

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО
Директор физтех-школы
аэрокосмических технологий
С.С. Негодяев

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Управление нелинейными динамическими системами
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Космические технологии
	Физтех-школа Аэрокосмических Технологий
	кафедра механики и процессов управления
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Дифференцированный зачет
2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 75 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

Программу составил: А.Е. Голубев, преподаватель

Программа обсуждена на заседании кафедры механики и процессов управления 05.04.2024

Аннотация

Дисциплина "Управление нелинейными динамическими системами" направлена на то, что бы познакомить слушателей с понятиями фундаментальных и классических результатов теории динамических систем, приёмам современной теории динамических систем, дать в руки инструментарий для проведения самостоятельных исследований. В дисциплине изучаются теории динамических систем, задаваемых обыкновенными дифференциальными уравнениями на многообразиях, а также способы применения этих понятий и результатов теории в практической работе по нахождению и исследованию движений механических систем, описываемых дифференциальными уравнениями.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- освоение студентами основных идей и методов математической теории управления, изучение способов применения результатов теории в практической работе по синтезу алгоритмов автоматического управления техническими объектами.

Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области таких разделов математической теории управления, как преобразования нелинейных динамических систем к специальным каноническим видам, синтез стабилизирующих нелинейных обратных связей по состоянию и по выходу с учетом структурных свойств моделей, построение программных траекторий движения динамических систем, синтез законов управления в условиях параметрических неопределенностей модели, возмущений и неполном измерении состояния;
- обучение студентов возможностям применения методов математической теории управления для решения задач синтеза алгоритмов автоматического управления техническими объектами;
- формирование более общих и рациональных подходов к выполнению студентами исследований в области анализа и управления движениями космических объектов в рамках выпускных работ на степень магистра.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
- современные проблемы математической теории управления;
- методический аппарат математической теории управления и способы его приложения к реальным объектам;
- новейшие открытия естествознания;
- о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

уметь:

- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций.

владеть:

- научной картиной мира;
- математическим моделированием физических задач.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Дифференциально плоские динамические системы. Линеаризация обратной связью по состоянию	12			5
2	Терминальная задача управления. Задание программной траектории на базе полиномов от независимой переменной	2			2
3	Динамические системы нижнетреугольного вида. Метод бэкстеппинга	2			3
4	Пассивность и пассивация динамических систем, стабилизация пассивных систем при помощи статической обратной связи по выходу	8			2
5	Стабилизация каскадных взаимосвязей подсистем. Минимально-фазовые и неминимально-фазовые динамические системы	6			3
6	Устойчивость динамических систем по отношению к возмущениям входа	10	4		20
7	Стабилизация динамических систем при наличии возмущений	10	5		20
8	Задача адаптивной стабилизации. Алгоритмы адаптации параметров управления	10	6		20
Итого часов		60	15		75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		180 час., 4 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Дифференциально плоские динамические системы. Линеаризация обратной связью по состоянию

Дифференциальная плоскостность динамических систем. Понятие плоского выхода. Канонический вид аффинной динамической системы. Линеаризация обратной связью по состоянию. Преобразование аффинных динамических систем к каноническому виду. Достаточные условия существования канонического вида. Матрица управляемости аффинной динамической системы.

2. Терминальная задача управления. Задание программной траектории на базе полиномов от независимой переменной

Задача терминального управления. Программное управление. Построение программной траектории движения дифференциально плоских динамических систем при помощи полиномов от независимой переменной. Учет ограничений на значения переменных состояния за счет выбора времени движения в зависимости от начальных и конечных условий.

3. Динамические системы нижнетреугольного вида. Метод бэкстеппинга

Лемма о бэкстеппинге. Метод бэкстеппинга синтеза стабилизирующего управления для динамических систем. Различные варианты выбора функций Ляпунова системы с управлением. Барьерные функции Ляпунова. Учет ограничений на переменные состояния в переходных процессах.

