

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Направление подготовки/специальность: 13.03.03 Энергетическое машиностроение

Наименование образовательной программы: Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели

Уровень образования: высшее образование - бакалавриат

Форма обучения: Очная

Рабочая программа дисциплины
ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ ТУРБОМАШИН

Блок:	Блок 1 «Дисциплины (модули)»
Часть образовательной программы:	Часть, формируемая участниками образовательных отношений
№ дисциплины по учебному плану:	Б1.Ч.11
Трудоемкость в зачетных единицах:	8 семестр - 3;
Часов (всего) по учебному плану:	108 часов
Лекции	8 семестр - 28 часа;
Практические занятия	8 семестр - 14 часов;
Лабораторные работы	не предусмотрено учебным планом
Консультации	проводится в рамках часов аудиторных занятий
Самостоятельная работа	8 семестр - 65,7 часа;
в том числе на КП/КР	не предусмотрено учебным планом
Иная контактная работа	проводится в рамках часов аудиторных занятий
включая: Тестирование Контрольная работа Расчетно-графическая работа	
Промежуточная аттестация:	
Зачет с оценкой	8 семестр - 0,3 часа;

Москва 2023

ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

Преподаватель

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Богомолова Т.В.
	Идентификатор	R21082b96-BogomolovaTV-4ebcd3f

Т.В. Богомолова

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Митрохова О.М.
	Идентификатор	R1d0f453c-FichoriakOM-ee811867

О.М.
Митрохова

Заведующий выпускающей
кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Грибин В.Г.
	Идентификатор	R44612ca0-GribinVG-8231e2ff

В.Г. Грибин

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель освоения дисциплины: изучение теории колебаний деталей и узлов турбомашин, колебательных процессов, происходящих в энергетических машинах с позиции вибрационной надежности, методов расчета и конструирования деталей энергетических машин

Задачи дисциплины

- изучение конструкции узлов и деталей энергетических машин, подверженных вибрации, специфических условий их работы, способов математического описания процессов;
- овладение основами анализа вибрационной надежности энергетических машин, построения алгоритмов решения задач надежности, оценка ресурса и работоспособности деталей, узлов и систем энергомашиностроения с позиций механических колебаний;
- изучение методов расчета вибрации элементов турбомашин: лопаточного аппарата, роторов, статоров и опорных систем;
- получение первичных навыков проведения комплексного анализа систем с позиций одновременного удовлетворения требований вибрационной надежности, экономичности и ремонтпригодности.

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
РПК-2 Способен участвовать в проектно-конструкторской деятельности в сфере энергетического машиностроения	ИД-3РПК-2 Выполняет комплекс расчетов элементов объектов профессиональной деятельности	знать: - статические и динамические характеристики опорных и упорных подшипников. уметь: - применять методы оценки вибрационных напряжений и усталостной прочности лопаток, а также расчета вибрационной диаграммы пакетированных рабочих лопаток и отстройкой их от резонанса; - определять собственные частоты колебаний ротора, формы колебаний с учетом податливости опор, а также амплитуды вынужденных колебаний на рабочей частоте вращения; - рассчитывать собственные частоты и главные формы рабочих лопаток в том числе с учетом демпфирования; - применять методики расчета подшипников.
РПК-2 Способен участвовать в проектно-конструкторской деятельности в сфере энергетического машиностроения	ИД-5РПК-2 Демонстрирует понимание влияния условий работы объекта профессиональной деятельности на принимаемые конструкционные решения	знать: - причины, вызывающие колебания валов и валопроводов, и меры повышения вибрационной надежности роторов; - влияние эксплуатационных и конструктивных факторов на вибрацию рабочих лопаток и методы обеспечения вибрационной надежности лопаток и

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
		венцов.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели (далее – ОПОП), направления подготовки 13.03.03 Энергетическое машиностроение, уровень образования: высшее образование - бакалавриат.

Базируется на уровне среднего общего образования.

