КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.5.015

А. А. Бобцов, А. А. Пыркин

АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ НЕИЗВЕСТНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ В УПРАВЛЕНИИ

Рассматривается задача компенсации неизвестного синусоидального возмущения в условиях запаздывания в управлении для нелинейной системы.

Ключевые слова: *управление в условиях запаздывания, нелинейные системы, компенсация возмущающих воздействий.*

Проблема управления в условиях запаздывания является актуальной и сложной для современной теории управления. Использование цифровых регуляторов, управление удаленными объектами, например, через Интернет, а также другие факторы вызывают нежелательные запаздывания. Несмотря на то что проблема эта хорошо известна и ей посвящено большое количество публикаций, следует отметить, что универсальных методов управления до сих не получено, и для решения практических задач приходится использовать тот или иной теоретический подход, связанный с конкретной математической постановкой. В рамках настоящей работы авторы планируют не проводить детальный анализ методов управления в условиях запаздывания, а представить новый алгоритм компенсации возмущений, базируясь на результатах монографии [1] и статьи [2].

В [1] была рассмотрена классическая задача стабилизации линейного стационарного объекта управления с постоянным запаздыванием

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t-\tau), \ y(t) = Cx(t), \tag{1}$$

где $x(t) \in R^n$ — измеряемый вектор переменных состояния, $u(t)$ — скалярная входная переменная, $y(t)$ — скалярная выходная переменная, $\tau \geq 0$ — постоянное запаздывание; A, B, C — матрицы соответствующей размерности, содержащие известные параметры объекта управления.

Необходимо найти такой закон управления $u(t)$, чтобы положение равновесия $x = 0$ было асимптотически устойчивым. Хорошо известно, что для системы вида (1) при $\tau = 0$ можно синтезировать закон управления вида:

$$u = Kx(t), \tag{2}$$

где вектор-строка K выбирается из условия гурвицевости матрицы состояния замкнутой системы $A + BK$.

Для случая $\tau > 0$ закон управления (2) можно переписать в виде:

$$u(t) = Kx(t+\tau), \tag{3}$$

где $x(t+\tau)$ — значение вектора $x(t)$ через интервал времени τ. Очевидно, что закон управления (3) нереализуем, поскольку содержит неизвестную величину $x(t+\tau)$. Однако вектор

$x(t+\tau)$ можно рассчитать на основе имеющейся информации об объекте. Базируясь на положениях работы [1], значение $x(t+\tau)$ будем искать в виде

$$x(t+\tau) = e^{A\tau}x(t) + \int\limits_{t-\tau}^{t} e^{A(t-s)}Bu(s)ds\,. \tag{4}$$

Из выражения (4) легко получить реализуемый закон управления вида (3).

Однако в современной практике решения задач управления в условиях запаздывания рассмотрение систем вида (1) не представляет интереса. Сегодня сложно представить ситуацию, когда на систему управления не действует возмущающее воздействие. Случай компенсации неизвестного синусоидального возмущающего воздействия для объекта вида (1) рассмотрен в работе [2]:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B[u(t-\tau) + \delta(t)]\,,\ y(t) = Cx(t)\,, \tag{5}$$

где $\delta(t) = \delta_0 + \delta_1\sin(\omega t + \varphi)$ — неизмеряемый сигнал, а δ_0, δ_1, ω, φ — неизвестные постоянные параметры.

В работе [2] с использованием закона управления (3), (4) была решена комплексная задача компенсации возмущающего воздействия $\delta(t) = \delta_0 + \delta_1\sin(\omega t + \varphi)$ и стабилизации неустойчивого положения равновесия $x = 0$. Также в работе [2] последовательно были выстроены компенсатор возмущения и предсказатель. Методика синтеза компенсатора возмущения предполагает знание параметров объекта управления, а также наличие косвенной информации, которую можно получить по измерениям состояний системы. Были идентифицированы неизвестные параметры δ_0, δ_1, ω, φ и с учетом величины запаздывания τ синтезирован компенсатор.

В настоящей статье рассмотрим более сложную (в сравнении с [1, 2]) задачу компенсации неизвестного синусоидального возмущения для нелинейной системы с запаздыванием в управлении. Пусть объект управления имеет вид

$$\left.\begin{aligned}
&\dot{x}_1(t) = x_2(t) + \psi_1(y(t-\tau_1)) + \theta_1 y(t),\\
&\ldots\\
&\dot{x}_n(t) = u(t-\tau) + \delta(t) + \psi_n(y(t-\tau_n)) + \theta_n y(t),\\
&y(t) = x_1(t),
\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

где θ_i и $\psi_i(y(t-\tau_i))$ — соответственно известные постоянные параметры и нелинейные функции, τ_i — известные константы, причем $\tau_i \ge \tau$ для всех $i = \overline{1,n}$.

Ставится задача синтеза такого управляющего воздействия $u(t)$, чтобы положение равновесия $y = 0$ было асимптотически устойчивым.

Аналогично [3] продифференцируем переменную $y(t) = x_1(t)$ n раз, последовательно проводя замены переменных

$$\left.\begin{aligned}
&\dot{y}(t) = \dot{\xi}_1(t) = \xi_2(t),\\
&\dot{\xi}_2(t) = \xi_3(t),\\
&\ldots\\
&\dot{\xi}_n(t) = u(t-\tau) + \delta(t) + \frac{\partial^{n-1}\psi_1(y(t-\tau_1))}{\partial y(t-\tau_1)^{n-1}}\, y^{(n-1)}(t-\tau_1) + \ldots\\
&\qquad \ldots + \psi_n(y(t-\tau_n)) + \theta_1 y^{(n-1)}(t) + \ldots + \theta_n y(t).
\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

Выберем закон управления следующим образом:

$$u(t)=u_1(t)-\frac{\partial^{n-1}\psi_1(y(t+\tau-\tau_1))}{\partial y(t+\tau-\tau_1)^{n-1}}y^{(n-1)}(t+\tau-\tau_1)+...+\psi_n(y(t+\tau-\tau_n)). \quad (8)$$

Подставив (8) в уравнение (7), получим

$$\left.\begin{aligned}
&\dot{\xi}_1(t)=\xi_2(t),\\
&\dot{\xi}_2(t)=\xi_3(t),\\
&...\\
&\dot{\xi}_n(t)=u_1(t-\tau)+\delta(t)+\theta_1 y^{(n-1)}(t)+...+\theta_n y(t).
\end{aligned}\right\} \quad (9)$$

Легко видеть, что система (9) аналогична (5), следовательно, к ней может быть применен алгоритм управления [2], который обеспечит асимптотическую устойчивость положения равновесия $y=0$.

Итак, положения метода компенсации неизвестного синусоидального возмущающего воздействия в условиях запаздывания [2] развиты на нелинейные системы. Остается нерешенной задача стабилизации модели (6) в условиях неизвестных параметров θ_i.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг. (соглашение № 14.B37.21.0406).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Krstic M.* Delay compensation for nonlinear, adaptive and PDE systems. Birkhauser, 2009.
2. *Pyrkin A., Smyshlyaev A., Bekiaris-Liberis N., Krstic M.* Rejection of Sinusoidal Disturbance of Unknown Frequency for Linear System with Input Delay // American Control Conf. Baltimore, 2010. P. 5688—5693.
3. *Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л.* Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб: Наука, 2000.

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; декан факультета КТиУ, заведующий кафедрой; E-mail: bobtsov@mail.ifmo.ru

Антон Александрович Пыркин — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: a.pyrkin@gmail.com

Рекомендована кафедрой систем управления и информатики

Поступила в редакцию 10.09.12 г.