ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ:
Заведующий выпускающей кафедрой

ЮУрГУ
Электронный документ, подписанный ПЭП, хранится в системе электронного документооборота Южно-Уральского государственного университета
СВЕДЕНИЯ О ВЛАДЕЛЬЦЕ ПЭП
Кому выдан: Тараненко П. А.
Пользователь: taranenkopa
Дата подписания: 23.05.2023

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.

ЮУрГУ
Электронный документ, подписанный ПЭП, хранится в системе электронного документооборота Южно-Уральского государственного университета
СВЕДЕНИЯ О ВЛАДЕЛЬЦЕ ПЭП
Кому выдан: Тараненко П. А.
Пользователь: taranenkopa
Дата подписания: 23.05.2023

П. А. Тараненко

Разработчик программы,
к.техн.н., доцент

ЮУрГУ
Электронный документ, подписанный ПЭП, хранится в системе электронного документооборота Южно-Уральского государственного университета
СВЕДЕНИЯ О ВЛАДЕЛЬЦЕ ПЭП
Кому выдан: Яушев А. А.
Пользователь: iaushevaa
Дата подписания: 22.05.2023

А. А. Яушев

Челябинск

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	Технологии аналитической обработки информации, Имитационное моделирование, Расчетно-экспериментальное моделирование динамики машин, Цифровое производство, Предельные неупругие состояния конструкций, Оптимальное проектирование, 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
Аудиторные занятия:	48	48
Лекции (Л)	16	16
Практические занятия, семинары и (или) другие виды аудиторных занятий (ПЗ)	32	32
Лабораторные работы (ЛР)	0	0
Самостоятельная работа (СРС)	53,75	53,75
Лабораторная работа 1. Собственные и вынужденные колебания балки	14	14

Лабораторная работа 2. Антивибратор в системе с распределенной массой	14	14
Лабораторная работа 3. Исследование собственных и вынужденных колебаний системы с двумя степенями свободы	14	14
Подготовка к зачету	11,75	11.75
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	Ведение 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
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 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
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
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

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	Учи-тыва-ется 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	Проме-жуточная 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 балов 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: http://e.lanbook.com/book/603 — 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. Яресько, С.В. Яресько. — Электрон. дан. — М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. — 44 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/book/52456 — 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
Лабораторные занятия	334 (2)	Компьютер, проектор, MathCAD, Ansys, Solidworks
Практические занятия и семинары	334 (2)	Компьютер, проектор, MathCAD, Ansys, Solidworks
Лекции	336 (2)	Компьютер, проектор