



Московский государственный технический университет
Факультет «Информатика и системы управления»
Кафедра ИУ-1 «Системы автоматического управления»

Программа учебной дисциплины «Основы теории управления» Нелинейные системы

для подготовки специалистов по направлению

24.05.06 «Системы управления летательными аппаратами»

Авторы программы: Филимонов Николай Борисович, д.т.н., профессор
Масленников Андрей Леонидович, старший преподаватель
amas@bmstu.ru

Москва, 2020.

Аннотация

Дисциплина посвящена изучению нелинейных систем автоматического управления. В рамках дисциплины изучаются основные особенности и виды нелинейностей, методы линеаризации, методы анализа особых точек и систем второго порядка, методы анализа автоколебаний – как особого режима работы нелинейных систем. Изучаются положения теории устойчивости нелинейных систем, методы синтеза с использованием линеаризации обратной связью. Отдельно рассматриваются вопросы синтеза управления со скользящим режимом и метода backstepping. В заключении курса рассматриваются особенности построения наблюдателей для нелинейных систем.

Структура дисциплины

Лекции	
1	Нелинейные системы. Основные виды нелинейностей.
2	Исследование особых точек нелинейных систем.
3	Исследование автоколебаний методом гармонической линеаризации.
4	Исследование автоколебаний методом точечного преобразования.
5	Устойчивость нелинейных систем.
6	Устойчивость нелинейных систем.
7	Синтез нелинейных систем. Линеаризация обратной связью.
8	Синтез нелинейных систем. Управление со скользящим режимом.
9	Синтез нелинейных систем. Backstepping. Наблюдатели в нелинейных системах.
Семинары	
1	Методы линеаризации нелинейных систем.
2	Исследование особых точек нелинейных систем.
3	Исследование автоколебаний методом гармонической линеаризации
4	Анализ устойчивости нелинейных систем.
5	Анализ устойчивости нелинейных систем.
6	Синтез нелинейных систем. Линеаризация обратной связью.
7	Синтез нелинейных систем. Управление со скользящим режимом.
8	Синтез нелинейных систем. Backstepping. Наблюдатели в нелинейных системах.
Лабораторные работы	
1	Анализ особых точек нелинейных систем.
2	Исследование автоколебаний в нелинейных системах.
3	Синтез нелинейных систем методом линеаризации обратной связью.
4	Синтез нелинейных систем методом линеаризации обратной связью.
Контрольные мероприятия	
1	Домашнее задание по материалам курса.

Теоретические вопросы для подготовки к экзамену

1. Нелинейные системы. Отличие от линейных систем. Задачи анализа и синтеза нелинейных систем автоматического управления.
2. Виды нелинейностей. Статические и динамические нелинейности. Функциональные нелинейности. Типовые нелинейности, их характеристики, математическое описание.
3. Математическое описание нелинейных систем в явной и неявной формах Коши.
4. Линеаризация нелинейных систем. Линеаризация уравнений динамики. Линеаризация системы с получением описания системы в переменных состояния. Проблемы анализа нелинейных систем с использованием линеаризации.
5. Метод фазовой плоскости. Фазовое пространство. Фазовая траектория. Фазовый портрет. Определение фазовых траекторий по описанию нелинейной системы. Методы построения фазовых портретов.
6. Особые точки нелинейных систем. Исследование особых точек. Типы особых точек. Устойчивый и неустойчивый узел. Седло. Устойчивый и неустойчивый фокус. центр. Устойчивый и неустойчивый вырожденный узел. Вид переходных процессов в окрестности каждой особой точки.
7. Особые точки нелинейных систем. Предельный цикл как особый тип особых точек. Устойчивый и неустойчивый предельный цикл. Вид переходных процессов систем с предельным циклом.
8. Автоколебания как особый режим работы нелинейных систем. Отличие колебаний в нелинейных системах от колебаний в линейных системах. Задачи исследования автоколебаний. Методы исследования автоколебаний. Устойчивость периодических процессов – автоколебаний. Понятие орбитальной устойчивости.
9. Автоколебания как особый режим работы нелинейных систем. Метод точечного преобразования. Функция проследования. Закон точечного преобразования. Алгоритм решения задачи точечного преобразования. Условие устойчивых и неустойчивых автоколебаний.
10. Автоколебания как особый режим работы нелинейных систем. Метод гармонической линеаризации. Математическая постановка метода. Алгоритм решения задачи гармонической линеаризации. Формулы определения коэффициентов гармонической линеаризации. Симметричные и несимметричные колебания.
11. Автоколебания как особый режим работы нелинейных систем. Методы определения параметров автоколебаний с использованием гармонической линеаризации. Алгебраический метод определения автоколебаний. Частотный метод определения параметров автоколебаний. Корреляционный метод определения наличия и параметров автоколебаний.
12. Устойчивость нелинейных систем. Методы оценки устойчивости нелинейных систем. Устойчивость в малом. Устойчивость в большом. Устойчивость в целом. Устойчивость по линейному приближению.
13. Первый метод Ляпунова. Устойчивость невозмущенного движения по Ляпунову. Асимптотическая устойчивость невозмущенного движения по Ляпунову. Абсолютная устойчивость невозмущенного движения по Ляпунову. Экспоненциальная устойчивость невозмущенного движения по Ляпунову.

