Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Максимов Алексей Борисович
Должность: директор департамента по образовательной политике
Дата подписания: 25.06.2026 12:15:50
Уникальный программный ключ:
8db180d1a3f02ac9e60521a5672742735c18b1d6

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

Транспортный факультет

УТВЕРЖДАЮ
И.о. декана
/М.Р. Рыбакова/
«26» февраля 2026 г

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Направление подготовки/ специальность
13.03.03 «Энергетическое машиностроение»

Профиль/ специализация
Поршневые двигатели и турбомашины

Квалификация
Бакалавр

Форма обучения
Очная

Москва, 2026

Разработчик(и):
к.т.н., доцент /А.В. Колунин/

Согласовано:
Заведующий кафедрой «Энергоустановки для транспорта и малой энергетики», д.т.н. /Г.Г. Надарейшвили/

Оглавление

1. Цели, задачи и планируемые результаты обучения по дисциплине 4
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы 4
3. Структура и содержание дисциплины 5
3.1. Виды учебной работы и трудоемкость 6
3.2. Тематический план изучения дисциплины 6
3.3. Содержание дисциплины 7
3.4. Тематика семинарских/практических и лабораторных занятий 9
3.4.1. Семинарские/практические занятия 9
3.4.2. Лабораторные занятия 10
3.5. Тематика курсовых проектов (курсовых работ) 11
4. Учебно-методическое и информационное обеспечение 11
4.1 Нормативные документы и ГОСТы 11
4.2 Основная литература 11
4.3 Дополнительная литература 12
4.4 Электронные образовательные ресурсы 12
4.5. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение 12
4.6. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы 12
5. Материально-техническое обеспечение 13
6. Методические рекомендации 14
6.1. Методические рекомендации для преподавателя по организации обучения 14
6.2. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины 15
7. Фонд оценочных средств 16
7.1 Методы контроля и оценивания результатов обучения 16
7.2 Шкала и критерии оценивания результатов обучения 18
7.2.1 Критерии оценки текущего (рубежного) тестирования по модулям 18
7.2.2 Критерии оценки итогового тестирования по курсу 18
7.2.3 Критерии оценки устного опроса (собеседования) 18
7.2.4 Критерии оценки практических занятий 19
7.2.5 Критерии оценки лабораторных работ 19
7.2.6 Критерии оценки курсового проекта 20
7.2.7 Критерии оценки ответа на экзамене 20
7.2.8 Соответствие методов контроля проверяемым индикаторам компетенций 21
7.3 Оценочные средства 22
7.3.1 Текущий контроль 22
7.3.2 Промежуточная аттестация (экзамен) 29

1. Цели, задачи и планируемые результаты обучения по дисциплине

Целью освоения дисциплины является формирование у обучающихся теоретических знаний и практических навыков в области кинематического и динамического анализа кривошипно-шатунного механизма, методов определения и уравновешивания сил и моментов, действующих в поршневых двигателях, необходимых для расчётного обоснования нагрузок на детали и узлы на третьем этапе сквозного проектирования «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация».

Задачами дисциплины являются:

- изучение кинематики кривошипно-шатунного механизма (КШМ), включая определение перемещений, скоростей и ускорений поршня и шатуна при различных законах движения;
- освоение методов расчёта сил давления газов, сил инерции движущихся масс и суммарных сил, действующих в КШМ;
- формирование навыков определения крутящих моментов, создаваемых отдельными цилиндрами и суммарного крутящего момента многоцилиндрового двигателя;
- изучение методов анализа неравномерности крутящего момента и выбора маховика для обеспечения требуемой степени равномерности хода;
- приобретение навыков расчёта нагрузок на шатунные и коренные шейки коленчатого вала, а также на подшипники скольжения;
- освоение методов статического и динамического уравновешивания двигателей различных схем (рядных, V-образных, оппозитных);
- изучение влияния порядка работы цилиндров на уравновешенность и крутильные колебания коленчатого вала;
- формирование умения выполнять динамический расчёт с использованием современных программных средств и анализировать полученные результаты для последующего прочностного анализа деталей.

В результате освоения дисциплины у обучающихся формируются следующие компетенции и должны быть достигнуты следующие результаты обучения:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
ПК-2. Способен проводить расчетно-теоретические исследования узлов и систем поршневых двигателей и турбомашин с применением методов математического и компьютерного моделирования (CAE)	**ИПК-2.7.** Способен выполнять верифицированный прочностной расчёт ответственной детали КШМ в CAE-среде на основе ранее рассчитанных динамических нагрузок

Роль дисциплины в формировании компетенций:

Обеспечивающая. Дисциплина формирует навыки динамического расчёта кривошипно-шатунного механизма (КШМ) поршневых двигателей. Студенты изучают кинематику КШМ (перемещение, скорость, ускорение поршня), приведение масс деталей к динамически эквивалентной системе, определение сил давления газов, сил инерции возвратно-поступательно движущихся и вращающихся масс, сил, действующих на шатунные и коренные шейки коленчатого вала. В ходе практических занятий и курсового проекта осваиваются методы построения полярных диаграмм и диаграмм износа шеек, определения суммарного крутящего момента, уравновешивания двигателя. Полученные результаты динамического расчёта (величины и законы изменения сил, моментов) являются основой для задания граничных условий при прочностном расчёте деталей КШМ в CAE-среде (ИПК-2.7), что обеспечивает верифицированность прочностного анализа.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина **«Динамический расчет поршневых двигателей»** относится к **части блока Б.1, формируемой участниками образовательных отношений** учебного плана (код дисциплины: Б1.2.4) и изучается в **5-м семестре** с курсовым проектом.

Данная дисциплина является **ключевой для третьего этапа сквозного проекта «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация»**, обеспечивая определение нагрузок, действующих на детали кривошипно-шатунного механизма, которые являются исходными данными для прочностных расчётов и оптимизации конструкции.

Изучение дисциплины базируется на знаниях, умениях и навыках, полученных при освоении следующих дисциплин и курсов:

- **Инженерная механика в энергетическом машиностроении** (Б1.1.16, 3 семестр): знание законов динамики, методов определения сил инерции и кинематических характеристик движения является фундаментом для динамического расчёта.
- **Инженерная механика машин и механизмов** (Б1.1.21, 4 семестр): знание методов кинематического и динамического анализа механизмов необходимо для расчёта КШМ.
- **Теория рабочих процессов поршневых двигателей** (Б1.1.20, 4 семестр): результаты теплового расчёта (индикаторные диаграммы) являются исходными данными для определения газовых сил.
- **Конструкция поршневых двигателей** (Б1.2.2, 2 семестр): знание конструктивных особенностей КШМ необходимо для понимания объекта расчёта.
- **Сопротивление материалов** (Б1.1.15, 3-4 семестры): понимание основ прочностного анализа необходимо для осознания целей динамического расчёта как поставщика нагрузок.
- **Математика** (школьный курс, а также дисциплины «Линейная алгебра» (Б1.1.26.1, 1 семестр) и «Математический анализ» (Б1.1.26.2, 2 семестр): владение тригонометрическими функциями, дифференциальным и интегральным исчислением необходимо для выполнения динамических расчётов.
- **Физика** (школьный курс, а также дисциплина «Физика» (Б1.1.26.3, 2-3 семестры): знание законов механики необходимо для понимания динамических процессов.

Основные положения дисциплины используются в дальнейшем при изучении следующих дисциплин и освоении элементов образовательной программы, обеспечивая завершение третьего этапа сквозного проекта:

- **Конструирование и расчет механизмов энергетических установок** (Б1.1.22, 5-6 семестры) и **Конструирование поршневых двигателей** (Б1.2.8, 6 семестр): результаты динамического расчёта (силы, моменты) используются как исходные данные для прочностного анализа деталей КШМ (III этап).
- **Расчет и оптимизация деталей двигателя** (Б1.2.9, 6 семестр): динамические нагрузки являются граничными условиями для CAE-расчётов напряжённо-деформированного состояния и усталостной долговечности (III этап).
- **Системы поршневых двигателей** (Б1.2.5, 5 семестр): понимание динамических нагрузок необходимо для расчёта систем, взаимодействующих с КШМ.
- **Виброакустика на транспорте** (Б1.2.11, 7 семестр) и **Снижение шума и вибрации автотранспортных средств** (Б1.2.10, 6 семестр): результаты анализа неуравновешенных сил и моментов используются для оценки виброакустических характеристик двигателя (III этап).
- **Методы испытаний поршневых двигателей и турбомашин** (Б1.2.14, 7 семестр): расчётные динамические характеристики могут быть верифицированы экспериментально (IV этап).
- Все последующие дисциплины, связанные с расчётом, конструированием и доводкой двигателей, а также подготовка и защита выпускной квалификационной работы.

3. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет **5 зачетных единиц (180 часов)**.

3.1. Виды учебной работы и трудоемкость

№ п/п	Вид учебной работы	Количество часов	Семестры
			5
1	Аудиторные занятия	90	90
	В том числе:		
1.1	Лекции	18	18
1.2	Семинарские/практические занятия	54	54
1.3	Лабораторные занятия	18	18
2	Самостоятельная работа	90	90
3	Промежуточная аттестация		
	Зачет/диф.зачет/экзамен	Экзамен	Экзамен
	Курсовой проект	Курсовой проект	Курсовой проект
	Итого	**180**	**180**

Примечание: курсовой проект выполняется в рамках часов самостоятельной работы.

