

А. А. БОБЦОВ, А. А. ВЕДЯКОВ, С. А. КОЛЮБИН, А. А. ПЫРКИН

ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПО ВЫХОДУ С КОМПЕНСАЦИЕЙ НЕИЗВЕСТНОГО МУЛЬТИСИНУСОИДАЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ*

Предлагается способ решения задачи управления по выходу линейным параметрически неопределенным объектом с неточно заданной относительной степенью, подверженным влиянию внешнего неизвестного мультисинусоидального возмущающего воздействия. Решение данной задачи найдено в классе гибридных алгоритмов адаптации, включающих в себя каналы стабилизации и идентификации параметров возмущающего воздействия.

Ключевые слова: гибридное управление, управление в условиях неопределенности, компенсация возмущения.

Введение. Настоящая статья посвящена анализу и синтезу методов управления параметрически неопределенными объектами в условиях действия внешних неизмеряемых возмущений. В работе [1] рассматривался объект управления вида

$$a(p)y(t) = b(p)[u(t) + \bar{\delta}(t)],$$

подверженный влиянию неизмеряемого возмущающего воздействия $\bar{\delta}(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$. Допускалось, что все параметры объекта и возмущающего воздействия неизвестны, но точно задана относительная степень. С использованием только измерений выходной переменной $y(t)$ был синтезирован гибридный регулятор, в котором комбинируются методы, приведенные в работах [2—7]. В настоящей статье, в отличие от работ [1, 8—14], предлагается подход, позволяющий парировать мультисинусоидальное возмущающее воздействие с неизвестными амплитудами, фазами и частотами, причем делать это в условиях полной параметрической неопределенности объекта управления и при любой относительной степени.

Постановка задачи. Как и в статье [1], рассмотрим объект управления вида

$$a(p)y(t) = b(p)[u(t) + \delta(t)], \quad (1)$$

где $p = d/dt$ — оператор дифференцирования, $y(t)$ — выход объекта, $u(t)$ — сигнал управления, параметры полиномов $a(p) = p^n + a_{n-1}p^{n-1} + a_{n-2}p^{n-2} + \dots + a_0$ и

$b(p) = b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + b_{m-2} p^{m-2} + \dots + b_0$ — неизвестные числа, а $\delta(t) = \sum_{i=1}^r A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$ —

возмущающее воздействие с неизвестными параметрами A_1, \dots, A_r , $\omega_1, \dots, \omega_r$ и $\varphi_1, \dots, \varphi_r$.

* Работа поддержана федеральной целевой программой „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы“ (государственный контракт № 11.519.11.4007).

Цель управления: требуется найти такой сигнал $u(t)$, чтобы было выполнено условие

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 0. \quad (2)$$

Данную задачу будем решать при следующих допущениях.

Допущение 1. Полином $b(p)$ гурвицев и коэффициент $b_0 > 0$.

Допущение 2. Известно максимальное значение относительной степени ρ_{\max} , но не сама относительная степень $\rho = n - m$.

Допущение 3. Известно число r , т.е. количество синусоид в сигнале $\delta(t)$.

Допущение 4. Полином $b(p)$ не имеет корней $\pm j\omega_i$ ($j = \sqrt{-1}$ и $i = \overline{1, r}$).

Основной результат. Как и в [1], сначала будем рассматривать вспомогательный результат, предполагая, что параметры ω_i возмущающего воздействия $\delta(t)$ известны. Используя результат [1, 15], выберем закон управления $u(t)$ в виде

$$u(t) = -k \frac{\alpha(p)(p+1)^{2r}}{(Tp+1)^{\rho_{\max}-1}(p^2 + \omega_i^2)^r} \xi_1(t), \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\xi}_1 &= \sigma \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 &= \sigma \xi_3, \\ &\dots \\ \dot{\xi}_{\rho_{\max}-1} &= \sigma(-k_1 \xi_1 - k_2 \xi_2 - \dots - k_{\rho_{\max}-1} \xi_{\rho_{\max}-1} + k_1 y), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где число $k > 0$ и полином $\alpha(p)$ степени $(\rho_{\max} - 1)$ выбираются так, чтобы передаточная функция

$$H(p) = \frac{\alpha(p)b(p)}{a(p)(p^2 + \omega_i^2)^r (Tp+1)^\gamma + k\alpha(p)(p+1)^{2r} b(p)}$$

была строго вещественно положительной, $\gamma = \rho_{\max} - \rho > 0$, постоянная времени T апериодического звена должна быть достаточно малой величиной, $\sigma > T^{-1} > k$. Коэффициенты k_i рассчитываются из требований асимптотической устойчивости системы (4) при нулевом входе $y(t)$.

