

1. Организация структур технических и программных средств проектирования и управления. Средства взаимодействия, структуры данных. Виртуальная реальность.

Пакет программ АСР (автоматический синтез регуляторов, обеспечивающих точность и время регулирования)

А.Г. Александров,
в.н.с., д. ф.-м. н., проф., alex7@ipu.ru,
Д.В. Шатов,
м.н.с., dvshatov@gmail.ru,
ИПУ РАН, г. Москва

Пакет АСР вычисляет коэффициенты регулятора для одномерного объекта любого порядка, работающего в условиях интенсивных, неизвестных внешних возмущений. Регулятор обеспечивает определенные показатели системы: допуск на ошибку регулирования, время регулирования при этом системе обеспечиваются инженерные запасы устойчивости по фазе и модулю.

В настоящем докладе описываются программы, предназначенные для синтеза регуляторов одномерных объектов, основанные на использовании тождества Безу, реализованные в среде Matlab. Все программы синтеза построены по схожему алгоритму: производится преобразование объекта в удобную форму, формируется правая часть тождества Безу, по которому составляется и решает система линейных уравнений, проводится анализ найденного регулятора с учетом заданных требований к качеству процесса регулирования, запасов устойчивости и реальных условий работы (немоделируемая динамика и ограничения на управление).

Package ACD (automatic controller design) calculates controller coefficients for SISO plant of any order that is affected by unknown intensive external disturbances. The controller provides given system specifications: accuracy and settling time with sufficient gain and phase margin.

In the presence paper programs for SISO plant controller design based on Bezout identity in Matlab are described. All design programs are based on the similar algorithm: plant is transformed to convenient form, then right part of the Bezout identity is formed, the solution of linear equation system made from the identity gives required controller, then result system is analyzed with respect to given specifications and actual operation conditions (nonmodel dynamics and control value limitation).

Введение

Системы автоматического управления характеризуются показателями качества: точность, быстродействие, перерегулирование, запасы устойчивости по фазе и модулю. Известно много методов построения регуляторов, которые направлены на получения в замкнутой системе заданных показателей качества при известных параметрах объекта управления и условиях функционирования. К таким методам относятся: метод логарифмических амплитудно-частотных характеристик (метод ЛАЧХ) [1] для одномерных объектов, методы LQ- и H_∞-оптимизации [2], которые позволяют находить оптимальные регуляторы для многомерных систем, для этих методов известна связь функционала оптимизации и заданных показателей качества (точность и запасы устойчивости) [3], синтез регуляторов для одномерных объектов с использованием тождества Безу, обеспечивающий системе заданную точность, быстродействие и запасы устойчивости [4, 5].

Настоящая работа описывает пакет АСР для среды Matlab, который представляет собой набор программ для синтеза регуляторов одномерных объектов. В отличие от других программных средств, разрабатываемых авторами [6, 7, 8] представленный пакет содержит только программы для расчета регуляторов. Пакет АСР вычисляет коэффициенты регулятора для объекта любого порядка, работающего в условиях интенсивных, неизвестных внешних возмущений. Регулятор обеспечивает определенные показатели системы: допуск на ошибку регулирования, время регулирования, запасы устойчивости по фазе и модулю. Программы позволяют найти регулятор для объекта любого порядка, причем порядок регулятора задается пользователем. Таким образом, кроме регуляторов общего вида пакет позволяет вычислить коэффициенты П-, ПИ- и ПИД-регуляторов широко распространенные в промышленности.

В пакете содержатся следующие варианты программ для синтеза регуляторов:

- синтез регуляторов общего вида;
- синтез регуляторов с чистым интегратором;
- синтез регуляторов (общего вида и с интегратором) с предварительной фильтрацией задающего воздействия;

В докладе описывается программа синтеза регулятора общего вида и приводится пример ее использования.

