

ОЦЕНИВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТЕПЕНИ РОБАСТНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ САР ПРОСТЫМИ ПРОГРАММНЫМИ СРЕДСТВАМИ ПАКЕТА МАТЛАБ

Введение. В научных статьях стало нормой приводить графики динамических процессов синтезированной системы для иллюстрации достигнутого результата. Робастность же системы по отношению к вариации параметров объекта регулирования в подавляющем количестве публикаций не оценивается и не иллюстрируется, за исключением статей, посвященных собственно синтезу робастных систем. В результате читатель не имеет информации от авторов публикации о том, допускает ли система с предложенным регулятором отклонения параметров объекта и какие именно, например, на 5%, 10%, 20%, 40%, 100% и т.д.

Применение так называемых «норм», содержащихся в математическом аппарате синтеза H_2 - и H_{∞} - регуляторов, требует весьма длительного и усердного изучения самого аппарата, а применение теории чувствительности – соответственно изучения самой теории. Тем не менее, автор статьи полагает, что оценка меры робастности синтезированной системы должна приводиться в каждой статье, посвященной синтезу САР, так как ее получение может производиться многократно более простыми средствами, нежели теория чувствительности и аппарат синтеза H_2 - и H_{∞} - регуляторов. Рассмотрим, как это можно сделать на достаточно характерном примере – для двухмассовой электромеханической системы с модальным регулятором, обеспечивающим астатизм первого порядка по управлению и возмущению (в виде момента нагрузки, прикладываемого ко второй массе).

1. Этап синтеза САР

Структурная схема САР представлена на рис.1. Параметры двигателя выбраны характерными для машин небольшой мощности. Жесткость упругой связи обеспечивает частоту упругих колебаний объекта порядка 10-15 Гц, демпфирование в валу - $\lambda=0.1-0.2$ (логарифмический декремент), преобразователь – безынерционный, например, транзисторный с высокой частотой коммутации, работающий либо в режиме ШИМ-модуляции, либо в релейном режиме. Коэффициенты передачи датчиков обратных связей включены в коэффициенты модального регулятора (выбран для простоты изложения). Регулятор благодаря дополнительному интегратору обеспечивает астатизм САР по управлению и по возмущению. Его коэффициенты – k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 . При желании можно повысить порядок астатизма, введя еще один, два, три и т.д. интеграторов, как это выполнено, например, в [1] для синтеза регулятора скорости системы подчиненного регулирования с астатизмом шестого порядка с применением алгоритма синтеза LQR-регулятора. Процедуры синтеза регуляторов состояния от этого не изменятся. Величину среднегеометрического корня ω введем в буквенном обозначении, чтобы ее значения далее изменять, а в качестве стандартных распределений корней знаменателя примем биномиальное, Баттерворта и ITAE. Отметим, что при необходимости получить более высокий порядок астатизма, достаточно формально скопировать слагаемые с младшими степенями оператора Лапласа из знаменателя желаемой передаточной функции замкнутой системы в ее числитель, однако, например, для ITAE-распределения придется изменить и коэффициенты знаменателя. Так, для системы шестого порядка желаемая ITAE-передаточная функция с астатизмом второго порядка записывается, как $W(p) = (6.76\omega^5 p + \omega^6) / (p^6 + 6.12 \omega p^5 + 13.42 \omega^2 p^4 + 17.16 \omega^3 p^3 + 14.14 \omega^4 p^2 + 6.76 \omega^5 p + \omega^6)$, а коэффициенты ее знаменателя отличаются от тех же коэффициентов ITAE-передаточной функции с астатизмом первого порядка в силу того, что минимизируется функционал качества другой системы. Саму процедуру синтеза модального регулятора выполним в пакете MAPLE в символьном виде. Полученные выражения для k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 перенесем в m-файл пакета МАТЛАБ для выполнения расчетов с вариацией параметров. Таким образом, синтез модального регулятора в данном случае выполняется в рамках типовой технологии и предполагает однозначно правильное получение результатов, то есть переходных процессов. Однако мера робастности синтезированной системы вовсе не очевидна и из полученных графиков не вытекает. Тогда остается оценить грубость (робастность) полученных решений и выбрать из них наиболее грубое.

2. Этап оценивания и визуализации меры робастности синтезированной САР

Робастность качества САР для устойчивых и неустойчивых объектов регулирования может быть получена в рамках процедуры μ -синтеза. Его обсуждать здесь не будем, так же, как и применение аппарата матричных неравенств и других средств, пока что не прижившихся в среде специалистов-электротехников.

Робастная устойчивость обеспечивается (по возможности) для устойчивых объектов и требует от разработчика задать подходящие весовые частотные характеристики. От их выбора многое зависит, но если обеспечена робастность, то как выглядят переходные процессы при разных весовых частотных характеристиках и при вариации параметров объекта – без моделирования сказать сложно. Здесь – полная аналогия с синтезом LQR-регулятора в смысле произвола пользователя по части выбора функционала качества и весового коэффициента в матрице R. Аналогична ситуация и с синтезом модального регулятора в смысле выбора стандартных (а, тем более, нестандартных) распределений корней. Кроме того, известное утверждение о робастной устойчивости модального регулятора напрямую относится лишь к ситуации увеличения коэффициента усиления ра-

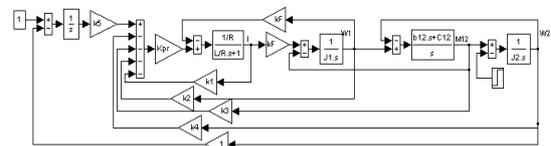


Рис. 1

зомкнутой системы (вплоть до бесконечности), а влияние вариации параметров при этом не оценивается. Поэтому в силу итерационности алгоритмов и эвристики действий разработчика полученные результаты синтеза нуждаются в непосредственной оценке их применимости – по внешнему виду совокупности переходных характеристик $h(t)$ систем с варьируемыми значениями параметров объекта. Частотные, корневые и иные косвенные оценки могут выполнять вспомогательные функции, но окончательное инженерное решение, все-таки, должно базироваться на интуитивной оценке семейства $h(t)$.

