

ТЕОРИЯ КОЛЕБАНИЙ

1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе.

1.1. Цель преподавания дисциплины

Ознакомление с общими теоретическими закономерностями колебательных процессов различного физического происхождения, выявление связи между уровнем колебаний и проблемой обеспечения надежности и долговечности современных машин текстильной и легкой промышленности, станков и приборов, ознакомление с современным состоянием проблемы защиты человека-оператора от вибраций и средств автоматизации технологических процессов, ознакомление с современными методами виброизоляции машин и приборов. Специфические особенности машин отрасли как объектов виброзащиты.

1.2. Задачи изучения дисциплины

Студент должен знать методы расчета собственных частот, методы расчета вынужденных колебаний при различных видах вынуждающих сил, методы подавления параметрических колебаний, методы виброизоляции и виброзащиты колеблющихся объектов. Студент должен уметь составлять математическую модель изучаемого объекта, определить собственные частоты систем с конечным числом степеней свободы, определять амплитуды вынужденных колебаний, производить отстройку от опасных режимов.

1.3. Перечень дисциплин с указанием разделов, усвоение которых студентами необходимо для изучения данной дисциплины

▼ Высшая математика – разделы: дифференцирование и интегрирование функций, дифференциальные уравнения.

▼ Вычислительная техника в инженерных и экономических расчетах раздел: основы программирования.

▼ Теоретическая механика - разделы: динамика материальной точки, динамика системы материальных точек.

▼ Теория механизмов и машин – раздел: динамика машин.

Содержание курса

Раздел 1. Общая характеристика курса "Теория колебаний"

Тема 1.1. Введение. Основные цели изучения теории колебаний.

Тема 1.2. Структура инженерного динамического расчета машины. Классификация колебательных явлений. Краткие сведения из истории развития теории колебаний.

Раздел 2. Динамическая модель и ее элементы.

Тема 2.1. Общие сведения. Основные допущения при идеализации механических систем. Типовые динамические модели механизмов машин легкой

промышленности.

Тема 2.2. Приведение инерционных, упругих и диссипативных характеристик.

Раздел 3. Математическое описание динамических моделей

Тема 3.1. Кратные сведения из аналитической механики. Представление кинетической и потенциальной энергии в виде квадратичных форм.

Тема 3.2. Составление систем дифференциальных уравнений малых колебаний с помощью квадратичных форм на базе уравнений Лагранжа второго рода.

Тема 3.3. Обратный способ составления систем дифференциальных уравнений для описания изгибных колебаний валов и балок. Примеры.

Раздел 4. Свободные колебания линейных механических систем

Тема 4.1. Свободные колебания систем с одной степенью свободы. Влияние сил сопротивления.

Тема 4.2. Свободные колебания систем с двумя степенями свободы. Частотные уравнения, коэффициенты формы, парциальные частоты.

Тема 4.3. Нормальные координаты. Системы с конечным числом степеней свободы. Приближенное определение низшей частоты с помощью Донкерли. Циклические и позиционные координаты.

Тема 4.4. Свободные колебания систем с распределенными параметрами.

Раздел 5. Вынужденные колебания линейных механических систем и способы виброзащиты машин .

Тема 5.1. Вынужденные колебания системы с одной степенью свободы при гармонической вынуждающей силы. Биения и резонанс. Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики. особенности кинематического возбуждения. Влияние линейной силы сопротивления.

Тема 5.2. Вынужденные колебания системы с двумя степенями свободы при гармонической вынуждающей силе.

Тема 5.3. Вынужденные колебания при периодической и произвольной вынуждающей силе. Критические скорости вращающихся валов.

Тема 5.4. Основные способы виброзащиты. Виброизоляция, динамическое гашение, снижение виброактивности источника колебаний, внутренняя виброзащита объекта. Примеры.

Тема 5.5. Источники динамических ошибок в механизмах. Использование авторезонансной настройки при проектировании манипуляторов. Условие энергетического баланса.

Раздел 6. Параметрические колебания

Тема 6.1. Общие сведения. Примеры возникновения параметрических эффектов в машинах. Параметрический резонанс и его подавление.

Тема 6.2. Параметрические колебания при медленно изменяющихся параметрах. Устранение амплитудной модуляции свободных и сопровождающих

колебаний.