3.2. Тематический план изучения дисциплины

№ п/п	Название раздела / темы	Всего часов	Аудиторная работа	Лекции	Семинарские/ практические занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа
Семестр 5	**Динамический расчет поршневых двигателей**						
1	Тема 1. Введение. Кинематика кривошипно-шатунного механизма	16	10	2	8	–	6
2	Тема 2. Приведение масс деталей КШМ. Динамически эквивалентная система	16	10	2	8	–	6

№ п/п	Название раздела / темы	Всего часов	Аудиторная работа	Лекции	Семинарские/ практические занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа
3	Тема 3. Силы, действующие в кривошипно-шатунном механизме	20	12	2	8	2	8
4	Тема 4. Силы, действующие на шатунные и коренные шейки коленчатого вала	22	14	2	8	4	8
5	Тема 5. Построение полярных диаграмм и диаграмм износа шеек	20	12	2	6	4	8
6	Тема 6. Суммарный крутящий момент и равномерность хода двигателя	20	12	2	6	4	8
7	Тема 7. Уравновешивание поршневых двигателей	24	14	2	8	4	10
8	Тема 8. Крутильные колебания коленчатого вала	12	4	2	2	–	8
	Итого за 1 семестр	**180**	**90**	**18**	**54**	**18**	**90**

3.3. Содержание дисциплины

Семестр 5. Динамический расчет поршневых двигателей

Тема 1. Введение. Кинематика кривошипно-шатунного механизма

Роль динамического расчета в обеспечении прочности, надежности и эффективности конструкции двигателя. Связь дисциплины с теоретической механикой, сопротивлением материалов и теорией механизмов и машин. Основные конструктивные схемы КШМ: цен-

тральный, дезаксиальный, V-образный. Необходимость кинематического анализа для последующего динамического расчёта. Кинематический анализ центрального КШМ. Перемещение поршня: точная и приближенная формулы (с использованием поправки Брикса). Скорость поршня. Ускорение поршня: вывод зависимостей, анализ гармонических составляющих первого и второго порядка. Влияние кинематического параметра $\lambda = R/L$ на характер движения. Угловая скорость и угловое ускорение шатуна. Кинематика дезаксиального КШМ. Кинематика V-образных двигателей с прицепным шатуном. Практическое применение результатов кинематического анализа.

Тема 2. Приведение масс деталей КШМ. Динамически эквивалентная система

Необходимость приведения масс для упрощения динамического расчёта. Массы деталей, совершающих возвратно-поступательное движение (поршень, поршневые кольца, палец). Массы деталей, совершающих вращательное движение (неуравновешенные части шатуна, щеки и противовесы коленчатого вала). Приведение массы шатуна к двум массам, сосредоточенным в поршневом и кривошипном пальцах. Условия динамической эквивалентности (равенство масс, положения центра масс, момента инерции). Приведение массы колена вала. Схема динамически эквивалентной системы КШМ с сосредоточенными массами. Определение масс, совершающих возвратно-поступательное и вращательное движение. Примеры приведения для конкретных конструкций.

Тема 3. Силы, действующие в кривошипно-шатунном механизме

Силы давления газов. Индикаторная диаграмма и её развертка по углу поворота коленчатого вала. Методика развёртки. Силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс: силы инерции первого и второго порядка, их зависимость от частоты вращения, массы и кинематического параметра λ. Силы инерции вращающихся масс (центробежные силы). Суммарные силы, действующие на поршневой палец. Разложение суммарной силы на составляющие: нормальную силу (перпендикулярную оси цилиндра) и силу, действующую вдоль шатуна. Перенос силы вдоль шатуна на шатунную шейку. Разложение силы, действующей на шатунную шейку, на тангенциальную и радиальную составляющие. Влияние этих сил на трение, износ и нагруженность деталей. Анализ сил на характерных режимах работы двигателя.

Тема 4. Силы, действующие на шатунные и коренные шейки коленчатого вала

Силы, действующие на шатунную шейку от одного шатуна. Построение таблицы динамического расчета как основы для определения нагрузок. Определение результирующей силы, действующей на шатунную шейку, с учётом постоянной центробежной силы вращающихся масс шатуна. Силы, действующие на коренные шейки. Понятие о набегающих моментах и силах для многоцилиндровых двигателей. Определение нагрузок на коренные подшипники. Средние удельные нагрузки на подшипники. Выбор направления оси масляного отверстия для обеспечения наилучших условий смазки. Влияние порядка работы цилиндров на нагруженность шеек.

Тема 5. Построение полярных диаграмм и диаграмм износа шеек

Методика построения полярной диаграммы сил, действующих на шатунную шейку, в координатах, вращающихся вместе с шейкой. Выбор масштабов и последовательность построения. Использование полярной диаграммы для определения максимальных и средних нагрузок, направления действия сил. Построение диаграммы износа шатунной шейки на основе полярной диаграммы (метод суммирования векторов сил). Определение зон минимального износа для выбора расположения маслоподводящих каналов. Построение полярных диаграмм для коренных шеек. Анализ нагрузок на различных режимах работы двигателя (режим максимального крутящего момента, режим максимальной мощности, холостой ход).

Тема 6. Суммарный крутящий момент и равномерность хода двигателя

Определение крутящего момента одного цилиндра от сил давления газов и сил инерции. Построение графика суммарного крутящего момента многоцилиндрового двигателя методом табличного суммирования. Угловой интервал между рабочими ходами. Влияние числа цилиндров и порядка их работы на характер суммарного момента. Средний крутящий мо-

мент. Неравномерность крутящего момента и хода двигателя. Коэффициент неравномерности крутящего момента. Степень неравномерности частоты вращения коленчатого вала δ. Роль маховика в обеспечении равномерности хода, аккумулировании и отдаче энергии. Расчет маховика по заданной степени неравномерности. Определение необходимого момента инерции маховика.

Тема 7. Уравновешивание поршневых двигателей

Причины возникновения вибраций в двигателях. Внешняя и внутренняя неуравновешенность. Условия полного уравновешивания двигателя (равенство нулю главного вектора и главного момента сил инерции). Уравновешивание сил инерции вращающихся масс с помощью противовесов на коленчатом валу. Уравновешивание сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс первого и второго порядка. Анализ уравновешенности двигателей различных схем: одноцилиндровых, рядных двух-, трёх-, четырёх-, пяти-, шестицилиндровых, V-образных четырёх-, шести-, восьмицилиндровых. Методы уравновешивания: применение дополнительных противовесов, установка балансирных валов (механизм Ланчестера для сил первого порядка, механизм «Дайхацу» и др.). Частичное уравновешивание. Особенности уравновешивания V-образных двигателей с разрезными и неразрезными шатунными шейками. Практические примеры систем уравновешивания современных двигателей.

Тема 8. Крутильные колебания коленчатого вала

Причины возникновения крутильных колебаний. Собственные и вынужденные крутильные колебания. Приведение крутильной системы коленчатого вала к многомассовой модели. Определение моментов инерции сосредоточенных масс и податливостей участков вала. Определение частот и форм собственных колебаний. Гармонический анализ возмущающих моментов (главные и побочные гармоники). Резонансные режимы работы и их опасность. Допускаемые напряжения при крутильных колебаниях. Способы борьбы с крутильными колебаниями: изменение параметров системы для смещения резонансных частот, применение демпферов (резиновых, вязкостных, сухого трения, маятниковых гасителей). Конструкции демпферов, применяемых в двигателях.

3.4. Тематика семинарских/практических и лабораторных занятий

3.4.1. Семинарские/практические занятия

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практического занятия	Трудоемкость (час.)
1	Тема 1	Кинематический анализ центрального КШМ. Расчёт перемещения, скорости и ускорения поршня	4
2	Тема 1	Построение графиков перемещения, скорости и ускорения поршня	2
3	Тема 1	Кинематический анализ дезаксиального КШМ и КШМ V-образных двигателей	2
4	Тема 2	Расчёт приведённых масс деталей КШМ для заданного двигателя	4
5	Тема 2	Построение динамически эквивалентной системы масс	2
6	Тема 3	Развёртка индикаторной диаграммы по углу поворота коленчатого вала	4
7	Тема 3	Расчёт сил инерции и суммарных сил, действующих в КШМ, для различных углов ПКВ	4

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практического занятия	Трудоемкость (час.)
8	Тема 4	Заполнение таблицы динамического расчета для одноцилиндрового двигателя	4
9	Тема 4	Определение сил, действующих на шатунную шейку, и построение графиков их изменения	4
10	Тема 5	Построение полярной диаграммы сил, действующих на шатунную шейку	4
11	Тема 5	Построение диаграммы износа шатунной шейки. Определение рационального расположения масляного отверстия	2
12	Тема 6	Построение графика суммарного крутящего момента для 4-цилиндрового двигателя	4
13	Тема 6	Расчёт параметров маховика по заданной степени неравномерности хода	2
14	Тема 7	Анализ уравновешенности рядного 4-цилиндрового двигателя	4
15	Тема 7	Расчёт параметров противовесов для уравновешивания вращающихся масс	4
16	Тема 7	Проектировочный расчёт балансирных валов для двигателя R4	4
	Итого		**54**

3.4.2. Лабораторные занятия

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование лабораторной работы	Трудоемкость (час.)
1	Тема 3	Экспериментальное определение давления газов в цилиндре двигателя и построение индикаторной диаграммы	2
2	Тема 3	Тензометрирование шатуна для экспериментального определения действующих сил	4
3	Тема 4	Экспериментальное определение нагрузок на коренные подшипники коленчатого вала	2
4	Тема 5	Моделирование полярной диаграммы сил на шатунную шейку в CAE-системе	4
5	Тема 6	Измерение неравномерности вращения коленчатого вала и определение момента инерции маховика	2
6	Тема 7	Исследование вибраций двигателя и анализ эффективности уравновешивания	4

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование лабораторной работы	Трудоемкость (час.)
	Итого		**18**

3.5. Тематика курсовых проектов (курсовых работ)

Курсовой проект выполняется в 5-м семестре и является **завершающим этапом формирования компетенций по динамическому расчёту поршневого двигателя**. Результаты курсового проекта используются в последующих дисциплинах для прочностного анализа и оптимизации.

Примерные темы курсовых проектов:

1. Динамический расчёт рядного четырёхцилиндрового бензинового двигателя с заданными параметрами.
2. Динамический расчёт рядного четырёхцилиндрового дизельного двигателя.
3. Динамический расчёт V-образного шестицилиндрового бензинового двигателя.
4. Динамический расчёт V-образного восьмицилиндрового двигателя.
5. Динамический расчёт рядного трёхцилиндрового двигателя с разработкой системы уравновешивания.
6. Динамический расчёт и уравновешивание оппозитного четырёхцилиндрового двигателя.
7. Динамический расчёт одноцилиндрового двигателя с дезаксиальным КШМ.
8. Анализ влияния параметров КШМ на нагруженность подшипников коленчатого вала.
9. Динамический расчёт и выбор параметров маховика для двигателя с заданной степенью неравномерности.
10. Разработка и расчёт системы уравновешивания для рядного пятицилиндрового двигателя.

