

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Ректор Белорусского
государственного университета

А.Д.Король

5 июля 2024 г.

Регистрационный № 2108/м.



ДИНАМИКА МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебная программа учреждения образования по учебной дисциплине для
специальности:

7-06-0533-06 Механика и математическое моделирование

2024 г.

Учебная программа составлена на основе ОСВО 7-06-0533-06-2023; учебного плана БГУ (15.02.2023, Рег. № М54-5.4-44/уч.).

СОСТАВИТЕЛИ:

Н.А. Докукова, доцент кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Ю.В. Василевич, профессор кафедры теоретической механики и механики материалов машиностроительного факультета Белорусского национального технического университета, доктор физико-математических наук, профессор;

В.В. Видякин, директор Научно-производственного общества с ограниченной ответственностью «ГЕОСПЛАЙН», кандидат физико-математических наук, доцент.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой теоретической и прикладной механики
механико-математического факультета БГУ
(протокол № 13 от 25.06.2024)

Научно-методическим советом БГУ
(протокол № 9 от 28.06.2024)

Заведующий кафедрой



М.А. Журавков

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели и задачи учебной дисциплины

Цель учебной дисциплины – формирование у студентов знаний по вопросам применения основополагающих законов механики к расчёту динамических движений твёрдых и деформируемых машиностроительных устройств, строительных конструкций, транспортной мобильной техники, и для проектирования эффективных виброизолирующих амортизаторов машин и аппаратов.

При изучении дисциплины вырабатываются навыки практического использования методов, предназначенных для математического моделирования движений систем материальных тел.

Задачи учебной дисциплины:

1. формирование установки на творческую профессиональную деятельность;

2. развитие профессионального мышления, которое обеспечит будущему специалисту возможность свободно оперировать профессиональными знаниями, видеть проблемы и пути их решений в самостоятельной практической деятельности, выбирать оптимальные способы и методы осуществления поставленных проблем;

3. воспитание активной профессиональной позиции, умения вырабатывать и обосновывать свой подход к разрешению сложных профессиональных задач.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с углубленным высшим образованием.

Учебная дисциплина относится к модулю «Роботы и робототехнические системы» дисциплин профилизации «Теоретическая и прикладная механика» компонента учреждения образования.

Учебная программа составлена с учетом межпредметных **связей** с модулями и программами по дисциплинам: «Актуальные вопросы современной механики», «Специальные разделы механики сплошных сред» - 1,2, «Численные и аналитические методы в современной механике. Пакеты прикладных программ».

Изучение дисциплины «Динамика многоэлементных механических систем» необходимо для дальнейшего изучения таких дисциплин, как: «Мехатроника», «Математическое моделирование физических процессов», «Математическое моделирование в инженерных системах».

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Динамика многоэлементных механических систем» должно обеспечить формирование **специализированных компетенций**:

Моделировать и программировать работу промышленных роботов и манипуляторов.

В результате освоения учебной дисциплины магистрант должен:

знать:

– основные принципы моделирования движений многоэлементных механических систем, технических объектов;

– качественно оценить типы математических моделей динамических систем;

– методы и приёмы линеаризаций нелинейных колебательных систем;

– способы и методы решения полученных математических моделей;

– теорию подобия, приведения уравнений к безразмерному виду;

– исследовать модели динамических систем с помощью фазовых диаграмм;

– основные алгебраические и геометрические критерии устойчивостей колебательных режимов;

уметь:

– применять полученные знания для расчета, исследования и анализа движений, колебаний, вибраций, виброгашения, виброизоляции машиностроительных конструкций, работающих в сложных условиях эксплуатации;

– решать задачи по всем разделам курса;

иметь навык:

– моделирования динамики многоэлементной конструкции;

– применения метода цепных динамических систем;

– составления полного механического сопротивления и импеданса;

– решения систем линейных и нелинейных дифференциальных уравнений;

– аналитического исследования динамики многоэлементных систем.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается в 1 семестре. В соответствии с учебным планом всего на изучение учебной дисциплины «Динамика многоэлементных механических систем» отведено для очной формы получения углубленного высшего образования – 90 часов, в том числе 36 аудиторных часов, лекции – 18 часов, лабораторные занятия – 18 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Форма промежуточной аттестации – экзамен.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел 1 Моделирование колебательных движений технических систем и их визуализированный анализ

Тема 1.1 Основные понятия и определения в теории колебаний механических систем

Колебания и характеризующие их величины. Моделирование колебательных систем. Расчетные схемы и уравнения движения. Колебания систем с конечным числом степеней свободы. Собственные частоты и формы колебаний. Изображения колебаний на плоскости. Типы колебаний и их признаки. Собственные, вынужденные, параметрические, связанные, автоколебания. Субгармонические, супергармонические и основные колебания. Переходная функция.