14. Второй (прямой) метод Ляпунова. Общая идея метода. Понятие функции Ляпунова. Знакопостоянные, знакоопределенные и знакопеременные функции. Устойчивость невозмущенного движения. Асимптотическая устойчивость невозмущенного движения. Асимптотическая (глобальная или «в целом») устойчивость невозмущенного движения. Неустойчивость невозмущенного движения.
15. Второй (прямой) метод Ляпунова. Методы построения функции Ляпунова. Метод полной энергии системы. Метод разделения переменных. Метод квадратичных форм. Критерий Сильвестра оценки положительной определенности квадратичной формы. Метод Красовского. Метод Вокера-Кларка. Метод Лурье-Постникова.
16. Устойчивость нелинейных систем. Частотный метод оценки абсолютной устойчивости нелинейной системы Попова.
17. Особенности синтеза систем управления нелинейными системами. Особенности решения задачи стабилизации. Особенности введения интеграла в управление.
18. Метод программного изменения коэффициента усиления (gain-scheduling), как простой пример адаптивного управления нелинейной системой.
19. Линеаризация обратной связью. Общая идея подхода. Отличие от традиционных методов синтеза и линеаризации нелинейных систем. Методы решения задачи линеаризации обратной связью. Понятия линеаризации обратной связью по выходу и по состоянию.
20. Линеаризация обратной связью. Метод компенсации нелинейностей. Скалярный и векторный случай решения задачи.
21. Линеаризация обратной связью. Метод линеаризации обратной связью по выходу (input-output linearization). Производные Ли. Относительный порядок системы и его определение. Условие линеаризуемости системы.
22. Линеаризация обратной связью. Метод линеаризации обратной связью по состоянию (full-state linearization). Скобки Ли. Условие линеаризуемости системы. Алгоритм решения задачи. Понятие внутренней и внешней динамики.
23. Системы с переменной структурой. Фазовые портреты системы с переменной структурой при наличии режима переключений. Скользящий режим работы нелинейных систем. Общая идея управления со скользящим режимом. Недостатки метода управления со скользящим режимом и способы их устранения.
24. Управление со скользящим режимом (sliding-mode control). Математическая постановка задачи управления со скользящим режимом. Необходимая информация для синтеза управления со скользящим режимом (sliding-mode control). Понятие вибрации динамики нелинейной системы при управлении со скользящим режимом.
25. Управление со скользящим режимом (sliding-mode control). Методы устранения вибраций при управлении со скользящим режимом. Метод комбинации непрерывного и переключающегося управлений. Метод использования функции насыщения в качестве функции переключения.
26. Методы управления backstepping. Общая идея метода. Математическая постановка задачи. Backstepping для нелинейной системы упрощенного вида. Backstepping для нелинейной системы общего вида.
27. Наблюдатели. Оценка вектора состояния. Особенность оценки вектора состояния в нелинейных системах. Наблюдатель с большим коэффициентом усиления (high-gain observer). Обеспечение робастности оценки относительно девиации модели нелинейной системы от истинной. Проблема пикового значения управления и ее решение.

