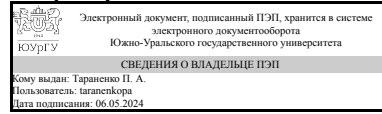


# ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ:  
Заведующий выпускающей  
кафедрой



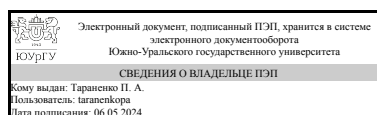
П. А. Тараненко

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

**дисциплины 1.Ф.М0.10 Цифровые двойники динамических систем  
для направления 15.04.03 Прикладная механика  
уровень Магистратура  
магистерская программа Компьютерное моделирование высокотехнологичных  
конструкций  
форма обучения очная  
кафедра-разработчик Техническая механика**

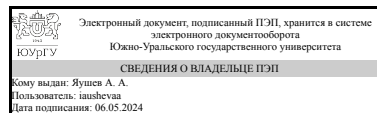
Рабочая программа составлена в соответствии с ФГОС ВО по направлению подготовки 15.04.03 Прикладная механика, утверждённым приказом Минобрнауки от 09.08.2021 № 731

Зав.кафедрой разработчика,  
к.техн.н., доц.



П. А. Тараненко

Разработчик программы,  
к.техн.н., доцент



А. А. Яушев

## 1. Цели и задачи дисциплины

Развитие у студентов представления о месте и роли расчетных и экспериментальных методов динамики изделий при построении и анализе основных физических моделей, при проведении модальных и вибропрочностных испытаний.

Приобретение опыта творческой работы по выбору адекватных расчетных схем разнообразных объектов и интерпретации их поведения. Приобретение опыта по планированию и проведению экспериментов, анализа их результатов и построения компьютерных моделей, верифицированных результатами испытаний.

Формирование умения комплексно решать инженерные задачи о динамике изделий путем построения расчетной схемы, записи дифференциальных уравнений движения, выбора метода решения, последующего анализа результатов расчета, экспериментальной оценки динамических характеристик, сравнения результатов расчета и эксперимента, уточнению математической модели по экспериментальным данным и выработки практических рекомендаций. Достижение этих целей позволит выпускнику оценивать прочность различных конструкций при вибрационных воздействиях и строить адекватные динамические модели механических систем.

## Краткое содержание дисциплины

Основные задачи динамики машин; построение расчетных схем и математических моделей. Вибрационные, ударные воздействия и переходные процессы в конструкциях, машинах, оборудовании и аппаратуре. Характеристики внешних динамических воздействий. Единицы измерения вибраций и шума. Расчетный и экспериментальный модальный анализ. Метод суперпозиции мод. Способы возбуждения и измерения колебаний. Определение собственных частот, форм и декрементов колебаний по результатам модальных испытаний. Оценка отклика объектов на действие виброударных нагрузок. Прямые и идентификационные методы построения динамических моделей машин, оборудования и аппаратуры. Системы виброударозащиты объектов. Верификация математической модели по результатам модальных испытаний. Критерии сравнения расчетной модели с результатами испытаний. Уточнение математической модели по экспериментальным данным. Способы корректировки модели. Оптимизация параметров модели. Методика создания цифровых двойников динамических систем.

## 2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Планируемые результаты освоения ОП ВО (компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
ПК-2 Готовность овладевать новыми современными методами и средствами проведения экспериментальных исследований по динамике, прочности и надежности машин и приборов, обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов	Знает: критерии подтверждения (проверки) адекватности создаваемой модальной математической модели Умеет: создавать математическую модель динамической системы, верифицированную результатами модальных испытаний Имеет практический опыт: методами корректировки (уточнения) расчетной модальной математической модели по экспериментальным данным

ПК-4 Способен выполнять научные исследования в области прикладной механики для различных отраслей промышленности, топливно-энергетического комплекса, транспорта и строительства, решать сложные научно-технические задачи, которые для своего изучения требуют разработки и применения математических и компьютерных моделей, применения программных систем мультидисциплинарного анализа (CAE-систем мирового уровня)	Знает: основные расчетные и экспериментальные методы исследования динамических свойств изделий Умеет: определять динамические свойства изделий при виброиспытаниях и экспериментальном модальном анализе Имеет практический опыт: современной аппаратурой и программным обеспечением для проведения и обработки результатов модальных и вибропрочностных испытаний
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### 3. Место дисциплины в структуре ОП ВО

