

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор, проректор по  
УР

А.Е. Рудин

« 21 » 02 2023 года

## Рабочая программа дисциплины

**Б1.В.07**

Нелинейные задачи динамики машин

Учебный план: 2023-2024 15.04.02 ИИТА КИТМ ОО №2-1-87.plx

Кафедра: **28** Машиноведения

Направление подготовки:  
(специальность) 15.04.02 Технологические машины и оборудование

Профиль подготовки: Компьютерный инжиниринг технологических машин  
(специализация)

Уровень образования: магистратура

Форма обучения: очная

### План учебного процесса

Семестр (курс для ЗАО)		Контактная работа обучающихся		Сам. работа	Контроль, час.	Трудоём- кость, ЗЕТ	Форма промежуточной аттестации
		Лекции	Практ. занятия				
3	УП	17	17	71,75	2,25	3	Зачет, Курсовая работа
	РПД	17	17	71,75	2,25	3	
Итого	УП	17	17	71,75	2,25	3	
	РПД	17	17	71,75	2,25	3	

Рабочая программа дисциплины составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 15.04.02 Технологические машины и оборудование, утверждённым приказом Минобрнауки России от 14.08.2020 г. № 1026

Составитель (и):

кандидат технических наук, Профессор

\_\_\_\_\_

Марковец Алексей  
Владимирович

От кафедры составителя:

Заведующий кафедрой машиноведения

\_\_\_\_\_

Марковец Алексей  
Владимирович

От выпускающей кафедры:

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_

Марковец Алексей  
Владимирович

Методический отдел: Макаренко С.В.

---

## 1 ВВЕДЕНИЕ К РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ ДИСЦИПЛИНЫ

**1.1 Цель дисциплины:** Сформировать компетенции обучающегося в области нелинейных задач динамики машин

**1.2 Задачи дисциплины:**

- Показать значение исследования и решения задач нелинейной динамики машин в процессе проектирования.

- Научить разрабатывать динамические и математические модели машин и механизмов с учетом входящих в них нелинейных элементов.

**1.3 Требования к предварительной подготовке обучающегося:**

Предварительная подготовка предполагает создание основы для формирования компетенций, указанных в п. 2, при изучении дисциплин:

Математическое моделирование

## 2 КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

<b>ПК-1: Способен сопровождать жизненный цикл продукции машиностроения</b>
--

<b>Знать:</b> Аналитические и численные методы решения нелинейных задач динамики машин
--

<b>Уметь:</b> Выбирать и применять аналитические и численные методы решения математических моделей, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями применительно к задачам динамики машин
--

<b>Владеть:</b> Навыками получения аналитического и численного решения нелинейных математических моделей, описывающих динамику машин, узлов и механизмов
--

<b>ПК-3: Способен организовывать техническое и методическое руководство проектированием продукции (услуг)</b>
---

<b>Знать:</b> Принципы разработки динамических и математических моделей узлов и механизмов технологических машин с учетом нелинейных эффектов (звеньев)
---

<b>Уметь:</b> Разрабатывать динамические и математические модели узлов и механизмов технологических машин с учетом нелинейных эффектов (звеньев)
--

<b>Владеть:</b> Навыками построения динамических моделей и получения соответствующих им математических моделей узлов и механизмов технологических машин при учете нелинейных явлений (звеньев)
--

