

АДАПТИВНЫЙ РЕГУЛЯТОР ДВУМЕРНОГО ОБЪЕКТА: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Александров А.Г., Резков И.Г., Шатов Д.В.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН
alex7@ipu.ru, rezkov@ipu.ru

1. Введение

Адаптивное управление развивается в нескольких направлениях.

Наибольшее число реальных 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 этого неидентификационного алгоритма адаптивного управления были разработаны адаптивные регуляторы, но их область применения была ограничена минимально-фазовыми объектами. Экспериментальные исследования выявили высокую чувствительность системы к интервалу периода дискретности. Чтобы избежать такой чувствительности, а также с целью расширения классов объектов (включающих не минимально-фазовые) был предложен [3] алгоритм идентификационного адаптивного управления, реализованного в регуляторе [4].

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

В работе [5] описан регулятор ЧАР-21, в котором реализованы многие из этих алгоритмов. При этом интервал дискретности измерения выхода объекта достаточно мал.

В работе [6] результаты, полученные в [5], развиваются на случай заданного интервала дискретности.

В настоящей же работе исследуется адаптивный регулятор двумерного объекта [7, 8].

2. Постановка задачи

Рассмотрим систему управления, описываемую дифференциальными уравнениями:

$$(1) \quad \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Mf(t), \quad y(t) = Cx(t);$$

$$(2) \quad \dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + B_c y(t), \quad u(t) = C_c x_c(t);$$

где $x(t) \in R^n$ — вектор состояния объекта (1), $u(t) \in R^2$ — вектор управления, $v(t) \in R^2$ — вектор испытательных воздействий, $y(t) \in R^2$ — вектор измеряемых переменных, $x_c(t) \in R^{n_c}$ — вектор состояния регулятора (2), $f(t) \in R^2$ — вектор неизмеряемых внешних возмущений — ограниченных полигармонических функций

$$(3) \quad f_j(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_{jk} \sin(\omega_k^f t + \varphi_{jk}), \quad (j = \overline{1,2}),$$

частоты ω_k^f и фазы φ_{jk} ($j = \overline{1,2}, k = \overline{1, \infty}$) которых — неизвестные числа, а амплитуды f_{jk} удовлетворяют условиям

$$(4) \quad \sum_{k=1}^{\infty} f_{jk}^2 \leq f_j^{*2}, \quad (j = \overline{1,2}),$$

в которых f_j^* ($j = \overline{1,2}$) — заданные числа. A, B и C — неизвестные матрицы чисел объекта, а A_c, B_c и C_c — искомые матрицы чисел регулятора.

Требуется найти матрицы регулятора (2) так, чтобы, начиная с некоторого момента времени, выполнялись следующие условия:

$$(5) \quad |y_i(t)| < y_i^*; \quad (i = \overline{1,2}),$$

где y_i^* заданные числа.

3. Адаптивный регулятор

Структурная схема адаптивного регулятора, обеспечивающего требование (5), приведена на рис. 1. Опишем назначение блоков структурной схемы.

Генератор испытательного сигнала вырабатывает сигналы, необходимые для идентификации объекта:

$$(6) \quad v_i(t) = \sum_{k=1}^{\gamma} \rho_{ik} \sin(\omega_{ik} t), \quad (i = \overline{1,2}),$$

где ρ_{ik} и ω_{ik} — амплитуды и частоты испытательного сигнала, $\rho_{ik}, \omega_{ik}, (i = \overline{1,2}, k = \overline{1, \gamma}), \gamma$ — заданные числа.