Перечень предшествующих дисциплин, видов работ учебного плана	Перечень последующих дисциплин, видов работ
Нет	Имитационное моделирование, Цифровое производство, Оптимальное проектирование, Предельные неупругие состояния конструкций, Технологии аналитической обработки информации, Расчетно-экспериментальное моделирование динамики машин, Производственная практика (преддипломная) (4 семестр)

Требования к «входным» знаниям, умениям, навыкам студента, необходимым при освоении данной дисциплины и приобретенным в результате освоения предшествующих дисциплин:

Нет

### 4. Объём и виды учебной работы

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 ч., 54,25 ч. контактной работы

Вид учебной работы	Всего часов	Распределение по семестрам в часах
		Номер семестра
		1
Общая трудоёмкость дисциплины	108	108
<i>Аудиторные занятия:</i>	48	48
Лекции (Л)	16	16
Практические занятия, семинары и (или) другие виды аудиторных занятий (ПЗ)	32	32
Лабораторные работы (ЛР)	0	0
<i>Самостоятельная работа (СРС)</i>	53,75	53,75
Подготовка к зачету	11,75	11,75
Лабораторная работа 1. Собственные и вынужденные	14	14

колебания балки		
Лабораторная работа 3. Исследование собственных и вынужденных колебаний системы с двумя степенями свободы	14	14
Лабораторная работа 2. Антивибратор в системе с распределенной массой	14	14
Консультации и промежуточная аттестация	6,25	6,25
Вид контроля (зачет, диф.зачет, экзамен)	-	зачет

## 5. Содержание дисциплины

№ раздела	Наименование разделов дисциплины	Объем аудиторных занятий по видам в часах			
		Всего	Л	ПЗ	ЛР
01	Расчетный модальный анализ	12	4	8	0
02	Экспериментальный модальный анализ	16	4	12	0
03	Верификация математической модели по результатам модальных испытаний	20	8	12	0

### 5.1. Лекции

№ лекции	№ раздела	Наименование или краткое содержание лекционного занятия	Кол-во часов
01	01	Введение в курс. Назначение цифровых двойников динамических систем. Обзор литературы посвященной созданию математических моделей, верифицированных результатами модальных испытаний. Примеры работ, выполненных в ЮУрГУ.	2
02	01	Расчетный модальный анализ. Определение собственных частот и форм системы с двумя и более степенями свободы. Метод суперпозиции мод.	2
03	02	Экспериментальный модальный анализ. Способы возбуждения и измерения колебаний.	2
04	02	Определение собственных частот, форм и декрементов колебаний по результатам модальных испытаний.	2
05	03	Верификация математической модели по результатам модальных испытаний. Критерии сравнения расчетной модели с результатами испытаний. Критерий модальной достоверности (MAC).	2
06	03	Способы корректировки математической модели по результатам испытаний. Оптимизация. Примеры.	2
07	03	Методика создания цифровых двойников динамических систем.	2
08	03	Автоматизированные расчетно-экспериментальные комплексы для создания цифровых двойников динамических систем. Пакеты LMS TestLab и LMS Virtual Lab.	2

### 5.2. Практические занятия, семинары

№ занятия	№ раздела	Наименование или краткое содержание практического занятия, семинара	Кол-во часов
01	01	Собственные колебания системы с двумя и более степенями свободы.	2
02	01	Вынужденные колебания системы с двумя и более степенями свободы.	2
03	01	Динамический гаситель колебаний.	2
04	01	Расчет собственных и вынужденных колебаний балки и балки с	2

