РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

АВТОМЕТРИЯ

2008, том 44, № 5

УДК 681.5.015

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «АВТОНОМНЫЙ ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ–ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

Ю. Н. Золотухин, А. А. Нестеров, А. П. Ян

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: zol@idisys.iae.nsk.su

Предложен метод идентификации ряда параметров динамической системы «подводный аппарат–окружающая среда», таких как момент инерции вращающихся частей движителя с учетом присоединенных моментов инерции и коэффициент вязкого трения винта. Моделирование подтвердило высокую скорость сходимости искомых параметров к истинным значениям.

Необходимость решения научных и прикладных задач, связанных с исследованием океана и развитием морских технологий, привела к созданию значительного числа автономных необитаемых подводных аппаратов [1–5]. Такие аппараты во взаимодействии с окружающей средой представляют собой сложные многомерные и многосвязные нелинейные динамические объекты. Системы управления данными объектами должны удовлетворять жестким требованиям к точности и быстродействию в условиях параметрической неопределенности. Это обстоятельство вынуждает применять сложные устройства идентификации параметров либо использовать методы адаптации и самонастройки [6].

В данной работе предложен метод идентификации параметров динамической системы, позволяющий следить за изменениями этих параметров в процессе движения объекта. Для демонстрации эффективности метода рассмотрена задача идентификации параметров движителя подводного аппарата, уравнение [7] которого имеет вид

$$J_g\dot{\omega}+K_c\omega|\omega|+\left(\frac{K_mK_w}{R}\right)\omega=\left(\frac{K_mK_y}{R}\right)u, \tag{1}$$

где J_g – момент инерции вращающихся частей движителя с учетом присоединенных моментов инерции; R – сопротивление якорной цепи двигателя постоянного тока; K_m, K_w, K_c, K_y – коэффициенты момента, противоЭДС, вязкого трения винта и усиления усилителя мощности соответственно; u – сигнал, поступающий на движитель от системы управления; ω – угловая скорость вращения вала движителя.

Из-за влияния вязкой среды коэффициенты J_g и K_c изменяются в процессе движения аппарата, что необходимо учитывать при формировании сигнала управления u. Далее будем считать, что характерное время изменения параметров управляемого объекта значительно больше времени переходных процессов в системе (1).

Рассмотрим управляемую систему

$$\dot{x} = f(\alpha,\ x(t),\ u(t)), \tag{2}$$

где $x = [x_1, \ldots, x_n],\ x \in \Re^n,$ – вектор-столбец переменных состояния системы; $\alpha = [\alpha_1, \ldots, \alpha_m],\ \alpha \in A \subset \Re^m,$ – вектор-столбец параметров системы (A – множество возможных значений параметров α); $u = [u_1, \ldots, u_r],\ u \in \Re^r,$ – вектор-столбец управляющих воздействий. Пусть на интервале наблюдения $[t_0, t_1]$ вектор параметров α принимает значение

$$\alpha = \alpha_0 = \text{const}, \quad \alpha_0 \in A. \tag{3}$$

В этом случае в соответствии с (2) система будет перемещаться по траектории $x(t, \alpha_0)$ такой, что

$$\dot{x}(t, \alpha_0) \equiv f(\alpha_0,\ x(t, \alpha_0),\ u(t)), \quad t \in [t_0, t_1],$$

т. е. функция $x(t, \alpha_0)$ превращает уравнение (2) в тождество на интервале $[t_0, t_1]$. Будем считать, что траектория системы (2) полностью наблюдаема.

Чтобы не вычислять производную $\dot{x}(t)$, представим уравнение (2) в интегральной форме

$$x(t) - x(t_0) - \int_{t_0}^{t} f(\alpha,\ x(t),\ u(t))\,dt = 0. \tag{4}$$

Введем вектор-функцию

$$Y(t, \alpha) = x(t, \alpha_0) - x(t_0, \alpha_0) - \int_{t_0}^{t} f(\alpha,\ x(t, \alpha_0),\ u(t))\,dt. \tag{5}$$

Очевидно, что при $\alpha = \alpha_0$ и $t \in [t_0, t_1]$ выполняется равенство

$$Y(t, \alpha_0) \equiv 0. \tag{6}$$

Определим функционал

$$I(\alpha) = \int_{t_0}^{t_1} (Y(t, \alpha),\ Y(t, \alpha))\,dt. \tag{7}$$

В соответствии с (6) и (7) функционал $I(\alpha)$ удовлетворяет условиям

$$\left.\begin{aligned} &I(\alpha)\geq 0, \quad \alpha\in A,\\ &I(\alpha_0)=0, \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

т. е. при $\alpha=\alpha_0$ функционал $I(\alpha)$ получает абсолютный минимум на множестве A.

Таким образом,

$$\alpha_0=\arg[\min I(\alpha),\ \alpha\in A] \tag{9}$$

и, следовательно, процедура (9) решает задачу идентификации параметров α в системе (2). Дифференцируя (7) по α, получим уравнения, определяющие вектор параметров α:

$$\int_{t_0}^{t_1}\left[\frac{\partial Y}{\partial\alpha}\right]^T Y(t,\alpha)\,dt=0. \tag{10}$$

Здесь индекс T – символ транспонирования. Соотношение (10) представляет собой систему m уравнений, в общем случае нелинейных относительно переменных $\alpha_1,\ldots,\alpha_m$. Один из способов решения таких уравнений предложен в [8].