Раздел 7. Нелинейные колебания

Тема 7.1. Общие сведения. Источники нелинейности в задачах динамики машин. Фазовая плоскость.

Тема 7.2. Метод гармонической линеаризации. Нелинейные вынужденные колебаний.

Тема 7.3. Автоколебания. Фрикционные автоколебания.

3. Основные термины

Звено – твердое тело, входящее в состав механизма.

Стойка – звено, принимаемое за неподвижное.

Входное звено – звено, которому сообщается движение, преобразуемое механизмом в требуемое движение других звеньев.

Выходное звено – звено, совершающее движение, для выполнения которого предназначен механизм.

Обобщенные координаты механической системы – независимые между собой координаты, однозначно определяющие положение механической системы.

Число степеней свободы механической системы – число обобщенных координат.

Обобщенная скорость – производная по времени от обобщенной координаты.

Механизм – связанная система тел (звеньев), предназначенная для преобразования движения одного или нескольких из этих тел в требуемое движение других тел и образующая кинематическую цепь, в которой одно из звеньев является стойкой, а число входных звеньев равно числу степеней свободы относительно стойки (степень подвижности).

Машина (машинный агрегат)– устройство, предназначенное для осуществления механических движений и силовых воздействий с целью выполнения технологических и транспортных операций, а также преобразования энергии, материалов и информации.

Возможное перемещение материальной точки – любое допускаемое наложенными связями перемещение материальной точки из положения, занимаемого ею в данный момент времени, в бесконечно близкое положение.

Возможные перемещения механической системы – любая совокупность возможных перемещений материальных точек данной механической системы, допускаемых всеми наложенными на нее связями.

Идеальные связи – связи, для которых сумма элементарных работ их реакций равна нулю на любом возможном перемещении механической системы (при удерживающих связях).

Обобщенная сила – величина, равная коэффициенту при вариации данной обобщенной координаты в выражении возможной работы сил, действующих на механическую систему.

Кинетическая энергия материальной точки – скалярная мера механического движения материальной точки, равная половине произведения ее массы на квадрат ее скорости.

Кинетическая энергия механической системы – величина, равная сумме кинетических энергий всех материальных точек, образующих систему.

Потенциальная энергия материальной точки – величина, равная работе, которую произведет сила, действующая на материальную точку, находящуюся в потенциальном силовом поле, при перемещении этой точки из данного положения в положение, для которого значение потенциальной энергии условно считается равным нулю.

Потенциальная энергия механической системы – величина, равная сумме потенциальных энергий всех точек механической системы.

Функция положения звена – зависимость координаты звена от координаты входного звена или координат входных звеньев.

Функция положения механизма – функция положения выходного звена механизма.

Первая геометрическая передаточная функция (аналог скорости) – производная функции положения по координате входного звена (для механизмов с одной степенью подвижности).

Вторая геометрическая передаточная функция (аналог ускорения) – вторая производная функции положения по координате входного звена (для механизмов с одной степенью подвижности).

Динамический анализ механизма – определение сил по заданному движению звеньев (*первая задача динамики*) или определение движения звеньев по заданным силам (*вторая задача динамики*).

Динамический синтез механизма – определение и выбор параметров механизма, отвечающих требуемым динамическим характеристикам.

Приведенная сила или момент – обобщенная сила, отвечающая координате звена приведения.

Кинетическая энергия механизма – кинетическая энергия всех звеньев механизма (машины).

Установившееся движение машины – движение, при котором кинетическая энергия является периодической функцией времени.

Цикл установившегося движения – период изменения кинетической энергии

Механические колебания – движение механической системы, при котором обобщенные координаты и (или) обобщенные скорости поочередно возрастают и убывают во времени.

Периодические колебания – колебания, при которых состояние системы повторяется через равные промежутки времени. Состояние системы характеризуется обобщенными координатами и их производными.

Гармонические колебания – колебания, при которых обобщенная координата или ее производная во времени изменяется пропорционально синусу (косинусу) с

аргументом, линейно зависящим от времени.

Амплитуда гармонических колебаний – наибольшее отклонение гармонического колебательного процесса от среднего его значения.