		антивибратором.	
05	02	Определение собственных частот и форм механической системы с использованием ударного молотка и модального вибростенда.	2
06	02	Лабораторная работа. Экспериментальное определение собственных частот и форм балки и балки с антивибратором.	2
07	02	Определение декремента колебаний по результатам испытаний	2
08	02	Лабораторная работа. Вынужденные колебания балки с антивибратором. Получение амплитудно-частотной характеристики.	2
09	02	Определение оптимальных точек для измерения и возбуждения колебаний при модальных испытаниях.	2
10	02	Лабораторная работа. Расчетно-экспериментальное определение собственных и вынужденных колебаний системы с двумя степенями свободы.	2
11	03	Верификация математической модели по результатам модальных испытаний.	2
12	03	Критерий модальной достоверности (MAC).	2
13	03	Анализ причин несоответствия расчетных и экспериментальных собственных частот и форм механической системы.	2
14	03	Способы и критерии проверки адекватности результатов модальных испытаний и расчетов.	2
15	03	Корректировки математической модели по результатам испытаний.	2
16	03	Оптимизация параметров расчетной модели.	2

### 5.3. Лабораторные работы

Не предусмотрены

### 5.4. Самостоятельная работа студента

Выполнение СРС			
Подвид СРС	Список литературы (с указанием разделов, глав, страниц) / ссылка на ресурс	Семестр	Кол-во часов
Подготовка к зачету	Основная литература [1-4], дополнительная литература [1-5], методические пособия в электронном виде [1], учебно-методические материалы в электронном виде [1], отечественные и зарубежные печатные журналы [1-6]	1	11,75
Лабораторная работа 1. Собственные и вынужденные колебания балки	Основная литература [1-4], дополнительная литература [4], методические пособия в электронном виде [1], учебно-методические материалы в электронном виде [1]	1	14
Лабораторная работа 3. Исследование собственных и вынужденных колебаний системы с двумя степенями свободы	Основная литература [1,4], методические пособия в электронном виде [1], учебно-методические материалы в электронном виде [1]	1	14
Лабораторная работа 2. Антивибратор в системе с распределенной массой	Основная литература [1-4], дополнительная литература [2], методические пособия в электронном виде [1], учебно-методические материалы в электронном виде [1], отечественные и зарубежные печатные журналы [1-6]	1	14

## 6. Фонд оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации

Контроль качества освоения образовательной программы осуществляется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе оценивания результатов учебной деятельности обучающихся.

### 6.1. Контрольные мероприятия (КМ)

№ КМ	Се-местр	Вид контроля	Название контрольного мероприятия	Вес	Макс. балл	Порядок начисления баллов	Учитывается в ПА
1	1	Текущий контроль	Лабораторная работа 1. Собственные и вынужденные колебания балки.	1	24	Состоит из 8 заданий, каждое задание по 3 балла. 3 балла если задание выполнено полностью, даны правильные ответы на дополнительные вопросы; 2 балла если задание выполнено, но имеются незначительные ошибки или даны неверные ответы на дополнительные вопросы; 1 балл если задание выполнено, но имеются незначительные ошибки и даны неверные ответы на дополнительные вопросы; 0 баллов если задание не выполнено.	зачет
2	1	Текущий контроль	Лабораторная работа 2. Антивибратор в системе с распределенной массой	1	18	Состоит из 6 заданий, каждое задание по 3 балла. 3 балла если задание выполнено полностью, даны правильные ответы на дополнительные вопросы; 2 балла если задание выполнено, но имеются незначительные ошибки или даны неверные ответы на дополнительные вопросы; 1 балл если задание выполнено, но имеются незначительные ошибки и даны неверные ответы на дополнительные вопросы; 0 баллов если задание не выполнено.	зачет
3	1	Текущий контроль	Лабораторная работа 3. Исследование собственных и вынужденных колебаний системы с двумя степенями свободы	1	18	Состоит из 6 заданий, каждое задание по 3 балла. 3 балла если задание выполнено полностью, даны правильные ответы на дополнительные вопросы; 2 балла если задание выполнено, но имеются незначительные ошибки или даны неверные ответы на дополнительные вопросы; 1 балл если задание выполнено, но имеются незначительные ошибки и даны неверные ответы на дополнительные вопросы; 0 баллов если задание не	зачет