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Наименование и содержание разделов, тем и учебных занятий	Семестр (курс для ЗАО)	Контактная работа		СР (часы)	Инновац. формы занятий	Форма текущего контроля
		Лек. (часы)	Пр. (часы)			
Раздел 1. Основы нелинейной механики	3					
Тема 1. Введение. Основные понятия и определения нелинейной механики		1		10		
Тема 2. Типы нелинейностей, причины их возникновения. Способы описания нелинейных характеристик упругих, диссипативных элементов. Нелинейность рабочих характеристик двигателя и машины, функции положения механизма.		1		10	ГД	О
Раздел 2. Методы определения периодических решений						
Тема 3. Фазовая плоскость. Особые точки линейных и нелинейных систем. Аналитические методы построения фазовой плоскости. Методы построения фазовой плоскости с применением компьютерных методов расчета. Практическое занятие: построение фазовой плоскости		2	2	10		
Тема 4. Методы определения периодических решений механических систем, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями. Метод припасовывания решений. Метод гармонического баланса. Метод гармонической линеаризации. Практическое занятие: определение периодического решения нелинейной математической модели механической системы с одной степенью свободы		5	3	10		
Раздел 3. Анализ нелинейных систем с одной степенью свободы						
Тема 5. Вынужденные колебания при гармоническом вибрационном воздействии и силе сопротивления, пропорциональной скорости. Дифференциальное уравнение механической системы с нелинейной упругой характеристикой. Анализ периодических решений методом гармонической линеаризации. построение АЧХ системы. Практическое занятие: исследование вынужденных колебаний механической системы с одной степенью подвижности при нелинейной упругой характеристике.	2	3	7	ГД	О	

Тема 6. Вынужденные колебания при гармоническом вибратционном воздействии и силе сухого трения. Дифференциальное уравнение механической системы при учете сухого трения. Анализ периодических решений методом гармонической линеаризации. построение АЧХ системы. Практическое занятие: исследование вынужденных колебаний механической системы с одной степенью подвижности при учете силы сухого трения.	2	3	8,25	ГД
Тема 7. Вынужденные колебания в системе с внутренним трением. Дифференциальное уравнение механической системы с вязким трением. Анализ периодических решений методом гармонической линеаризации. построение АЧХ системы. Практическое занятие: исследование вынужденных колебаний механической системы с одной степенью подвижности с вязким трением.	2	3	8,25	ГД
Тема 8. Резонансы дробного порядка в виброзащитных системах. Субгармонический резонанс. Автоколебания. Практическое занятие: Исследование субгармонических резонансов механической системы	2	3	8,25	
Итого в семестре (на курсе для ЗАО)	17	17	71,75	
Консультации и промежуточная аттестация (Зачет, Курсовая работа)	2,25			
<b>Всего контактная работа и СР по дисциплине</b>	36,25		71,75	

#### 4 КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

**4.1 Цели и задачи курсовой работы (проекта):** Закрепление навыков студентов по исследованию нелинейных математических моделей, соответствующих узлам и механизмам машин отрасли, аналитически и на ЭВМ

**4.2 Тематика курсовой работы (проекта):** Темы курсового проектирования связаны с научно-исследовательской работой студента, выполняемой им под руководством преподавателя в течение обучения

**4.3 Требования к выполнению и представлению результатов курсовой работы (проекта):**  
Работа выполняется индивидуально, с использованием ЭВМ.  
Результаты представляются в виде пояснительной записки, объемом 24–30 листов формата А4, содержащего следующие обязательные элементы:

- введение;
- динамическая модель нелинейной механической системы;
- математическая модель нелинейной механической системы;
- определение периодического решения математической модели нелинейной механической системы;
- компьютерное моделирование колебаний нелинейной механической системы;
- заключение;
- список использованных источников;
- Приложение

#### 5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

##### 5.1 Описание показателей, критериев и системы оценивания результатов обучения

##### 5.1.1 Показатели оценивания

Код компетенции	Показатели оценивания результатов обучения	Наименование оценочного средства
ПК-3	Называет причины возникновения нелинейных явлений в машинах; описывает характеристики нелинейных элементов (звеньев);	Вопросы устного собеседования

