

АДАПТИВНЫЙ РЕГУЛЯТОР*

Приводятся структура и результаты экспериментального исследования частотного адаптивного регулятора ЧАР-25, который предназначен для управления объектом с неизвестными коэффициентами в описывающих его уравнениях, находящимся под воздействием неизвестного ограниченного внешнего возмущения. Цель управления — обеспечение заданного допуска на регулируемую переменную объекта.

Введение

Адаптивное управление развивается в нескольких направлениях, среди которых можно выделить прямые и непрямые методы, системы с эталонной моделью, метод рекуррентных целевых неравенств, метод наименьших квадратов и его вариации, и многие другие. Разные методы предполагают различные допущения о внешнем возмущении, действующем на объект. На практике большую часть ситуаций охватывает случай, когда целью управления является обеспечение заданного допуска на модуль регулируемой переменной, а внешнее возмущение — неизвестная ограниченная функция.

Первая реализация частотного адаптивного управления, использующего алгоритм, предложенный в [1], описана в работе [2]. Затем на основе не идентификационного алгоритма адаптивного управления [3] были разработаны адаптивные регуляторы ЧАР-5 [4] и ЧАР-6 [5], область применения которых была ограничена минимально-фазовыми объектами. Экспериментальное исследование ЧАР-6 [5] выявило высокую чувствительность системы к величине интервала дискретности. Чтобы избежать такой чувствительности, а также с целью расширения классов объектов (включающих не минимально-фазовые) был предложен [6] алгоритм идентификационного адаптивного управления, реализованный в регуляторе ЧАР-14 [7].

Последние 10 лет развития метода конечно-частотной идентификации и частотного адаптивного управления [8–11] позволили построить алгоритм самонастройки амплитуд гармоник испытательного сигнала и длительности адаптации [9], а также метод определения границ испытательных частот [8]. Это дает возможность адаптивного управления с существенно меньшими сведениями об объекте.

В работе [12] описан ЧАР-21, в котором реализованы многие из этих алгоритмов. При этом интервал дискретности измерения выхода объекта достаточно мал.

В настоящей работе результаты, полученные в [12], развиваются на случай заданного интервала дискретности, который может быть велик, а также проводятся экспериментальные исследования частотного адаптивного регулятора.

* Научный руководитель д.ф.-м.н. А.Г. Александров.

Назначение и область применения

НАЗНАЧЕНИЕ

Частотный адаптивный регулятор ЧАР-25 — это программа на языке C# для промышленного контроллера WinCon, снабженного аналого-цифровым (АЦП) и цифро-аналоговым (ЦАП) преобразователями для связи с реальным объектом управления. С помощью этой программы сигнал с измерительного устройства объекта преобразуется в управляющий сигнала так, чтобы выход объекта не превышал заданной величины.

Чтобы более точно описать цели управления и возможности ЧАР-25, рассмотрим асимптотически устойчивый объект, описываемый разностным уравнением:

$$y[k+n] + d_{n-1}y[k+n-1] + \dots + d_1y[k+1] + d_0y[k] = k_{n-1}u[k+n-1] + \dots + k_1u[k+1] + k_0u[k] + f(k), \quad k=0,1,2,\dots, \quad (1)$$

где $y(k)$ — измеряемый выход; $u(k)$ — управление, имеющее кусочно-постоянный вид; $f(k)$ — неизвестное ограниченное возмущение: $|f(k)| \leq f^*$, где f^* — заданное число. Коэффициенты d_i и k_j ($i=0, n-1, j=0, \gamma$) — неизвестные числа, n — известное число, k — номер такта.

Адаптивное управление объектом (1) формируется регулятором с кусочно-постоянными коэффициентами:

$$g_{n-1}^{[i]}u[k+n-1] + \dots + g_1^{[i]}u[k+1] + g_0^{[i]}u[k] = r_{n-1}^{[i]}(y[k+n-1] + \dots + v_{[i]}[k+n-1]) + r_1^{[i]}(y[k+1] + v_{[i]}[k+1]) + r_0^{[i]}(y[k] + v_{[i]}[k]), \quad i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где i — номер интервала адаптации ($i = \overline{1, N}$), $v_{[i]}(k)$ — испытательный сигнал.