3. Алгоритм оценивания и визуализации меры робастности синтезированной САР

Идея и техника построения алгоритма предельно просты и «не впечатляют». Впечатляют, по крайней мере, по мнению автора, результаты расчета и простота их получения.

Программу пишем в виде m-файла Матлаба в следующем порядке. Сначала задаем «номинальные» значения параметров объекта регулирования, типовые распределения корней и среднегеометрический корень (для модального регулятора). Затем пишем расчетные формулы для вычисления значений коэффициентов модального регулятора (полученные в пакете MAPLE). После этого задаем в процентах предполагаемые значения предельных отклонений каждого параметра объекта от его «номинальных» значений, а коэффициенты регулятора k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 не варьируем, так как они, например, хранятся в программе управляющего контроллера и не «дрейфуют». И, наконец, вводим генератор случайных чисел с равномерным распределением вероятности (команда `rand`), смещая его выход в диапазон $-0.5 \div 0.5$ и масштабируем для каждого параметра объекта в отдельности. Вариации параметров реализуются в теле цикла и равномерно покрывают заданную область гиперпространства параметров вокруг их «номинальных» значений. Теперь для каждой из точек рассчитываем переходный процесс в системе (команда `step`) и, если нужно, – корни характеристического уравнения (команда `roots`), частотные характеристики для замкнутой или разомкнутой систем (команда `bode`). 200-300 циклов таких расчетов сохраняем в памяти, а затем командой `plot` строим все эти (разумеется, однотипные) графики в одной плоскости. Такое количество графиков плотно покрывает зону возможных переходных процессов при заданных вариациях параметров объекта в синтезированной САР. После этого оценить меру робастности и пригодность САР к эксплуатации сможет и заказчик, и даже студент, не сдавший экзамен по курсу ТАУ.

С точки зрения автора инженерная интуиция должна быть определяющей при оценке робастности системы по таким графикам, хотя ничего не мешает такую оценку «обначить», задав трубку допустимых отклонений от среднего значения во времени или оценив относительную площадь образовавшейся зачерненной фигуры.

Примеры реализации описанного алгоритма показаны на рис. 2а) – переходные характеристики, на рис 2б) – корневая плоскость, на рис. 2в) и 2г) – частотные характеристики замкнутой (ЛАЧХ) и разомкнутой (ЛАЧХ+ЛФЧХ) систем, при величине отклонений всех и каждого параметра объекта в пределах $\pm 25\%$ и биномиальном распределении корней с $\omega=314$ рад/с. Хорошо видно, что наиболее чувствительны к вариации параметров объекта косвенные носители показателей качества – корни характеристического уравнения; наименее чувствительны к вариации параметров объекта другие косвенные носители показателей качества – частотные характеристики, в силу чего и те, и другие нецелесообразно использовать для оценки робастности САР, в отличие от носителей прямых показателей – переходных характеристик, определяющих реальное поведение синтезированной САР.

4. Синтез робастной по качеству САР в рамках рассмотренного алгоритма оценивания

Матлаб выполняет упомянутые вычисления достаточно быстро. Поэтому можно себе позволить в оперативном порядке выполнить несколько десятков расчетов, изменяя, например, распределения корней (функционал качества или матрицу R при синтезе по алгоритму LQR и т.п.). Это уже будет, фактически, синтез САР, основанный на разумном (с инженерной точки зрения) и быстром переборе выгодных вариантов. При этом мера робастности каждого варианта САР мгновенно оценивается и сравнивается с другими. Так, например, очень легко установить, что увеличение в 5-7 раз «внутренних» коэффициентов характеристического полинома при фиксированных «внешних» обеспечивает допустимость отклонения параметров рассмотренного объекта до 80-90% (то есть в $1.9/0.1=19$ раз) вместо 25%, заданных при построении графиков рис.2. Следует добавить, что подобная программа и подход могут быть использованы и для нелинейных систем с той разницей, что команды `roots` и `bode` нужно будет исключить, а команду `step` придется заменить командой численного решения дифференциальных уравнений (в Матлабе) и включить в программу в качестве «подпрограммы» саму систему дифференциальных уравнений САР.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В. Осичев. Синтез транзисторных систем подчиненного регулирования по алгоритмам модального и оптимального управления.- Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».-Харків: НТУ «ХПІ».-2003.- № 10.- Т.2. С.81-84

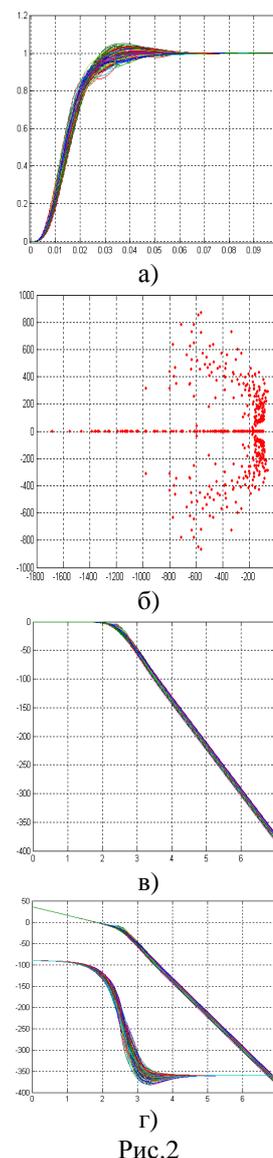


Рис.2