Отличительной особенностью регулятора (3) от предложенного в [15] является использование слагаемого $(p+1)^{2r}/(p^2 + \omega_i^2)^r$, которое представляет собой встраиваемую модель возмущающего воздействия $\delta(t)$. Это слагаемое в случае известных параметров $\omega_1, \dots, \omega_r$ парировует возмущающее воздействие $\delta(t)$. Если параметры $\omega_1, \dots, \omega_r$ неизвестны, то следуя [1], будем использовать итеративный алгоритм адаптации вида

$$\begin{aligned} u(t) &= -k \frac{\alpha(p)(p+1)^{2r}}{(Tp+1)^{\rho_{\max}-1}(p^2 + \hat{\omega}_i^2)^r} \xi_1(t) = \\ &= -k \frac{\alpha(p)(p+1)^{2r}}{(Tp+1)^{\rho_{\max}-1}(p^{2r} + \hat{\theta}_r p^{2(r-2)} + \dots + \hat{\theta}_1)} \xi_1(t), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_r$ — оценки неизвестных параметров полинома

$$\mathfrak{Z}(p) = p^{2r} + \theta_r p^{2(r-2)} + \dots + \theta_1 = (p^2 + \omega_i^2)^r, \quad i = \overline{1, r}.$$

Идентификацию неизвестных параметров $\theta_1, \dots, \theta_r$ полинома $\mathfrak{Z}(p)$ будем осуществлять в несколько этапов. Сначала подставим в выражение (5) некоторые номинальные значения $\hat{\theta}_1(0), \dots, \hat{\theta}_r(0)$ и зафиксируем их. Поскольку рассматриваемая система является линейной и

асимптотически устойчивой, то выходная переменная $y(t)$ будет являться мультисинусоидальной функцией с частотами $\omega_1, \dots, \omega_r$ (см., например, [16]). Для идентификации параметров $\theta_1, \dots, \theta_r$ воспользуемся схемами идентификации, приведенными в работах [6, 7].

Введем линейный фильтр вида

$$\zeta(t) = \frac{\gamma_0^{2r}}{(p + \gamma_0)^{2r}} y(t),$$

где $\gamma_0 > 0$.

Для идентификации параметров полинома $\vartheta(p) = p^{2r} + \theta_r p^{2(r-2)} + \dots + \theta_1$ используем следующий алгоритм:

$$\hat{\Theta}(t) = \chi(t) + k_a \Omega(t) \zeta^{(2r)}(t), \quad (6)$$

$$\dot{\chi}(t) = -k_a \Omega(t) \Omega^T(t) \hat{\Theta}(t) \zeta^{(2r)}(t) - k_a \dot{\Omega}(t) \zeta^{(2r)}(t), \quad (7)$$

где $\hat{\Theta}^T = [\hat{\theta}_1 \dots \hat{\theta}_{r-1} \hat{\theta}_r]$ — оценка вектора неизвестных параметров.

После того как истинные значения параметров полинома $\vartheta(p) = (p^2 + \omega_i^2)^r$ будут найдены, подставим их в закон управления (5) вместо $\hat{\theta}_1(0), \dots, \hat{\theta}_r(0)$. При выборе момента времени для подстановки значений $\hat{\Theta}^T$ из алгоритма идентификации (6)—(7) в уравнение (5) воспользуемся итеративной процедурой идентификации, аналогичной [1].

На первом шаге в уравнение (5) подставим значение $\hat{\theta}_1(0), \dots, \hat{\theta}_r(0)$. Система работает с данными значениями в течение некоторого времени до определенного момента t_1 . Далее в момент t_1 из алгоритма идентификации (6), (7) возьмем обновленное значение $\hat{\theta}_1(t_1), \dots, \hat{\theta}_r(t_1)$ и подставим в уравнение (5). Далее процедура итеративно повторяется.

Заключение. В развитие результата работы [1] для случая, когда относительная степень объекта управления известна неточно, а возмущающее воздействие представляет собой неизмеряемый мультисинусоидальный сигнал с неизвестными параметрами, предложен модифицированный гибридный алгоритм управления по выходу вида (5). Закон управления при выполнении указанных допущений обеспечивает достижение цели управления (2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобцов А. А., Колюбин С. А., Кремлев А. С., Пыркин А. А. Итеративный алгоритм адаптивного управления по выходу с полной компенсацией неизвестного синусоидального возмущения // *АиТ*. 2012. № 8. С. 64—75.
2. Бобцов А. А., Николаев Н. А. Синтез управления нелинейными системами с функциональными и параметрическими неопределенностями на основе теоремы Фрадкова // *АиТ*. 2005. № 1. С. 118—129. (Bobtsov A. A., Nikolaev N. A. Fradkov theorem-based design of the control of nonlinear systems with functional and parametric uncertainties // *Automation and Remote Control*. 2005. Vol. 66, N 1. P. 108—118).
3. Бобцов А. А. Алгоритм компенсации неконтролируемого возмущения в задаче стабилизации выходной переменной линейного объекта с неизвестными параметрами // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2003. Т. 46, № 1. С. 22—27.
4. Бобцов А. А., Николаев Н. А. Синтез закона управления для стабилизации нелинейной системы по измерениям выхода с компенсацией неизвестного возмущения // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 2005. № 5. С. 5—11.
5. Бобцов А. А. Алгоритм робастного управления в задаче слежения за командным сигналом с компенсацией паразитного эффекта внешнего неограниченного возмущения // *АиТ*. 2005. № 8. С. 108—117. (Bobtsov A. A. A Robust Control Algorithm for Tracking the Command Signal with Compensation for the Parasitic Effect of External Unbounded Disturbances // *Automation and Remote Control*. 2005. Vol. 66, N 8. P. 1287—1295).

