



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

Программа учебной дисциплины «Дискретные системы автоматического управления»

для подготовки специалистов по направлению

24.05.06 «Системы управления летательными аппаратами»

Автор программы: Андрей Леонидович Масленников,
ассистент кафедры ИУ-1 «Системы автоматического управления»

Email: andrey.L.maslennikov@yandex.ru.

Группа в VK: <http://vk.com/amas.bmstu>.

Учебные материалы: <https://yadi.sk/d/fZrN7FsY3RudeU>.

Москва, 2019.

Аннотация

Дисциплина посвящена изучению методов анализа и синтеза дискретных систем автоматического управления, в рамках которой рассматриваются: математическое описание дискретных систем, последовательный переход от непрерывных систем к импульсным, от импульсных систем к цифровым, методы анализа и синтеза дискретных систем автоматического управления, вопросы управляемости и наблюдаемости дискретных систем, методов формирования модального, финитного, терминального и оптимального управления, а также методы синтеза различных наблюдателей для оценки вектора состояния.

Структура дисциплины

Модуль 1.	
Математическое описание дискретных систем.	
#01	Математические основы дискретных систем.
#02	Квантование и восстановление непрерывных сигналов.
#03	Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразования.
#04	Решетчатые функции и разностные уравнения.
#05	Математическое описание дискретных систем.
#06	Математическое описание систем с дискретизацией данных.
#07	Моделирование дискретных систем (семинар).
ДЗ #1	Математическое описание дискретных систем.
#08	Рубежный контроль №1.
Модуль 2.	
Анализ и синтез дискретных систем.	
#09	Анализ дискретных систем в частотной области.
#10	Устойчивость дискретных систем.
#11	Синтез дискретных систем. Модальное управление.
#12	Финитное, терминальное виды управления.
#13	Оптимальное управление в дискретных системах
#14	Оценка вектора состояния дискретной системы.
#15	Оценка вектора состояния наблюдателями Люенбергера.
#16	Оптимальные наблюдатели (фильтры Калмана)
ЛР #1	Анализ дискретных систем.
ЛР #2	Синтез дискретных систем.
ЛР #3	Оценка вектора состояния дискретных систем.
ЛР #4	Оценка вектора состояния линейным фильтром Калмана.
ДЗ #2	Синтез дискретных систем управления.
#17	Рубежный контроль №2.

Теоретические вопросы для подготовки к РК1

1. Сигналы. Виды сигналов. Математическая модель цифрового сигнала.
2. Дискретное преобразование Лапласа.
3. Z-преобразование. Свойства Z-преобразования. Область сходимости Z-преобразования.
4. Минимальный полином. Связь собственных значений матрицы и корней характеристического полинома.
5. Дискретные системы. Виды дискретных систем. Виды элементов дискретных систем. Импульсные, цифровые, системы с дискретизацией данных.
6. Физический характер сигналов, дискретность в импульсных системах.
7. Квантование непрерывных сигналов. Восстановление непрерывных сигналов. Дискретизация. Связь с аналого-цифровым и цифро-аналоговым преобразованиями.
8. Квантование непрерывного сигнала. Квантование по времени. Квантование по уровню. Квантование по времени и по уровню. Нелинейная характеристика квантования по уровню (при квантовании по времени).
9. Восстановление непрерывного сигнала. Экстраполятор нулевого порядка. Экстраполятор первого порядка. Экстраполятор первого порядка с запаздыванием. Экстраполятор первого порядка с прогнозом. Физическая реализуемость экстраполяторов первого порядка.
10. Математическая модель импульса.
11. Аналого-цифровые преобразователи. Основные характеристики АЦП.
12. Устройства аналого-цифрового преобразования. Компаратор. АЦП импульсно-кодовой модуляции, АЦП прямого преобразования. АЦП последовательного приближения. Интегрирующие АЦП. Сигма-дельта АЦП. Принцип работы, преимущества и недостатки, область применения каждого вида АЦП.
13. Устройства цифро-аналогового преобразования. ЦАП на базе ШИМ. Дельта-сигма ЦАП (ЦАП передискретизации). ЦАП взвешенного типа. ЦАП лестничного типа.
14. Решетчатая функция. Прямые и обратные разности. Полная и неполная суммы.
15. Разностные уравнения. Запись в виде разностной схемы и в каноническом виде. Решение разностных уравнения. Решение разностных уравнений с использованием Z-преобразования.
16. Описание дискретных систем в переменных вход-выход. Передаточные функции $W(z)$ и $W(z^{-1})$. Связь передаточных функций с разностными уравнениями. Реализуемые и нереализуемые системы.
17. Описание дискретных систем в виде структурных схем. Элементарные преобразования структурных схем дискретных систем.
18. Описание дискретных систем в переменных состояния. Переход от описания в переменных вход-выход к описанию в переменных состояния и обратно.
19. Моделирование дискретных систем, заданных в переменных вход-выход и в переменных состояния. Фундаментальная матрица решений и ее свойства.
20. Множество реализаций в пространстве состояний. Каноническая форма Жордана. Каноническая форма управляемости. Каноническая форма наблюдаемости.
21. Минимальная и балансная реализация дискретных систем.
22. Системы с дискретизацией данных. Методы исследования.