Векторное изображение колебаний в комплексной плоскости. Сложение двух гармонических колебаний с одинаковыми частотами. Сложение двух колебаний с произвольными частотами и амплитудами. Фазовые траектории и фазовый портрет. Общие особенности фазовых траекторий. Положение равновесия, особые точки.

Раздел 2 Методы и способы расчёта колебательных механических систем

Тема 2.1 Колебания механических систем с конечным числом степеней свободы

Уравнения движения. Определение частот и форм свободных колебаний. Уравнение частот, вековое уравнение. Собственные формы колебаний и их свойства. Теорема об ортогональности собственных форм. Теорема об узлах собственных форм. Теорема о разложении. Разложение коэффициентов уравнений малых колебаний по собственным формам.

Теоремы об изменении частот системы при наложении связей. Функция Рэлея. Теоремы об экстремальных свойствах собственных частот. Метод последовательный приближений формами колебаний. Теоремы о границах основной частоты. Главные координаты.

Матричная форма уравнений. Некоторые особые случаи расчёта собственных колебаний. Примеры расчёта частот и форм собственных колебаний. Вынужденные колебания системы без трения. Влияние трения на колебания систем с конечным числом степеней свободы.

Тема 2.2 Операторный метод расчёта колебаний механических систем с конечным числом степеней свободы

Матричные методы анализа колебательных механических систем. Применение метода интегральных преобразований Лапласа для решения линейных уравнений движения механизма. Решение, фазовый портрет, амплитудно-частотная характеристика.

Раздел 3 Методы решений нелинейных уравнений движения механизмов

Тема 3.1 Методы линеаризаций нелинейных колебаний однопараметрической системы

Линеаризация нелинейных характеристик сил. Линеаризация на малых участках характеристики, на больших участках, теория наилучшего приближения по Чебышеву, применение среднеквадратического приближения, линеаризация на дискретном множестве ломаных. Квазилинейные уравнения движения механизмов. Порождающее уравнение. Метод малого параметра.

Применение малого параметра для квазилинейных уравнений, правая часть которых есть явная функция времени. Применение малого параметра и метода последовательных приближений для квазилинейных уравнений. Применение малого параметра для автономных систем.

Метод гармонического баланса. Метод Галеркина. Метод медленно меняющихся параметров Ван-дер-Поля. Колебания дисковой пилы трения. Колебания в механизме с нелинейной упругой муфтой. Линеаризация Чебышева. Нелинейная АЧХ. Неустойчивые режимы работы механизма, срыв амплитуды.

Раздел 4 Методы моделирования движений механических систем с конечным числом степеней свободы

Тема 4.1 Теория импеданса

Метод цепных динамических систем. Методы полного механического сопротивления и импеданса.

Раздел 5 Основы теории виброизоляции и виброгашения

Тема 5.1 Математические модели и физические аналоги виброгашения

Основы расчета виброизоляции. Динамическое гашение колебаний. Динамический гаситель с трением. Передаточная функция. Амплитудно-частотная характеристика. Примеры расчёта ограничителей размаха виброколебаний при случайных перегрузках.

Раздел 6 Критерии устойчивости колебательных режимов механических систем с конечным числом степеней свободы

Тема 6.1 Алгебраические критерии устойчивости движений механических систем с конечным числом степеней свободы

Алгебраические критерии устойчивости Рауса и Гурвица.

Раздел 6.2 Геометрические критерии устойчивости движений механических систем с конечным числом степеней свободы

Критерий устойчивости колебательных режимов Михайлова. Критерий устойчивости колебательных режимов Найквиста.