Структура курсового проекта:

- Введение (актуальность, цель и задачи работы).
- Выбор и обоснование исходных данных для расчёта (параметры двигателя, режим расчёта).
- Краткий тепловой расчёт двигателя (с использованием результатов дисциплины Б1.1.20).
- Кинематический расчёт КШМ.
- Приведение масс деталей КШМ.
- Динамический расчёт (определение сил, действующих в КШМ, построение таблицы динамического расчета).
- Построение полярных диаграмм и диаграмм износа для шатунных и коренных шеек.
- Расчёт суммарного крутящего момента и определение параметров маховика.
- Анализ уравновешенности двигателя и разработка системы уравновешивания (при необходимости).
- Заключение с выводами по работе.
- Список использованной литературы.
- Графическая часть (при необходимости): схемы КШМ, графики, диаграммы.

4. Учебно-методическое и информационное обеспечение

4.1 Нормативные документы и ГОСТы

1. ГОСТ 14846–2020 Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний
2. ГОСТ 10150– 2014 Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Общие технические условия
3. ГОСТ Р 54120-2010 Двигатели автомобильные. Пусковые качества. Технические требования

4.2 Основная литература

1. Баширов, Р. М. Автотракторные двигатели: конструкция, основы теории и расчета : учебник / Р. М. Баширов. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 336 с. —

ISBN 978-5-8114-2741-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://reader.lanbook.com/book/96242

2. Уханов, А. П. Конструкция автомобилей и тракторов : учебник / А. П. Уханов, Д. А. Уханов, В. А. Голубев. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — 188 с. — ISBN 978-5-8114-4582-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — https://reader.lanbook.com/book/122188

4.3 Дополнительная литература

1. Автомобильные двигатели. Рабочие процессы, конструкция, основы расчёта и эксплуатации : учебник / Н. Г. Фаталиев, М. М. Аливагабов, А. Х. Бекеев, М. А. Арсланов. — Махачкала : ДагГАУ имени М.М.Джамбулатова, 2018. — 316 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://reader.lanbook.com/book/113001

2. Щерба, В. Е. Теория, расчет и конструирование поршневых компрессоров объемного действия: В. Е. Щерба. — 2-е изд., доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2023. — 323 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-09232-5. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: https://urait.ru/bcode/517027

4.4 Электронные образовательные ресурсы

1. Курс «Динамика двигателей внутреннего сгорания» 4-й семестр https://online.mospolytech.ru/course/view.php?id=7597

5-й семестр

Курс «Динамика двигателей внутреннего сгорания (5 сем)» https://online.mospolytech.ru/course/view.php?id=9607

4.5. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение

Для освоения дисциплины и выполнения учебных, научно-исследовательских и проектных работ в рамках образовательной программы рекомендуется использование следующего лицензионного и свободно распространяемого программного обеспечения.

Microsoft Windows – лицензионная операционная система, используемая для обеспечения работы всех учебных компьютеров и персональных устройств в аудиториях университета. Доступна на всех компьютерах университета в рамках лицензионного соглашения. Студенты могут использовать свободно распространяемые альтернативы (Linux, Astra Linux) для выполнения учебных задач.

Microsoft Office – лицензионный пакет офисных приложений, включающий текстовый редактор Word, табличный процессор Excel, программу для создания презентаций PowerPoint. Используется для оформления расчётно-пояснительных записок, отчётов, презентаций и другой учебной документации. Доступен на компьютерах университета. Свободными аналогами являются LibreOffice и OpenOffice.

КОМПАС-3D – российская система трёхмерного моделирования, широко используемая в отечественном машиностроении. Позволяет выполнять параметрическое моделирование, создавать чертежи в соответствии с ЕСКД, проводить прочностные расчёты в среде APM FEM. Учебная версия доступна для свободного скачивания на сайте разработчика (https://kompas.ru).

4.6. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

Для успешного освоения образовательной программы и выполнения научно-исследовательских, проектных и выпускных квалификационных работ студентам рекомендуется использовать следующие современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы.

Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU – крупнейшая российская электронная библиотека научных публикаций, интегрированная с Российским индексом научного цитирования (РИНЦ). Содержит полнотекстовые статьи из научных журналов по энергетическому машиностроению, двигателестроению и смежным отраслям. Позволяет отслеживать публикационную активность и находить актуальные исследования. Доступ открыт с любого компьютера через сеть Интернет по адресу: https://elibrary.ru.

КиберЛенинка – научная электронная библиотека открытого доступа. Содержит полнотекстовые научные статьи, в том числе по техническим наукам, энергетическому машиностроению и двигателестроению. Все материалы доступны бесплатно. Адрес ресурса: https://cyberleninka.ru.

Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов (docs.cntd.ru**)** – бесплатная база нормативных документов, включающая ГОСТы, технические условия, строительные нормы и правила. Удобна для оперативного поиска актуальных стандартов, необходимых при проектировании и расчётах деталей и узлов двигателей. Адрес: https://docs.cntd.ru.

Росстандарт (ФГУП «Стандартинформ») – официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. Содержит информацию о действующих стандартах, технических регламентах и нормативных документах. Адрес: https://www.gost.ru.

Научная библиотека Московского политехнического университета – электронный каталог библиотеки университета, содержащий информацию о фондах учебной и научной литературы. Доступен с любого устройства, имеющего подключение к интернету. Адрес: https://lib.mospolytech.ru.

«Известия вузов. Машиностроение» – рецензируемый научный журнал открытого доступа, публикующий статьи по актуальным проблемам машиностроения, включая двигателестроение. Входит в перечень ВАК. Содержит исследования по рабочему процессу ДВС, динамике, прочности и другим направлениям. Адрес: https://izvuzmash.ru.

Объединение сетевых электронных библиотек (СЭБ) – некоммерческое партнёрство, объединяющее научную и учебную литературу вузов — участников проекта. Обеспечивает доступ к учебно-методическим материалам по техническим специальностям. Доступ осуществляется через портал ЭБС «Лань»: https://e.lanbook.com (авторизация по IP-адресам университета или через личный кабинет).

5. Материально-техническое обеспечение

Для успешного освоения дисциплины используется общий аудиторный фонд университета и специализированные аудитории, закреплённые за кафедрой, имеющие следующее материально-техническое обеспечение:

Наименование специальных помещений	**Оснащённость специальных помещений**
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Нд-222 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, экран для проектора, переносной ноутбук, проектор. Возможность доступа в интернет.
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Нд-223 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, переносной ноутбук. Возможность доступа в интернет.
Компьютерный класс № Нд-224	Компьютеры и мебель для учебного процесса.

Наименование специальных помещений	**Оснащённость специальных помещений**
107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, переносной ноутбук. Возможность доступа в интернет.
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Нд-229 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, переносной ноутбук. Возможность доступа в интернет.
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Н-406 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, экран для проектора, переносной ноутбук, проектор. Возможность доступа в интернет.

6. Методические рекомендации

6.1. Методические рекомендации для преподавателя по организации обучения

Эффективность освоения дисциплины определяется качеством организации учебного процесса, выбором адекватных форм и методов обучения. Преподавателю необходимо учитывать специфику дисциплины, уровень подготовленности обучающихся и современные образовательные технологии.

Возможно проведение занятий и аттестаций в дистанционном формате с применением системы дистанционного обучения университета (СДО-LMS). Порядок проведения работ в дистанционном формате устанавливается отдельными распоряжениями проректора по учебной работе и/или центром учебно-методической работы.

Перед началом преподавания преподавателю необходимо:

- изучить рабочую программу, цели и задачи дисциплины;
- чётко представлять, какие знания, умения и навыки должен приобрести студент;
- ознакомиться с видами учебной работы и содержанием разделов дисциплины.

В ходе лекционного занятия преподаватель должен:

- назвать тему, учебные вопросы, ознакомить студентов с перечнем основной и дополнительной литературы;
- во вступительной части обосновать место и роль темы, раскрыть её практическое значение, увязать с предыдущим материалом;
- в основной части раскрывать содержание учебных вопросов, акцентировать внимание на ключевых категориях, явлениях и процессах, аргументированно обосновывать собственную позицию, приводить примеры, задавать риторические вопросы;
- руководить конспектированием, подчёркивая необходимость фиксации основных положений;
- в заключительной части сформулировать выводы, объявить план следующего занятия, дать рекомендации по подготовке.

При проведении практических (семинарских) занятий рекомендуется:

- обеспечивать активное участие всех студентов, использовать индивидуальные выступления, групповые дискуссии, решение практических задач, разбор кейсов;
- контролировать степень усвоения материала, поощрять самостоятельный поиск информации.

При проведении лабораторных занятий (при наличии) рекомендуется:

- ознакомить студентов с правилами техники безопасности;
- обеспечить понимание цели и задач каждой работы;

- организовать защиту работ с оценкой понимания сущности изучаемых процессов.

При организации самостоятельной работы студентов следует:

- чётко формулировать задания, указывать сроки выполнения;
- обеспечивать необходимыми учебно-методическими материалами;
- осуществлять регулярный контроль выполнения.

При проведении текущего контроля и промежуточной аттестации рекомендуется:

- использовать разнообразные формы контроля в соответствии с фондом оценочных средств;
- обеспечить объективность оценивания, руководствуясь установленными критериями;
- своевременно доводить результаты до студентов с указанием ошибок и рекомендаций.

В целях повышения эффективности образовательного процесса рекомендуется использовать:

- мультимедийные презентации для визуализации материала;
- интерактивные методы обучения (деловые игры, дискуссии, разбор кейсов);
- дистанционные образовательные технологии;
- материалы, размещённые в системе дистанционного обучения Московского Политеха (СДО-LMS).

6.2. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Освоение дисциплины осуществляется при контактной работе с преподавателем и в процессе самостоятельной работы. Эффективное освоение предполагает регулярное посещение всех видов аудиторных занятий, выполнение плана самостоятельной работы в полном объёме и прохождение аттестации в соответствии с календарным учебным графиком.

Студенту рекомендуется ознакомиться со списком основной и дополнительной литературы и взять в библиотеке необходимые издания. Доступ к информационным ресурсам организован в читальных залах библиотеки со стационарных ПЭВМ, либо с личного устройства через беспроводной доступ.

Изучение дисциплины должно сопровождаться интенсивной самостоятельной работой с рекомендованными источниками и материалами лекций. Начинать самостоятельные занятия следует с первого дня изучения дисциплины и проводить их регулярно.

Каждый студент должен самостоятельно планировать свою работу, исходя из возможностей и приоритетов. Для плодотворной работы важно организовать постоянное рабочее место, чередовать труд и отдых (перерывы каждые 1–2 часа).