Фаза гармонических колебаний – аргумент функции, описывающей гармонические колебания.

Начальная фаза – значение фазы гармонических колебаний в начальный момент времени.

Сдвиг фаз – разность фаз двух гармонических колебаний с одинаковыми частотами.

Круговая частота – производная фазы гармонических колебаний по времени, c^{-1} .

Частота – число колебаний в секунду, Гц. (Частота в Гц в 2π раз меньше круговой частоты).

Период – наименьший промежуток времени, по истечении которого повторяется состояние системы.

Свободные колебания – колебания, происходящие без переменного внешнего воздействия и поступления энергии извне. Свободные колебания происходят за счет энергии, подведенной в начальный момент времени из-за начальных условий (начального отклонения от положения равновесия и начальной скорости).

Вынужденные колебания – колебания, вызванные и поддерживаемые силовым или кинематическим возбуждением. При **силовом возбуждении** к системе приложена переменная внешняя сила, зависящая от времени. При **кинематическом возбуждении** какая-либо точка или сечение принудительно перемещается по заданному закону движения.

Параметрические колебания – колебания, вызванные и поддерживаемые изменением во времени одного или нескольких параметров системы (приведенной массы, приведенного момента инерции, коэффициента жесткости и др.).

Автоколебания – установившиеся колебания, которые возникают в системе при неколебательном источнике энергии или источнике энергии с существенно отличающейся частотой и регулируются движением самой системы.

Линейные колебания – колебания, описываемые линейными дифференциальными уравнениями.

Нелинейные колебания – колебания, описываемые нелинейными дифференциальными уравнениями.

Собственная частота – каждая из частот свободных колебаний линейной колебательной системы.

Коэффициент формы – соотношение амплитуд свободных колебаний при фиксированной собственной частоте.

Декремент колебаний – отношение амплитуд затухающих свободных колебаний, разделенных одним периодом.

Логарифмический декремент – абсолютная величина натурального логарифма от отношения амплитуд свободных затухающих колебаний, разделенных

одним периодом.

Амплитудно-частотная характеристика, АЧХ (резонансная кривая) – зависимость амплитуды гармонических вынужденных колебаний от частоты гармонического силового или кинематического возбуждения.

Фазо-частотная характеристика, ФЧХ – зависимость сдвига фаз между гармоническими вынужденными колебаниями и гармоническим возбуждением от его частоты.

Статическая амплитуда – деформация упругой системы под действием амплитудного значения вынуждающей силы, приложенной в статических условиях.

Коэффициент динамичности при силовом возбуждении – отношение амплитуды вынужденных колебаний к статической амплитуде.

Коэффициент частотной расстройки – отношение частоты гармонического возбуждения к собственной частоте колебательной системы с одной степенью свободы.

Коэффициент динамичности при кинематическом возбуждении – отношение амплитуды вынужденных колебаний к амплитуде гармонического кинематического возбуждения.

Безразмерная форма АЧХ – зависимость коэффициента динамичности от коэффициента частотной расстройки.

Гармоника – каждая составляющая периодических колебаний или периодической силы, представленных в виде ряда Фурье.

Резонанс – вынужденные колебания, соответствующие одному из максимумов амплитудно-частотной характеристики.

Антирезонанс – вынужденные колебания, соответствующие одному из минимумов амплитудно-частотной характеристики.

Биеения – колебания, являющиеся результатом сложения двух гармонических колебаний с близкими значениями частот.

Частота параметрического возбуждения – частота изменения параметра.

Период параметрического возбуждения – период изменения параметра.

Глубина пульсации – отношение амплитудного значения переменной составляющей параметра к среднему значению этого параметра.

Параметрический резонанс – нарастание амплитуд колебаний в линейной колебательной системе, связанное с потерей динамической устойчивости в окрестности определенных частот параметрического возбуждения.

Критическое значение глубины пульсации – значение глубины пульсации, ниже которого обеспечивается подавление параметрического резонанса.

Фазовая плоскость – декартова система координат, в которой по оси абсцисс отложена обобщенная координата, а по оси ординат – обобщенная скорость.

Изображающая точка – точка на фазовой плоскости.

Фазовая траектория – геометрическое место изображающих точек, соответствующих последовательным моментам времени.