						выполнено.	
4	1	Промежуточная аттестация	Зачет	-	40	Зачет состоит из четырех частей, каждая оценивается по 10 баллов. 1. Экспериментальное определение собственных частот и форм конструкции, вывод амплитудно-частотных характеристик в определенных точках. 2. Замер реальной конструкции, построение ее конечноэлементной модели, расчет собственных частот и форм. 3. Практическое задание. 4. Теоретический вопрос.	зачет

## 6.2. Процедура проведения, критерии оценивания

Вид промежуточной аттестации	Процедура проведения	Критерии оценивания
зачет	Зачет состоит из двух этапов и четырех частей (каждая часть оценивается по 10 баллов). Первый этап. Каждому студенту в конце семестра (два последних практических занятия) выдается своя конструкция (например, сварной стальной уголок, пластина, балка и др.). Необходимо выполнить замер конструкции для дальнейшего построения конечноэлементной модели. С помощью экспериментального модального анализа определить собственные частоты и формы конструкции, вывести амплитудно-частотные характеристики в определенных точках. Подготовить конечноэлементную модель и рассчитать собственные частоты и формы. Второй этап. На зачете каждый студент тянет билет, состоящий из теоретического вопроса и задания, для выполнения которого необходимы расчетные и экспериментальные результаты первого этапа. В случае, если студент без уважительной причины не провел экспериментальный модальный анализ своей конструкции ему заранее выдаются готовые результаты испытаний и чертеж конструкции, но максимальный балл снижается на 10. Итоговая оценка (зачет) выставляется по сумме баллов за лабораторные работы и зачет. Всего 100 баллов. Зачет: 60-100 баллов. Незачет: менее 60 баллов.	В соответствии с пп. 2.5, 2.6 Положения

## 6.3. Паспорт фонда оценочных средств

Компетенции	Результаты обучения	№ КМ			
		1	2	3	4
ПК-2	Знает: критерии подтверждения (проверки) адекватности создаваемой модальной математической модели	+	+		+
ПК-2	Умеет: создавать математическую модель динамической системы, верифицированную результатами модальных испытаний	+	+		+
ПК-2	Имеет практический опыт: методами корректировки (уточнения) расчетной модальной математической модели по экспериментальным данным	+	+		
ПК-4	Знает: основные расчетные и экспериментальные методы исследования				+

	динамических свойств изделий				
ПК-4	Умеет: определять динамические свойства изделий при виброиспытаниях и экспериментальном модальном анализе			+	
ПК-4	Имеет практический опыт: современной аппаратурой и программным обеспечением для проведения и обработки результатов модальных и вибропрочностных испытаний			+	

Типовые контрольные задания по каждому мероприятию находятся в приложениях.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### Печатная учебно-методическая документация

#### а) основная литература:

1. Бидерман, В. Л. Теория механических колебаний Текст Учебник для вузов по спец. "Динамика и прочность машин". - М.: Высшая школа, 1980. - 408 с. ил.
2. Пановко, Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. - 4-е изд., перераб. и доп. - Л.: Политехника, 1990. - 272 с. ил.
3. Бабаков, И. М. Теория колебаний Учеб. пособие для вузов И. М. Бабаков. - 4-е изд., испр. - М.: Дрофа, 2004. - 592 с.
4. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле Пер. с англ. Л. Г. Корнейчука; Под ред. Э. И. Григолюка. - М.: Машиностроение, 1985. - 472 с. Ил.
5. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов Учеб. для втузов. - 10-е изд., перераб. и доп. - М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. - 590,[1] с.