	<p>называет принципы построения динамических моделей машин и механизмов, с учетом нелинейных элементов (звеньев); раскрывает методы получения математической модели механической системы по ее динамической модели при учете нелинейных элементов (звеньев).</p> <p>Выполняет построение и дает описание динамической модели механической системы, содержащей нелинейные звенья; записывает математическую модель исследуемой механической системы, соответствующей динамической модели с учетом нелинейных звеньев.</p> <p>Получает динамическую и математическую модели нелинейной механической системы применительно к целям исследования узлов и механизмов технологических машин.</p>	<p>Практико-ориентированные задания</p> <p>Курсовая работа</p>
ПК-1	<p>Характеризует приближенные аналитические методы определения периодических решений нелинейных дифференциальных уравнений применительно к задачам исследования нелинейной динамики машин; воспроизводит алгоритмы численного решения задач нелинейной динамики машин.</p> <p>Объясняет особенности реализации аналитических и численных методов поиска периодических решений нелинейных дифференциальных уравнений применительно к задачам динамики машин.</p> <p>Решает с использованием аналитического аппарата и возможностей современных ЭВМ нелинейные математические модели, соответствующие динамическим моделям узлов машин и механизмов; анализирует получаемые решения; оценивает</p>	<p>Вопросы устного собеседования</p> <p>Практико-ориентированные задания</p> <p>Курсовая работа</p>

#### 5.1.2 Система и критерии оценивания

Шкала оценивания	Критерии оценивания сформированности компетенций	
	Устное собеседование	Письменная работа
5 (отлично)		Критическое и разностороннее рассмотрение вопросов, свидетельствующее о значительной самостоятельной работе с источниками. Качество исполнения всех элементов задания полностью соответствует всем требованиям. Учитываются баллы, накопленные в течение семестра.
4 (хорошо)		Все заданные вопросы освещены в необходимой полноте и с требуемым качеством. Ошибки отсутствуют. Самостоятельная работа проведена в достаточном объеме, но ограничивается только основными рекомендованными источниками информации. Или. Работа выполнена в соответствии с заданием. Имеются отдельные несущественные ошибки или отступления от правил оформления работы. Учитываются баллы, накопленные в течение семестра.
3 (удовлетворительно)		Задание выполнено полностью, но в работе есть отдельные существенные ошибки, либо качество представления работы низкое, либо работа представлена с опозданием. Или. Задание выполнено полностью, но с многочисленными существенными ошибками. При этом нарушены правила оформления или сроки представления работы. Учитываются баллы, накопленные в течение семестра.
2 (неудовлетворительно)		Отсутствие одного или нескольких

		<p>обязательных элементов задания, либо многочисленные грубые ошибки в работе, либо грубое нарушение правил оформления или сроков представления работы.</p> <p>Или.</p> <p>Содержание работы полностью не соответствует заданию.</p> <p>Или.</p> <p>Представление чужой работы, плагиат, либо отказ от представления работы.</p> <p>Не учитываются баллы, накопленные в течение семестра.</p>
Зачтено	Обучающийся ответил на вопросы устного собеседования, решил практические задачи, прошел интернет-тестирование, возможно допуская несущественные ошибки в ответе на вопросы преподавателя. Учитываются баллы, накопленные в течение семестра.	Не предусмотрено
Не зачтено	Обучающийся не ответил на вопросы устного собеседования, не решил практические задачи, не прошел интернет-тестирование, допустил существенные ошибки в ответе на вопросы преподавателя. Не учитываются баллы, накопленные в течение семестра.	Не предусмотрено