Фазовой портрет – совокупность фазовых траекторий, свойственных данной системе.

4. Курсовая работа, ее цели, задачи, характеристика.

◆ Название курсовой работы: «**Расчет колебательной системы привода машины**».

◆ Цель работы: привить навык расчетов колебаний и практического применения современных методов анализа колебательных систем; закрепить и развить понимание основных закономерностей колебательных явлений, сформированных при слушании лекционного курса.

◆ Задачи работы: составление математической модели, частотный анализ системы, расчет вынужденных колебаний, построение АЧХ и ФЧХ, виброизоляция машины, подавление параметрического возбуждения.

◆ Характеристика работы: Результаты анализа привода машины излагаются на 12-18 листах формата А4. При выполнении работы предполагается использование ПЭВМ и программных микрокалькуляторов.

◆ Программы для проверки основных этапов курсовой работы на ПЭВМ

1. Проверка инерционных, квазиупругих коэффициентов, собственных частот и коэффициентов форм крутильной колебательной системы.

2. Проверка амплитуд вынужденных колебаний и расчет АЧХ.

3. Проверка коэффициентов податливости, собственных частот и коэффициентов форм изгибных колебаний вала.

5. Учебно – методические материалы по дисциплине

• Основная литература

1. *Вульфсон И. И.* Колебания в машинах. Учебное пособие.– СПб.:СПбГУТД, 2-ое, 3-ье издание (дополненное), 2006, 2008.

2. *Механика машин.* Учебное пособие для втузов/ И.И.Вульфсон, М.Л.Ерихов, М.З.Коловский и др. М.: Высшая школа, 1996.

3. *Вульфсон И. И., Шарапин И. А., Преображенская М. В.* Расчет колебаний привода./ Учеб. пособие для втузов.– Спб: СПбГУТД, 2005..

4. *Пановко Я .Г.* Введение в теорию механических колебаний. – М.: Наука,1991..

• Дополнительная литература

5. *Бидерман В. Л.* Теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1980.

6. *Коритыцкий Я. И.* Динамика упругих систем текстильных машин.– М.: Легкая промышленность, 1982.

7. *Вульфсон И. И.* Динамические расчеты цикловых механизмов.–Л.: Машиностроение, 1976.

8. *Вульфсон И. И.* Колебания машин с механизмами циклового действия. –Л.: Машиностроение, 1990.

6. Перечень наглядных пособий, методических материалов и технических средств обучения.

▼ Кинофильмы

К 1. Свободные колебания (черно-белый, 16 мм, 2 части, 1974 г.).

К 2. Вынужденные колебания (черно-белый, 16 мм, 2 части, 1973 г.).

К 3. Параметрические колебания и автоколебания (черно-белый, 16 мм, 2 части, 1973).

В Ф1. Видеофильм "Колебания в машинах и виброзащита", 1985 г.

▼ Макеты, иллюстрирующие следующие колебательные процессы

МТ 4. Кинематическое возмущение кулисного механизма.

МТ 5. Изгибные вынужденные колебания балки.

МТ 6. Связанность крупных колебательных систем.

ОЦ 7. Осциллограммы типовых колебательных процессов по всем разделам программы.

▼ Программы расчета типовых колебательных режимов на программ – мных калькуляторах

Пр 8. Расчет собственных частот и форм крутильных колебательных систем.

Пр 9. Расчет собственных частот и форм изгибных колебательных систем.

Пр 10. Расчет амплитудно-частотных характеристик и фазо-частотных характеристик.

При разработке программы использовались идеи и алгоритмы, предложенные проф. И.И.Вульфсоном.

▼ Демонстрационные работы на ПЭВМ

Д 1. Свободные колебания.

Д 2. Вынужденные колебания.

Д 3. Параметрические колебания.

Д 4. Фрикционные колебания.

Д 5. Динамический гаситель.

Д 6. Динамические искажения законов движения кулачковых механизмов.

Д 7. Изгибные колебания.

Д 8. Виброизоляция привода

Д 9. Переход через резонанс.

Д 10. Вибратор.

