

**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**

**Оценочные материалы  
по дисциплине  
Динамика мехатронных систем**

**Москва  
2023**

## ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Преподаватель

(должность)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Капустина О.М.
	Идентификатор	R6f4a785d-KapustinaOM-1bc0f249

(подпись)

О.М.

Капустина

(расшифровка  
подписи)

## СОГЛАСОВАНО:

Руководитель  
образовательной  
программы

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

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

(подпись)

Б.И. Адамов

(расшифровка  
подписи)

Заведующий  
выпускающей кафедры

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

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

(подпись)

И.В.

Меркурьев

(расшифровка  
подписи)

## 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-1 Способен применять естественнонаучные и общетехнические знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности

ИД-15 Применяет аппарат теории колебаний, в том числе асимптотические методы, для исследования и моделирования динамики мехатронных систем

и включает:

**для текущего контроля успеваемости:**

Форма реализации: Смешанная форма

1. Контрольная работа по теме "Метод осреднения Крылова Боголюбова" раздела 3 (Контрольная работа)
2. Контрольная работа по теме "Приближённое решение уравнений динамики методом Пуанкаре" раздела 1 (Контрольная работа)
3. Контрольный опрос по разделу 3 Разделение движений в системах с быстрой фазой. Методы осреднения (Коллоквиум)

Форма реализации: Устная форма

1. Контрольный опрос по разделу 1 Регулярно возмущённые по малому параметру системы уравнений и асимптотические методы их решений (Коллоквиум)
2. Контрольный опрос по разделу 2 "Асимптотические методы решений динамических уравнений в системах с пограничным слоем" (Коллоквиум)

## БРС дисциплины

8 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %					
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5
	Срок КМ:	4	6	8	10	11
Регулярно возмущённые по малому параметру системы уравнений и асимптотические методы их решений						
Введение	+	+	+			
Классификация возмущений уравнений по малому параметру	+	+				
Асимптотические методы решений регулярно возмущённых по малому параметру уравнений	+	+				
Сингулярно возмущённые по малому параметру системы уравнений и асимптотические методы их решений						

Асимптотические методы решений динамических уравнений в системах с погранслоем			+		
Разделение движений в системах с быстрой фазой. Методы осреднения					
Асимптотические методы решения динамических уравнений в системах с быстрой фазой				+	+
Вес КМ:	20	20	20	20	20

\$Общая часть/Для промежуточной аттестации\$

### БРС курсовой работы/проекта

8 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %			
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3
	Срок КМ:	4	8	11
Асимптотические методы решений динамических уравнений в системах с погранслоем		+	+	+
Вес КМ:		30	30	40

## 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-1	ИД-15 <sub>ОПК-1</sub> Применяет аппарат теории колебаний, в том числе асимптотические методы, для исследования и моделирования динамики мехатронных систем	<p>Знать:</p> <p>Основные определения, теоремы, алгоритмы асимптотических методов решения регулярно возмущённых по малому параметру уравнений динамики мехатронных систем</p> <p>Основные определения, теоремы, алгоритмы асимптотических методов решения уравнений динамики систем с погранслоем</p> <p>Основные определения, теоремы, алгоритмы асимптотических методов решения уравнений динамики мехатронных систем с быстрой фазой</p> <p>Уметь:</p> <p>Применять алгоритмы асимптотических методов решения регулярно</p>	<p>Контрольный опрос по разделу 1 Регулярно возмущённые по малому параметру системы уравнений и асимптотические методы их решений (Коллоквиум)</p> <p>Контрольная работа по теме "Приближённое решение уравнений динамики методом Пуанкаре" раздела 1 (Контрольная работа)</p> <p>Контрольный опрос по разделу 2 "Асимптотические методы решений динамических уравнений в системах с погранслоем" (Коллоквиум)</p> <p>Контрольный опрос по разделу 3 Разделение движений в системах с быстрой фазой. Методы осреднения (Коллоквиум)</p> <p>Контрольная работа по теме "Метод осреднения Крылова Боголюбова" раздела 3 (Контрольная работа)</p>

		<p>возмущённых по малому параметру уравнений динамики мехатронных систем</p> <p>Применять алгоритмы асимптотических методов решения уравнений динамики систем с погранслоем</p> <p>Применять алгоритмы асимптотических методов решения уравнений динамики мехатронных систем с быстрой фазой</p>	
--	--	--	--

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

### КМ-1. Контрольный опрос по разделу 1 Регулярно возмущённые по малому параметру системы уравнений и асимптотические методы их решений