Тема 6.3 Исследование устойчивости динамической системы по критериям В.С. Воронова

Критерии устойчивости колебательных режимов В.С. Воронова. Выбор оптимальных физических параметров многоэлементных динамических систем с конечным числом степеней свободы. Примеры асимптотических устойчивостей, затухающих колебаний многопараметрических прототипов.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Очная (дневная) форма получения высшего образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Моделирование колебательных движений технических систем и их визуализированный анализ.							
1.1	Основные понятия и определения в теории колебаний механических систем.	2			2			экспресс-опрос
2	Методы и способы расчёта колебательных механических систем.							
2.1	Колебания механических систем с конечным числом степеней свободы.	2			2			отчет
2.2	Операторный метод расчёта колебаний механических систем с конечным числом степеней свободы.	2			2			отчет
3	Методы решений нелинейных уравнений движений механизмов.							
3.1	Методы линеаризаций нелинейных колебаний однопараметрической системы.	2			2			экспресс-опрос
4	Методы моделирования движений механических систем с конечным числом степеней свободы.							

4.1	Теория импеданса.	2			2			отчет
5	Основы теории виброизоляции и виброгашения.							
5.1	Математические модели и физические аналоги виброгашения.	2			2			отчет
6	Критерии устойчивости колебательных режимов механических систем с конечным числом степеней свободы.							
6.1	Алгебраические критерии устойчивости движений механических систем с конечным числом степеней свободы.	2			2			презентация
6.2	Геометрические критерии устойчивости движений механических систем с конечным числом степеней свободы.	2			2			презентация
6.3	Исследование устойчивости динамической системы по критериям В.С. Воронова.	2			2			контрольная работа
		18			18			

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Основная литература

1. Алдошин Г. Т. Теория линейных и нелинейных колебаний: учебное пособие для студ. и аспирантов физико-технических вузов / Г. Т. Алдошин. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2024. - 311 с. - URL: <https://e.lanbook.com/book/211076>.
2. Бертяев В. Д. Теоретическая и аналитическая механика. Учебно-исследовательская работа студентов: учебное пособие для студ. Вузов / В. Д. Бертяев, В. С. Ручинский. - Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2024. - 423 с. - URL: <https://e.lanbook.com/book/205973>.
3. Диевский В.А. Теоретическая механика: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Прикладная механика" / В.А. Диевский. - Изд. 6-е, стер. - Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2023. - 346 с. - URL: <https://e.lanbook.com/book/238736>.
4. Скубов Д. Ю. Основы теории нелинейных колебаний: учебное пособие / Д. Ю. Скубов. - Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2024. - 311 с. - URL: <https://e.lanbook.com/book/211349>.
5. Стрелков С. П. Введение в теорию колебаний: учебник / С. П. Стрелков. - Изд. 4-е, стер. - Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2021. - 437 с. - URL: <https://e.lanbook.com/book/158954>.

Дополнительная литература

1. Алдошин, Г. Т. Аналитическая динамика и теория колебаний: учебное пособие для студентов и аспирантов машиностроительных и физико-технических вузов / Г.Т. Алдошин. - Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2023. - 253 с. - URL: <https://reader.lanbook.com/book/213161#1>.
2. Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики: Учеб. для втузов / С.М. Тарг. – М.: Высш. школа, 2010. – 416 с.
3. Цивильский, В. Л. Теоретическая механика: учебник для студентов высших учебных заведений / В.Л. Цивильский. - Изд. 5-е, перераб. и доп. - Москва: Курс: ИНФРА-М, 2020. - 368 с. - URL: <https://znanium.com/catalog/document?id=427285>.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой отметки

Диагностика результатов учебной деятельности по дисциплине «Динамика многоэлементных механических систем» проводится, как правило, во время аудиторных занятий. Для диагностики используются:

- Отчёт по лабораторным работам;
- Разработка презентаций;

- экспресс-опрос на аудиторных занятиях;
- контрольная работа.

Отметка за ответы на лекциях (опрос) и выполнение отчетов по лабораторным работам включает в себя полноту ответа, наличие аргументов, примеров из практики. Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины.

Формой промежуточной аттестации по дисциплине «Динамика многоэлементных механических систем» учебным планом предусмотрен экзамен.