Вернемся к исходной задаче. Применяя описанную выше процедуру к уравнению (1), получим явное выражение для функционала I:

$$I(J_g,K_c)=$$

$$=\int_{t_0}^{t_1}\left[J_g(\omega(t)-\omega(t_0))+K_c\int_{t_0}^{t}\omega(t)\left|\omega(t)\right|dt+\int_{t_0}^{t}(K_2\omega(t)-K_1u(t))\,dt\right]^2 dt, \tag{11}$$

где $K_1=\dfrac{K_mK_y}{R}$, $K_2=\dfrac{K_mK_w}{R}$.

Введем в рассмотрение функции времени

$$\left.\begin{aligned} &w_1(t)=\omega(t)-\omega(t_0),\\ &w_2(t)=\int_{t_0}^{t}\omega(t)\left|\omega(t)\right|dt,\\ &w_3(t)=\int_{t_0}^{t}(K_1u(t)-K_2\omega(t))\,dt \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

и вычислим константы

$$\left.\begin{aligned}
c_{11} &= \int_{t_0}^{t_1} w_1^2(t)\,dt, \\
c_{12} &= \int_{t_0}^{t_1} w_1(t) w_2(t)\,dt, \\
c_{22} &= \int_{t_0}^{t_1} w_2^2(t)\,dt, \\
c_1 &= \int_{t_0}^{t_1} w_1(t) w_3(t)\,dt, \\
c_2 &= \int_{t_0}^{t_1} w_2(t) w_3(t)\,dt.
\end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

Теперь определение параметров J_g и K_c сводится к решению системы линейных уравнений

$$\left.\begin{aligned}
c_{11} J_g + c_{12} K_c &= c_1, \\
c_{12} J_g + c_{22} K_c &= c_2.
\end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

Анализ соотношений (11) и (12) показывает, что при $\omega(t) \equiv \text{const}$, т. е. при $\dot{\omega}(t) \equiv 0$, определитель $D = c_{11} c_{22} - c_{12}^2$ системы (14) равен нулю. Следовательно, определение параметров J_g и K_c невозможно в стационарном режиме работы системы (1). Это легко объясняется физически: при $\dot{\omega}(t) \equiv 0$ практически отсутствует информация о параметре J_g, а в случае $\omega(t) \equiv 0$ отсутствует информация о коэффициенте K_c. Таким образом, идентификация параметров J_g и K_c возможна лишь при нестационарном движении системы (1). Это обстоятельство может потребовать введения тестового сигнала в управление $u(t)$.

Моделирование предложенного метода идентификации параметров системы (1) показало, что в случае непрерывного сигнала $\omega(t)$ значение параметров J_g и K_c с высокой точностью можно получить за время наблюдения $t_1 - t_0 \le 10^{-5}$ с, что существенно меньше времени переходного процесса в системе (1). Для дискретного сигнала $\omega(t_k)$ интегралы в уравнениях (12), (13) должны вычисляться методами численного интегрирования. При этом необходимое время наблюдения и точность идентификации существенно зависят от метода интегрирования и частоты дискретизации сигнала $\omega(t)$ по времени. В процессе моделирования с использованием метода Симпсона значения искомых параметров с погрешностью порядка ≤ 5 % были получены за время наблюдения $t_1 - t_0 \le 0{,}1$ с. Моделирование проведено для значений параметров объекта, приведенных в [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Herman M., Albus J.** Overview of MAUV: Multiple autonomous undersea vehicles // Unmanned Systems. 1989. **7**, N 1. P. 36.
2. **Bingham D., Drake T., Hill A., Lott R.** The application of autonomous underwater vehicle (AUV) technology in the oil industry – vision and experience // http://www.fig.net/pub/fig_2002/Ts4-4/TS4_4_bingham_etal.pdf
3. **Автономные** подводные роботы: системы и технологии /Под ред. М. Д. Агеева. М.: Наука, 2005.
4. **Gasparoni F.** Deep-sea intervention systems: status and perspectives // http://www.vlvnt2.it/Slides/Plenary/nov10/P_Gasparoni_Tecnomare.ppt
5. **Desa E., Madhan R., Maurya P.** Potential of autonomous underwater vehicles as new generation ocean data platforms // Current Sci. 2006. **90**, N 9. P. 1202.
6. **Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Юхимец Д. А.** Устройства и системы управления подводных роботов. М.: Наука, 2005.
7. **Филаретов В. Ф., Алексеев Ю. К., Лебедев А. В.** Системы управления подводными роботами. М.: Изд. дом «Круглый год», 2001.
8. **Золотухин Ю. Н., Нестеров А. А.** Вычисление нулей нелинейной функции в среде MATLAB-SIMULINK // Автометрия. 2001. № 5. С. 64.

Поступила в редакцию 8 апреля 2008 г.