

УДК 62–50

О.С. Козлов, канд. техн. наук, доцент,**Л.М. Скворцов, канд. техн. наук***Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия**E-mail: lm_skvo@rambler.ru***ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОГО ПИ-РЕГУЛЯТОРА С ЧАСТОТНОЙ НАСТРОЙКОЙ**

Рассматривается адаптивный ПИ-регулятор, построенный на основе интерполяционного метода с настройкой в одной точке комплексной частотной характеристики. Построение модели такого регулятора и ее исследование осуществляется в среде программного комплекса "Моделирование в технических устройствах" (ПК "МВТУ").

Интерполяционный метод синтеза систем управления основывается на расчете параметров регулятора исходя из условия совпадения передаточной функции проектируемой системы с передаточной функцией эталонной модели в заданных точках комплексной плоскости. Такой подход позволяет конструировать регуляторы невысокого порядка, обеспечивающие заданные динамические свойства системы управления. На основе интерполяционных условий можно составить уравнения относительно неизвестных параметров регулятора. Нахождение этих параметров в схемах настройки и адаптации сводится к получению оценок значений передаточной функции объекта в заданных точках комплексной плоскости. Схема получения таких оценок была предложена в [1] и использовалась при построении в ПК "МВТУ" [2] моделей адаптивных систем с простейшими регуляторами (ПИ, ПД, ПИД). Моделирование таких систем показало, что предложенные схемы адаптации обеспечивают заданную настройку системы управления при изменении параметров объекта в широких пределах.

Цель статьи – показать перспективность предложенного способа построения адаптивных систем, а также продемонстрировать некоторые возможности ПК "МВТУ" на примере исследования адаптивного ПИ-регулятора.

Пусть $K(s) = K_P + \frac{K_I}{s}$ – передаточная функция ПИ-регулятора, а $G(s)$ и $W_{\text{эт}}(s)$ – передаточные функции объекта и разомкнутой эталонной системы. Настройка параметров ПИ-регулятора осуществляется на основе интерполяционного условия

$$\left(K_P + \frac{K_I}{j\omega_c} \right) G(j\omega_c) = W_{\text{эт}}(j\omega_c), \quad (1)$$

где частота настройки выбрана равной частоте среза эталонной системы ω_c . Из (1) получаем

$$K_P = \operatorname{Re} \frac{W_{\text{эт}}(j\omega_c)}{G(j\omega_c)}, \quad K_I = \operatorname{Re} \frac{W_{\text{эт}}(j\omega_c) \cdot j\omega_c}{G(j\omega_c)}. \quad (2)$$

Таким образом, нахождение параметров регулятора сводится к оцениванию значений передаточных функций в заданной точке на мнимой оси. Схема оценивания на основе взвешенного метода наименьших квадратов (МНК) была предложена в [1]. Проведенные эксперименты показали, что такая схема адаптации обеспечивает стабилизацию системы при изменении параметров объекта, но для настройки в заданной точке частотной характеристики входное воздействие должно иметь достаточно широкий спектр. В противном случае, например, при медленно изменяющемся входном воздействии, система стабилизируется, но не всегда настраивается на эталонную модель.

Для устранения этого недостатка использовались два способа. Первый из них хорошо известен и заключается в подмешивании к сигналу ошибки пробного гармонического сигнала с частотой, равной частоте настройки. Этот сигнал не должен вносить существенного вклада в ошибку слежения, поэтому его амплитуда устанавливалась равной 5...10 % сигнала ошибки (применялась амплитудная модуляция). Моделирование в ПК "МВТУ" показало, что такой способ действительно обеспечивает не только стабилизацию, но и заданную настройку адаптивной системы при различных входных воздействиях.

Второй способ является новым и основан на предположении, что при определенных условиях в контуре адаптации могут возникать автоколебания с необходимой частотой. С помощью ПК "МВТУ" были исследованы различные варианты схемы адаптации, в результате удалось найти условия, при которых возникают автоколебания.