Вопросы для самоконтроля

1. Общие сведения о механических колебаниях

1. Какие цели преследует изучение колебаний в машинах?
2. Охарактеризуйте основные этапы динамического расчета.
3. Приведите классификацию колебаний по кинематическим признакам.
4. Приведите классификацию колебаний по виду возмущений.
5. Приведите классификацию колебаний по виду деформаций.
6. Приведите классификацию колебаний по виду динамической и математической моделей.

2. Динамическая модель и ее элементы

1. Что понимают под динамической моделью и числом ее степеней свободы?
2. Из каких принципов исходят при построении динамических моделей с конечным числом степеней свободы?
3. Приведите примеры разновидностей динамических моделей приводов машин.
4. Из чего следует исходить при приведении инерционных и упругих характеристик моделей?
5. Как определяется приведенный коэффициент жесткости при параллельном и последовательном соединениях упругих элементов?
6. Что определяет коэффициент рассеяния и логарифмический декремент?

3. Методика составления динамической модели

1. Выразите кинетическую и потенциальную энергии системы при малых колебаниях в виде квадратичных форм.
2. При каком условии положение равновесия системы является устойчивым? с использованием инерционных и квазиупругих коэффициентов.
3. На чем основан обратный способ составления систем дифференциальных уравнений малых колебаний?

4. Свободные колебания

1. Чему равна собственная частота и период свободных колебаний системы с одной степенью свободы?
2. В чем проявляется влияние линейной силы сопротивления на свободные колебания?
3. В чем проявляется влияние постоянной силы сопротивления (кулонова трения) на свободные колебания?
4. Как определяются собственные частоты системы с двумя степенями свободы?
5. Что определяют коэффициенты формы?
6. Что такое парциальные частоты?

7. От чего зависит число собственных частот колебательной системы?
8. С какой целью осуществляется переход к нормальным (главным) координатам?
9. В чем особенность свободных колебаний систем с распределенными параметрами?

4. Вынужденные колебания

1. Что представляет собой режим биений?
2. Проанализируйте график коэффициента динамичности в зависимости от коэффициента частотной расстройки.
3. От чего зависит амплитуда вынужденных колебаний и резонансная амплитуда?
4. На какую величину отличается фаза вынужденных колебаний от фазы гармонической вынуждающей силы?
5. Что такое кинематическое возбуждение? Какое отличие АЧХ при кинематическом возбуждении?
6. Какие известны способы расчета вынужденных колебаний при периодической вынуждающей силе?
7. Когда наступает резонанс при действии периодической вынуждающей силы?
8. Что такое самоцентрирование? Когда угловая скорость вращения вала оказывается критической?
9. Каким образом используются условия энергетического баланса при анализе колебательных режимов?
10. Каким образом колебательные процессы отображаются на фазовой плоскости?

6. Виброзащита

1. Какие известны способы виброзащиты?
2. Как влияют разрывы непрерывности геометрических характеристик механизма (функции положения, первой и второй передаточных функций) на ускорения выходного звена?
3. Сформулируйте рекомендации при выборе законов программного движения.
4. Как следует рациональным образом изменять параметры системы в дорезонансном и резонансном режимах?
5. В чем состоит виброизоляция и каким образом она осуществляется?
6. На чем основан эффект динамического гашения?
7. Каким образом осуществляется динамическая разгрузка?

7. Параметрические колебания

1. Приведите примеры динамических моделей с переменными параметрами.
2. Охарактеризуйте параметрический резонанс и приведите способы его подавления.

3. В чем состоят основные отличия параметрического резонанса от резонанса при вынужденных колебаниях.

8. Краткие сведения о нелинейных колебаниях

1. Перечислите основные источники нелинейностей.
2. В чем состоит дельта-метод?
3. На чем основан метод гармонической линеаризации?
4. Приведите графики и проанализируйте АЧХ при нелинейных колебаниях.
5. Какова структура автоколебательной системы?
6. Какие существуют виды автоколебаний?
7. Какие различаются случаи выхода на режим автоколебаний с позиций энергетического баланса?
8. Отчего возникают фрикционные автоколебания?
9. Каким образом можно устранить остановки рабочих органов, вызванные фрикционными автоколебаниями?

Демонстрационно-расчётная программа Механические колебания и некоторые способы виброзащиты.