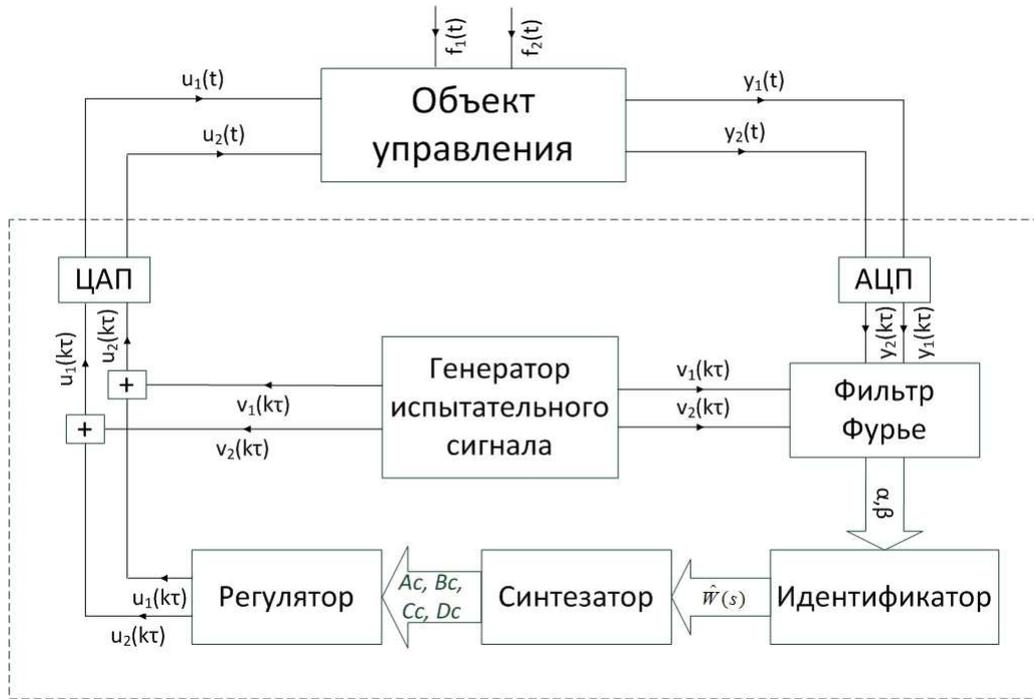


Рис 1. Структурная схема адаптивного регулятора

Фильтр Фурье вычисляет оценки частотных параметров объекта. Вычисляются значения преобразования Фурье для сигналов по входам и выходам объекта

(7)

$$\alpha_{yij}^{\omega_{jk}} = \sum_{q=N_0}^N y_j(qh) \sin(\omega_{jk} \cdot qh), \quad \alpha_{uij}^{\omega_{jk}} = \sum_{q=N_0}^N u_j(qh) \sin(\omega_{jk} \cdot qh),$$

$$\beta_{yij}^{\omega_{jk}} = \sum_{q=N_0}^N y_j(qh) \cos(\omega_{jk} \cdot qh), \quad \beta_{uij}^{\omega_{jk}} = \sum_{q=N_0}^N u_j(qh) \cos(\omega_{jk} \cdot qh),$$

($i = \overline{1, 2}; j = \overline{1, 2}; k = \overline{1, \gamma}$)

где h — интервал дискретизации, N — число измерений входов и выходов, N_0 — заданное число.

По этим значениям вычисляются оценки частотных параметров объекта:

$$\alpha_{ij}^{\omega_k} = \frac{\alpha_{yij}^{\omega_k} \alpha_{uij}^{\omega_k} + \beta_{yij}^{\omega_k} \beta_{uij}^{\omega_k}}{\alpha_{uij}^{\omega_k} \alpha_{uij}^{\omega_k} + \beta_{uij}^{\omega_k} \beta_{uij}^{\omega_k}},$$

$$\beta_{ij}^{\omega_k} = \frac{-\alpha_{yij}^{\omega_k} \beta_{uij}^{\omega_k} + \beta_{yij}^{\omega_k} \alpha_{uij}^{\omega_k}}{\alpha_{uij}^{\omega_k} \alpha_{uij}^{\omega_k} + \beta_{uij}^{\omega_k} \beta_{uij}^{\omega_k}},$$

($i = \overline{1, 2}; j = \overline{1, 2}; k = \overline{1, \gamma}$)

Идентификатор решает частотные уравнения:

(9)

$$\sum_{l=0}^m (j\omega_{jk})^l \hat{b}_{ij}^{[l]} - (\alpha_{ij}^{\omega_{jk}} + j\beta_{ij}^{\omega_{jk}}) \sum_{t=0}^{n-1} (j\omega_{jk})^t \hat{d}_{ij}^{[t]} = (\alpha_{ij}^{\omega_{jk}} + j\beta_{ij}^{\omega_{jk}}) (j\omega_{jk})^n, \quad (i = \overline{1, 2}, j = \overline{1, 2}, k = \overline{1, \gamma}),$$