Структурная схема адаптивной системы с ПИ-регулятором, сформированная в ПК "МВТУ", показана на рисунке 1, где модели регулятора, объекта и устройства адаптации представляют собой макроблоки, имеющие внутреннюю структуру. Структурная схема устройства адаптации показана на

Начальные условия $Kp0$, $Ki0$, $v0$ и параметр β , а также некоторые другие параметры задаются в окне глобальных параметров модели.

В качестве примера рассмотрим объект с запаздыванием из [3] (эта статья доступна в Интернете по адресу <http://albalex.narod.ru/stat4n.html>). Уравнение объекта имеет вид:

$$T \dot{y}(t) + y(t) = ku(t - \tau) + f(t - \tau), \quad k = 3, \quad T = 5, \quad \tau = 1. \quad (5)$$

Задающее воздействие – ступенчатая функция

$$g(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0, \\ 0, & t < 0, \end{cases}$$

а внешнее возмущение имеет вид

$$f(t) = 0.05 \operatorname{sign}(\sin(2,1t)).$$

Коэффициент k скачком изменяется в моменты времени $t_1 = 314$ с, $t_2 = 942$ с, $t_3 = 1570$ с, принимая значения

$$k_1 = 5,1; \quad k_2 = 8,67; \quad k_3 = 14,7. \quad (6)$$

Требуется сформировать управление, при котором после окончания адаптации выполняется условие

$$|e(t)| = |g(t) - y(t)| \leq 0,015. \quad (7)$$

Для объекта с параметрами (5) выполнение такого условия обеспечивает ПИ-регулятор с коэффициентами $K_p = 1,2$, $K_I = 0,37$, при этом ошибка после затухания переходного процесса ($t > 16$ с) не превышает 0,01. Такая система имеет частоту среза $\omega_c = 0,75$ и запас по фазе $\Delta\varphi = 40^\circ$. Эти значения были заданы в качестве параметров эталонной модели (3), (4).

Время, в течение которого осуществляется адаптация, назовем периодом адаптации. Период адаптации начинается при нарушении условия (7), и заканчивается, если в течение 20 с условие (7) выполняется. К сигналу ошибки на входе регулятора в процессе адаптации добавляется гармонический испытательный сигнал $x(t) = 0,003 \sin(\omega_c t)$. Вне периода адаптации испытательный сигнал отключается, а параметры регулятора фиксируются. Модель в ПК "МВТУ" содержит также блоки, обеспечивающие в процессе моделирования расчет и отображение годографа Найквиста, запаса устойчивости по фазе и частоты среза адаптивной системы.

Моделирование адаптивной системы показало, что период адаптации после изменения параметра k объекта не превышает 80 с, а после окончания этого периода ошибка не превышает 0,01. Эти показатели сохраняются при изменении k в широких пределах, даже если система временно теряет устойчивость (например, при увеличении некоторых значений в (6) на несколько порядков). Отметим, что многие другие адаптивные регуляторы (в том числе и рассмотренный в [3]) не могут быть применены в такой ситуации, поскольку для их успешной работы необходимо, чтобы система сохраняла устойчивость при скачкообразном изменении параметров объекта.

В дальнейшем предполагается распространить предложенный подход к построению адаптивных систем на случай регуляторов более высоких порядков, а также многомерных регуляторов.

Библиографический список

1. Скворцов Л.М. Интерполяционный метод автоматической настройки регуляторов / Л.М. Скворцов // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. — 1998. — № 6. — С. 100–103.
2. Программный комплекс "Моделирование в технических устройствах" [Электронный ресурс] / О.С. Козлов [и др.] — Электрон. текстовые и граф. данные — Режим доступа: <http://model.exponenta.ru/mvtu/20050615.html>
3. Александров А.Г. Адаптивное управление объектом с запаздыванием // Аналитическая механика, устойчивость и управление движением. В 3 т.: Тр. IX Междунар. Четаевской конф., Иркутск, 12–14 июля 2007. — Иркутск, 2007. — Т. 3. — С. 6–13.

Поступила в редакцию 8.10.2008 г.