Особое место уделяется консультированию как форме обучения и контроля. Консультирование предполагает взаимодействие между преподавателем и студентами, направленное на разрешение проблем.

Для успешного освоения дисциплины рекомендуется:

- систематически посещать лекции, вести конспект;
- готовиться к практическим занятиям заранее, изучая теорию и выполняя задания;
- при наличии лабораторных работ — выполнять их в соответствии с методическими указаниями, оформлять отчёты и готовиться к защите;
- своевременно выполнять задания для самостоятельной работы;
- активно участвовать в обсуждениях, задавать вопросы;
- использовать СДО-LMS для доступа к материалам и выполнения тестов;
- регулярно проверять свои знания с помощью вопросов для самопроверки.

При подготовке к текущему контролю и промежуточной аттестации рекомендуется:

- повторить теоретический материал по соответствующим разделам;
- выполнить практические задания, аналогичные разобранным на занятиях;
- ознакомиться с критериями оценивания;
- систематизировать материал, составить краткий план ответов;
- при необходимости посетить консультацию преподавателя.

Соблюдение данных рекомендаций позволит качественно освоить учебный материал и успешно пройти все формы контроля.

7. Фонд оценочных средств

7.1 Методы контроля и оценивания результатов обучения

Сформированность компетенций при изучении дисциплины определяется посредством оценки соответствия ответов и/или выполнения заданий заявленным индикаторам в рамках мероприятий текущего контроля и промежуточной аттестации (экзамена). Дисциплина «Динамический расчет поршневых двигателей» является **обеспечивающей** для компетенции ПК-2, обеспечивая теоретические знания и практические навыки в области кинематического и динамического анализа кривошипно-шатунного механизма, методов определения и уравновешивания сил и моментов, действующих в поршневых двигателях, необходимых для расчётного обоснования нагрузок на детали и узлы на третьем этапе сквозного проектирования «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация».

В процессе изучения дисциплины оценивается сформированность следующих компетенций и индикаторов:

ПК-2. Способен проводить расчетно-теоретические исследования узлов и систем поршневых двигателей и турбомашин с применением методов математического и компьютерного моделирования (CAE)

Индикатор достижения компетенции:

• **ИПК-2.7.** Способен выполнять верифицированный прочностной расчёт ответственной детали КШМ в CAE-среде на основе ранее рассчитанных динамических нагрузок.

Дисциплина «Динамический расчет поршневых двигателей» является ключевой для третьего этапа сквозного проекта «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация», обеспечивая определение нагрузок, действующих на детали кривошипно-шатунного механизма, которые являются исходными данными для прочностных расчётов и оптимизации конструкции. В ходе изучения дисциплины студент осваивает кинематику кривошипно-шатунного механизма, методы приведения масс, расчёт сил, действующих в КШМ, построение полярных диаграмм и диаграмм износа шеек, расчёт суммарного крутящего момента и равномерности хода двигателя, методы уравновешивания поршневых двигателей различных схем, а также основы расчёта крутильных колебаний коленчатого вала.

В процессе изучения дисциплины используются следующие методы контроля.

Текущее (рубежное) тестирование по модулям

Проводится после завершения изучения каждого из двух модулей дисциплины (в пятом семестре дисциплина изучается в рамках одного семестра и делится на два модуля). Тестирование осуществляется в письменной или компьютерной форме и включает вопросы закрытого и открытого типа, а также расчётные задачи, направленные на проверку знаний кинематики КШМ, методов приведения масс, расчёта сил, действующих в КШМ, построения полярных диаграмм, расчёта суммарного крутящего момента, методов уравновешивания двигателей. Результаты тестирования используются для оценки уровня освоения материала модуля и определения готовности студента к выполнению курсового проекта. Проверяемый индикатор: ИПК-2.7 (знания в области динамического расчёта для последующего прочностного анализа).

Устный опрос (собеседование)

Проводится в ходе практических занятий для проверки понимания студентом теоретического материала, способности аргументированно излагать методы кинематического и динамического анализа, объяснять физический смысл сил, действующих в КШМ, обосновывать выбор методов уравновешивания. Устный опрос может быть как индивидуальным, так и фронтальным, и направлен на выявление глубины усвоения материала, умения применять полученные знания для решения профессиональных задач. В рамках сквозного проекта устный опрос позволяет оценить способность студента выполнять динамический расчёт КШМ проектируемого двигателя. Проверяемый индикатор: ИПК-2.7.

Практические занятия

В ходе выполнения практических заданий (кинематический анализ КШМ, расчёт приведённых масс, развёртка индикаторной диаграммы, расчёт сил инерции и суммарных сил, заполнение таблицы динамического расчёта, построение полярных диаграмм и диаграмм износа, построение графика суммарного крутящего момента, расчёт маховика, анализ уравновешенности двигателей, расчёт балансирных валов) оценивается способность студента применять теоретические знания для решения конкретных профессиональных задач. Результаты выполнения практических заданий фиксируются в виде отчётов, которые защищаются студентом в устной форме. Практические занятия ориентированы на формирование навыков динамического расчёта, необходимых для выполнения курсового проекта и третьего этапа сквозного проекта. Проверяемый индикатор: ИПК-2.7.

Лабораторные занятия

В ходе выполнения лабораторных работ студент работает с лабораторными установками, тензометрическим оборудованием, системами сбора данных. Проводятся работы по экспериментальному определению давления газов в цилиндре и построению индикаторной диаграммы, тензометрированию шатуна для определения действующих сил, экспериментальному определению нагрузок на коренные подшипники, моделированию полярной диаграммы в CAE-системе, измерению неравномерности вращения коленчатого вала, исследованию вибраций двигателя. Оценивается умение работать с лабораторным оборудованием, проводить измерения, обрабатывать результаты, сравнивать экспериментальные и расчётные данные. Лабораторные работы выполняются в соответствии с методическими указаниями и защищаются студентом путем ответов на контрольные вопросы. Проверяемый индикатор: ИПК-2.7.

Курсовой проект

Курсовой проект выполняется в пятом семестре и является завершающим этапом формирования компетенций по динамическому расчёту поршневого двигателя. Курсовой проект направлен на комплексное применение знаний и навыков для выполнения динамического расчёта двигателя с заданными параметрами. Выполнение курсового проекта позволяет оценить способность студента самостоятельно выполнять кинематический и динамический расчёт КШМ, строить полярные диаграммы и диаграммы износа, рассчитывать суммарный крутящий момент и параметры маховика, анализировать уравновешенность двигателя и разрабатывать систему уравновешивания. Результаты курсового проекта используются в последующих дисциплинах для прочностного анализа и оптимизации. Проверяемый индикатор: ИПК-2.7.

Экзамен

Промежуточная аттестация проводится в форме экзамена по завершении изучения дисциплины. Экзамен позволяет комплексно оценить знания, умения и навыки студента по всем разделам дисциплины. Экзаменационный билет включает два теоретических вопроса (по основным разделам динамического расчёта) и одно практическое задание (расчётная задача). Результаты экзамена определяют итоговую оценку по дисциплине и отражают степень сформированности знаний, необходимых для выполнения третьего этапа сквозного проекта «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация». Проверяемый индикатор: ИПК-2.7.

Роль дисциплины в оценке результатов сквозного проекта

Дисциплина «Динамический расчет поршневых двигателей» формирует фундаментальные знания и навыки, необходимые для выполнения третьего этапа сквозного проекта — «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация». В рамках этого этапа студент должен выполнить динамический расчёт КШМ проектируемого двигателя, определить силы, действующие на детали, построить полярные диаграммы и диаграммы износа, рассчитать суммарный крутящий момент, определить параметры маховика, проанализировать уравновешенность двигателя. Результаты освоения дисциплины оцениваются в ходе защиты курсового проекта и отчета по третьему этапу сквозного проекта. Оценка сформированности компетенции ПК-2 по дисциплине учитывается при подведении итогов выполнения сквозного проекта в целом.

7.2 Шкала и критерии оценивания результатов обучения

7.2.1 Критерии оценки текущего (рубежного) тестирования по модулям

Текущее (рубежное) тестирование проводится после завершения изучения каждого модуля. Тест состоит из 20 заданий различного типа (выбор правильного ответа, установление соответствия, краткий ответ, расчётная задача). Каждое верно выполненное задание оценивается в 1 балл. Максимальное количество баллов за тест – 20.

Оценка «зачтено» выставляется студенту, если выполнено верно более 75% заданий теста (набрано более 15 баллов). Студент, получивший «зачтено», демонстрирует достаточное знание теоретического материала модуля, владеет методами кинематического и динамического анализа КШМ, умеет рассчитывать силы, действующие в механизме, строить полярные диаграммы, выполнять уравновешивание двигателей. Это свидетельствует о сформированности на пороговом уровне индикаторов ИПК-2.7в части теоретических основ динамического расчёта.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, если выполнено верно менее 75% заданий теста (набрано 15 баллов и менее). Студент, получивший «не зачтено», не владеет основным материалом модуля, допускает грубые ошибки в кинематическом и динамическом анализе, не может рассчитать силы инерции, не понимает методов уравновешивания. Студент обязан ликвидировать задолженность по модулю до прохождения следующего рубежного контроля.

7.2.2 Критерии оценки итогового тестирования по курсу

Итоговое тестирование проводится после завершения изучения всех модулей. Тест состоит из 30 заданий, охватывающих весь материал дисциплины. Каждое верно выполненное задание оценивается в 1 балл. Максимальное количество баллов – 30.

Оценка «отлично» выставляется студенту, набравшему от 29 до 30 баллов (97-100% правильных ответов). Студент демонстрирует системные теоретические знания по всем разделам дисциплины, уверенно выполняет кинематический и динамический анализ КШМ, рассчитывает силы и моменты, строит полярные диаграммы, выполняет уравновешивание двигателей, анализирует крутильные колебания. Сформированность индикаторов ИПК-2.7оценивается на продвинутом уровне, что позволяет студенту успешно выполнить курсовой проект и раздел сквозного проекта, связанный с динамическим расчётом.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, набравшему от 24 до 28 баллов (80-97% правильных ответов). Студент в целом демонстрирует системные теоретические знания, владеет большинством терминов, но допускает отдельные неточности в сложных вопросах, связанных с расчётом полярных диаграмм или уравновешиванием V-образных двигателей. Сформированность индикаторов оценивается на базовом уровне, достаточном для выполнения курсового проекта.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, набравшему от 18 до 23 баллов (60-80% правильных ответов). Студент демонстрирует знание основного материала, но допускает ошибки в деталях, испытывает затруднения при расчёте сил инерции или построении диаграмм износа, не в полной мере владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикаторов оценивается на пороговом уровне, что требует дополнительной работы для успешного выполнения курсового проекта.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, набравшему от 0 до 17 баллов (менее 60% правильных ответов). Студент не демонстрирует системных знаний, не владеет основными понятиями, не может выполнить динамический расчёт, допускает грубые ошибки. Сформированность индикаторов не достигла порогового уровня, что делает невозможным выполнение курсового проекта без дополнительной подготовки.