23. Получение эквивалентных дискретных систем в переменных вход-выход. Метод аппроксимации Тастина. Метод инвариантности импульсной характеристики. Метод согласованного Z преобразования.
24. Получение эквивалентных дискретных систем в пространстве состояний.

Темы практических заданий для подготовки к РК1

1. Для заданного графически непрерывного сигнала и частоты дискретизации нарисовать вид дискретного сигнала.
2. Для заданного графически непрерывного сигнала нарисовать вид сигнала, получаемого различными видами квантования.
3. Для заданного таблично дискретного сигнала нарисовать вид сигнала, получаемого на выходе различных видов экстраполятора.
4. Для заданного ряда Z -преобразования оценить сходимость и область сходимости.
5. Для заданного графически непрерывного сигнала пояснить графически механизм аналого-цифрового преобразования при импульсно-кодовой модуляции.
6. Для заданного графически непрерывного сигнала пояснить графически механизм аналого-цифрового преобразования интегрирующим АЦП.
7. Для заданного значения непрерывного сигнала показать графически механизм аналого-цифрового преобразования АЦП последовательного приближения.
8. Для заданной таблично решетчатой функции рассчитать, как прямые, так и обратные разности всех возможных порядков.
9. Привести разностное уравнение, заданное в рекуррентном виде к каноническому и наоборот.
10. Получить решение разностного уравнения с использованием Z -преобразования.
11. Получить выражение передаточной функции из разностного уравнения, заданного в каноническом виде, и наоборот.
12. Для заданной структурной схемы дискретной системы получить ее описание в переменных вход-выход.
13. Для заданной передаточной функции дискретной системы перейти к ее описанию в канонической форме управляемости в переменных вход выход, и наоборот.
14. Вычислить значения вектора состояния дискретной системы на некотором количестве шагов как с, так и без использования фундаментальной матрицы решений.
15. Для заданной в переменных состояния дискретной системы получить каноническую форму управляемости, наблюдаемости и Жордана.
16. Для заданной непрерывной системы получить ее эквивалентную дискретную систему методом аппроксимации Тастина, методом согласованного Z -преобразования и методом инвариантности импульсной характеристики.

Вопросы для подготовки к РК2

1. Частотные характеристики систем дискретных систем. Вещественная гармоническая последовательность и ее представление в комплексном виде. Вычисление АЧХ и ФЧХ дискретных систем.
2. Дискретная частота и ее свойства. Отличия от непрерывного случая. Связь с частотой дискретизации и частотой Найквиста. Проблемы использования частотного метода синтеза дискретных систем.
3. Устойчивость дискретных систем. Физический смысл устойчивости. Прямые и косвенные критерии устойчивости дискретных систем. Алгебраические критерии устойчивости.
4. Критерий Джури.
5. Критерий Гурвица для дискретных систем, заданных в переменных состояниях.
6. Критерий Найквиста.
7. Математическое описание дискретных систем управления. Автономная система. Дискретная система регулирования. Дискретная система управления.
8. Переход от формы записи дискретной системы в переменных состояниях к описанию дискретной системы в переменных вход-выход. Влияние начальных условий на получаемую реализацию.
9. Полная и неполная управляемость. Физический и практический смысл. Матрица управляемости. Формулировка критерия управляемости системы по Калману и его математическое обоснование.
10. Модальное управление. Физический смысл. Прямой метод решения задачи синтеза. Метод решения задачи синтеза с использованием формулы Аккермана. Принципиальное отличие двух методов.
11. Модальное управление. Прямой метод. Формула Аккермана.
12. Финитное управление по состоянию и по выходной переменной. Физический смысл. Проблемы практической реализации.
13. Задачи терминального управления.
14. Оптимальное управление. Задачи оптимального управления. Минимизируемый функционал. Виды задач оптимального управления.
15. Линейно-квадратичное регулирование по состоянию. Задачи Infinite (не фиксированное время окончания) / Finite Horizon (фиксированное время окончания) линейно-квадратичного управления. Линейно-квадратичное управление по выходной переменной.
16. Весовые матрицы состояния и управления, их свойства и выбор. Физический смысл минимизации. Преимущества использования квадратичных форм. Численное решение задач синтеза линейно-квадратичного управления как для случая конечного времени управления, так и для случая бесконечного времени управления.
17. Задача оценки вектора состояния.
18. Полная и неполная наблюдаемость. Физический и практический смысл. Матрица наблюдаемости. Формулировка критерия наблюдаемости системы по Калману и его математическое обоснование.
19. Наблюдатели. Принципы функционирования. Основные виды наблюдателей. Ошибка наблюдения. Отсутствие влияния динамики наблюдателя на динамику системы.