#### б) дополнительная литература:

1. Ильин, М. М. Теория колебаний Учеб. для вузов по направлению подгот. дипломир. специалистов в обл. машиностроения и приборостроения М. И. Ильин, К. С. Колесников, Ю. С. Саратов; Под ред. К. С. Колесникова; Федер. целевая программа "Гос. поддержка интеграции высш. образования и фундам. науки"; Федер. целевая программа "Гос. поддержка интеграции высш. образования и фундам. науки". - 2-е изд., стер. - М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. - 271 с. ил.
2. Расчеты на прочность в машиностроении [Текст] Т. 3. Инерционные нагрузки. Колебания и ударные нагрузки. Выносливость. Устойчивость. В 3 т. С. Д. Пономарев, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарев и др.; под ред. С. Д. Пономарева. - М.: Машгиз, 1959. - 1118 с. ил.
3. Светлицкий, В. А. Задачи и примеры по теории колебаний Ч. 1 Учеб. пособие для втузов. - М.: Издательство МГТУ, 1994. - 307 с. ил.
4. Светлицкий, В. А. Задачи и примеры по теории колебаний Ч. 2 Учеб. пособие для втузов. - М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. - 262,[1] с. ил.
5. Пановко, Я. Г. Устойчивость и колебания упругих систем: Современ. концепции, парадоксы и ошибки. - 4-е изд., перераб. - М.: Наука, 1987. - 352 с. ил.

#### в) отечественные и зарубежные журналы по дисциплине, имеющиеся в библиотеке:



1. Межин В. С., Обухов В. В. Практика применения модальных испытаний для целей верификации конечно-элементных моделей конструкции изделий ракетно-космической техники //Космическая техника и технологии. – 2014. – №. 1. – С. 86-91.

2. Яушев А. А. и др. Расчетно-экспериментальное исследование частот и форм собственных колебаний сварного корпуса кориолисового расходомера //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2018. – Т. 10. – №. 1.

3. Бернс В.А. и др. Экспериментальный модальный анализ летательных аппаратов на основе монофазных колебаний // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – №4-1 (20). – С. 43-54.

4. Бернс В.А. О построении расчетных моделей динамических систем по результатам испытаний // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318 – № 2 – С. 15-20.

5. Клебанов Я.М. и др. Применение метода оценки соответствия экспериментальных и расчетных собственных частот для уточнения конечно-элементной модели изделия // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2013. – №1(37) – С. 118-126.

6. Нихамкин М.Ш., Соломонов Д.Г. Применение экспериментального модального анализа для идентификации параметров модели слоистого углепластика // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2017. – №51. – С. 124-135.

г) методические указания для студентов по освоению дисциплины:

1. Романов В.А., Тараненко П.А. Аналитическая динамика и теория колебаний. Учебное пособие // Челябинск: ЮУрГУ. – 2019.

из них: учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента:

### Электронная учебно-методическая документация

№	Вид литературы	Наименование ресурса в электронной форме	Библиографическое описание
1	Основная литература	Электронно-библиотечная система издательства Лань	Стрелков, С.П. Введение в теорию колебаний. [Электронный ресурс] : учеб. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2005. — 440 с. — Режим доступа: <a href="http://e.lanbook.com/book/603">http://e.lanbook.com/book/603</a> — Загл. с экрана.
2	Дополнительная литература	Электронно-библиотечная система издательства Лань	Гуськов, А.М. Свободные колебания консервативных нелинейных систем с одной степенью свободы. [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А.М. Гуськов, С.В. Ярьско, С.В. Ярьско. — Электрон. дан. — М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. — 44 с. — Режим доступа: <a href="http://e.lanbook.com/book/52456">http://e.lanbook.com/book/52456</a> — Загл. с экрана.

Перечень используемого программного обеспечения:

1. PTC-MathCAD(бессрочно)
2. Dassault Systèmes-SolidWorks Education Edition 500 CAMPUS(бессрочно)

3. ANSYS-ANSYS Academic Multiphysics Campus Solution (Mechanical, Fluent, CFX, Workbench, Maxwell, HFSS, Simplorer, Designer, PowerArtist, RedHawk)(бессрочно)

Перечень используемых профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

Нет

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Вид занятий	№ ауд.	Основное оборудование, стенды, макеты, компьютерная техника, предустановленное программное обеспечение, используемое для различных видов занятий
Лекции	336 (2)	Компьютер, проектор
Практические занятия и семинары	334 (2)	Компьютер, проектор, MathCAD, Ansys, Solidworks
Лабораторные занятия	334 (2)	Компьютер, проектор, MathCAD, Ansys, Solidworks