7.2.3 Критерии оценки устного опроса (собеседования)

Оценка «отлично» выставляется студенту, который глубоко и прочно усвоил материал, исчерпывающе и логически стройно его излагает. Студент демонстрирует полное знание ки-

нематики КШМ, методов приведения масс, расчёта сил, действующих в КШМ, построения полярных диаграмм, расчёта суммарного крутящего момента, методов уравновешивания двигателей различных схем. Уверенно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы, свободно владеет профессиональной терминологией. В контексте сквозного проекта такой уровень подготовки позволяет студенту самостоятельно выполнять динамический расчёт КШМ проектируемого двигателя.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, который твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей. Студент владеет основными понятиями и методами, умеет решать типовые задачи, но может испытывать затруднения при ответе на уточняющие вопросы или при объяснении сложных разделов (например, уравновешивание V-образных двигателей). В целом демонстрирует хорошее владение профессиональной терминологией.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, который имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей. Студент допускает неточности и ошибки в изложении, испытывает затруднения при расчёте сил инерции, обладает фрагментарными знаниями. Ответы на дополнительные вопросы даются с трудом, требуют наводящих вопросов. Профессиональная терминология используется недостаточно уверенно.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части материала, допускает грубые ошибки в изложении, не может выполнить динамический расчёт. Отсутствует понимание физических процессов, протекающих в КШМ. Не способен ответить на дополнительные вопросы, не владеет профессиональной терминологией. Студент не готов к выполнению курсового проекта.

7.2.4 Критерии оценки практических занятий

Оценка «зачтено» выставляется студенту, который выполнил практическое задание правильно, в установленные сроки. Студент продемонстрировал понимание методики решения задачи, способность применять теоретические знания для расчёта кинематических характеристик, сил инерции, суммарных сил, построения полярных диаграмм, расчёта крутящего момента, уравновешивания. При защите студент аргументирует полученные результаты, отвечает на уточняющие вопросы, демонстрирует владение профессиональной терминологией. В рамках сквозного проекта успешное выполнение практических заданий позволяет студенту овладеть методами динамического расчёта, необходимыми для выполнения курсового проекта.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, который не выполнил практическое задание, выполнил его не в полном объеме, или выполнил с грубыми ошибками. Студент не понимает методику решения, не может объяснить полученные результаты, не отвечает на вопросы по существу задания, не владеет профессиональной терминологией. Студент обязан выполнить практическое задание повторно в установленные преподавателем сроки.

7.2.5 Критерии оценки лабораторных работ

Оценка «зачтено» выставляется студенту, который выполнил лабораторную работу в полном объеме, в установленные сроки. Студент продемонстрировал умение работать с лабораторным оборудованием, проводить измерения, обрабатывать результаты, сравнивать экспериментальные и расчётные данные. При защите работы студент показывает понимание цели и методики проведения работы, уверенно отвечает на контрольные вопросы, правильно интерпретирует полученные результаты. Отчет оформлен в соответствии с требованиями. Успешное выполнение лабораторных работ позволяет студенту получить практический опыт, необходимый для верификации расчётных моделей в рамках сквозного проекта.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, который не выполнил лабораторную работу, выполнил ее не в полном объеме, или выполнил с грубыми ошибками. При защите студент не понимает цели и методики работы, не может ответить на контрольные вопросы, допускает грубые ошибки в интерпретации результатов. Отсутствует отчет или он оформлен с грубыми нарушениями требований. Студент обязан выполнить лабораторную работу повторно в установленные преподавателем сроки.

7.2.6 Критерии оценки курсового проекта

Курсовой проект выполняется в пятом семестре. Оценка выставляется по результатам защиты выполненного проекта. Защита проводится в форме устной презентации результатов с последующим ответом на вопросы преподавателя. Максимальная оценка – 5 баллов (отлично). Критерии оценки включают полноту выполнения задания, качество расчётов, правильность построения диаграмм, обоснованность выводов, качество оформления пояснительной записки и презентации.

Оценка «отлично» выставляется студенту, который полностью выполнил курсовой проект в соответствии с требованиями. Студент демонстрирует глубокое понимание методов кинематического и динамического анализа, самостоятельно выполняет динамический расчёт двигателя, корректно определяет силы, действующие в КШМ, строит полярные диаграммы и диаграммы износа, рассчитывает суммарный крутящий момент и параметры маховика, выполняет анализ уравновешенности и разрабатывает систему уравновешивания. Пояснительная записка оформлена в соответствии с требованиями, содержит все необходимые расчёты и графические материалы. При защите студент свободно владеет материалом, аргументированно отвечает на вопросы, демонстрирует понимание взаимосвязей между параметрами динамического расчёта и нагрузками на детали. Сформированность индикаторов ИПК-2.7оценивается на продвинутом уровне. Результаты курсового проекта могут быть использованы в качестве основы для последующих этапов сквозного проекта.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, который выполнил курсовой проект в полном объеме, но допускает отдельные неточности в расчётах или незначительные ошибки в построении диаграмм. Студент демонстрирует понимание методов динамического расчёта, способен выполнять основные расчёты, но может испытывать затруднения при анализе уравновешенности сложных схем. Пояснительная записка оформлена в соответствии с требованиями, но содержит незначительные замечания. При защите студент в целом отвечает на вопросы, но может допускать неточности. Сформированность индикаторов оценивается на базовом уровне.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, который выполнил курсовой проект, но допустил существенные ошибки в расчётах или не полностью выполнил требуемые разделы. Студент демонстрирует фрагментарные знания методов динамического расчёта, испытывает значительные затруднения при определении сил инерции или построении полярных диаграмм. Пояснительная записка оформлена с нарушениями требований. При защите студент отвечает на вопросы неуверенно, требует наводящих вопросов. Сформированность индикаторов оценивается на пороговом уровне.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не выполнил курсовой проект, выполнил его не в полном объеме или допустил грубые ошибки. Студент не демонстрирует понимания методов динамического расчёта, не может выполнить расчёты. Пояснительная записка отсутствует или оформлена с грубыми нарушениями. При защите студент не отвечает на вопросы, не владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикаторов не достигла порогового уровня. Студент обязан выполнить курсовой проект повторно в установленные преподавателем сроки.

7.2.7 Критерии оценки ответа на экзамене

Оценка «отлично» выставляется студенту, который глубоко и прочно усвоил программный материал по всем разделам, исчерпывающе и логически стройно излагает ответы на теоретические вопросы. Студент демонстрирует полное знание кинематики КШМ, методов приведения масс, расчёта сил, действующих в КШМ, построения полярных диаграмм, расчёта суммарного крутящего момента, методов уравновешивания двигателей различных схем, основ расчёта крутильных колебаний. Уверенно и без ошибок выполняет практическое задание (расчётную задачу), аргументирует последовательность решения, делает обоснованные выводы. Дает полные ответы на дополнительные вопросы, свободно владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикаторов ИПК-2.7оценивается на продвину-

том уровне, что подтверждает готовность студента к выполнению третьего этапа сквозного проекта.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, который твердо знает материал, грамотно и по существу излагает ответы на теоретические вопросы, не допуская существенных неточностей. Студент владеет основными понятиями и методами, умеет решать типовые задачи. Выполняет практическое задание в целом правильно, но может испытывать затруднения при обосновании отдельных этапов. На дополнительные вопросы отвечает в целом правильно, но допускает несущественные ошибки. Сформированность индикаторов оценивается на базовом уровне.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, который имеет знания только основного материала, допускает неточности и ошибки в изложении теоретических вопросов. Студент обладает фрагментарными знаниями по отдельным разделам. Выполняет практическое задание с помощью наводящих вопросов или допускает ошибки в расчётах. Ответы на дополнительные вопросы даются с трудом, профессиональная терминология используется недостаточно уверенно. Сформированность индикаторов оценивается на пороговом уровне.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает грубые ошибки в изложении теоретических вопросов. Студент не может выполнить практическое задание или выполняет его с грубыми ошибками, не понимает сути задания. Не способен ответить на дополнительные вопросы, не владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикаторов не достигла порогового уровня, что делает невозможным выполнение третьего этапа сквозного проекта.

7.2.8 Соответствие методов контроля проверяемым индикаторам компетенций

В процессе изучения дисциплины оценивается сформированность знаний и навыков, необходимых для освоения индикатора компетенции ПК-2. Дисциплина является обеспечивающей для указанной компетенции.

ИПК-2.7. Способен выполнять верифицированный прочностной расчёт ответственной детали КШМ в CAE-среде на основе ранее рассчитанных динамических нагрузок.

Формируется через изучение методов расчёта сил, действующих на детали КШМ, определение нагрузок на шатунные и коренные шейки, что является исходными данными для прочностных расчётов в CAE-среде. Проверяется методами: текущее тестирование, устный опрос, практические занятия, курсовой проект, экзамен.

Индикатор	Формируемые знания и навыки	Методы контроля
ИПК-2.7. Способен выполнять верифицированный прочностной расчёт ответственной детали КШМ в CAE-среде на основе ранее рассчитанных динамических нагрузок	Знание методов кинематического и динамического анализа КШМ; умение определять силы давления газов, силы инерции, суммарные силы; умение строить полярные диаграммы и диаграммы износа; умение определять нагрузки на шатунные и коренные шейки; понимание роли динамических нагрузок как граничных условий для прочностных расчётов	Текущее тестирование, устный опрос, практические занятия, лабораторные работы, курсовой проект, экзамен

Оценка сформированности знаний и навыков осуществляется комплексно с использованием всех методов контроля. Результаты текущего и итогового тестирования, устных опросов, выполнения практических и лабораторных работ, защиты курсового проекта, а также экзамена учитываются при формировании итоговой оценки по дисциплине и оценке выполнения третьего этапа сквозного проекта. Дисциплина «Динамический расчет поршневых двигателей» закладывает содержательную основу для последующего формирования компе-

тенции ПК-2 на этапах расчётного обоснования, верификации и оптимизации, обеспечивая студента знаниями и навыками, необходимыми для определения нагрузок на детали КШМ, выполнения динамического анализа, уравновешивания двигателей и подготовки исходных данных для прочностных расчётов в CAE-среде.