1. Задача синтеза и её решение

Рассматриваются системы вида:

$$d_n y^{(n)}(t) + \dots + d_1 y(t) + y(t) = k_m u^{(m)}(t) + \dots + k_0 u(t) + c_1 f^{(1)}(t) + c_0 f(t), \quad n > m, \quad n > l \quad (1)$$

$$g_{n-1} u^{(n-1)} + \dots + g_1 u + g_0 u = r_{m_c-1} e^{(m_c-1)} + \dots + r_1 e + r_0 e, \quad n_c \geq m_c, \quad (2)$$

где $y(t)$ – выход объекта (1), $u(t)$ – сигнал управления, $e(t) = y(t) - v(t)$, где $v(t)$ – задающее воздействие, $f(t)$ – внешнее возмущение, которое может быть представлено полигармонической функцией

$$f(t) = \sum_{i=0}^{\infty} f_i \sin(\omega_i t + \phi_i),$$

где частоты ω_i^f и фазы ϕ_i^f — неизвестны, а неизвестные амплитуды f_i удовлетворяют условию

$$\sum_{i=0}^5 |f_i| \leq f^*, \quad (3)$$

в котором значение f^* известно.

Коэффициенты полиномов $k(s)$, $c(s)$ и $d(s)$ объекта (1) известны. Ставится задача найти коэффициенты r_j , $j = \overline{0, m_c}$, r_j , $j = \overline{1, n_c}$ полиномов регулятора (2) такие, чтобы выполнялись заданные требования к показателям качества системы.

Для случая директив с фильтром на задающее воздействие уравнение регулятора (2) приобретает вид:

$$g_{n_c} u^{(n_c-1)} + \dots + g_1 \dot{u} + g_0 u = r_{m_c-1} y^{(m_c-1)} + \dots + r_1 \dot{y} + r_0 y + r_{c_p m_c-1} v^{(m_c-1)} + \dots + r_1 \dot{v} + r_0 v, \quad n_c \geq m_c.$$

Рассматриваются следующие показатели качества:

- точность регулирования (допуск на ошибку регулирования)

$$|e(t)| \leq e^*, \quad t \geq t_{per}, \quad (4)$$

- время регулирования (t_{per})

$$t_{per} \leq t_{per}^*, \quad (5)$$

- запасы устойчивости по фазе (P_m) и модулю (G_m)

$$G_m \geq G_m^*, \quad P_m \geq P_m^* \quad (6)$$

где e^* , t_{per}^* , G_m^* , P_m^* — заданные числа.

Алгоритм синтеза, используемый во всех директивах, основан на решении тождества Бэзу и приведен в работе [8]. Кратко опишем этот алгоритм: рассматривается тождество Бэзу вида:

$$d(s)g(s) - k(s)r(s) = \psi(s), \quad (7)$$

правая часть содержит полином $\psi(s) = \delta(s)\varepsilon(s)$, выбор которого определяет результирующий регулятор. Полином $\delta(s)$ называется базовым и формируется исходя из требований к показателям качества, а полином $\varepsilon(s)$ является вспомогательным и содержит часть корней полинома $k(s)$ и корни, отвечающие за реализуемость итогового регулятора.

В [8] описан выбор корней этого полинома, обеспечивающий выполнение требований к допуску на ошибку регулирования и быстродействие системы с учетом запасов устойчивости по фазе и модулю. Сами коэффициенты полиномов $r(s)$ и $g(s)$ ищутся как решение системы составленной из коэффициентов полиномов при одинаковых степенях тождества (7).

2. Программа синтеза регулятора asr1c1

2.1. Назначение и структура

Программа синтеза предназначена для построения регулятора общего вида, обеспечивающего точность и быстродействие процесса слежения. Программа синтеза состоит из отдельных функций (модулей), связанных промежуточными расчетными частями. Программа имеет следующую структуру:

1) преобразование полиномов объекта (1), приведение к форме с единичным коэффициентом при старшей степени полинома $c(s)$.

2) Модуль **redplant** — редуцирует порядок объекта в зависимости от заданного пользователя порядка регулятора (n_c).