По окончании адаптации регулятор имеет вид:

$$g_{n-1}u[k+n-1] + \dots + g_1u[k] + g_0u = r_{n-1}y[k+n-1] + \dots + r_1y[k+1] + r_0y[k], \quad (3)$$

и обеспечивает выполнение требования к точности (цель управления):

$$|y(k)| \leq y^*, \quad t \geq t_N, \quad (4)$$

где y^* — заданное число.

Предполагается, что существует регулятор (3), обеспечивающий достижение цели (4), когда коэффициенты объекта (1) известны.

Если после окончания процесса адаптации коэффициенты объекта (1) изменились достаточно сильно, так, что целевое неравенство (4) нарушилось, то процесс адаптации повторяется.

Измерительное устройство, формирующее сигнал $y(k)$, имеет заданный предел y_- и в процессе адаптивного управления выход объекта не должен превышать этой величины:

$$|y(k)| \leq y_-, \quad t \geq t_0. \quad (5)$$

Формируемый регулятором сигнал $u(t)$, который поступает на вход исполнительного устройства объекта, также не должен превышать заданного значения u_- :

$$|u(k)| \leq u_-.$$

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

ЧАР-25 используется в ситуациях, когда динамика объекта управления описывается линейным дифференциальным уравнением. Коэффициенты этого уравнения неизвестны, а о внешних возмущениях, действующих на объект, известно лишь, что оно ограничено известным числом (f^*).

Кроме того, должно быть известно следующее:

- a) порядок (n) дифференциального уравнения объекта;
- b) диапазон собственных частот объекта M .

Ограничение a) возможностей ЧАР-25 будет снято в последующих версиях ЧАР.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исходными данными для работы ЧАР-25 являются:

- a) требуемая точность управления — y^* ;
- b) граница внешнего возмущения — f^* ;
- c) предел измерений выхода объекта y_- ;
- d) предельное значение входа исполнительного устройства — u_- ;
- e) порядок (n) уравнения объекта и диапазон частот — M .

Структура

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА

На рис. 1 приведена структурная схема регулятора с объектом, совпадающая с [12].

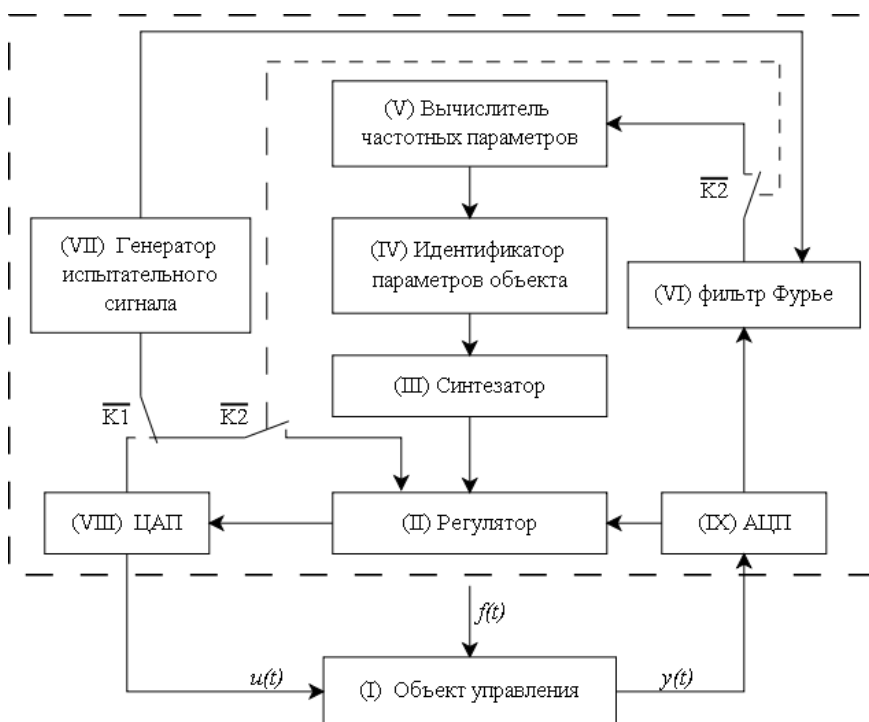


Рис. 1. Структурная схема ЧАР-25

ГЕНЕРАТОР ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СИГНАЛА

Генератор формирует функцию

$$u(k) = \sum_{i=1}^n \rho_i \sin(\omega_i kh), \quad (6)$$

где ρ_i — амплитуды испытательного сигнала, ω_i — его частота.