7.3 Оценочные средства

7.3.1 Текущий контроль

7.3.1.1 Модульная структура дисциплины

Дисциплина изучается в 5-м семестре. Семестр делится на два равных модуля (периода), каждый из которых включает определенные темы.

Модуль 1 (недели 1–8) — Кинематика и динамика КШМ. Силы в механизме. Полярные диаграммы

Включает темы: Тема 1. Введение. Кинематика кривошипно-шатунного механизма; Тема 2. Приведение масс деталей КШМ. Динамически эквивалентная система; Тема 3. Силы, действующие в кривошипно-шатунном механизме; Тема 4. Силы, действующие на шатунные и коренные шейки коленчатого вала; Тема 5. Построение полярных диаграмм и диаграмм износа шеек.

Модуль 2 (недели 9–16) — Крутящий момент. Уравновешивание. Крутильные колебания

Включает темы: Тема 6. Суммарный крутящий момент и равномерность хода двигателя; Тема 7. Уравновешивание поршневых двигателей; Тема 8. Крутильные колебания коленчатого вала.

7.3.1.2 Рубежный контроль по модулям (устный опрос/собеседование)

7.3.1.2.1 Модуль 1. Кинематика и динамика КШМ. Силы в механизме. Полярные диаграммы

Перечень вопросов для собеседования:

1. Роль динамического расчета в обеспечении прочности, надежности и эффективности конструкции двигателя. Связь дисциплины с теоретической механикой, сопротивлением материалов и теорией механизмов и машин.
2. Основные конструктивные схемы КШМ: центральный, дезаксиальный, V-образный. Необходимость кинематического анализа для последующего динамического расчёта.
3. Кинематический анализ центрального КШМ. Перемещение поршня: точная и приближенная формулы (с использованием поправки Брикса).
4. Скорость поршня. Ускорение поршня: вывод зависимостей, анализ гармонических составляющих первого и второго порядка.
5. Влияние кинематического параметра $\lambda = R/L$ на характер движения. Угловая скорость и угловое ускорение шатуна. Кинематика дезаксиального КШМ. Кинематика V-образных двигателей с прицепным шатуном.
6. Необходимость приведения масс для упрощения динамического расчёта. Массы деталей, совершающих возвратно-поступательное движение (поршень, поршневые кольца, палец).
7. Массы деталей, совершающих вращательное движение (неуравновешенные части шатуна, щеки и противовесы коленчатого вала).
8. Приведение массы шатуна к двум массам, сосредоточенным в поршневом и кривошипном пальцах. Условия динамической эквивалентности (равенство масс, положения центра масс, момента инерции).
9. Приведение массы колена вала. Схема динамически эквивалентной системы КШМ с сосредоточенными массами. Определение масс, совершающих возвратно-поступательное и вращательное движение.

10. Силы давления газов. Индикаторная диаграмма и её развертка по углу поворота коленчатого вала. Методика развёртки.

11. Силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс: силы инерции первого и второго порядка, их зависимость от частоты вращения, массы и кинематического параметра λ.

12. Силы инерции вращающихся масс (центробежные силы). Суммарные силы, действующие на поршневой палец.

13. Разложение суммарной силы на составляющие: нормальную силу (перпендикулярную оси цилиндра) и силу, действующую вдоль шатуна.

14. Перенос силы вдоль шатуна на шатунную шейку. Разложение силы, действующей на шатунную шейку, на тангенциальную и радиальную составляющие.

15. Влияние этих сил на трение, износ и нагруженность деталей. Анализ сил на характерных режимах работы двигателя.

16. Силы, действующие на шатунную шейку от одного шатуна. Построение таблицы динамического расчета как основы для определения нагрузок.

17. Определение результирующей силы, действующей на шатунную шейку, с учётом постоянной центробежной силы вращающихся масс шатуна.

18. Силы, действующие на коренные шейки. Понятие о набегающих моментах и силах для многоцилиндровых двигателей. Определение нагрузок на коренные подшипники.

19. Средние удельные нагрузки на подшипники. Выбор направления оси масляного отверстия для обеспечения наилучших условий смазки. Влияние порядка работы цилиндров на нагруженность шеек.

20. Методика построения полярной диаграммы сил, действующих на шатунную шейку, в координатах, вращающихся вместе с шейкой. Выбор масштабов и последовательность построения.

21. Использование полярной диаграммы для определения максимальных и средних нагрузок, направления действия сил. Построение диаграммы износа шатунной шейки на основе полярной диаграммы (метод суммирования векторов сил).

22. Определение зон минимального износа для выбора расположения маслоподводящих каналов. Построение полярных диаграмм для коренных шеек.

7.3.1.2.2 Модуль 2. Крутящий момент. Уравновешивание. Крутильные колебания

Перечень вопросов для собеседования:

1. Определение крутящего момента одного цилиндра от сил давления газов и сил инерции. Построение графика суммарного крутящего момента многоцилиндрового двигателя методом табличного суммирования.

2. Угловой интервал между рабочими ходами. Влияние числа цилиндров и порядка их работы на характер суммарного момента. Средний крутящий момент.

3. Неравномерность крутящего момента и хода двигателя. Коэффициент неравномерности крутящего момента. Степень неравномерности частоты вращения коленчатого вала δ.

4. Роль маховика в обеспечении равномерности хода, аккумулировании и отдаче энергии. Расчет маховика по заданной степени неравномерности. Определение необходимого момента инерции маховика.

5. Причины возникновения вибраций в двигателях. Внешняя и внутренняя неуравновешенность. Условия полного уравновешивания двигателя (равенство нулю главного вектора и главного момента сил инерции).

6. Уравновешивание сил инерции вращающихся масс с помощью противовесов на коленчатом валу. Уравновешивание сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс первого и второго порядка.

7. Анализ уравновешенности двигателей различных схем: одноцилиндровых, рядных двух-, трёх-, четырёх-, пяти-, шестицилиндровых, V-образных четырёх-, шести-, восьмицилиндровых.

8. Методы уравновешивания: применение дополнительных противовесов, установка балансирных валов (механизм Ланчестера для сил первого порядка, механизм «Дайхацу» и др.).

9. Частичное уравновешивание. Особенности уравновешивания V-образных двигателей с разрезными и неразрезными шатунными шейками.

10. Причины возникновения крутильных колебаний. Собственные и вынужденные крутильные колебания. Приведение крутильной системы коленчатого вала к многомассовой модели.

11. Определение моментов инерции сосредоточенных масс и податливостей участков вала. Определение частот и форм собственных колебаний.

12. Гармонический анализ возмущающих моментов (главные и побочные гармоники). Резонансные режимы работы и их опасность. Допускаемые напряжения при крутильных колебаниях.

13. Способы борьбы с крутильными колебаниями: изменение параметров системы для смещения резонансных частот, применение демпферов (резиновых, вязкостных, сухого трения, маятниковых гасителей). Конструкции демпферов, применяемых в двигателях.

7.3.1.3 Рубежный контроль по модулям (тестирование)

Тестирование проводится после завершения изучения каждого модуля. Тест состоит из 20 заданий различного типа (выбор правильного ответа, установление соответствия, краткий ответ, расчётная задача). Каждое верно выполненное задание оценивается в 1 балл. Максимальное количество баллов за тест – 20. Оценка «зачтено» выставляется при выполнении верно более 75% заданий (более 15 баллов).

Пример тестовых заданий (один вариант)

1. **Какой параметр влияет на величину сил инерции второго порядка в КШМ?**

2. A) Только масса поршня

3. B) Кинематический параметр λ

4. C) Только частота вращения

5. D) Угол наклона шатуна

Правильный ответ: B

6. **Какая составляющая суммарной силы, действующей на поршневой палец, передаётся на шатун?**

7. A) Нормальная сила

8. B) Сила, действующая вдоль шатуна

9. C) Тангенциальная сила

10. D) Радиальная сила

Правильный ответ: B

11. **Для чего строится полярная диаграмма сил, действующих на шатунную шейку?**

12. A) Для определения угловой скорости

13. B) Для определения максимальных нагрузок и выбора расположения масляного отверстия

14. C) Для расчёта крутящего момента

15. D) Для определения степени сжатия

Правильный ответ: B

16. **Какой параметр характеризует неравномерность хода двигателя?**

17. A) Коэффициент приспособляемости

18. B) Степень неравномерности частоты вращения δ

19. C) Механический КПД
20. D) Литровая мощность

Правильный ответ: B

21. **Какое условие необходимо для полного уравновешивания двигателя?**
22. A) Равенство нулю главного вектора сил инерции
23. B) Равенство нулю главного момента сил инерции
24. C) Равенство нулю главного вектора и главного момента сил инерции
25. D) Равенство нулю крутящего момента

Правильный ответ: C

7.3.1.4 Оценочные средства для индивидуального задания в рамках сквозного проекта

Индивидуальное задание в рамках сквозного проекта является составной частью курсового проекта и представляет собой выполнение динамического расчёта кривошипно-шатунного механизма проектируемого двигателя. Задание выполняется студентом самостоятельно в рамках курсового проекта.

Содержание индивидуального задания:

Индивидуальное задание включает в себя выполнение следующих этапов:

1. **Выбор и обоснование исходных данных для расчёта.** На основе заданного типа двигателя (бензиновый, дизельный) и его основных параметров (мощность, частота вращения, число цилиндров, размеры КШМ) выбираются исходные данные для динамического расчёта: радиус кривошипа R, длина шатуна L, массы деталей КШМ, индикаторная диаграмма.
2. **Кинематический расчёт КШМ.** Выполняется расчёт перемещения, скорости и ускорения поршня в зависимости от угла поворота коленчатого вала. Определяются угловая скорость и угловое ускорение шатуна. Строятся графики кинематических характеристик.
3. **Приведение масс деталей КШМ.** Определяются массы, совершающие возвратно-поступательное движение, и массы, совершающие вращательное движение. Выполняется приведение массы шатуна к двум массам.
4. **Динамический расчёт (определение сил, действующих в КШМ).** Выполняется развёртка индикаторной диаграммы по углу поворота коленчатого вала. Рассчитываются силы давления газов, силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс, суммарные силы, действующие на поршневой палец. Определяются нормальная сила, сила, действующая вдоль шатуна, тангенциальная и радиальная составляющие. Заполняется таблица динамического расчёта.
5. **Построение полярных диаграмм и диаграмм износа.** Для шатунной шейки строится полярная диаграмма сил. На её основе строится диаграмма износа. Определяется рациональное расположение масляного отверстия.
6. **Расчёт суммарного крутящего момента и параметров маховика.** Для многоцилиндрового двигателя строится график суммарного крутящего момента. Определяется средний крутящий момент, неравномерность крутящего момента. Рассчитывается момент инерции маховика по заданной степени неравномерности хода.
7. **Анализ уравновешенности двигателя.** Для заданной схемы двигателя (одноцилиндровый, рядный, V-образный) выполняется анализ уравновешенности. При необходимости разрабатывается система уравновешивания (противовесы, балансирные валы).