Для магистрантов, пропустивших контрольные мероприятия или получивших неудовлетворительную отметку, решение о повторном проведении контрольного мероприятия выносится в соответствии с Положением о рейтинговой системе оценки знаний обучающихся по учебной дисциплине в Белорусском государственном университете.

Для формирования итоговой отметки по учебной дисциплине используется модульно-рейтинговая система оценки знаний магистранта, дающая возможность проследить и оценить динамику процесса достижения целей обучения. Рейтинговая система предусматривает использование весовых коэффициентов для текущей и промежуточной аттестации магистрантов по учебной дисциплине.

Формирование итоговой отметки в ходе проведения контрольных мероприятий текущей аттестации (примерные весовые коэффициенты, определяющие вклад текущей аттестации в отметку при прохождении промежуточной аттестации):

- Разработка презентаций – 10 %;
- Отчёты по лабораторным работам – 30 %;
- Контрольная работа – 60%.

Итоговая отметка по дисциплине рассчитывается на основе итоговой отметки текущей аттестации (рейтинговой системы оценки знаний) – 40 % и экзаменационной отметки – 60 %.

Примерный перечень лабораторных занятий

1. Лабораторная работа № 1. Уравнения движений механической колебательной системы.
2. Лабораторная работа № 2. Операторный метод Лапласа для решения уравнений движения механической колебательной системы.
3. Лабораторная работа № 3. Исследования характеристического уравнения механической колебательной системы.
4. Лабораторная работа № 4. Использование метода Рунге - Кутты 4-го порядка для численного решения систем дифференциальных уравнений.
5. Лабораторная работа № 5. Использование пакета прикладных программ Wolfram Mathematica для решения неоднородных дифференциальных уравнений движений механической системы.

6. Лабораторная работа № 6. Исследования амплитудно-частотных характеристик и устойчивости динамической системы по алгебраическим критериям Рауса, Гурвица.

7. Лабораторная работа № 7. Исследование устойчивости динамической системы по геометрическим критериям Найквиста, Михайлова.

8. Лабораторная работа № 8. Исследование устойчивости динамической системы по критериям В.С. Воронова.

9. Лабораторная работа № 9. Выбор оптимальных параметров механической системы.

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

При организации образовательного процесса используется *практико-ориентированный подход*, который предполагает:

- освоение содержания образования через решения практических задач;
- приобретение навыков эффективного выполнения разных видов профессиональной деятельности;
- использование процедур, способов оценивания, фиксирующих формирование профессиональных компетенций.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы

При изучении учебной дисциплины организация самостоятельной работы магистрантов должна представлять единство трех взаимосвязанных форм:

- 1) внеаудиторная самостоятельная работа;
- 2) аудиторная самостоятельная работа, которая осуществляется под непосредственным руководством преподавателя;
- 3) творческая, в том числе научно-исследовательская работа.

На лекционных занятиях по дисциплине «Динамика многоэлементных механических систем» рекомендуется контролировать усвоение учебного материала магистрантов путем проведения экспресс-опросов по темам дисциплины. При этом необходимо фиксировать внимание на использование изученных терминов, принципов, законов и закономерностей для соответствующих математических моделей и прототипов.

На лабораторных занятиях по дисциплине «Динамика многоэлементных механических систем» рекомендуется применять вариативные индивидуальные, в том числе исследовательские задания для магистрантов с целью приобретения навыков самостоятельного решения практических задач.

В силу различного уровня готовности магистрантов к восприятию новых понятий на лабораторных занятиях по дисциплине рекомендуется проводить регулярные самостоятельные работы и при необходимости проводить дополнительные консультации для объяснения и закрепления сложного материала.

Условия для самостоятельной работы магистрантов, в частности, для развития навыков самоконтроля, способствующих интенсификации учебного

процесса, обеспечиваются наличием и полной доступностью электронных вариантов курсов лекций, учебно-методических пособий и сборников задач по основным разделам дисциплины.

Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Основные понятия и определения в теории колебаний механических систем.
2. Моделирование колебательных систем.
3. Расчетные схемы и уравнения движения.
4. Колебание систем с конечным числом степеней свободы. Собственные частоты и формы колебаний.
5. Изображения колебаний на плоскости.
6. Типы колебаний и их признаки. Собственные, вынужденные, параметрические, связанные, автоколебания. Субгармонические, супергармонические и основные колебания.
7. Переходная функция.
8. Векторное изображение колебаний в комплексной плоскости.
9. Сложение двух гармонических колебаний с одинаковыми частотами.
10. Сложение двух колебаний с произвольными частотами и амплитудами.
11. Фазовые траектории и фазовый портрет. Общие особенности фазовых траекторий. Положение равновесия, особые точки.
12. Характеристики сил трения. Гипотеза Амонтона, формула Кулона. Чистое трение, сухое, граничное, жидкостное. Силы трения в кинематических парах.
13. Характеристики импульсных и ударных сил.
14. Характеристики сил упругости. Линейная, жесткая, мягкая силы упругости.
15. Нелинейная сила упругости типа «зазор».
16. Характеристика движущих сил и сил сопротивления.
17. Неупругое сопротивление. Конструкционный гистерезис. Потери на внутреннее трение в материале.
18. Уравнение частот, вековое уравнение. Собственные формы колебаний и их свойства.
19. Теорема об ортогональности собственных форм.
20. Теорема об узлах собственных форм.
21. Теорема о разложении.
22. Разложение коэффициентов уравнений малых колебаний по собственным формам.
23. Теоремы об изменении частот системы при наложении связей.
24. Функция Рэлея.
25. Теоремы об экстремальных свойствах собственных частот.
26. Метод последовательных приближений формами колебаний.
27. Теоремы о границах основной частоты.

28. Линеаризация нелинейных характеристик сил. Линеаризация на малых и на больших участках характеристик.
29. Теория наилучшего приближения по Чебышеву.
30. Применение среднеквадратического приближения.
31. Линеаризация на дискретном множестве ломаных.
32. Метод малого параметра. Квазилинейные уравнения движения механизмов. Порождающее уравнение.
33. Применение малого параметра для квазилинейных уравнений, правая часть которых есть явная функция времени.
34. Применение малого параметра и метода последовательных приближений для квазилинейных уравнений.
35. Применение малого параметра для автономных систем.
36. Метод гармонического баланса.
37. Метод Галеркина.
38. Метод медленно меняющихся параметров Ван-дер-Поля.
39. Колебания дисковой пилы трения.
40. Колебания в механизме с нелинейной упругой муфтой.
41. Линеаризация Чебышева. Нелинейная амплитудно-частотная характеристика. Неустойчивые режимы работы механизма, срыв амплитуды.
42. Матричные методы анализа колебательных механических систем.
43. Применение метода интегральных преобразований Лапласа для решения систем дифференциальных уравнений движения механизмов.
44. Решение, фазовый портрет, амплитудно-частотная характеристика.
45. Метод цепных динамических систем.
46. Фрикционные колебания в механизмах.
47. Колебания в механизмах с упругими муфтами.
48. Колебания в рычажных механизмах.
49. Колебания в кулачковых механизмах.
50. Вибрационные транспортеры.
51. Расчет вибротранспортера с подбрасыванием материальных тел.
52. Критерии устойчивости Рауса.
53. Критерии устойчивости Гурвица.
54. Критерий устойчивости колебательных режимов Михайлова.
55. Критерий устойчивости колебательных режимов Найквиста.
56. Теорема Ляпунова об устойчивости неустановившихся движений.
57. Алгебраические критерии устойчивости В.С. Воронова.
58. Основы расчета виброизоляции.
59. Передаточная функция. Амплитудно-частотная характеристика.
60. Динамическое гашение колебаний.
61. Динамический гаситель с трением.
62. Маятниковый динамический гаситель.
63. Ударные гасители колебаний.
64. Система виброгашения Алабужева П.М.
65. Система виброгашения с квази нулевой жесткостью «Ферма Мизеса».
66. Система виброгашения с переменным кулоновым трением.

67. Расчет ограничителей размаха виброколебаний при случайных ударах и перегрузках.

68. Управляемые системы виброизоляции.

69. Гидроамортизаторы.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Учебная дисциплина не требует согласования			

Заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики
доктор ф/м наук профессор

25. 06 2024 г.



М.А.Журавков

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ ПО
ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

на ____ / ____ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры
_____ (протокол № ____ от _____ 202__ г.)

Заведующий кафедрой

УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета
