

Проектирование линейных систем управления с обратной связью

Ю.В. Митришкин

Кафедра ИУ-1, группы 71, 72, 2009 г., 2-й семестр, 4 курс (зачет)

1. (2009 09 04) Управление по состоянию. Метод размещения полюсов замкнутой системы управления посредством преобразующей матрицы. Вывод формулы Аккермана. Уравнение для наблюдателя состояния.
2. (2009 09 11 семинар) Синтез системы управления для объекта второго порядка: последовательное соединение двух интегрирующих звеньев. Представление модели объекта в пространстве состояний. Применение команды `place` для заданного размещения полюсов замкнутой системы. Исследование полученной замкнутой системы во временной области с применением команды `initial`. Создание модели замкнутой системы в среде `simulink`. Исследование переходного процесса в системе при задании произвольных начальных условий на интегрирующих звеньев. Вывод информации на осциллографы и с применением команды `plot`.
3. (2009 09 18) Представление структурных схем замкнутой системы управления с регулятором по состоянию для модели объекта с двумя интеграторами в двух видах: общем и для моделирования в `simulink`. Вывод матриц уравнения наблюдателя с использованием равенства матричных передаточных функций модели объекта и наблюдателя. Вывод уравнения для ошибки оценки состояния. Представление системы управления с наблюдателем в координатах вектора состояния модели объекта и ошибки оценивания, а также в координатах векторов состояния модели объекта и наблюдателя. Характеристическое уравнение системы с наблюдателем. Теорема разделения.
4. (2009 09 25 семинар) Синтез наблюдателя для объекта второго порядка в виде двух интеграторов посредством формулы Аккермана. Подключение наблюдателя к системе управления объектом по состоянию и исследование точности отслеживания состояния в переходных режимах при различных начальных условиях.
5. (2009 10 02) Понятие дискретной системы (системы в дискретном времени). Ситуации, когда требуется переход от систем в непрерывном времени к системам в дискретном времени. Переход от описания систем в пространстве состояний в непрерывном времени к описанию в пространстве состояний в дискретном времени и наоборот. Вычисление матриц системы в дискретном времени для случаев невырожденной и вырожденной матрицы A . Пример дискретной системы без непрерывного аналога. Дискретизация уравнений в пространстве состояний двойного интегратора. Понятие z -преобразования числовой последовательности. Теорема о сдвиге на целое число тактов. Решение разностных уравнений состояния разомкнутой системы управления. Теорема об управляемости линейных дискретных систем. Вывод передаточной функции дискретной системы.
6. (2009 10 09 семинар) Дискретизация двойного интегратора посредством команды `c2d`. Сравнение работы линейной и дискретной систем управления по состоянию при различных интервалах дискретизации, когда переходный процесс в системах вызван различными начальными условиями. Наблюдатель состояния при этом не использовался.

7. (2009 10 16) Пример применения разностных уравнений. Аналогия представления непрерывных и дискретных систем. В непрерывном времени: формула Коши, теорема о преобразовании Лапласа производной функции по времени, передаточная функция, преобразование Лапласа матричной экспоненты, формула Коши с применением операции свертки, теорема о преобразовании Лапласа операции свертки, преобразование Лапласа свертки матричной экспоненты и входного сигнала. В дискретном времени: решение неоднородной системы разностных уравнений с учетом начальных условий; теорема z-преобразования о сдвиге на такт вперед; связь состояния, начальных условий и входного сигнала в изображениях по z-преобразованию; z-преобразование степени квадратной матрицы; связь вектора состояния с входным сигналом, выраженная через свертку; представление свертки в дискретном времени и ее физический смысл. Система линейных алгебраических уравнений в координатной и векторно-матричной формах. Правило умножения матрицы на вектор в двух формах: а) в форме скалярных произведений строк на вектор-столбец, б) в форме линейной комбинации столбцов матрицы. Теорема Кронекера-Капелли и ее алгебраический смысл. Замена координат при умножении матрицы на вектор-столбец: связь исходной матрицы с матрицей для новой системы координат. Связь базисов посредством матрицы преобразования координат. Установление связи координат одного и того же вектора, заданного в разных базисах пространства координат. Алгебраический смысл столбцов матрицы преобразования координат. Происхождение задачи на собственные векторы и собственные значения квадратной матрицы. Алгебраический смысл собственных векторов и собственных значений. Геометрический смысл определителя квадратной матрицы.
8. (2009 10 23 семинар) Выяснение знака обратной связи и его роли при применении синтезированного регулятора по состоянию. Дискретизация наблюдателя.
9. (2009 10 30) Перестановка, инверсия, подстановка. Определения определителя квадратной матрицы: 1) формула алгебраической суммы слагаемых всевозможных произведений n элементов матрицы, взятых по одному из каждой строки и каждого столбца, 2) разложении Лапласа: определение по индукции. Вырожденная матрица и ее определитель. Получение характеристического уравнения матрицы с помощью ее определителя для нахождения собственных значений. Получение СЛАУ для нахождения собственного вектора. Понятие ядра матрицы. Сравнение собственных значений и сингулярных чисел матриц. Получение частного решения линейного однородного векторного дифференциального уравнения с помощью собственного вектора и собственного значения. Фундаментальная система решений линейного однородного векторного дифференциального уравнения как базиса пространства решений. Общее решение однородной системы линейных дифференциальных уравнений. Вычисление вектора весовых коэффициентов в общем решении. Диагонализация квадратной матрицы с помощью системы попарно различных собственных векторов. Представление решения однородной системы линейных дифференциальных уравнений с помощью матричной экспоненты. Условие устойчивости линейной динамической системы в непрерывном времени. Получение общего решения однородной векторной системы разностных уравнений и нахождение вектора весовых коэффициентов. Условие устойчивости решения разностного уравнения. Аналогия решений однородных дифференциальных и разностных систем уравнений с постоянными коэффициентами.
10. (2009 11 06 семинар) Синтез дискретной системы управления по состоянию объектом второго порядка, переводящей объект в нулевое состояние за конечное время (за число шагов, равное порядку объекта).

11. (2009 11 13) Синтез закона управления по состоянию для дискретного объекта, обеспечивающего нулевые собственные значения матрице замкнутой системе. Обоснование перехода синтезированной системы из любого состояния в нулевое состояние за конечное время посредством теоремы Кэли-Гамильтона. Пример нильпотентной матрицы. Теорема о сингулярном разложении матриц. Связь выходного сигнала в линейной замкнутой системе с матричными передаточными функциями с задающим воздействием и внешним выходным возмущением. Связь максимального сингулярного числа функции чувствительности с минимальным сингулярным числом передаточной функции разомкнутой системы. Запас робастной устойчивости замкнутой системы, выражаемый через H -бесконечность норму выходной мультипликативной неопределенности. Теорема о малом коэффициенте усиления. Определение H -бесконечность нормы устойчивой правильной матричной передаточной функции в частотной и временной области. Тождество Парсеваля. Связь максимальных сингулярных чисел дополнительной функции чувствительности и передаточной функции разомкнутой системы. Противоречие между качеством управления и запасом робастной устойчивости из-за фундаментальной связи между чувствительностью и дополнительной чувствительностью. Обеспечение компромисса посредством спецификации на частотные характеристики сингулярных чисел передаточной функции разомкнутой системы в диапазонах низких и высоких частот.
12. (2009 11 20 семинар) Проектирование системы управления объектом 2-го порядка (два последовательных интегратора) методом loop shaping. Применение команды синтеза регулятора ncfsyn. Создание симьюлинк-схемы замкнутой системы управления с задающим воздействием и внешним возмущением. Исследование работы системы во временной области в режиме слежения за линейно изменяющимся задающим воздействием и в режиме парирования действия выходного внешнего возмущения. Понимание возникновения динамических и статических ошибок системы. Установление факта астатизма второго порядка в обратной связи.
13. (2009 11 27) Мультипликативная выходная неопределенность модели объекта управления. Аддитивная неопределенность модели объекта управления. Запасы робастной устойчивости многомерных систем в частотной области на основе теоремы о малом коэффициенте усиления. Типы задач смешанной чувствительности для разрешения противоречия между точностью управления и запасом робастной устойчивости. Расширение модели объекта управления посредством весовых функций: пред- и пост-компенсаторов. Нормализованная взаимно-простая факторизация передаточной функции расширенной модели объекта. Тождество Безу. Неопределенности в факторизованной модели объекта. Конфигурация замкнутой робастной системы управления с факторизованной расширенной моделью объекта. Вывод формулы для запаса робастной устойчивости с неопределенностями в матричных сомножителях факторизации путем преобразования структурной схемы.
14. (2009 12 04 семинар) Исследование замкнутой робастной системы управления в частотной области. Численное построение амплитудных частотных характеристик передаточной функции чувствительности и дополнительной функции чувствительности, передаточной функции разомкнутой системы, обратной функции чувствительности. Установление факта частотного разделения при получении компромисса между точностью управления и запасом робастной устойчивости. Синтез регулятора для различных значений веса и установление связи между величиной веса, сдвигом частотных характеристик и динамическими ошибками замкнутой системы управления. Синтез регулятора для неустойчивой модели объекта второго порядка с

использованием динамической весовой функции для получения астатизма первого порядка в обратной связи. Применение методики исследования полученной замкнутой системы управления во временной и частотной области.

15. (2009 12 11) Формула для вычисления максимального робастного запаса устойчивости в задаче о синтезе регулятора методом формирования частотной характеристики разомкнутой системы управления. Грамианы управляемости и наблюдаемости. Спектральный радиус квадратной матрицы. (A, B, C, D) -представление робастного регулятора, обеспечивающего заданный запас робастной устойчивости. Алгебраические уравнения Риккати для вычисления матриц X и Z , входящих в формулы максимального запаса устойчивости и робастного регулятора. Линейно-квадратичная проблема оптимального управления (задача оптимальной стабилизации). Теорема о синтезе линейно-квадратичного регулятора. Уравнение Риккати, оптимальный закон управления по состоянию, минимальное значение показателя качества. Последовательность этапов при синтезе линейно-квадратичного регулятора.