6. *Aranovskiy S., Bobtsov A., Kremlev A., Nikolaev N. et al.* Identification of frequency of biased harmonic signal // *Europ. J. of Control.* 2010. N 2. P. 129—139.
7. *Пыркин А. А.* Адаптивный алгоритм компенсации параметрически неопределенного смещенного гармонического возмущения для линейного объекта с запаздыванием в канале управления // *АиТ.* 2010. № 8. С. 62—78. (*Pyркиn A. A.* Adaptive algorithm to compensate parametrically uncertain biased disturbance of a linear plant with delay in the control channel // *Automation and Remote Control.* 2010. Vol. 71, N 8. P. 1562—1577).
8. *Bodson M., Douglas S. C.* Adaptive algorithms for the rejection of periodic disturbances with unknown frequencies // *Automatica.* 1997. Vol. 33. P. 2213—2221.
9. *Marino R., Santosuosso G. L., Tomei P.* Robust adaptive compensation of biased sinusoidal disturbances with unknown frequency // *Automatica.* 2003. Vol. 39. P. 1755—1761.
10. *Marino R., Tomei R.* Output Regulation for Linear Minimum Phase Systems with Unknown Order Exosystem // *IEEE Trans. on Automatic Control.* 2007. Vol. 52. P. 2000—2005.
11. *Бобцов А. А.* Алгоритм управления по выходу с компенсацией гармонического возмущения со смещением // *АиТ.* 2008. № 8. С. 25—32 (*Bobtsov A. A.* Output control algorithm with the compensation of biased harmonic disturbances // *Automation and Remote Control.* 2008. Vol. 69, N 8. P. 1289—1296).
12. *Бобцов А. А.* Адаптивное управление по выходу с компенсацией гармонического смещенного возмущения // *Изв. РАН. Теория и системы управления.* 2009. № 1. С. 45—48. (*Bobtsov A. A.* Adaptive output control with compensation of biased harmonic disturbance // *J. of Computer and Syst. Sc. Int.* 2009. Vol. 48, N 1. P. 41—44).
13. *Бобцов А. А., Пыркин А. А.* Компенсация неизвестного синусоидального возмущения для линейного объекта любой относительной степени // *АиТ.* 2009. № 3. С. 114—122 (*Bobtsov A. A., Pyркиn A. A.* Compensation of unknown sinusoidal disturbances in linear plants of arbitrary relative degree // *Automation and Remote Control.* 2009. Vol. 70, N 3. P. 449—456).
14. *Бобцов А. А., Колюбин С. А., Пыркин А. А.* Компенсация неизвестного мультигармонического возмущения для нелинейного объекта с запаздыванием по управлению // *АиТ.* 2010. № 11. С. 115—122 (*Bobtsov A. A., Kolyubin S. A., Pyркиn A. A.* Compensation of unknown multi-harmonic disturbances in nonlinear plants with delayed control // *Automation and Remote Control.* 2010. Vol. 71, N 11. P. 2383—2394).
15. *Бобцов А. А., Пыркин А. А.* Алгоритм управления по выходной переменной для линейного объекта с неизвестными параметрами и динамической размерностью // *Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО.* 2011. № 4. С. 160—161.
16. *Бабаков Н. А., Воронов А. А., Воронова А. А. и др.* Теория автоматического управления: Учеб. для вузов. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления. М.: Высш. школа, 1986.

Сведения об авторах

- Алексей Алексеевич Бобцов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; заведующий кафедрой; декан факультета компьютерных технологий и управления; E-mail: bobtsov@mail.ifmo.ru
- Алексей Алексеевич Ведяков** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики
- Сергей Алексеевич Колюбин** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; инженер-исследователь
- Антон Александрович Пыркин** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; доцент; E-mail: a.pyркиn@gmail.com

Рекомендована кафедрой
систем управления и информатики

Поступила в редакцию
13.12.12 г.