4. Пассивность и пассивация динамических систем, стабилизация пассивных систем при помощи статической обратной связи по выходу

Пассивность динамических систем. Физическая интерпретация свойства пассивности. Критерий пассивности аффинных динамических систем. Диссипативность динамических систем. Неравенства диссипации. Устойчивость пассивных динамических систем. Теорема об устойчивости нулевой динамики пассивных систем. Теоремы об асимптотической устойчивости пассивных динамических систем. Теорема о стабилизации пассивных систем при помощи статической обратной связи по выходу. Постановка задачи пассивации динамической системы. Пассивизируемость прямой связью. Пассивизируемость обратной связью по выходу. Физическая интерпретация пассивации. Каскадные взаимосвязи пассивных систем. Пассивация параллельного и последовательного соединения пассивных систем.

5. Стабилизация каскадных взаимосвязей подсистем. Минимально-фазовые и неминимально-фазовые динамические системы

Теорема о глобальной стабилизации последовательного соединения подсистем. Понятие нулевой динамики. Минимально-фазовость и неминимально-фазовость динамических систем. Стабилизация минимально-фазовых динамических систем. Поиск выхода, с которым динамическая система является минимально-фазовой.

Семестр: 2 (Весенний)

6. Устойчивость динамических систем по отношению к возмущениям входа

Свойство устойчивости динамических систем по отношению к возмущениям входа. Критерии устойчивости по отношению к возмущениям входа. Примеры систем, обладающих свойством устойчивости по отношению к возмущениям входа. Устойчивость каскадных взаимосвязей подсистем.

7. Стабилизация динамических систем при наличии возмущений

Методы стабилизации динамических систем при наличии возмущений. Нелинейное демпфирование. Метод бэкстеппинга при наличии возмущений.

8. Задача адаптивной стабилизации. Алгоритмы адаптации параметров управления

Постановка задачи адаптивной стабилизации. Теорема Ласалля-Йошизава. Построение закона обновления параметров управления как пассивация. Алгоритмы адаптации параметров управления. Адаптивный метод бэкстеппинга.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: компьютер и мультимедийное оборудование (проектор, маркерная доска, связь с Интернетом).

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Математические методы классической механики [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / В. И. Арнольд. — 5-е изд., стереотип. — М. : Эдиториал УРСС, 2003. — 416 с.
2. Математический анализ [Текст] : в 2 ч. : учебник для вузов / В. А. Зорич. — 5-е изд. — М. : МЦНМО, 2007. — Ч.2. - 794 с.
1. Isidori A. Nonlinear Control Systems. 3rd ed. London: Springer-Verlag, 1995. - 549 p.
2. Krstić M., Kanellakopoulos I., Kokotović P.V. Nonlinear and adaptive control design. New York: John Wiley and Sons, 1995.- 563 p.
3. Халил Х. К. Нелинейные системы / Халил Х. К. ; пер. с англ. Макаров И. А. ; ред. пер. с англ. Фрадков А. Л. - 3-е изд. - М. ; Ижевск : Ин-т компьютерных исследований : Регулярная и хаотическая динамика, 2009. - XVIII, 812 с. - (Бестселлеры нелинейной науки). - Библиогр.: с. 778-789, с. 796-802. - ISBN 978-5-93972-724-2.
4. Голубев А. Е. Стабилизация динамических систем с использованием свойства пассивности : конспект лекций / Голубев А. Е. ; ред. Крищенко А. П. ; МГТУ им. Н. Э. Баумана. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. - 45 с. - Библиогр.: с. 45.