Требования к оформлению:

Индивидуальное задание выполняется в рамках курсового проекта. Пояснительная записка оформляется в соответствии с требованиями к курсовому проекту. Графическая часть включает кинематические графики, полярные диаграммы, диаграммы износа, график суммарного крутящего момента, схемы уравновешивания.

7.3.1.5 Оценочные средства для практических занятий

Типовые задания для практических занятий

Модуль 1. Кинематика и динамика КШМ. Силы в механизме. Полярные диаграммы

Задание 1. Кинематический анализ центрального КШМ. Расчёт перемещения, скорости и ускорения поршня

Для заданного КШМ с параметрами R = 0,05 м, L = 0,2 м, частота вращения n = 1500 об/мин. Рассчитать перемещение, скорость и ускорение поршня для углов поворота кривошипа φ = 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°. Построить графики.

Задание 2. Построение графиков перемещения, скорости и ускорения поршня

По результатам расчёта из Задания 1 построить графики перемещения, скорости и ускорения поршня в зависимости от угла поворота коленчатого вала.

Задание 3. Кинематический анализ дезаксиального КШМ и КШМ V-образных двигателей

Для заданного дезаксиального КШМ (дезаксиал e = 0,01 м) определить кинематические характеристики. Для V-образного двигателя с углом развала 90° определить особенности кинематики.

Задание 4. Расчёт приведённых масс деталей КШМ для заданного двигателя

Для заданного двигателя с известными массами поршневой группы mп = 0,5 кг, шатуна mш = 0,6 кг, коленчатого вала mк = 2 кг (приведённая) определить массы возвратно-поступательного и вращательного движения.

Задание 5. Построение динамически эквивалентной системы масс

По результатам Задания 4 построить схему динамически эквивалентной системы КШМ с сосредоточенными массами.

Задание 6. Развёртка индикаторной диаграммы по углу поворота коленчатого вала

Для заданной индикаторной диаграммы (в координатах p-V) выполнить её развёртку в координатах p-φ. Определить давление газов для углов поворота коленчатого вала через 30°.

Задание 7. Расчёт сил инерции и суммарных сил, действующих в КШМ, для различных углов ПКВ

Для заданных параметров двигателя рассчитать силы инерции возвратно-поступательного движения и центробежные силы для нескольких углов поворота коленчатого вала. Определить суммарную силу, действующую на поршневой палец.

Задание 8. Заполнение таблицы динамического расчета для одноцилиндрового двигателя

По результатам расчётов заполнить таблицу динамического расчёта для одного цилиндра, включающую: угол ПКВ, давление газов, силы инерции, суммарную силу, нормальную силу, силу вдоль шатуна, тангенциальную и радиальную составляющие.

Задание 9. Определение сил, действующих на шатунную шейку, и построение графиков их изменения

На основе таблицы динамического расчёта определить силы, действующие на шатунную шейку, построить графики изменения тангенциальной и радиальной составляющих.

Задание 10. Построение полярной диаграммы сил, действующих на шатунную шейку

По данным таблицы динамического расчёта построить полярную диаграмму сил, действующих на шатунную шейку. Выбрать масштаб.

Задание 11. Построение диаграммы износа шатунной шейки. Определение рационального расположения масляного отверстия

На основе полярной диаграммы построить диаграмму износа шатунной шейки. Определить зоны минимального износа и выбрать расположение масляного отверстия.

Модуль 2. Крутящий момент. Уравновешивание. Крутильные колебания

Задание 12. Построение графика суммарного крутящего момента для 4-цилиндрового двигателя

Для рядного четырёхцилиндрового двигателя с порядком работы 1-3-4-2 построить график суммарного крутящего момента методом табличного суммирования. Определить средний крутящий момент.

Задание 13. Расчёт параметров маховика по заданной степени неравномерности хода

Для заданного двигателя с известным суммарным крутящим моментом и степенью неравномерности $\delta = 0{,}01$ определить необходимый момент инерции маховика.

Задание 14. Анализ уравновешенности рядного 4-цилиндрового двигателя

Для рядного четырёхцилиндрового двигателя определить неуравновешенные силы инерции первого и второго порядка, моменты от этих сил. Сделать вывод об уравновешенности.

Задание 15. Расчёт параметров противовесов для уравновешивания вращающихся масс

Для одноцилиндрового двигателя определить массу противовесов, необходимую для полного уравновешивания вращающихся масс.

Задание 16. Проектировочный расчёт балансирных валов для двигателя R4

Для рядного четырёхцилиндрового двигателя выполнить проектировочный расчёт балансирных валов для уравновешивания сил инерции первого порядка. Определить параметры балансирных валов.

7.3.1.6 Оценочные средства для лабораторных занятий

Перечень лабораторных работ и контрольные вопросы для защиты

Лабораторная работа №1. Экспериментальное определение давления газов в цилиндре двигателя и построение индикаторной диаграммы

Краткое содержание: установка датчика давления в цилиндр двигателя, снятие осциллограммы давления, построение индикаторной диаграммы в координатах p-V. Анализ характерных точек диаграммы.

Контрольные вопросы для защиты:

- Как устанавливается датчик давления в цилиндр?
- Какие процессы отображаются на индикаторной диаграмме?
- Как определить работу цикла по индикаторной диаграмме?
- Каковы основные источники погрешности при снятии индикаторной диаграммы?

Лабораторная работа №2. Тензометрирование шатуна для экспериментального определения действующих сил

Краткое содержание: наклейка тензорезисторов на шатун, калибровка, измерение деформаций при работе двигателя, расчёт сил, действующих на шатун. Сравнение с расчётными значениями.

Контрольные вопросы для защиты:

- Что такое тензорезистор и как он работает?
- Как выполняется калибровка тензометрического канала?
- Какие силы действуют на шатун?
- Как сравнить экспериментальные и расчётные данные?

Лабораторная работа №3. Экспериментальное определение нагрузок на коренные подшипники коленчатого вала

Краткое содержание: установка тензометрических вкладышей, измерение нагрузок на коренные подшипники при различных режимах работы двигателя. Построение диаграмм нагрузок.

Контрольные вопросы для защиты:

- Как устроены тензометрические вкладыши?
- Какие факторы влияют на нагрузку на коренные подшипники?
- Как изменяется нагрузка на подшипники в зависимости от угла поворота коленчатого вала?

• Каковы признаки повышенного износа подшипников?

Лабораторная работа №4. Моделирование полярной диаграммы сил на шатунную шейку в CAE-системе

Краткое содержание: создание модели КШМ в CAE-системе, задание нагрузок, построение полярной диаграммы сил. Сравнение с результатами аналитического расчёта.

Контрольные вопросы для защиты:

• Какие возможности CAE-систем для моделирования КШМ?

• Как задаются нагрузки в CAE-системе?

• Как построить полярную диаграмму в CAE-системе?

• Каковы преимущества компьютерного моделирования?

Лабораторная работа №5. Измерение неравномерности вращения коленчатого вала и определение момента инерции маховика

Краткое содержание: измерение частоты вращения коленчатого вала с высокой точностью, определение степени неравномерности хода. Расчёт момента инерции маховика по экспериментальным данным.

Контрольные вопросы для защиты:

• Как измеряется мгновенная частота вращения?

• Что такое степень неравномерности хода?

• Как определить момент инерции маховика по экспериментальным данным?

• Как влияет момент инерции маховика на равномерность хода?

Лабораторная работа №6. Исследование вибраций двигателя и анализ эффективности уравновешивания

Краткое содержание: установка вибродатчиков на двигатель, измерение вибраций на различных режимах работы. Анализ спектра вибраций. Оценка эффективности уравновешивания.

Контрольные вопросы для защиты:

• Какие типы вибродатчиков используются?

• Как анализируется спектр вибраций?

• Какие частоты соответствуют неуравновешенным силам первого и второго порядка?

• Как оценить эффективность уравновешивания?

7.3.1.7 Оценочные средства для курсового проекта

Курсовой проект выполняется в пятом семестре и является завершающим этапом формирования компетенций по динамическому расчёту поршневого двигателя. Результаты курсового проекта используются в последующих дисциплинах для прочностного анализа и оптимизации.

Цель курсового проекта: выполнить динамический расчёт и анализ рабочего процесса проектируемого двигателя с заданными параметрами, определить его основные показатели и оценить влияние конструктивных и режимных факторов на эффективность, экономичность и экологические характеристики.

Примерные темы курсовых проектов:

1. Динамический расчёт рядного четырёхцилиндрового бензинового двигателя с заданными параметрами.
2. Динамический расчёт рядного четырёхцилиндрового дизельного двигателя.
3. Динамический расчёт V-образного шестицилиндрового бензинового двигателя.
4. Динамический расчёт V-образного восьмицилиндрового двигателя.
5. Динамический расчёт рядного трёхцилиндрового двигателя с разработкой системы уравновешивания.
6. Динамический расчёт и уравновешивание оппозитного четырёхцилиндрового двигателя.
7. Динамический расчёт одноцилиндрового двигателя с дезаксиальным КШМ.

8. Анализ влияния параметров КШМ на нагруженность подшипников коленчатого вала.

9. Динамический расчёт и выбор параметров маховика для двигателя с заданной степенью неравномерности.

10. Разработка и расчёт системы уравновешивания для рядного пятицилиндрового двигателя.