где $\hat{b}_{ij}^{[l]}, \hat{d}_{ij}^{[t]}$, ($i = \overline{1, 2}, j = \overline{1, 2}, l = \overline{1, m}, t = \overline{1, n}$) — оценки коэффициентов передаточной матрицы объекта (1):

$$(10) \quad y(t) = W_u(s) \cdot u(t) + W_f(s) \cdot f(t),$$

где

$$(11) \quad W_u(s) = \begin{pmatrix} w_{11}(s) & w_{12}(s) \\ w_{21}(s) & w_{22}(s) \end{pmatrix} \text{ и } W_f(s) = \begin{pmatrix} w_{f_1}(s) \\ w_{f_2}(s) \end{pmatrix}.$$

$$(12) \quad w_{11}(s) = \frac{b_{11}^{[m_{11}]} s^{m_{11}} + \dots + b_{11}^{[1]} s + b_{11}^{[0]}}{d_{11}^{[n_{11}]} s^{n_{11}} + \dots + d_{11}^{[1]} s + d_{11}^{[0]}}, \quad w_{12}(s) = \frac{b_{12}^{[m_{12}]} s^{\gamma_{12}} + \dots + b_{12}^{[1]} s + b_{12}^{[0]}}{d_{12}^{[n_{12}]} s^{n_{12}} + \dots + d_{12}^{[1]} s + d_{12}^{[0]}},$$

$$(13) \quad w_{21}(s) = \frac{b_{21}^{[m_{21}]} s^{m_{21}} + \dots + b_{21}^{[1]} s + b_{21}^{[0]}}{d_{21}^{[n_{21}]} s^{n_{21}} + \dots + d_{21}^{[1]} s + d_{21}^{[0]}}, \quad w_{22}(s) = \frac{b_{22}^{[m_{22}]} s^{m_{22}} + \dots + b_{22}^{[1]} s + b_{22}^{[0]}}{d_{22}^{[n_{22}]} s^{n_{22}} + \dots + d_{22}^{[1]} s + d_{22}^{[0]}}$$

Синтезатор вычисляет матрицы регулятора (2), обеспечивающего требования к точности (5), путем минимизации функционала:

$$(14) \quad J_\varepsilon = \int_0^\infty [y^T Q^{(0)} y + \varepsilon_1^{[0]} u_1^2 + \varepsilon_1^{[1]} \dot{u}_1^2 + \varepsilon_1^{[\gamma_1]} u_1^{(\gamma_1)^2} + \varepsilon_2^{[0]} u_2^2 + \varepsilon_2^{[1]} \dot{u}_2^2 + \dots + \varepsilon_2^{[\gamma_2]} u_2^{(\gamma_2)^2}] dt,$$

где $Q^{(0)} = \text{diag}[q_{11} \ q_{22}]$, $q_{ii} = \left(\frac{f_i^*}{y_i^*} \right)^2$, $(i = \overline{1, 2})$, ε_i^j , $(i = \overline{1, 2})$, $(j = \overline{1, \gamma_1}$ или $j = \overline{1, \gamma_2})$, —

достаточно малые заданные числа, γ_1 и γ_2 — заданные числа, обеспечивающие реализуемость регулятора.

4. Экспериментальные исследования

Для экспериментального исследования регулятора был разработан испытательный стенд. Он состоит из промышленного контроллера WinPAC W-8441 [9], содержащего 14-битные ЦАП и АЦП, и IBM-совместимого одноплатного промышленного компьютера Athena [10] со встроенными ЦАП разрядностью 12 бит и АЦП разрядностью 16 бит. Регулятор работает на контроллере WinPAC, а объект имитируется промышленным компьютером Athena.

При экспериментальных исследованиях передаточные матрицы объекта имели вид:

$$y(t) = \begin{pmatrix} \frac{0.4s+1}{0.2s^3+1.24s^2+5.24s+1} & \frac{3}{4s+1} \\ \frac{4}{0.1s+1} & \frac{6}{3s^2+4s+1} \end{pmatrix} u(t) + \begin{pmatrix} \frac{0.4s+1}{0.2s^3+1.24s^2+5.24s+1} \\ \frac{6}{3s^2+4s+1} \end{pmatrix} f(t).$$

Внешнее возмущение $f_1(t) = f_2(t) = \sin(0,25t)$. Требования к точности $y_1^* = y_2^* = 0,5$, границы внешних возмущений $f_1^* = f_2^* = 1,0$.