## 5.2 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

### 5.2.1 Перечень контрольных вопросов

№ п/п	Формулировки вопросов
Семестр 3	
1	Гармонические колебания механических систем, описываемые линейным дифференциальным уравнением
2	Причины возникновения нелинейных явлений в механических колебательных системах
3	Представление нелинейных упругих и диссипативных сил при исследовании колебаний механических систем
4	Представление нелинейных характеристик рабочих процессов, характеристик двигателя и функции положения при исследовании колебаний механических систем
5	Методы фазовой плоскости: основные понятия, построение фазового портрета на примере линейного осциллятора без демпфирования
6	Построение фазового портрета на примере нелинейного дифференциального уравнения Дюффинга
7	Фазовые портреты дифференциального уравнения второго порядка с демпфированием
8	Определение периодического решения линейного дифференциального уравнения на базе замкнутой формы решения
9	Определение периодического решения линейного дифференциального уравнения с использованием разложения в ряд Фурье
10	Определение периодического решения нелинейного дифференциального уравнения методом припасовывания
11	Определение периодического решения нелинейного дифференциального уравнения методом гармонического баланса
12	Определение периодического решения нелинейного дифференциального уравнения методом гармонической линеаризации
13	Свободные колебания механической системы с нелинейной упругой характеристикой
14	Вынужденные колебания нелинейной механической системы с одной степенью свободы при гармонической вынуждающей силе. Случай вязкого трения
15	Вынужденные колебания нелинейной механической системы с одной степенью свободы при гармонической вынуждающей силе. Случай сухого трения
16	Вынужденные колебания нелинейной механической системы с одной степенью свободы при гармонической вынуждающей силе. Случай внутреннего трения

17	Субгармонические резонансы
18	Автоколебания

### 5.2.2 Типовые тестовые задания

Не предусмотрено

### 5.2.3 Типовые практико-ориентированные задания (задачи, кейсы)

Типовые практико-ориентированные задания находятся в Приложении к данной РГД

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

### 5.3.1 Условия допуска обучающегося к промежуточной аттестации и порядок ликвидации академической задолженности

Проведение промежуточной аттестации регламентировано локальным нормативным актом СПбГУПТД «Положение о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся»

### 5.3.2 Форма проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Устная  +  Письменная  Компьютерное тестирование  Иная

### 5.3.3 Особенности проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Не допускается использование текстов лекций и справочных материалов.  
Время на подготовку ответа на зачете не превышает 40 мин.

## 6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 6.1 Учебная литература

Автор	Заглавие	Издательство	Год издания	Ссылка
<b>6.1.1 Основная учебная литература</b>				
Красильников, П. С.	Прикладные методы исследования нелинейных колебаний	Москва, Ижевск: Институт компьютерных исследований	2019	<a href="http://www.iprbookshop.ru/92109.html">http://www.iprbookshop.ru/92109.html</a>
Вульфсон И. И., Преображенская М. В.	Колебания в цикловых механизмах	СПб.: СПбГУПТД	2013	<a href="http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=1270">http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=1270</a>
<b>6.1.2 Дополнительная учебная литература</b>				
Мазин Л. С., Марковец А. В.	Нелинейные задачи динамики машин. Практические занятия	СПб.: СПбГУПТД	2017	<a href="http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=201788">http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=201788</a>
Мазин Л. С., Марковец А. В., Беспалова И. М., Гренишина Н. А., Рокотов Н. В.	Нелинейные задачи динамики машин. Курсовая работа	СПб.: СПбГУПТД	2013	<a href="http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=1333">http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=1333</a>
Мазин Л.С., Марковец А.В., Мартыничик К.И.	Нелинейные задачи динамики машин. Практические занятия	СПб.: СПбГУПТД	2019	<a href="http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=2019145">http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=2019145</a>

### 6.2 Перечень профессиональных баз данных и информационно-справочных систем

Реферативная и справочная база данных рецензируемой литературы Scopus [Электронный ресурс]. URL: <https://www.scopus.com>

Электронно-библиотечная система IPRbooks [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iprbookshop.ru/>

### 6.3 Перечень лицензионного и свободно распространяемого программного обеспечения

Microsoft Office Standart Russian Open No Level Academic

Microsoft Windows Home Russian Open No Level Academic Legalization Get Genuine (GGK) + Microsoft Windows Professional (Pro – профессиональная) Russian Upgrade Open No Level Academic

Лицензия на право использования Учебного комплекта программного обеспечения Корпоративный справочник Материалы и Сортаменты

Лицензия на право использования Учебного комплекта программного обеспечения Пакет обновления ВЕРТИКАЛЬ