Самонастройка амплитуд осуществляется итерационным методом.

На каждой итерации проверяется требование (5) к выходу объекта. Если это требование выполнено — текущие амплитуды принимаются испытательными. Если же нет — текущие амплитуды уменьшаются в 2 раза.

Функция (6) после преобразования ЦАП (VIII) поступает в виде физического сигнала (напряжения) на объект управления (в этом случае ключ $\overline{K1}$ замкнут, а $\overline{K2}$ разомкнут) либо эта функция прикладывается к регулятору (II) (ключ $\overline{K2}$ замкнут, а $\overline{K1}$ разомкнут).

ВЫБОР ЧАСТОТ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СИГНАЛА

Определение испытательных частот начинается с определения нижней границы испытательных частот ω_l итерационным методом.

Верхняя граница испытательных частот объекта определяется как

$$\overline{\omega}_u = M \overline{\omega}_l$$

где M — заданный диапазон испытательных частот.

Далее определяются все n испытательных частот по формуле:

$$\lg \omega_k = \lg \overline{\omega}_l + (k-1) \frac{\lg \overline{\omega}_u - \lg \overline{\omega}_l}{n-1}, \quad k = \overline{1, n}. \quad (7)$$

ФИЛЬТР ФУРЬЕ

Фильтр Фурье (VI) — вычисляет оценки частотных параметров объекта, либо системы:

$$\begin{aligned} \widehat{\alpha}_i &= \alpha_i(\tau) = \frac{2}{\rho_i \tau} \sum_{k=1}^N y(kh) \sin \omega_i kh \\ \widehat{\beta}_i &= \beta_i(\tau) = \frac{2}{\rho_i \tau} \sum_{k=1}^N y(kh) \sin \omega_i kh, \quad i = \overline{1, n} \end{aligned} \quad (8)$$

Время фильтрации $\tau = Nh$ настраивается в процессе адаптации.

ИДЕНТИФИКАТОР

Идентификатор (IV) решает частотные уравнения:

$$k(e^{j\omega_i h}) - (\widehat{\alpha}_i + j\widehat{\beta}_i)d(e^{j\omega_i h}) = (\alpha_i + j\beta_i)(e^{j\omega_i h})^n, \quad i = \overline{1, n}, \quad (9)$$

где $k(z) = k_\gamma z_i^\gamma + \dots + k_0$, $d(z) = d_{n-1} z_i^{n-1} + \dots + d_1 z_i$ — полиномы объекта, и находит оценки коэффициентов объекта $\widehat{k}_i, \widehat{d}_i$, $i = \overline{0, \gamma}$.

СИНТЕЗАТОР

Синтезатор (III) находит коэффициенты регулятора (II), описываемого уравнением (3) так, чтобы выполнялись требования к точности регулирования (4). При этом используются оценки коэффициентов объекта.

В основе алгоритма синтезатора лежит решение задачи АКОР (LQ-оптимизации) с функционалом:

$$J = \sum \left\{ \begin{array}{l} x^T(k) Q x(k) + u^2(k) + \varepsilon_1^2 \left[\frac{u(k+1) - u(k)}{h} \right]^2 + \varepsilon_2^2 \left[\frac{u(k+2) - u(k+1)}{h} \right]^2 + \dots \\ + \varepsilon_\varphi^2 \left[\frac{u(k+\varphi) - u(k+\varphi-1)}{h} \right]^2 \end{array} \right\},$$

где $x(k)$ — вектор переменных состояния идентифицированного объекта (1),
 ε_i ($i = \overline{1, \psi}$) — достаточно малый коэффициент, определяемый по [13] из условия реализуемости передаточной функции регулятора,
 $Q = C^T q C$ — положительно-определенная матрица в которой коэффициент q определяется по формуле:

$$q^2 = \frac{f^{*2}}{y^{*2}}.$$

C — вектор идентифицированного объекта (1), записанного в форме пространства состояний ($y = Cx + Du$).

