УДК 621.531

**О.М. Безвесільна, д.т.н., проф.**
**В.П. Квасніков, к.т.н.**
*Національний технічний університет України "КПІ"*

# ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КЕРУВАННЯ ПОВОРОТНИМ СТОЛОМ ТРИКООРДИНАТНОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН

*Розглядається задача синтезу керування поворотним столом трикоординатної інформаційно вимірювальної системи (ТІВС) механічних величин об'єктів із складною просторовою поверхнею. Розроблена схема адаптації ТІВС.*

Сучасні проблеми керування часто зв'язані з динамічними системами, що характеризуються швидкою зміною параметрів і необхідністю використання методів адаптації. Серед них, крім найбільш розповсюджених проблем керування, спостереження й ідентифікації з еталонною моделлю, можна вказати нестаціонарні задачі спостереження і програмного керування, узгодження вихідних змінних багатоканальних систем, а також цілий ряд нелінійних задач, що призводять до одержання моделі похибок зі швидкими варіаціями параметрів. Більшість стандартних методів адаптивного керування орієнтовано на стаціонарні та квазістаціонарні моделі. Швидкі зміни параметрів зазвичай відбиваються за допомогою релейних законів керування й адаптації, а також робастних алгоритмів, що за рахунок вибору досить великих значень коефіцієнтів зворотного зв'язку забезпечують значне прискорення основних процесів системи в порівнянні з динамікою параметричних варіацій [1, 2].

Будемо вважати, що задача керування зведена до стабілізації моделі похибок:

$$\dot{e} = Ae + b(u + z\theta), \tag{1}$$

де $e \in R^n$ – вектор похибок, $u$ – скалярний керуючий вплив; $z = z(t)$ – відома функція впливу (регресор), $\theta = \theta(t)$ – невідомий параметр, динаміка якого описується моделлю параметричного дрейфу:

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= \Gamma\xi_i; \\ \theta &= h^{\mathrm{T}}\xi_i, \end{aligned} \tag{2}$$

де $\xi \in R^p$ – вектор стану; $A$, $\Gamma$, $b$, $h$ – матриці відповідних розмірностей. Задача адаптивної стабілізації моделі похибок зазвичай зводиться до синтезу закону керування, що забезпечує асимптотичну стійкість моделі похибок щодо нульового розв'язку $e = 0$, а також, якщо можливо, і параметричну збіжність шуканого алгоритму адаптації.

Виберемо алгоритм комбінованого керування виду:

$$u = -z\bar{\theta} - v, \tag{3}$$

де $\bar{\theta} = \bar{\theta}(t)$ – поточна оцінка змінного параметра $\theta = \theta(t)$, $v$ – вихід моделі похибок, що обчислюється за формулою:

$$v = k^{\mathrm{T}}e_i, \tag{4}$$

де $k$ – матриця-рядок коефіцієнтів зворотних зв'язків. Тоді модель приймає вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= A_c e + bz\tilde{\theta}, \\ A_c &= A - bk^{\mathrm{T}}. \end{aligned} \tag{5}$$

де $\tilde{\theta} = \theta - \bar{\theta}$ – похибка настроювання параметра.

За умови керованості моделі помилки відповідний вибір матриці $k^{\mathrm{T}}$ забезпечує асимптотичну стійкість і бажані динамічні властивості системи для нульової параметричної помилки $\theta = 0$. За допомогою відомих методів можна знайти зворотні зв'язки, при яких:

$$Re\,\lambda_i\{A_c\} \le -\lambda, \quad i = \overline{1,n}, \tag{6}$$

тобто досягається ступінь стійкості $\lambda > 0$. Більш строгі вимоги до вибору коефіцієнтів зворотних зв'язків забезпечують, крім того, строгу позитивність передаточної функції:

$$\mathrm{Re}\,H(s) > 0 \ \text{для} \ \mathrm{Re}\,s \ge -\lambda.$$

Саме ця властивість дозволяє гарантувати асимптотичну стійкість моделі (4) з підключеним у зворотний зв'язок динамічним блоком спеціального класу, що і відповідає шуканому алгоритму адаптації, що генерує змінну $\bar{\theta} = \bar{\theta}(t)$.