**Формы реализации:** Устная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Коллоквиум

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Устный опрос с возможными письменными комментариями в процессе ответа

#### Краткое содержание задания:

Ответить на вопросы

#### Контрольные вопросы/задания:

Знать: Основные определения, теоремы, алгоритмы асимптотических методов решения возмущённых по малому параметру уравнений динамики мехатронных систем	1. Какие системы дифференциальных уравнений называются регулярно возмущёнными по малому параметру?
---	--

#### Описание шкалы оценивания:

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

### КМ-2. Контрольная работа по теме "Приближённое решение уравнений динамики методом Пуанкаре" раздела 1

**Формы реализации:** Смешанная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Решение в аудитории индивидуального задания с применением компьютерной системы Mathematica

#### Краткое содержание задания:

### ЗАДАЧА 1

Уравнения вертикального падения шара в вязкой среде (задача Стокса) в проекциях на направленную вниз вертикальную ось  $x$  имеют вид

$$\begin{aligned}M \frac{dV}{dT} &= MG - KV, \\ \frac{dX}{dT} &= V, \\ X(0) &= X_0, \\ V(0) &= V_0.\end{aligned}\tag{1}$$

Здесь  $M$  – масса шара,  $X$  – координата центра масс,  $V$  – проекция на ось  $X$  скорости центра масс,  $G$  – ускорение свободного падения под действием разности веса и архимедовой силы.

Провести нормализацию уравнений (1), перейдя к безразмерным переменным согласно формулам замены

$$t = \frac{T}{T_*}, v = \frac{V}{V_*}, x = \frac{X}{X_*}.$$

Для качественных оценок найдём из уравнения установившегося движения

$$MG - KV = 0$$

скорость установившегося движения

$$V_1 = \frac{MG}{K}.$$

Постоянную времени, характеризующую изменение скорости за счёт силы трения, найдём из уравнения

$$M \frac{dV}{dT} = -KV.$$

Эта постоянная равна



$$T_1 = \frac{M}{K}.$$

Рассмотреть класс движений при малых временах  $T \ll T_1$  с малой начальной скоростью  $V_0 \ll V_1$ .

Выбрать

$$T_* = \mu T_1, V_* = V_0 = \mu V_1, X_* = V_* T_*, \mu \ll 1.$$

Отыскивая решение уравнений падения шара, записанных в безразмерном нормализованном форме, в виде рядов по степеням малого параметра  $\mu$

$$\begin{aligned} x &= x^{(0)} + \mu x^{(1)} + \mu^2 x^{(2)} + \dots, \\ v &= v^{(0)} + \mu v^{(1)} + \mu^2 v^{(2)} + \dots, \end{aligned}$$

найти методом Пуанкаре приближённое решение уравнений движения

$$\begin{aligned} x_{(1)} &= x^{(0)} + \mu x^{(1)}, \\ v_{(1)} &= v^{(0)} + \mu v^{(1)}. \end{aligned} \tag{2}$$

Записать решение (2) в размерных переменных.

Построить в зависимости от времени  $t$  графики точного  $x, v$ , приближенного  $x_{(1)}, v_{(1)}$  решения уравнений (1), а также графики погрешности

$$\begin{aligned} \Delta x &= x - x_{(1)}, \\ \Delta v &= v - v_{(1)}. \end{aligned}$$

Принять:

$$\begin{aligned} M &= 3,4 \cdot 10^{-5} \text{ кг}, G = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}, K = 0,2 \text{ Н с / м}, \\ X(0) &= 0,01 \text{ м}, \mu = 0,1. \end{aligned}$$

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: Основные определения, теоремы, алгоритмы асимптотических методов решения регулярно	1. В чем заключается метод Пуанкаре нахождения приближённого решения уравнений динамики?
---	--

возмущённых по малому параметру уравнений динамики мехатронных систем	
Уметь: Применять алгоритмы асимптотических методов решения уравнений динамики мехатронных систем возмущённых по малому параметру уравнений динамики мехатронных систем	1. Как применить метод Пуанкаре для приближённого решения уравнений динамики заданной механической системы?

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно*

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 60*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто, выбрано верное направление для решения задач*

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено*

**КМ-3. Контрольный опрос по разделу 2 "Асимптотические методы решений динамических уравнений в системах с погранслоем"**

**Формы реализации:** Устная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Коллоквиум

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Устный опрос с возможными письменными комментариями в процессе ответа

**Краткое содержание задания:**

Ответить на предложенные вопросы

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: Основные определения, теоремы, алгоритмы асимптотических методов решения уравнений динамики мехатронных систем с быстрой фазой	1. Как ввести малый параметр в системах с быстрым и медленным временем? Что называется погранслоем?
Уметь: Применять алгоритмы асимптотических методов решения уравнений динамики систем с погранслоем	1. Как построить вырожденную и присоединённую систему уравнений?