Дополнительная литература

1. Каток А.Б., Хасселблат Б. Введение в современную теорию динамических систем с обзором последних достижений. — М.: МЦНМО, 2005. — 464 с.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

<http://www.sciencedirect.com/journal/ifac-papersonline>
<http://ieeexplore.ieee.org>

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Необходимое программное обеспечение: программный пакет MATLAB®
Обеспечение самостоятельной работы: электронные ресурсы, в том числе веб-сайт Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (<http://ipmnet.ru>), базы журналов издательств Springer, Elsevier, IEEE

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения, понятия, аксиомы.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- подготовку к дифференцированному зачету и экзамену.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Космические технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра механики и процессов управления
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Разработчик: А.Е. Голубев, преподаватель

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Управление нелинейными динамическими системами» обучающийся должен:

знать:

- место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
- современные проблемы математической теории управления;
- методический аппарат математической теории управления и способы его приложения к реальным объектам;
- новейшие открытия естествознания;
- о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

уметь:

- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций.

владеть:

- научной картиной мира;
- математическим моделированием физических задач.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов для сдачи дифференцированного зачёта:

1. Сформулируйте определение дифференциально плоской динамической системы. Приведите примеры дифференциально плоских механических систем.
2. Сформулируйте первое необходимое и достаточное условие эквивалентности аффинной стационарной системы системе канонического вида. Докажите достаточность.
3. Сформулируйте первое необходимое и достаточное условие эквивалентности аффинной стационарной системы системе канонического вида. Докажите необходимость.

4. Сформулируйте локальное условие существования регулярного канонического вида. Докажите достаточность.
5. Дайте определение матрицы управляемости для аффинной стационарной системы.
6. Решите терминальную задачу управления для аффинной системы второго порядка канонического вида.
7. Пассивность динамических систем. Физическая интерпретация свойства пассивности. Примеры пассивных механических систем.
8. Сформулируйте и докажите критерий пассивности аффинных динамических систем.
9. Устойчивость пассивных динамических систем. Сформулируйте и докажите теорему об устойчивости нулевой динамики пассивных систем.
10. Сформулируйте и докажите теорему о стабилизации пассивных динамических систем при помощи статической обратной связи по выходу. Физическая интерпретация стабилизирующей обратной связи.
11. Сформулируйте постановку задачи пассивации динамической системы. Дайте определение пассивируемости прямой связью и пассивируемости обратной связью по выходу. Дайте физическую интерпретацию пассивации.
12. Сравните управление на основе пассивации и управление на основе линеаризации обратной связью.
13. Каскадные взаимосвязи пассивных систем. Как пассивировать параллельное и последовательное соединение пассивных подсистем?
14. Сформулируйте и докажите теорему о глобальной стабилизации последовательного соединения подсистем.

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена:

1. Дайте определение устойчивости динамических систем по отношению к возмущениям входа. Приведите примеры систем, обладающих свойством устойчивости по отношению к возмущениям входа.
2. Сформулируйте и докажите критерии устойчивости по отношению к возмущениям входа.
3. Сформулируйте и докажите теоремы об устойчивости каскадных взаимосвязей систем.
4. Приведите постановку задачи стабилизации динамической системы при наличии возмущений. В чем заключается подход, основанный на использовании нелинейного демпфирования?
5. Обоснуйте метод бэкстеппинга при наличии возмущений на примере системы второго порядка.
6. Приведите постановку задачи адаптивной стабилизации. Сформулируйте теорему Ласалля-Йошизавы.
7. Опишите построение закона обновления параметров управления как процесс пассивации динамики ошибки оценки параметров. Приведите примеры алгоритмов адаптации параметров управления.
8. Обоснуйте адаптивный метод бэкстеппинга на примере системы второго порядка.

Примерный перечень билетов:

Билет №1.

1. Сформулируйте и докажите теоремы об устойчивости каскадных взаимосвязей систем.
2. Приведите решение задачи адаптивной стабилизации заданного углового положения гибкого однозвенного робота-манипулятора

Билет №2.

1. Сформулируйте и докажите критерии устойчивости по отношению к возмущениям входа.
2. Приведите решение задачи стабилизации заданного значения угла атаки для продольной динамики летательного аппарата.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Во время проведения экзамена и дифференцированного зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Дифференцированный зачет может проводиться по итогам текущей успеваемости и сдачи заданий, или путем организации специального опроса, проводимого в устной форме. Экзамен проводится путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.