Испытательный сигнал имел вид:

$$u_1(t) = 0.1 \sin(0.2t) + 0.3 \sin(4t) + 0.3 \sin(8t),$$

$$u_2(t) = 0.1 \sin(0.1t) + 0.3 \sin(3t) + 0.3 \sin(7t).$$

В результате адаптации получен регулятор, обеспечивающий требуемую точность; соответствующие графики выходов объекта приведены на рис. 2.

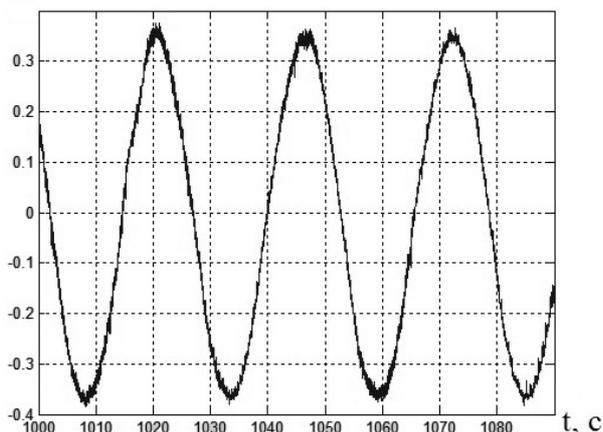
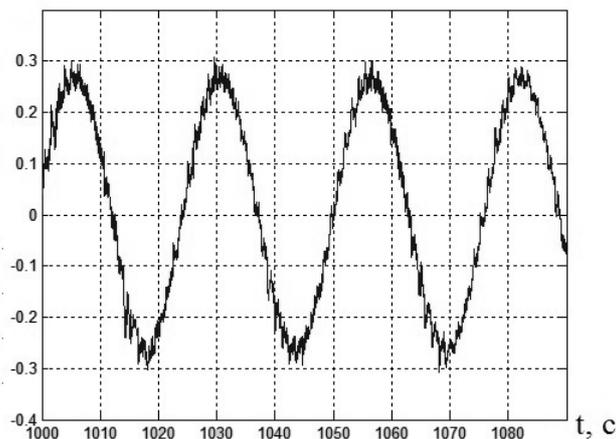
U_{Y1}, B  U_{Y2}, B 

Рис 2. Выхода объекта, замкнутого адаптивным регулятором

На рис. 2 U_{Y1} и U_{Y2} — соответственно напряжение на первом и втором выходе объекта. Нетрудно видеть, что требования к точности выполняются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

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. Адаптивное управление на основе идентификации частотных характеристик // Известия РАН «Теория и системы управления». 1995. №2. С. 63-67.
4. Александров А. Г., Богачев А. С. Частотный адаптивный регулятор // Материалы III международной научно-технической конференции «Микропроцессорные системы автоматики», г. Новосибирск, 19-24 февраля 1996 г.
5. Александров А. Г., Кариков Д. Г. Частотный адаптивный регулятор ЧАР-21. Труды международной конференции «ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ И ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ». Москва. 2006. ИПУ. CD-ROM ISBN 5-201-14984-7. Стр. 2361-2381.
6. Александров А. Г., Кариков Д. Г., Курицина Е. Ю. Частотный адаптивный регулятор с заданным интервалом дискретности. Труды международной конференции «ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ», Москва, 2007, ИПУ. CD-ROM, ISBN 5-201-14992-8, стр.655-668.
7. Александров А. Г., Орлов Ю. Ф. Частотное адаптивное управление многомерными объектами // АиТ, 2006. Т. 67. 7. С. 104-119.
8. Александров А. Г., Орлов Ю. Ф. Частотное адаптивное управление многорежимными объектами. Четвертая Международная конференция по проблемам управления. МКПУ' 09, Сборник трудов, Москва, 26-30 января, 2009, стр. 537-555. CD-ROM ISBN-978-5-91450-026-6.
9. <http://www.icpdas.com/products/PAC/winpac/wp-8x41.htm>
10. <http://www.diamondsystems.com/products/athena>