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

*Оценка:* 4

*Нижний порог выполнения задания в процентах:* 70

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

*Оценка:* 3

*Нижний порог выполнения задания в процентах:* 50

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

#### **КМ-4. Контрольный опрос по разделу 3 Разделение движений в системах с быстрой фазой. Методы осреднения**

**Формы реализации:** Смешанная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Коллоквиум

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Устные ответы на вопросы, дополненные при необходимости письменными комментариями

**Краткое содержание задания:**

Ответить на вопросы

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: Основные определения, теоремы, алгоритмы асимптотических методов решения уравнений динамики систем с погранслоем	1.Что собой представляет стандартная форма и обобщение стандартной формы уравнений метода осреднения Крылова-Боголюбова?
Уметь: Применять алгоритмы асимптотических методов решения уравнений динамики мехатронных систем с быстрой фазой	1.Описать алгоритм реализации метода осреднения Крылова Боголюбова

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка:* 5

*Нижний порог выполнения задания в процентах:* 90

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

*Оценка:* 4

*Нижний порог выполнения задания в процентах:* 60

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

*Оценка:* 3

*Нижний порог выполнения задания в процентах:* 50

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

## КМ-5. Контрольная работа по теме "Метод осреднения Крылова Боголюбова" раздела 3

**Формы реализации:** Смешанная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Решение в аудитории индивидуального задания с применением компьютерной системы Mathematica

### Краткое содержание задания:

Найти методом осреднения приближённое решение в первом по малому параметру приближении уравнений свободных колебаний груза на горизонтальной плоскости рис. 1 под действием упругой силы пружины и кулоновой силы трения

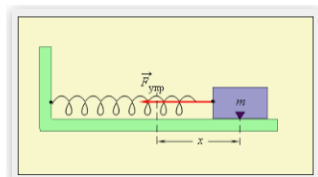


Рис. 1 Груз на шероховатой плоскости

Ось  $x$  направлена по горизонтали, начало отсчёта находится в положении равновесия груза.

Построить графики амплитуды  $a$  и фазы  $\varphi$  координаты проекции скорости  $v$ , погрешностей  $a$ ,  $\varphi$ ,  $x$ ,  $v$  в зависимости от времени.

Масса груза  $M=10^{-2}$  кг, коэффициент жёсткости пружины  $K=20$  кг  $c^{-2}$ , коэффициент трения груза о плоскость  $f=0,02$ ,  $x(0)=3,5 \cdot 10^{-2}$  м,  $\dot{x}(0)=0,001$  м  $c^{-1}$

$$|F_{\text{тр}}| = f M g = 0,00196 \text{ Н}$$

$$\epsilon = f M g / (K x(0)) = 0,0028$$

тби

### Контрольные вопросы/задания:

<p><b>Знать:</b> Основные определения, теоремы, алгоритмы асимптотических методов решения уравнений динамики систем с погранслоем</p>	<p>1. Что собой представляет метод осреднения Крылова Боголюбова?</p>
<p><b>Уметь:</b> Применять алгоритмы асимптотических методов решения уравнений динамики мехатронных систем с быстрой фазой</p>	<p>1. Найти методом осреднения Крылова Боголюбова приближённое решение уравнений динамики заданной механической системы</p>

### Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 90

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено



# СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

8 семестр

Форма промежуточной аттестации: Экзамен

Пример билета

МЭИ Кафедра робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин  
Дисциплина Динамика мехатронных систем

Утверждаю:  
*Меркулов*  
Зав. кафедрой  
Меркулов И.В.  
7 июня 2021 г.

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 2

1. Варианты введения малого параметра.

2. Найти методом осреднения приближённое решение в первом по малому параметру приближении уравнений свободных колебаний груза на рисунке под действием упругой силы пружины и силы вязкого сопротивления, пропорциональной первой степени скорости груза.

Ось  $x$  направлена по вертикали, начало отсчёта находится в положении равновесия груза.




Рис. Груз, подвешенный с помощью упруго-демпфирующего элемента

Масса груза  $M=10^{-3}$  кг, коэффициент жёсткости пружины  $K=20,5$  кг  $c^{-2}$ , коэффициент демпфирования  $R = 2,1 \cdot 10^{-3}$  кг  $c^{-1}$ ,  $x(0)=3,47 \cdot 10^{-3}$  м,  $\dot{x}(0)=0,001$  м  $c^{-1}$ ,  $F_{сопр}=R \dot{v}$ ,  $\epsilon=R / K / \sqrt{M / K}$ .