3) Представление полинома $k(s) = k_1(s)k_2(s)$, где $k_1(s)$ — полином, вещественные части корней которого отрицательны, $k_2(s)$ — полином, вещественные части корней которого не отрицательны.

4) Модули **setltime**, **accur**, **polreal** формируют полином правой части тождества (7). Модуль **setltime** формирует базовый полином $\delta(s)$ по заданному времени регулирования, модуль **accur** формирует базовый полином по заданной точности слежения, а модуль **polreal** вычисляет коэффициенты полинома реализуемости $\varepsilon(s)$.

После формирования полинома $\psi(s)$ рассчитываются коэффициенты полиномов регулятора (2).

5) Модуль **analmod2cdistcp** — служит для анализа точности и быстродействия обеспечиваемых найденным регулятором.

2.2. Исходные и выходные данные

Вызов программы синтеза выглядит следующим образом:

[el, Gm, Pm]=asr1c1(d, k, c, usat, fm, par1, par2, em, treg, par3, nc, te)

Опишем выходные и выходные данные программы.

Исходные данные программы:

d, k, c — вектора коэффициентов полиномов объекта (1).

usat — граница управления ($|u(t)| \leq usat$).

fm — граница f^* внешнего возмущения (3).

par1, par2, par3 — вектора чисел, которые характеризуют вид и параметры функций внешнего возмущения, помехи измерения и задающего воздействия. Например, первое число в векторе описывает форму сигнала (1 — ступенька, 2 — синусоида, 3 — меандр и т.п.), второе число амплитуда сигнала, третье — частота и т.д.

ϵ_m – допуск на ошибку регулирования (4).

t_{reg} – желаемое время регулирования (5).

n_c – порядок регулятора (2).

t_e – время моделирования (используется только при моделировании системы, также как и $par1$, $par2$, $par3$).

Результаты расчета программы:

g, g – вектора коэффициентов полиномов регулятора (2), для случая с предварительной фильтрацией по задающему воздействию также выдается вектор его коэффициентов ГСР.

ϵ_f – фактический допуск на ошибку регулирования, обеспечиваемый данным регулятором (находится по итогам моделирования).

G_m, P_m – запасы устойчивости системы (6) по модулю и фазе.

Программа строит графики изменения сигналов $y(t), u(t), e(t)$.

2.3. Модули программы синтеза

Модуль **redplant** преобразует полиномы объекта управления и редуцирует его порядок. Он проводит разбиение полинома $d(s)$ объекта (1) в зависимости от наличия неустойчивых корней. Далее проводится уменьшение степени объекта управления либо с помощью программы **formb2**, если все корни полинома $d(s)$ устойчивы, либо с помощью модуля **formbnonq**, если у объекта есть неустойчивые корни. После этого модуль **rear2** упорядочивает корни результирующего полинома объекта в порядке их возрастания.

Модули **setltime**, **accur**, **polreal** определяют полином $\psi(s)$ правой части тождества (7), они имеют схожие алгоритмы работы. В каждом модуле проводится варьирование корней полинома до тех пор, пока не выполнится некоторое целевое условие. Модули **setltime**, **accur** формируют полином $\delta(s)$, а модуль **polreal** — $\varepsilon(s)$.

Модуль **setltime** ищет такой регулятор, который обеспечивает желаемое быстродействие и обеспечивает запасы устойчивости системы. Он основан на модуле **formpsi2e2noti2**, который варьирует параметр при генерации корней полинома $\delta(s)$ так, чтобы выполнить требования к быстродействию с учетом запасов устойчивости. При этом используются модули **omdiap3** и **radi3b**, первый находит рабочий диапазон частот, в котором вычисляются запасы устойчивости, а второй рассчитывает запасы. Также используется модуль **utf**, который значение максимальной ошибки слежения, используя передаточные функции, связывающие регулируемую переменную с внешним возмущением и задающим воздействием.