Функционал минимизируется, и результат находится путем решения уравнения Риккати и прямого алгоритма восстановления.

Стенд для экспериментальных исследований

СТРУКТУРА СТЕНДА

Для экспериментального исследования ЧАР-25 был разработан стенд ФМ-2. Он состоит из промышленного контроллера WinCon W-8341 [14] содержащего 12-битные ЦАП и АЦП, и IBM-совместимого одноплатного промышленного компьютера Athena со встроенными ЦАП и АЦП. ЧАР-ПИД-1 работает на промышленном контроллере WinCon, а объект имитируется промышленным компьютером Athena [15].

ИМИТАТОР ОБЪЕКТА

Имитатор объекта — это программа на языке C++ для промышленного компьютера Athena, имитирующая объект со следующей передаточной функцией:

$$W_{os}(s) = \frac{(s+1)(0.5s+1)}{(2s+1)(3s+1)(1.5s+1)} = \frac{0.5s^2 + 1.5s + 1}{9s^3 + 13.5s^2 + 6.5s + 1}. \quad (11)$$

Экспериментальное исследование

Исходными данными для работы ЧАР-25 являлись:

- требуемая точность управления — $y^* = 0.016$;
- граница внешнего возмущения — $f^* = 1$;
- граница измерения выхода объекта $y_- = 1.5$;
- предельное значение входа объекта $u_- = 3$;
- порядок объекта $n = 3$.

Внешнее возмущение имеет вид: $f(t) = \text{sign}\{\sin(t)\}$. Выход объекта (без регулятора), возбужденный этим возмущением, приводится на рис. 2.

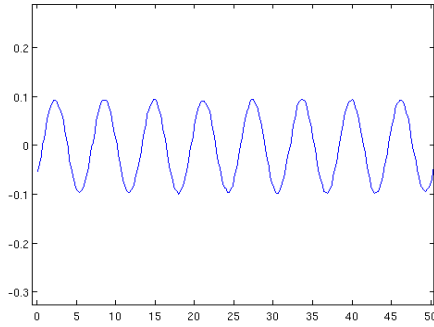


Рис. 2. Реакция объекта на возмущение

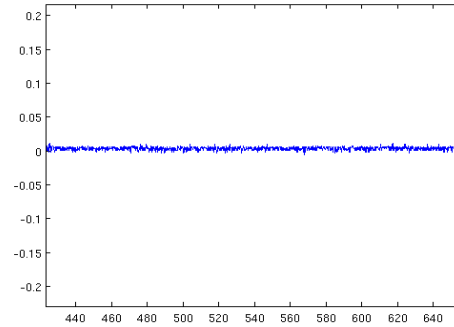


Рис. 3. Выход объекта с регулятором при действии внешних возмущений

В результате адаптации длительностью 952 секунды получен дискретный регулятор (3) с передаточной функцией:

$$W_{REG}(z) = \frac{-506.6996z^2 + 992.8469z - 486.5375}{z^2 - 1.9793z + 0.9794}. \quad (12)$$

На рис. 3 приведен график выхода объекта с этим регулятором. Сравнение графиков на рис. 2 и рис. 3 показывает высокую эффективность регулятора. Ошибка $|y(t)| \leq 0.016$ уменьшилась более чем в 8 раз.

ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АДАПТАЦИИ

Испытательные частоты определялись в процессе адаптации и имели следующие значения:

$$\omega_1 = 0.168, \quad \omega_2 = 0.335, \quad \omega_3 = 1.173.$$

В процессе самонастройки амплитуд испытательного сигнала были получены следующие значения:

$$\rho_1 = 0.15, \quad \rho_2 = 0.3, \quad \rho_3 = 1.05.$$

На рис. 4 приведен график самонастройки испытательного сигнала.