Лицензия на право использования Учебного комплекта программного обеспечения Пакет обновления КОМПАС-3D

Octave

MATLAB

#### 6.4 Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Аудитория	Оснащение
Компьютерный класс	Мультимедийное оборудование, компьютерная техника с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду
Лекционная аудитория	Мультимедийное оборудование, специализированная мебель, доска
Учебная аудитория	Специализированная мебель, доска

## Приложение

рабочей программы дисциплины

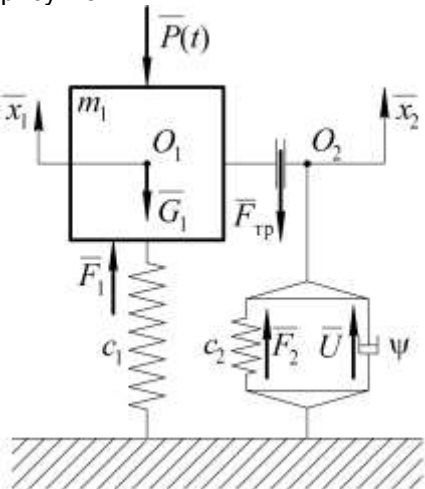
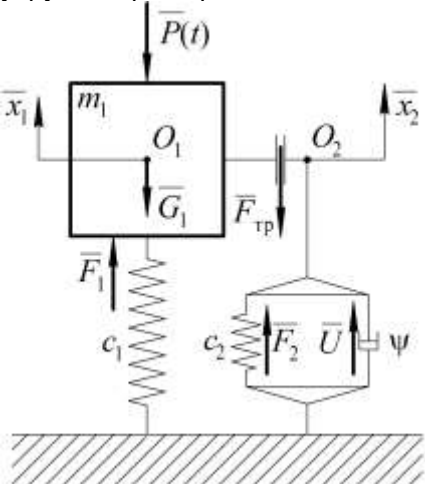
Нелинейные задачи динамики машин

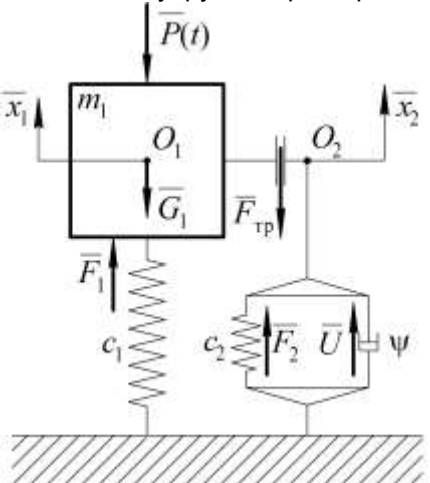
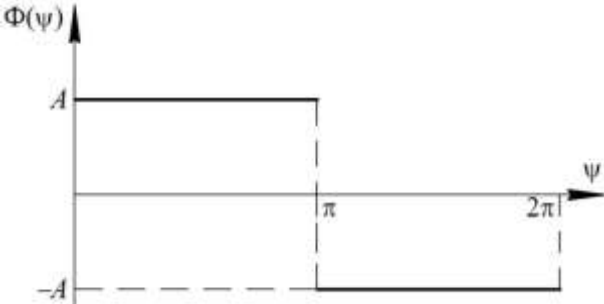
наименование дисциплины

по направлению подготовки  
наименование ОП (профиля):

15.04.02 – Технологические машины и оборудование  
Компьютерный инжиниринг технологических машин