Figure 1 Пример экзаменационного билета

## Процедура проведения

Проводится по индивидуальным билетам в устной форме в аудитории

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

**1. Компетенция/Индикатор:** ИД-15<sub>ОПК-1</sub> Применяет аппарат теории колебаний, в том числе асимптотические методы, для исследования и моделирования динамики мехатронных систем

### Вопросы, задания

- 1.1. История происхождения и смысл понятия «мехатронные системы», примеры мехатронных систем.
2. Определение, цель использования асимптотических методов.
3. Приведение систем уравнений к безразмерному нормализованному виду. Классы движений. Варианты введения малого параметра. Разделение движений в жёстких системах.
4. Регулярные и сингулярные возмущения по малому параметру. Два типа асимптотических разложений по малому параметру. Избыточность в приближённых методах.
5. Теорема Пуанкаре.
6. Секулярные члены. Построение методом Пуанкаре приближённого решения уравнения гармонического осциллятора с малым разбросом коэффициента жёсткости от номинального значения.

7. Метод Пуанкаре-Ляпунова (Линдштедта-Пуанкаре). Применение метода Пуанкаре-Ляпунова для построения приближённого решения гармонического осциллятора с малым разбросом коэффициента жёсткости от номинального значения.
8. Разделение движения в системах с погранслоем. Медленное и быстрое безразмерное время. Вырожденная и присоединённая системы уравнений. Теорема Тихонова. Построение вырожденной системы уравнений в системах с иерархией числовых значений характерных времён. О переходе к вырожденным уравнениям на бесконечном интервале времени.
9. Асимптотические разложения решений в системах с погранслоем. Асимптотическое разложение в задаче Стокса о вертикальном падении шара в вязкой жидкости на классе движения «в большом». Асимптотическое разложение в задаче о движении физического маятника в сильно вязкой среде.
10. Разделение движений в системах с разрывными характеристиками.
11. Метод осреднения Крылова-Боголюбова. Стандартная форма и обобщение стандартной формы уравнений метода осреднения Крылова-Боголюбова. Алгоритм асимптотического разложения метода Крылова-Боголюбова. Оценка точности приближений метода осреднения Крылова-Боголюбова.

### **Материалы для проверки остаточных знаний**

- 1.1. История происхождения и смысл понятия «мехатронные системы», примеры мехатронных систем.
2. Определение, цель использования асимптотических методов.
3. Приведение систем уравнений к безразмерному нормализованному виду. Классы движений. Варианты введения малого параметра.
4. Регулярные и сингулярные возмущения по малому параметру.
5. Теорема Пуанкаре.
6. Секулярные члены.
7. Метод Пуанкаре-Ляпунова (Линдштедта-Пуанкаре).
8. Разделение движения в системах с погранслоем. Медленное и быстрое безразмерное время. Вырожденная и присоединённая системы уравнений. Теорема Тихонова. О переходе к вырожденным уравнениям на бесконечном интервале времени.
9. Разделение движений в системах с разрывными характеристиками.
10. Метод осреднения Крылова-Боголюбова.
11. Порождающая система уравнений,

Ответы:

Дать правильный ответ на вопрос

Верный ответ: Правильный ответ на вопрос

### **II. Описание шкалы оценивания**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "продвинутого" уровня. Ответы даны верно, четко сформулированные особенности практических решений

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 60*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "базового" уровня. Большинство ответов даны верно. В части материала есть незначительные недостатки

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "порогового" уровня. Основная часть задания выполнена верно. на вопросы углубленного уровня

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

Итоговая оценка выставляется по совокупности экзаменационной и семестровой оценок



**Для курсового проекта/работы:**

**8 семестр**

**Форма проведения: Защита КП/КР**

***I. Процедура защиты КП/КР***

Ответ на вопросы по курсовой работе преподавателям из принимающей комиссии

***II. Описание шкалы оценивания***

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "продвинутого" уровня. Ответы даны верно, четко сформулированные особенности практических решений

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 60*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "базового" уровня. Большинство ответов даны верно. В части материала есть незначительные недостатки

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания:* Работа выполнена в рамках "порогового" уровня. Основная часть задания выполнена верно. на вопросы углубленного уровня

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

Оценка за курсовую работу выставляется по совокупности оценок промежуточной аттестации и защиты