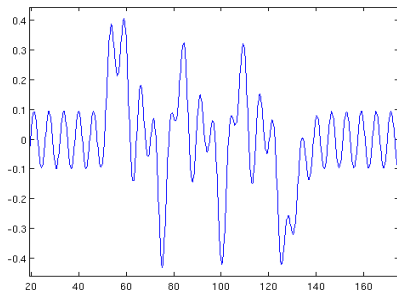


Рис. 4. График выхода объекта при самонастройке испытательного сигнала

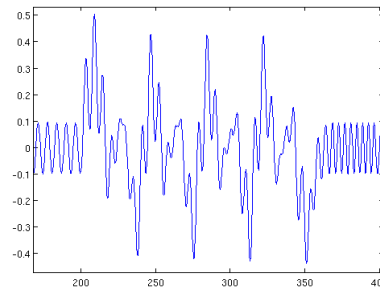


Рис. 5. График выхода объекта при его идентификации

На рис. 5 приведен график выхода объекта при его идентификации. Длительность идентификации автоматически настраивалась в процессе работы ЧАР-25. В результате идентификации объекта была найдена дискретная передаточная функция, имеющая следующий непрерывный аналог:

$$W_{об}(s) = \frac{1.157s^2 + 3.176s + 0.969}{21.69s^3 + 23.190s^2 + 8.176s + 1}.$$

Заключение

В результате практического исследования частотного адаптивного регулятора была продемонстрирована высокая эффективность идентификации объекта управления. Полученный регулятор (12) выполняет цель регулирования (4) при ограниченном внешнем возмущении, действующем на объект. Дальнейшие исследования будут направлены на снятие ограничения знания порядка объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Александров А.Г.** Частотный алгоритм адаптивного управления // Межвузовский научный сборник «Аналитические методы синтеза регуляторов», Саратов: Саратовский политехнический институт, 1984.
2. **Трефилов П.А.** Частотный адаптивный регулятор ЧАР-1. // Межвузовский научный сборник «Аналитические методы синтеза регуляторов», Саратов: Саратовский политехнический институт, 1984.
3. **Александров А.Г.** Частотное адаптивное управление. ч. I, II. // *АиТ*. 1994. № 12. С. 93-104, *АиТ*. 1995. № 1. С. 117-128.
4. **Сперанский К.Р.** Экспериментальное исследование частотного адаптивного регулятора ЧАР-5 // Частотное управление, М.: Московский институт стали и сплавов. Научные труды, 1994. С. 99-122.
5. **Александров В.А., Орлов Ю.Ф.** Проблемы реализации частотного адаптивного регулятора // Частотное управление, М.: Московский институт стали и сплавов. Научные труды, 1994. С. 123-133.
6. **Александров А.Г.** Адаптивное управление на основе идентификации частотных характеристик // *Известия РАН «Теория и системы управления»*. 1995. №2. С. 63-67.
7. **Александров А.Г., Богачев А.С.** Частотный адаптивный регулятор // *Материалы III международной научно-технической конференции «Микропроцессорные системы автоматизи», г. Новосибирск, 19-24 февраля 1996 г.*
8. **Александров А.Г.** Конечно-частотная идентификация: граница частот испытательного сигнала // *АиТ*. 2001. Т. 62. №11.
9. **Александров А.Г.** Конечная частотная идентификация: самонастройка испытательного сигнала // *Сб. научных трудов «Робастное управление и частотная идентификация»*. Электросталь, ЭПИ МИСиС. 2004. С. 67-97.
10. **Alexandrov A.G.** "Finite-frequency identification: selftuning of test signal". // 16th world congress of IFAC, Preprints, Praha, 2005.
11. **Alexandrov A.G., Orlov Ju. F.** "Frequency adaptive control of multivariable plants". // 15th world congress of IFAC, Preprints, Barcelona, 2002.
12. **Частотный адаптивный регулятор ЧАР-21.** Труды международной конференции "ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ И ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ", Москва, 2006, ИПУ, CD-ROM ISBN 5-201-14984-7, С. 2361-2381, (соавтор Д. Г. Кариков)
13. **Александров А.Г.** Синтез регуляторов много мерных систем. // М.: Машиностроение, 1986.
14. **W-8x4x Hardware Specification**, 2009. [online]. URL: http://www.icpdas.com/products/PAC/wincon-8000/8x4x_hardware_specification.htm. [Date visited: 01 February 2009].
15. **DIAMOND SYSTEMS CORPORATION**, 2009. [online]. URL: <http://www.diamondsystems.com/products/athena>. [Date visited: 01 February 2009].