Модуль **accur** обеспечивает выполнение требований к точности системы. Его алгоритм работы схож с предыдущим модулем и основан на модуле **formpsi2e2noy2**, который также варьирует корни полинома $\delta(s)$, с той разницей, что начальными значениями для него являются корни, полученные в результате выполнения модуля **setltime**, а целью варьирования является достижение заданной точности, с сохранением выполнения условия на желаемое время регулирования.

Модуль **polreal** формирует полином реализуемости $\varepsilon(s)$, при учитывается ограничение на коэффициент усиления регулятора (он не должен сильно возрастать за счет коэффициента реализуемости). Цель достигается путем уменьшения наименьшей постоянной времени полинома реализуемости до тех пор, пока не будет обеспечена цель модуля. Начальные значения постоянных времени полинома реализуемости определяются наибольшим корнем характеристического полинома системы.

Модуль **analmod2cdistcp** используется во всех директивах пакета. Он служит для моделирования процессов управления в синтезированной системе для заданных функций внешнего возмущения, помехи измерения и задающего воздействия. Модуль работает в четыре этапа: на первом вычисляются запасы устойчивости по фазе и модулю, на втором система объект-регулятор приводится к дискретному виду, в третьей решаются уравнения системы (1), (2) с учетом насыщения, в четвертой формируются и выдаются графики сигналов регулируемой переменной, управления, ошибки регулирования и строится годограф Найквиста разомкнутой системы.

3. Пример расчёта регулятора

Рассматривается объект управления, описываемый уравнением следующего вида:

$$(s^3 + 6,2s^2 + 26,2s + 5)y = (10s + 5)u + 5f, \quad (8)$$

который для простоты записан в преобразованиях Лапласа.

Ограничение на управление принято равным $usat = 100$, а граница внешнего возмущения принята как $f^* = 1$.

Внешнее возмущение, используемое при моделировании имеет вид:

$$f = sign(\sin[5t]).$$

Помеха измерения для простоты опущена, задающее воздействие принято следующим:

$$v(t) = const = 1.$$

Требование к точности (4) выбрано как:

$$\epsilon^* = 0,1,$$

а желаемое время регулирования (5) выбрано как:

$$t_{per}^* = 3 \text{ с}.$$

Порядок регулятора (2) выбран полным, т.е. $n_c = 3$. Время моделирования выбрано как $t_e = 10 \text{ с}$.

В результате для объекта (8) получен следующий регулятор:

$$(0,004s^3 + 0,13s^2 + 12,13s + 6,04)u = (17,47s^2 + 118,88s + 120,53)e.$$

При таком регуляторе фактический допуск на ошибку регулирования составил:

$$|\theta(t)| \leq 0,0954,$$

при этом запасы устойчивости по модулю и фазе следующие:

$$G_m = 24,16, P_m = 80,4^\circ.$$

Видно, что требование к точности системы выполняется, и она обладает высокими запасами устойчивости.