доц. Преображенская Марианна Васильевна

Программа предназначена для демонстрации различных видов колебательных процессов для систем с одной и с двумя степенями свободы:

- ◆ свободные колебания системы с одной степенью свободы,
- ◆ свободные колебания системы с двумя степенями свободы,
- ◆ вынужденные колебания системы с одной степенью свободы,
- ◆ вынужденные колебания системы с двумя степенями свободы,
- ◆ динамический гаситель колебаний,
- ◆ параметрические колебания системы с одной степенью свободы (рис. 2).
- ◆ автоколебания системы с одной степенью свободы,
- ◆ виброизоляция привода (рис. 4),
- ◆ изгибные колебания системы с двумя степенями свободы (рис 3),
- ◆ переход через резонанс.

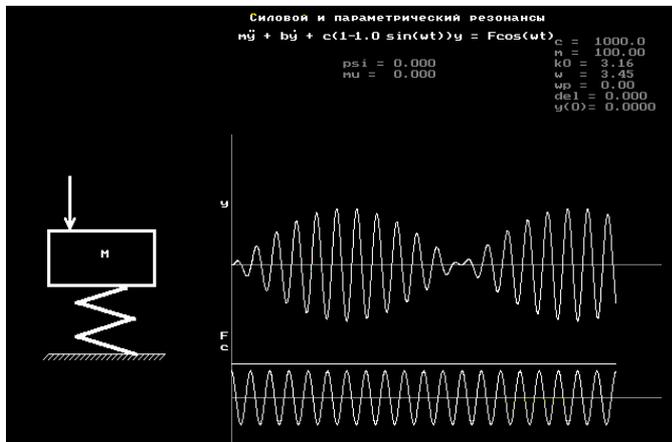


Рис1.

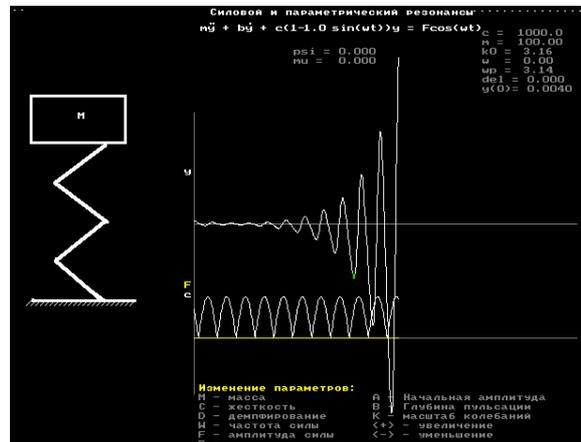


Рис2.

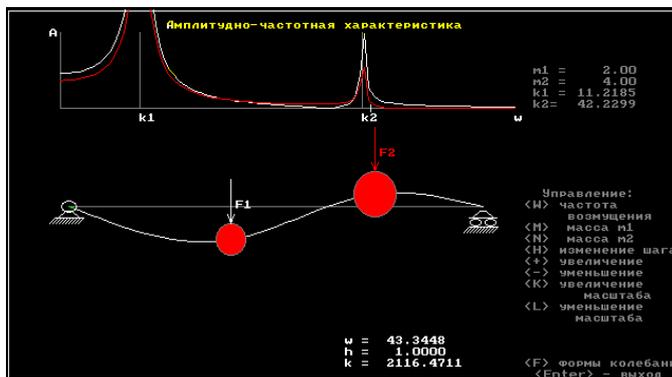


Рис3

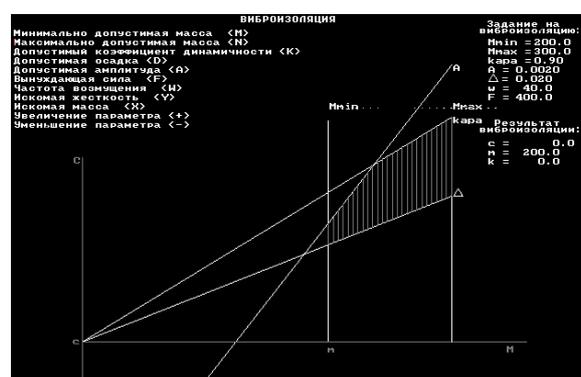


Рис4

Программа интерактивна и позволяет менять параметры системы без ее остановки.