Структура курсового проекта:

- **Введение** (актуальность, цель и задачи работы).
- **Выбор и обоснование исходных данных для расчёта** (параметры двигателя, режим расчёта).
- **Краткий тепловой расчёт двигателя** (с использованием результатов дисциплины Б1.1.20).
- **Кинематический расчёт КШМ**.
- **Приведение масс деталей КШМ**.
- **Динамический расчёт** (определение сил, действующих в КШМ, построение таблицы динамического расчета).
- **Построение полярных диаграмм и диаграмм износа для шатунных и коренных шеек**.
- **Расчёт суммарного крутящего момента и определение параметров маховика**.
- **Анализ уравновешенности двигателя и разработка системы уравновешивания** (при необходимости).
- **Заключение** с выводами по работе.
- **Список использованной литературы**.
- **Графическая часть** (при необходимости): схемы КШМ, графики, диаграммы.

7.3.2 Промежуточная аттестация (экзамен)

7.3.2.1 Условия допуска к экзамену

Студент допускается к сдаче экзамена при выполнении следующих условий:

- Успешное прохождение всех двух рубежных контролей (устных опросов по модулям) с оценкой не ниже «удовлетворительно».
- Выполнение и защита всех лабораторных работ, предусмотренных учебным планом (6 лабораторных работ).
- Выполнение и защита всех практических занятий (не менее 80% заданий выполнены и защищены).
- Выполнение и защита курсового проекта с оценкой не ниже «удовлетворительно».
- Отсутствие академической задолженности по дисциплине.

7.3.2.2 Структура экзаменационного билета

Экзаменационный билет состоит из двух теоретических вопросов (по одному из каждого модуля) и одного практического задания (расчётная задача).

Структура билета:

- **Вопрос 1** (Модуль 1): Кинематика и динамика КШМ, силы в механизме, полярные диаграммы.
- **Вопрос 2** (Модуль 2): Суммарный крутящий момент, уравновешивание, крутильные колебания.
- **Задание 3**: Расчётная задача (расчёт кинематических характеристик, сил инерции, параметров маховика, параметров уравновешивания).

7.3.2.3 Типовые экзаменационные билеты

Экзаменационный билет №1

Вопрос 1 (Модуль 1)

Кинематика кривошипно-шатунного механизма. Перемещение, скорость и ускорение поршня. Вывод зависимостей, анализ гармонических составляющих. Влияние кинематического параметра $\lambda = R/L$ на характер движения.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Уравновешивание поршневых двигателей. Причины возникновения вибраций. Условия полного уравновешивания. Уравновешивание сил инерции вращающихся масс. Уравновешивание сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс первого и второго порядка. Анализ уравновешенности двигателей различных схем.

Задание 3

Для центрального КШМ с параметрами: $R = 0{,}05$ м, $L = 0{,}2$ м, частота вращения $n = 2000$ об/мин, масса поршневой группы $m_п = 0{,}6$ кг. Определить силу инерции возвратно-поступательно движущихся масс при угле поворота коленчатого вала $\varphi = 90°$. Силу инерции первого и второго порядка.

Экзаменационный билет №2

Вопрос 1 (Модуль 1)

Силы, действующие в кривошипно-шатунном механизме. Силы давления газов. Силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс. Силы инерции вращающихся масс. Разложение суммарной силы на составляющие. Тангенциальная и радиальная составляющие силы, действующей на шатунную шейку.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Крутильные колебания коленчатого вала. Причины возникновения. Собственные и вынужденные колебания. Приведение крутильной системы к многомассовой модели. Гармонический анализ возмущающих моментов. Резонансные режимы. Способы борьбы с крутильными колебаниями (демпферы).

Задание 3

Для рядного четырёхцилиндрового двигателя с порядком работы 1-3-4-2 определить угловые интервалы между рабочими ходами. Построить (качественно) график суммарного крутящего момента, указать характерные точки. Определить средний крутящий момент, если максимальный крутящий момент $M_{max} = 300$ Н·м, минимальный $M_{min} = 50$ Н·м.

Экзаменационный билет №3

Вопрос 1 (Модуль 1)

Построение полярных диаграмм и диаграмм износа шеек коленчатого вала. Методика построения полярной диаграммы сил, действующих на шатунную шейку. Использование полярной диаграммы для определения нагрузок и выбора расположения масляного отверстия. Построение диаграммы износа.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Суммарный крутящий момент и равномерность хода двигателя. Определение крутящего момента одного цилиндра. Построение графика суммарного крутящего момента многоцилиндрового двигателя. Неравномерность крутящего момента и хода двигателя. Роль маховика. Расчёт маховика.

Задание 3

Для одноцилиндрового двигателя массой вращающихся частей $m_{вр} = 2$ кг, радиусом кривошипа $R = 0{,}05$ м определить центробежную силу инерции вращающихся масс при частоте вращения $n = 3000$ об/мин. Определить массу противовеса, который необходимо установить на щеке коленчатого вала для полного уравновешивания центробежной силы.

7.3.2.4 Полный перечень теоретических вопросов к экзамену по каждой теме

Модуль 1. Кинематика и динамика КШМ. Силы в механизме. Полярные диаграммы

1. Роль динамического расчета в обеспечении прочности, надежности и эффективности конструкции двигателя. Связь дисциплины с теоретической механикой, сопротивлением материалов и теорией механизмов и машин.

2. Основные конструктивные схемы КШМ: центральный, дезаксиальный, V-образный. Необходимость кинематического анализа для последующего динамического расчёта.

3. Кинематический анализ центрального КШМ. Перемещение поршня: точная и приближенная формулы (с использованием поправки Брикса).

4. Скорость поршня. Ускорение поршня: вывод зависимостей, анализ гармонических составляющих первого и второго порядка.

5. Влияние кинематического параметра $\lambda = R/L$ на характер движения. Угловая скорость и угловое ускорение шатуна. Кинематика дезаксиального КШМ. Кинематика V-образных двигателей с прицепным шатуном.

6. Необходимость приведения масс для упрощения динамического расчёта. Массы деталей, совершающих возвратно-поступательное движение (поршень, поршневые кольца, палец).

7. Массы деталей, совершающих вращательное движение (неуравновешенные части шатуна, щеки и противовесы коленчатого вала).

8. Приведение массы шатуна к двум массам, сосредоточенным в поршневом и кривошипном пальцах. Условия динамической эквивалентности (равенство масс, положения центра масс, момента инерции).

9. Приведение массы колена вала. Схема динамически эквивалентной системы КШМ с сосредоточенными массами. Определение масс, совершающих возвратно-поступательное и вращательное движение.

10. Силы давления газов. Индикаторная диаграмма и её развертка по углу поворота коленчатого вала. Методика развёртки.

11. Силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс: силы инерции первого и второго порядка, их зависимость от частоты вращения, массы и кинематического параметра λ.

12. Силы инерции вращающихся масс (центробежные силы). Суммарные силы, действующие на поршневой палец.

13. Разложение суммарной силы на составляющие: нормальную силу (перпендикулярную оси цилиндра) и силу, действующую вдоль шатуна.

14. Перенос силы вдоль шатуна на шатунную шейку. Разложение силы, действующей на шатунную шейку, на тангенциальную и радиальную составляющие.

15. Влияние этих сил на трение, износ и нагруженность деталей. Анализ сил на характерных режимах работы двигателя.

16. Силы, действующие на шатунную шейку от одного шатуна. Построение таблицы динамического расчета как основы для определения нагрузок.

17. Определение результирующей силы, действующей на шатунную шейку, с учётом постоянной центробежной силы вращающихся масс шатуна.

18. Силы, действующие на коренные шейки. Понятие о набегающих моментах и силах для многоцилиндровых двигателей. Определение нагрузок на коренные подшипники.

19. Средние удельные нагрузки на подшипники. Выбор направления оси масляного отверстия для обеспечения наилучших условий смазки. Влияние порядка работы цилиндров на нагруженность шеек.

20. Методика построения полярной диаграммы сил, действующих на шатунную шейку, в координатах, вращающихся вместе с шейкой. Выбор масштабов и последовательность построения.

21. Использование полярной диаграммы для определения максимальных и средних нагрузок, направления действия сил. Построение диаграммы износа шатунной шейки на основе полярной диаграммы (метод суммирования векторов сил).

22. Определение зон минимального износа для выбора расположения маслоподводящих каналов. Построение полярных диаграмм для коренных шеек.

Модуль 2. Крутящий момент. Уравновешивание. Крутильные колебания

23. Определение крутящего момента одного цилиндра от сил давления газов и сил инерции. Построение графика суммарного крутящего момента многоцилиндрового двигателя методом табличного суммирования.

24. Угловой интервал между рабочими ходами. Влияние числа цилиндров и порядка их работы на характер суммарного момента. Средний крутящий момент.

25. Неравномерность крутящего момента и хода двигателя. Коэффициент неравномерности крутящего момента. Степень неравномерности частоты вращения коленчатого вала δ.

26. Роль маховика в обеспечении равномерности хода, аккумулировании и отдаче энергии. Расчет маховика по заданной степени неравномерности. Определение необходимого момента инерции маховика.

27. Причины возникновения вибраций в двигателях. Внешняя и внутренняя неуравновешенность. Условия полного уравновешивания двигателя (равенство нулю главного вектора и главного момента сил инерции).

28. Уравновешивание сил инерции вращающихся масс с помощью противовесов на коленчатом валу. Уравновешивание сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс первого и второго порядка.

29. Анализ уравновешенности двигателей различных схем: одноцилиндровых, рядных двух-, трёх-, четырёх-, пяти-, шестицилиндровых, V-образных четырёх-, шести-, восьмицилиндровых.

30. Методы уравновешивания: применение дополнительных противовесов, установка балансирных валов (механизм Ланчестера для сил первого порядка, механизм «Дайхацу» и др.).

31. Частичное уравновешивание. Особенности уравновешивания V-образных двигателей с разрезными и неразрезными шатунными шейками.

32. Причины возникновения крутильных колебаний. Собственные и вынужденные крутильные колебания. Приведение крутильной системы коленчатого вала к многомассовой модели.

33. Определение моментов инерции сосредоточенных масс и податливостей участков вала. Определение частот и форм собственных колебаний.

34. Гармонический анализ возмущающих моментов (главные и побочные гармоники). Резонансные режимы работы и их опасность. Допускаемые напряжения при крутильных колебаниях.

35. Способы борьбы с крутильными колебаниями: изменение параметров системы для смещения резонансных частот, применение демпферов (резиновых, вязкостных, сухого трения, маятниковых гасителей). Конструкции демпферов, применяемых в двигателях.