20. Оценка вектора состояния системы в случае, когда наблюдатель и дискретная система работают на одной частоте дискретизации. Практический смысл и проблемы реализации.
21. Оценка вектора состояния системы в случае, когда частота работы наблюдателя превышает частоту работы исходной дискретной системы. Практический смысл и проблемы реализации.
22. Полный наблюдатель. Формирования динамики наблюдателя. Описание динамики всей системы вместе с наблюдателем.
23. Апериодический наблюдатель.
24. Наблюдатель по текущему измерению. Практический смысл формирования наблюдателя с учетом измерений, полученных на текущем шаге работы дискретной системы. Описание динамики всей системы вместе с наблюдателем.
25. Редуцированный наблюдатель. Получение математической модели системы вместе с наблюдателем. Преимущества редуцированного наблюдателя. Реализация редуцированного наблюдателя в случае неединичной матрицы выхода.
26. Влияние наблюдаемости системы на синтез наблюдателя. Методы синтеза матрицы наблюдателя.
27. Фильтры Калмана. Постановка задачи в контексте оценки вектора состояния динамических систем. Виды фильтров Калмана.
28. Линейный фильтр Калмана. Постановка задачи. Инициализация начальных условий. Алгоритм определения оценок. Оптимальность линейного фильтра Калмана.
29. Виды линейного фильтра Калмана. Фильтр Калмана-Бюси. Гибридный фильтр Калмана. Проблемы и сложности использования линейных фильтров Калмана при решении практических задач.
30. Расширенный фильтр Калмана. Механизм линеаризации в алгоритме расширенного фильтра Калмана. Алгоритм формирования оценок. Оптимальность расширенного фильтра Калмана. Сложности практического применения. Полностью непрерывный и гибридный вариант расширенного фильтра Калмана.
31. Сигма-точечный фильтр Калмана. Постановка задачи. Отличие от расширенного фильтра Калмана. Механизм линеаризации, используемый при формировании оценок. Сложность реализации сигма-точечного фильтра Калмана. Реализация сигма-точечного фильтра Калмана при нулевых математических ожиданиях входных и измерительных шумов.

Темы практических заданий для подготовки к РК2

1. Для заданной дискретной системы в переменных вход-выход оценить устойчивость алгебраическим критерием, критерием Джюри.
2. Определить допустимую величину усиления цепи обратной связи используя критерий Джюри.
3. Оценить устойчивость дискретной системы, заданной в пространстве состояний.
4. Для заданной в переменных состояния дискретной системы и начальных условий получить описание в переменных вход выход.
5. Определить управляемость системы по Калману.

6. Для заданной разомкнутой дискретной системы и заданных желаемых полюсов замкнутой системы решить задачу синтеза прямым методом модального управления.
7. Для заданной разомкнутой дискретной системы и заданных желаемых полюсов замкнутой системы решить задачу синтеза методом модального управления с использованием формулы Аккермана.
8. Для заданной дискретной системы решить задачу синтеза финитного управления как по состоянию, так и по выходной переменной.
9. Определить наблюдаемость системы по Калману.
10. Показать структурной схемой принцип работы наблюдателей.

Список литературы по дискретным системам

1. Бесекерский В.А. Цифровые автоматические системы. И.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1976. 576 с.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления. Пер. с английского. И.: Мир. 1984. 541 с. [Iserman R. Digital Control Systems. 1st Edition. Springer-Verlag, Berlin. 1981].
3. Мита Ц., Хара С., Кондо Р. Введение в цифровое управление. Пер. с японского. И.: Мир. 1994. 256 с.
4. Солодовников В.В., Коньков В.Г., Суханов В.А. Шевяков О.В. Микропроцессорные автоматические системы регулирования. Основы теории и элементы. Учебное пособие. И.: Высшая школа. 1991. 255 с.
5. Phillips C.L., Nagle H.T. Digital control system analysis and design. 3th Edition. Prentice Hall Press. 1995.

Список литературы по теории управления

1. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. Учебное пособие. И.: НГТУ. 2003. 364 с.
2. Деменков Н.П., Микрин Е.А. Управление в технических системах. И.: МГТУ имени Н.Э. Баумана. 2017. 456 с.
3. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. 8-е издание. Пер. с английского. М.: Лаборатория Базовых Знаний. 2002. 832 с. [Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems. 8th Edition. Addison-Wesley. 2001].
4. Филлипс Ч.Л., Харбор Р.Д. Системы управления обратной связью. 4-е издание. Пер. с английского. И.: Лаборатория Базовых Знаний. 2001. 616 с. [Phillips C.L., Harbor R.D. Feedback Control Systems. 4th Edition. Prentice Hall. 2000].
5. Antsaklis P.J., Michel A.N. Linear Systems. McGraw-Hill. 1997.

Список литературы по цифровой обработке сигналов

1. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. Цифровая обработка сигналов. Пер. с английского. И.: Техносфера. 2006. 858 с. [Oppenheim A.V., Shafer R.W. Digital Signal Processing. Prentice Hall. 2006].
2. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. Пер. с английского. И.: Мир. 1978. 848 с. [Rabiner L.R., Gold B. Theory and application of digital signal processing. PrenticeHall. 1975].
3. Shenoit B.A. Introduction to digital signal processing and filter design. Willey. 2006.