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 3 зачетных единицы, 108 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	Динамические характеристики подшипников	10	8	4	-	2	-	-	-	-	-	4	-	<p><u>Подготовка к текущему контролю:</u> Повторение материала по разделу "Динамические характеристики подшипников"</p> <p><u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Изучение материала по разделу "Динамические характеристики подшипников" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях</p> <p><u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], стр. 241-256 [2], стр. 39-42</p>	
1.1	Динамические характеристики подшипников	10		4	-	2	-	-	-	-	-	4	-		
2	Колебания рабочих лопаток турбомашин	22		8	-	4	-	-	-	-	-	-	10		-
2.1	Колебания рабочих лопаток турбомашин	22		8	-	4	-	-	-	-	-	-	10		-
3	Оценка вибрационных напряжений и усталостной	34		8	-	4	-	-	-	-	-	22	-	<p><u>Подготовка к текущему контролю:</u> Повторение материала по разделу "Оценка вибрационных напряжений и усталостной</p>	

	прочности лопаток и пакетов турбомашин												прочности лопаток и пакетов турбомашин" <u>Подготовка расчетно-графического задания:</u> Выполнение расчетного задания "Построение вибрационной диаграммы пакетированных рабочих лопаток турбинной ступени с отстройкой от резонанса и оценкой пригодности их к эксплуатации" <u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Изучение материала по разделу "Оценка вибрационных напряжений и усталостной прочности лопаток и пакетов турбомашин" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], стр. 292-336 [2], стр. 47-50
3.1	Оценка вибрационных напряжений и усталостной прочности лопаток и пакетов турбомашин	34	8	-	4	-	-	-	-	-	22	-	
4	Колебания валов и валопроводов турбомашин	24	8	-	4	-	-	-	-	-	12	-	<u>Подготовка к текущему контролю:</u> Повторение материала по разделу "Колебания валов и валопроводов турбомашин" <u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Изучение материала по разделу "Колебания валов и валопроводов турбомашин" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], стр. 337-412 [2], стр. 39-42
4.1	Колебания валов и валопроводов турбомашин	24	8	-	4	-	-	-	-	-	12	-	
	Зачет с оценкой	18.0	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-	17.7	
	Всего за семестр	108.0	28	-	14	-	-	-	-	0.3	48	17.7	
	Итого за семестр	108.0	28	-	14	-	-	-	-	0.3	65.7		

Примечание: Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПР – 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. Динамические характеристики подшипников

1.1. Динамические характеристики подшипников

Коэффициенты жесткости и демпфирования масляной пленки подшипников. Методы расчета. Использование таблиц.

2. Колебания рабочих лопаток турбомашин

2.1. Колебания рабочих лопаток турбомашин

Причины, вызывающие вибрации лопаток. Последствия высокой вибрации. Измерение вибраций. Собственные частоты и главные формы колебаний рабочих лопаток. Математические модели для расчета колебаний. Граничные условия. Методы расчета при различных условиях закрепления. Собственные частоты и главные формы колебаний, пакетов и венцов. Учет пакетирования, демпферных связей, заделки. Отстройка от резонансов. Вибрационная диаграмма. Изгибно-крутильные колебания лопаток. Математическая модель расчета. Формы колебаний.

3. Оценка вибрационных напряжений и усталостной прочности лопаток и пакетов турбомашин

3.1. Оценка вибрационных напряжений и усталостной прочности лопаток и пакетов турбомашин

Отстройка от резонансов. Вибрационная диаграмма. Определение переменных сил, вызывающих колебания лопаток. Силы от неоднородности потока, кромочных следов, технологических неоднородностей. Методы расчетов. Демпфирование колебаний лопаток. Конструкционное и внутреннее демпфирование. Учет демпфирования в расчетах. Влияние на частоты амплитуды колебаний. Вынужденные колебания лопаток и оценка вибрационных напряжений и усталостной прочности лопаток. Математические модели расчета вынужденных колебаний. Расчет напряжений, критерии прочности. Методы обеспечения вибрационной надежности рабочих лопаток. Влияние эксплуатационных и конструктивных факторов на вибрацию рабочих лопаток. Совместные колебания лопаток и диска. Влияние вращения на собственные частоты системы ДЛ.

