики манипуляционных роботов                  |            |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1.1           | Кинематика манипуляционных роботов в параметрах Денавита-Хартенберга      |            | +    | +    |      |      |      |      |      |      |
| 1.2           | Кинематика манипуляционных роботов: задачи о скоростях                    |            |      | +    |      |      |      |      |      |      |
| 2             | Основные матричные разложения: LU-разложение с частичным выбором ведущего |            |      |      |      |      |      |      |      |      |

|            |   |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
|            | элемента и QR-разложение  |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 2.1        | Метод LU-разложения с частичным выбором ведущего элемента                             |    |    | +  | +  |    |    |    |    |
| 2.2        | QR-разложение   |    |    | +  | +  |    |    |    |    |
| 3          | Решения СЛАУ общего вида. Решение обратной задачи кинематики избыточного манипулятора |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 3.1        | Решения СЛАУ общего вида  |    |    |    |    |    | +  |    |    |
| 3.2        | Численное решение обратной задачи о скоростях избыточного манипулятора                |    |    |    |    | +  | +  |    |    |
| 4          | Численные методы решения нелинейных уравнений и систем нелинейных уравнений           |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 4.1        | Численные методы решения нелинейных уравнений и систем нелинейных уравнений           |    |    |    |    |    |    | +  | +  |
| 4.2        | Численное решение обратной задачи и положений   |    |    |    |    |    |    | +  | +  |
| Вес КМ, %: |   | 15 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 10 | 15 |

**БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА  
КУРСОВОГО ПРОЕКТА/РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**Вычислительная механика**

(название дисциплины)

**7 семестр**

**Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по курсовой работе:**

- КМ-1 Соблюдение графика выполнения раздела 1
- КМ-2 Выполнение раздела 1
- КМ-3 Оформление раздела 1
- КМ-4 Выполнение раздела 2
- КМ-5 Оформление раздела 2
- КМ-6 Выполнение раздела 3
- КМ-7 Оформление раздела 3
- КМ-8 Выполнение раздела 4
- КМ-9 Оформление раздела 4

**Вид промежуточной аттестации – защита КР.**

| Номер раздела | Раздел курсового проекта/курсовой работы   | Индекс КМ: | КМ -1 | КМ -2 | КМ -3 | КМ -4 | КМ -5 | КМ -6 | КМ -7 | КМ -8 | КМ -9 |
|---------------|--|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               |  | Неделя КМ: | 4     | 6     | 6     | 8     | 8     | 13    | 13    | 15    | 15    |
| 1             | Описание кинематики манипулятора в параметрах Денавита-Хартенберга                     |            | +     | +     | +     |       |       |       |       |       |       |
| 2             | Решение прямой задачи о положениях. Анализ рабочей области                             |            |       |       |       | +     | +     |       |       |       |       |
| 3             | Уравнения кинематики манипулятора в скоростях. Моделирование траекторного движения     |            |       |       |       |       |       | +     | +     |       |       |
| 4             | Решение обратной задачи о положениях манипулятора. Моделирование траекторного движения |            |       |       |       |       |       |       |       | +     | +     |
| Вес КМ, %:    |  |            | 8     | 20    | 12    | 8     | 8     | 14    | 12    | 8     | 10    |