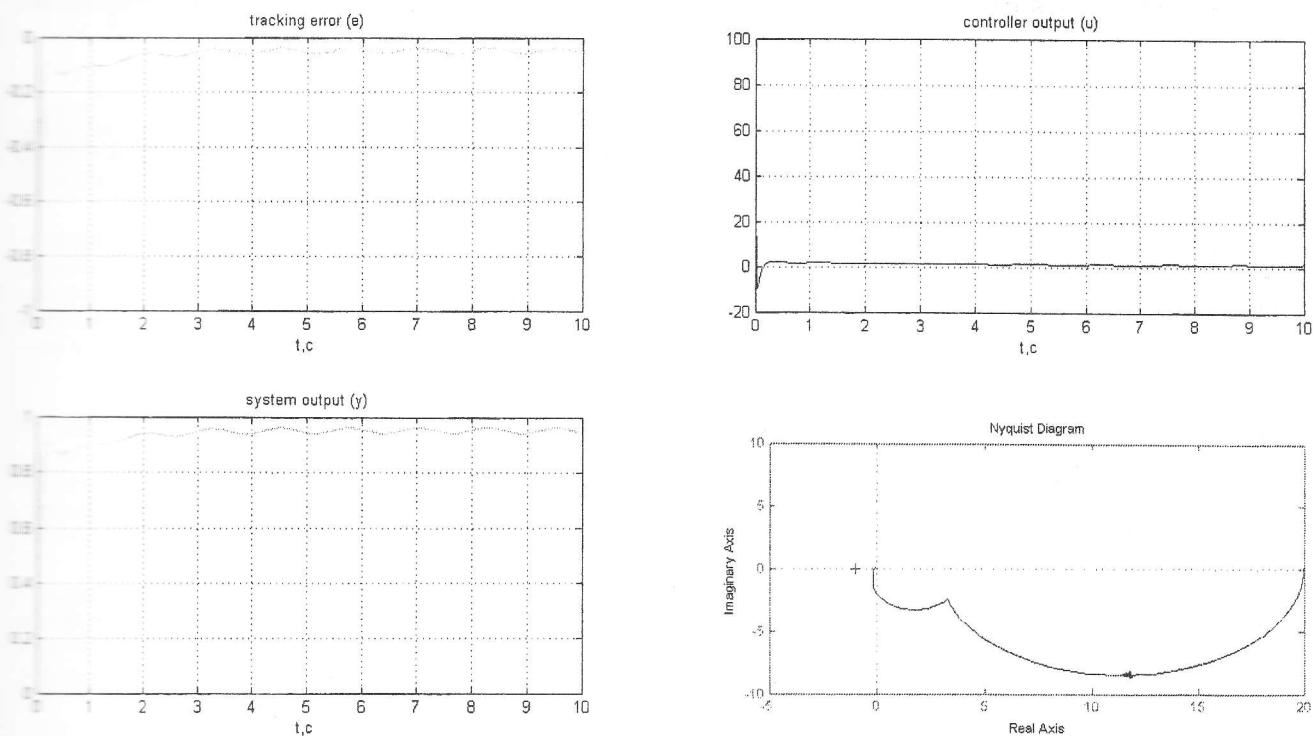


Рис. 1. Графические результаты выполнения программы синтеза регулятора

На рис. 1 показаны графики сигналов ошибки регулирования, выхода регулятора и выхода объекта, а также показан годограф Найквиста разомкнутой системы. По графику, изображающему выходной сигнал объекта $y(t)$ видно, что также выполняется требование к времени регулирования системы.

Литература

1. Основы автоматического регулирования / Под ред. В.В. Соловьевника. М.: Машгиз, 1954.
2. Летов А.М. Аналитическое конструирование регуляторов. I-IV // Автоматика и телемеханика. 1960. № 4. С. 436-441; № 5. С. 561-568; № 6. С. 661-665; 1961. № 4. С. 425-435.
3. Александров А.Г. Методы построения систем автоматического регулирования. М.: Физматлит, 2008.
4. Александров А.Г. К аналитическому синтезу регуляторов // Автоматика и телемеханика. 2010. № 6. С.3-19.
5. Александров А.Г. Синтез регуляторов по показателям точности и быстродействию. I // Автоматика и телемеханика. 2015. № 5. С. 27-42
6. Alexandrov A.G., Shatov D.V. Package "Automatica": New Opportunities / Preprints of the 2013 IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control (IFAC MIM '2013). Saint Petersburg, Russia: IFAC Publication, 2013. Р. 1838-1843.
7. Александров А.Г., Шатов Д.В. Развитие пакета "Автоматика" / Труды 14-й Международной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта» (CAD/CAM/PDM-2014, Москва). М.: ООО Аналитик, 2014. С. 37-41.
8. Александров А.Г., Шатов Д.В. Пакет «Автоматика»: директивы идентификации запаздывания и синтеза регуляторов одномерных систем / Труды 15-ой международной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта» (CAD/CAM/PDM-2015, Москва). М.: ООО Аналитик, 2015. С. 38-42.