У багатьох задачах адаптації прийнято, що швидкість зміни параметрів незначна, тобто модель зміни $\theta(t)$ представляється у вигляді:

$$\dot{\theta} \cong 0 .$$

Тоді при зазначеному вище виборі матриці зворотних зв'язків $k$ можна скористатися відомими схемами [89] адаптації і, зокрема, застосувати інтегральний алгоритм настроювання параметра виду:

$$\overline{\theta} \cong k_{a1} z v ,$$

де $k_{a1} > 0$ – коефіцієнт адаптації. При відомих обмеженнях на властивості функції впливу $z(t)$ такий алгоритм гарантує асимптотичну стійкість рішення $e = 0$ і параметричну збіжність $\theta \to 0$.

Швидка зміна параметра часто є основною перешкодою для застосування алгоритмів адаптації інтегрального типу. Проаналізуємо можливості адаптації системи для більш широкого класу моделей варіацій параметра $\theta\ (t)$. Спочатку спробуємо звести поставлену задачу до настроювання системи з постійними параметрами. Для цього запишемо розв'язок системи у вигляді:

$$\xi = \exp(\Gamma t)\xi^0 ,$$

де $\xi^0 = \xi(0)$ – вектор невизначених початкових умов. Рівняння (2) перепишемо у виглялі [3, 4]:

$$\theta = \overline{h}^{\mathrm{T}}(t)\xi^0 ,$$

де вектор-функція $h=h\ \exp(\Gamma t)$ покладається відомої. Тоді поточна оцінка параметра $\theta$ знаходиться так:

$$\theta = \overline{h}^{\mathrm{T}}(t)\,\widetilde{\xi}^0 , \tag{7}$$

де $\xi^0$ – оцінка вектора початкових умов $\xi^0$. Приймаючи до уваги сталість вектора $\xi^0$, скористаємося багатомірним інтегральним алгоритмом адаптації:

$$\xi^0 = K_a\left(z\overline{h}\right)v , \tag{8}$$

де $K_a > 0$ – матриця коефіцієнтів адаптації, а функція $z(t)h(t)$ виступає як нова функція впливу. У припущенні, що остання обмежена, за стандартною схемою можна показати, що алгоритм забезпечує асимптотичну стійкість адаптивної системи за сталою $e$ і стійкість за параметричною похибкою $\tilde{\xi}^0 = \xi^0 - \hat{\xi}^0$. Збіжність за параметрами $\xi^0$ (і отже, $\theta \to 0$) гарантується при додатковому припущенні, що функція $zh$ є збуджуючим впливом. Зазначені обмеження на властивості функції $zh$ можуть не виконуватися, якщо матриця моделі параметрів $\Gamma$ гурвіцева (асимптотична стійка) і якщо вона стійка. Останнє, а також незадовільні ідентифікуючі властивості рівнобіжних багатомірних алгоритмів типу (8) визначають основні недоліки розглянутої схеми адаптації.

Природне узагальнення одномірних інтегральних алгоритмів передбачає використання схем адаптації, що включають у себе повну модель параметричного дрейфу. Розглянемо алгоритм виду:

$$\xi^0 = \Gamma\xi + k_a z v, \quad \theta = h^{\mathrm{T}}\xi , \tag{9}$$

де $\xi \in R^p$ – оцінка вектора стану $\xi$ моделі параметрів, $k_a$ – матриця-стовпець коефіцієнтів адаптації. Для випадку $p>1$ неважко показати, що однією з умов працездатності такої схеми адаптації є вимога: матриця $\Gamma$ гурвіцева. Це відповідає асимптотичній стійкості моделі дрейфу і не являє інтересу випадку зникаючих параметричних збурювань: $\theta \to \theta$.

Для забезпечення стійкості адаптивної системи з довільною моделлю варіації параметрів здійснимо стабілізацію динамічного алгоритму адаптації. Думаючи тимчасово, що поточні значення параметричної помилки $\widetilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ доступні виміру, введемо додаткові стабілізуючі зв'язки за $\theta$, запишемо:

$$\begin{aligned} &\hat{\xi}^0 = \Gamma\hat{\xi} + k_a\left(zv + \widetilde{\theta}\right); \\ &\theta = h^{\mathrm{T}}\xi . \end{aligned} \tag{10}$$

Приймаючи до уваги рівняння, знайдемо модель параметричних похибок:

$$\widetilde{\xi}^0 = \Gamma_c\widetilde{\xi} + k_a z v , \ \theta = h^{\mathrm{T}}\widetilde{\xi} , \tag{11}$$

де $\Gamma_c = \Gamma - k_a h^{\mathrm{T}}$, $\widetilde{\xi} = \xi - \hat{\xi}$.