Темы практических задач для подготовки к экзамену

1. Получить описание системы в форме Коши.
2. Восстановить описание системы в виде дифференциального уравнения по заданному описанию в форме Коши.
3. Решить задачу диагонализации матрицы.
4. Получить описание линеаризованной системы в переменных состояния.
5. Линеаризовать уравнения динамики системы.
6. Построить фазовый портрет для системы с переключением.
7. Для заданной системы определить тип особых точек.
8. Построить примерный вид фазового портрета системы.
9. Получить коэффициенты гармонической линеаризации для заданной нелинейности.
10. Определить параметры автоколебаний алгебраическим методом.
11. Определить параметры автоколебаний частотным методом.
12. Определить положительную определенность квадратичной формы.
13. Определить характеристику кандидата на функцию Ляпунова.
14. Решить задачу оценки устойчивости нелинейной системы вторым методом Ляпунова. Для поиска функции Ляпунова использовать метод полной энергии системы.
15. Решить задачу оценки устойчивости нелинейной системы вторым методом Ляпунова. Для поиска функции Ляпунова использовать метод квадратичной формы.
16. Решить задачу оценки устойчивости нелинейной системы вторым методом Ляпунова. Для поиска функции Ляпунова использовать метод разделения переменных.
17. Решить задачу оценки устойчивости нелинейной системы вторым методом Ляпунова. Для поиска функции Ляпунова использовать метод Красовского.
18. Решить задачу оценки устойчивости нелинейной системы вторым методом Ляпунова. Для поиска функции Ляпунова использовать метод Лурье-Постникова.
19. Решить задачу оценки устойчивости нелинейной системы вторым методом Ляпунова. Для поиска функции Ляпунова использовать метод Вокера-Кларка.
20. Решить задачу оценки устойчивости нелинейной системы методом линейного приближения.
21. Решить задачу синтеза нелинейной системы с использованием метода компенсации нелинейностей. В качестве линейного закона управления взять ПИ-регулятор.
22. Решить задачу синтеза нелинейной системы с использованием метода компенсации нелинейностей. В качестве линейного закона управления взять модальный регулятор.
23. Определить относительный порядок системы и оценить ее линеаризуемость обратной связью.
24. Для заданной системы решить задачу линеаризации обратной связью по выходу.
25. Для заданной системы решить задачу линеаризации обратной связью по состоянию.
26. Для заданной системы решить задачу синтеза методом backstepping.
27. Для заданной системы решить задачу синтеза методом управления со скользящим режимом.
28. Для заданной системы решить задачу синтеза наблюдателя с большим коэффициентом усиления.

Список основной литературы

1. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Том 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. 2-е издание. И.: Физматлит, 2016, 440 с.
2. Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. Учебное пособие. 2-е издание. И.: Наука, 1988, 256 с.
3. Халил Х.К. Нелинейные системы. 3-е издание / пер. с англ. Макаров И.А., ред. Фрадков А.Л. И.: Институт компьютерных исследований, 2009, 812 с.
4. Khalil H.K. Nonlinear system. 3rd edition. Prentice Hall, 2002, 750 p.

Список дополнительной литературы

1. Воронов А.А. Введение в динамику сложных управляемых систем. И.: Наука, 1985, 352 с.
2. Лазута И.В., Щербаков В.С. Теория автоматического управления. Нелинейные системы. Учебное пособие. Электронное издание. И.: СибАДИ, 2017, 116 с.
3. Ла-Салль Ж., Лефшец С. Исследование устойчивости прямым методом Ляпунова / пер. с англ. Ф.Р. Гантмахер, ред. А.А. Рывкин. И.: Мир, 1964, 168 с.
4. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. И.: Питер, 2006, 272 с.