4. Колебания валов и валопроводов турбомашин

4.1. Колебания валов и валопроводов турбомашин

Причины, вызывающие колебания валов и валопроводов. Особенности моделирования системы валопровод-подшипники-основание. Демпфирование колебаний валов и валопроводов. Внутреннее, конструкционное, аэродинамическое и гидродинамическое демпфирование. Влияние демпфирования на амплитуды и частоты. Собственные частоты и главные формы валопроводов. Определение частот и форм колебаний для системы с одной и несколькими степенями свободы. Амплитуды колебаний под действием неуравновешенности. Влияние эксцентриситета массы. Балансировка - статическая и динамическая. Меры повышения вибрационной надежности роторов. Самовозбуждающиеся колебания валопроводов. Причины, вызывающие низкочастотную вибрацию роторов турбомашин. Последствия, определение и устранение причин.

3.3. Темы практических занятий

1. Динамические характеристики подшипников турбин (2 часа);

2. Колебания рабочих лопаток турбомашин. Собственные частоты и главные формы

колебаний рабочих лопаток. Собственные частоты и главные формы колебаний, пакетов и венцов (2 часа);

3. Определение переменных сил, вызывающих колебания лопаток (2 часа);

4. Вынужденные колебания лопаток. Отстройка от резонансов (2 часа);

5. Оценка вибрационных напряжений и усталостной прочности лопаток (2 часа);

6. Колебания валов турбомашин. Собственные частоты и главные формы валопроводов. Траектории и фазы колебаний роторов. Влияние опор (2 часа);

7. Амплитуды колебаний роторов под действием неуравновешенности. Определение возмущающих сил, вызывающих вибрацию роторов (2 часа).

3.4. Темы лабораторных работ не предусмотрено

3.5 Консультации

3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ Курсовой проект/ работа не предусмотрены

3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1)	Коды индикаторов	Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1)				Оценочное средство (тип и наименование)
		1	2	3	4	
Знать:						
статические и динамические характеристики опорных и упорных подшипников	ИД-3РПК-2	+				Тестирование/Тест №1 «Динамические характеристики подшипников»
влияние эксплуатационных и конструктивных факторов на вибрацию рабочих лопаток и методы обеспечения вибрационной надежности лопаток и венцов	ИД-5РПК-2		+	+		Тестирование/Тест №2 «Оценка вибрационных напряжений и усталостной прочности лопаток и пакетов турбомашин»
причины, вызывающие колебания валов и валопроводов, и меры повышения вибрационной надежности роторов	ИД-5РПК-2				+	Тестирование/Тест №3 «Колебания валов и валопроводов»
Уметь:						
применять методики расчета подшипников	ИД-3РПК-2	+				Контрольная работа/Контрольная работа №1 «Характеристики подшипников турбомашин. Оценка собственных частот лопаток и пакетов турбомашин»
рассчитывать собственные частоты и главные формы рабочих лопаток в том числе с учетом демпфирования	ИД-3РПК-2		+			Контрольная работа/Контрольная работа №1 «Характеристики подшипников турбомашин. Оценка собственных частот лопаток и пакетов турбомашин»
определять собственные частоты колебаний ротора, формы колебаний с учетом податливости опор, а также амплитуды вынужденных колебаний на рабочей частоте вращения	ИД-3РПК-2		+		+	Контрольная работа/Контрольная работа №2 «Колебания»
применять методы оценки вибрационных напряжений и усталостной прочности лопаток, а также расчета вибрационной диаграммы пакетированных рабочих лопаток и отстройкой	ИД-3РПК-2		+	+		Расчетно-графическая работа/Выполнение и защита расчетного задания «Построение вибрационной диаграммы пакетированных рабочих лопаток турбинной ступени с отстройкой от резонанса и оценкой

их от резонанса						пригодности их к эксплуатации»
-----------------	--	--	--	--	--	--------------------------------

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

4.1. Текущий контроль успеваемости

8 семестр

Форма реализации: Выполнение задания

1. Выполнение и защита расчетного задания «Построение вибрационной диаграммы пакетированных рабочих лопаток турбинной ступени с отстройкой от резонанса и оценкой пригодности их к эксплуатации» (Расчетно-графическая работа)

Форма реализации: Компьютерное задание

1. Тест №1 «Динамические характеристики подшипников» (Тестирование)
2. Тест №2 «Оценка вибрационных напряжений и усталостной прочности лопаток и пакетов турбомашин» (Тестирование)
3. Тест №3 «Колебания валов и валопроводов» (Тестирование)

Форма реализации: Письменная работа

1. Контрольная работа №1 «Характеристики подшипников турбомашин. Оценка собственных частот лопаток и пакетов турбомашин» (Контрольная работа)
2. Контрольная работа №2 «Колебания» (Контрольная работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине

Зачет с оценкой (Семестр №8)

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

В диплом выставляется оценка за 8 семестр.