### 5.2.3 Типовые практико-ориентированные задания (задачи, кейсы)

№ п/п	Условия типовых практико-ориентированных заданий (задач, кейсов)
Семестр 3	
1	<p>Составить математическую модель, соответствующую динамической модели, представленной на рисунке</p>  <p>The diagram shows a mass <math>m_1</math> with center of mass <math>O_1</math> and gravity <math>\bar{G}_1</math>. A force <math>\bar{P}(t)</math> acts downwards. A spring <math>c_1</math> is attached to the bottom of the mass, with force <math>\bar{F}_1</math> acting upwards. A second spring <math>c_2</math> is attached to the bottom of the mass, with force <math>\bar{F}_2</math> acting upwards. A damper <math>\bar{U}</math> and a friction element <math>\psi</math> are also attached to the bottom of the mass, with force <math>\bar{F}_{тр}</math> acting downwards. The displacement of the mass is <math>\bar{x}_1</math> and the displacement of the damper/friction element is <math>\bar{x}_2</math>.</p>
2	<p>Для нелинейного элемента “сухое трение” динамической модели записать выражение нелинейной упругой характеристики</p>  <p>The diagram is identical to the one in task 1, showing a mass <math>m_1</math> with center of mass <math>O_1</math> and gravity <math>\bar{G}_1</math>. A force <math>\bar{P}(t)</math> acts downwards. A spring <math>c_1</math> is attached to the bottom of the mass, with force <math>\bar{F}_1</math> acting upwards. A second spring <math>c_2</math> is attached to the bottom of the mass, with force <math>\bar{F}_2</math> acting upwards. A damper <math>\bar{U}</math> and a friction element <math>\psi</math> are also attached to the bottom of the mass, with force <math>\bar{F}_{тр}</math> acting downwards. The displacement of the mass is <math>\bar{x}_1</math> and the displacement of the damper/friction element is <math>\bar{x}_2</math>.</p>

№ п/п	Условия типовых практико-ориентированных заданий (задач, кейсов)
3	<p>Для нелинейного элемента “внутренне трение” динамической модели записать выражение нелинейной упругой характеристики</p>  <p>The diagram shows a mechanical system on a fixed base. A mass <math>m_1</math> is suspended from a fixed point <math>O_1</math> by a spring with stiffness <math>c_1</math>. A force <math>\bar{F}_1</math> acts upwards on the mass. A force <math>\bar{P}(t)</math> acts downwards on the mass. The displacement of the mass is <math>\bar{x}_1</math>. A second mass is suspended from the first mass by a spring with stiffness <math>c_2</math> and a damper with coefficient <math>\bar{U}</math>. A force <math>\bar{F}_2</math> acts upwards on the second mass. A force <math>\bar{F}_{тр}</math> acts downwards on the second mass. The displacement of the second mass is <math>\bar{x}_2</math>. The angle of rotation of the damper is <math>\psi</math>.</p>
4	<p>Выполнить гармоническую линеаризацию для дифференциального уравнения математической модели</p> $\ddot{\Delta}_1 + k^2 \Delta_1 + h \text{sign} \dot{\Delta}_1 = a_0 + a \sin \omega t$
5	<p>Построить фазовый портрет для дифференциального уравнения</p> $\ddot{x} + k^2 x = 0$
6	<p>Построить фазовый портрет для дифференциального уравнения</p> $\ddot{x} - k^2 x = 0$
7	<p>Найти аналитическое выражение коэффициентов гармонической линеаризации для нелинейной восстанавливающей силы, представленной в виде <math>f(x, \dot{x}) = \mu x^3 + 2n\dot{x}</math></p>
8	<p>Периодическая функция <math>\Phi(\psi)</math>, <math>\psi = \omega t</math>, <math>\omega = \text{const}</math>, представлена в виде графика (см. рисунок). Определить коэффициенты первой гармоники ряда Фурье</p>  <p>The graph shows a periodic square wave function <math>\Phi(\psi)</math> with period <math>2\pi</math>. The function is constant at <math>A</math> for <math>0 \leq \psi &lt; \pi</math> and constant at <math>-A</math> for <math>\pi \leq \psi &lt; 2\pi</math>. The vertical axis is labeled <math>\Phi(\psi)</math> and the horizontal axis is labeled <math>\psi</math>.</p>