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

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1 Печатные и электронные издания:

1. Костюк А.Г.- "Динамика и прочность турбомашин", Издательство: "МЭИ", Москва, 2020 <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383014271.html>;
2. Костюк, А. Г. Сборник задач по динамике и прочности турбомашин : Учебное пособие для вузов по специальности "Турбостроение" и "Динамика и прочность машин" / А. Г. Костюк . – М. : Машиностроение, 1990 . – 336 с. - ISBN 5-217-00081-3 ..

5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

1. СДО "Прометей";
2. Office / Российский пакет офисных программ;
3. Windows / Операционная система семейства Linux;
4. Видеоконференции (Майнд, Сберджаз, ВК и др);
5. SmathStudio.

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
3. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>
4. База данных ВИНИТИ 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. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>
15. Национальный портал онлайн обучения «Открытое образование» - <https://openedu.ru>
16. Официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии - <http://protect.gost.ru/>
17. Открытая университетская информационная система «РОССИЯ» - <https://uisrussia.msu.ru>

6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
	П-25, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, вешалка для одежды, доска интерактивная, компьютерная сеть с выходом в Интернет, кондиционер, учебно-наглядное пособие
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
	П-25, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, вешалка для одежды, доска интерактивная, компьютерная сеть с выходом в Интернет, кондиционер, учебно-наглядное пособие
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
	П-25, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, вешалка для одежды, доска интерактивная, компьютерная сеть с выходом в Интернет, кондиционер, учебно-наглядное пособие
Помещения для самостоятельной работы	НТБ-201, Компьютерный читальный зал	стол компьютерный, стул, стол письменный, вешалка для одежды, компьютерная сеть с выходом в Интернет, компьютер персональный, принтер, кондиционер

	П-28, Комната для самостоятельных занятий студентов	
Помещения для консультирования	П-22, Кабинет сотрудников каф. ПГТ (проф. Богомолова Т.В.)	кресло рабочее, стеллаж для хранения книг, стул, шкаф для одежды, стол письменный, тумба, компьютерная сеть с выходом в Интернет, компьютер персональный
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	П-05а, Лаборатория аэродинамики	
	П-03б, Подсобное помещение	

БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Динамика и прочность турбомашин

(название дисциплины)

8 семестр

Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:

- КМ-1 Тест №1 «Динамические характеристики подшипников» (Тестирование)
- КМ-2 Контрольная работа №1 «Характеристики подшипников турбомашин. Оценка собственных частот лопаток и пакетов турбомашин» (Контрольная работа)
- КМ-3 Тест №2 «Оценка вибрационных напряжений и усталостной прочности лопаток и пакетов турбомашин» (Тестирование)
- КМ-4 Контрольная работа №2 «Колебания» (Контрольная работа)
- КМ-5 Выполнение и защита расчетного задания «Построение вибрационной диаграммы пакетированных рабочих лопаток турбинной ступени с отстройкой от резонанса и оценкой пригодности их к эксплуатации» (Расчетно-графическая работа)
- КМ-6 Тест №3 «Колебания валов и валопроводов» (Тестирование)

Вид промежуточной аттестации – Зачет с оценкой.

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5	КМ-6
		Неделя КМ:	3	6	8	12	13	14
1	Динамические характеристики подшипников							
1.1	Динамические характеристики подшипников		+	+				
2	Колебания рабочих лопаток турбомашин							
2.1	Колебания рабочих лопаток турбомашин			+	+	+	+	
3	Оценка вибрационных напряжений и усталостной прочности лопаток и пакетов турбомашин							
3.1	Оценка вибрационных напряжений и усталостной прочности лопаток и пакетов турбомашин				+		+	
4	Колебания валов и валопроводов турбомашин							
4.1	Колебания валов и валопроводов турбомашин					+		+
Вес КМ, %:			20	15	15	20	20	10