При деякому спеціальному виборі матриці коефіцієнтів $k_a$ можна одержати, що:

$$Re\,\lambda_i\{\Gamma_c\} \le -\lambda_a, \qquad i = \overline{1,p} ,$$

де $\lambda_a > 0$ – ступінь стійкості,

$$\mathrm{Re}\,H_a(s) > 0 \ \text{для} \ Re\,s \ge -\lambda_a .$$

Зазначимо, що остання властивість гарантує для блока (10) із входом $v = -v$ і виходом $w = z\theta$ (рис. 1) виконання відомої нерівності:

$$\eta(t_1) = \int_0^{t_1} \tilde{v}\,\omega d\tau \geq -\beta_0\,, \tag{12}$$

де $\beta_0 > 0$.

Розглянемо структурну схему адаптивної трикоординатної ІВС, що представлена на рис. 1.

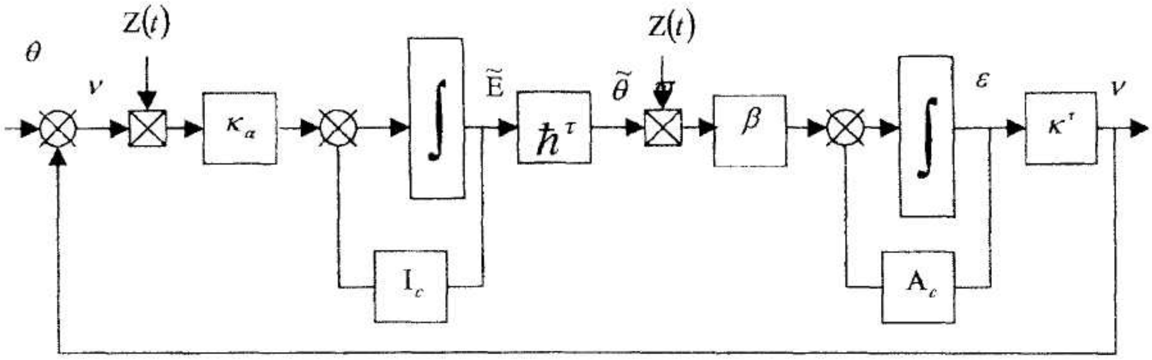


*Рис.1. Структурна схема адаптивної трикоординатної ІВС*

Вважаємо, що $z(t)$ – обмежена функція і скористаємося відомим положенням теорії стійкості. Тоді встановлена строга позитивність передаточної функції $H(s)$ моделі похибок (4) у сполученні з умовою позитивності $H_a(s)$ забезпечує асимптотичну стійкість розширеної моделі похибок за вектором $e$ і стійкістю за $\xi$ [2, 3].

Розглядаючи рівняння (13), для $e = 0$, одержимо $\xi = \Gamma c \xi$, і через те, що матриця $\Gamma c$ гурвіцева $\xi \to 0$. Це забезпечує збіжність параметричної похибки: $\theta \to 0$ і, отже, $\theta \to \theta$.

Перетворимо алгоритм (10) так, щоб одержати схему адаптації, в якій в явному вигляді не використовується інформація про похибку $\theta$. Розглянемо випадок, коли функція $z(t)$ диференційована, обмежена і строго позитивна за модулем. Розглянемо вектор:

$$\xi = \xi - \bar{k}_a c^{\mathrm{T}} e\,. \tag{13}$$

Рівняння визначає часткове перетворення координат розширеної моделі похибок, що дозволяє привести алгоритм до форми, у якій присутні тільки вимірювані сигнали.

Одночасно при установці лазерного гіроскопу у вузлі поворотного столу ТІВС дозволило підвищити точність позиціювання вимірюваної деталі в робочій зоні і цим підвищити точність вимірювання в 2,3 рази.

## ЛІТЕРАТУРА:


1. *Бобцов А.А., Мирошник И.В.* Динамический алгоритм адаптации нестационарных систем // Автоматика и телемеханика. – 1999. – №12. – С. 121–128.
2. *Васин А.С., Колючкин В.Я., Метелкин А.И., Мосягин Г.М.* Лазерный измеритель объектов // Вестник МГТУ. Серия Приборостроение. – 1992. – №2. – С. 81–87.
3. *Брайсон А., Ю Ши Хо.* Прикладная теория оптимального управления. – М.: Мир, 1972. – 544 с.
4. *Иванов В.А.* Теория оптимальных систем автоматического управления. – М.: Наука, 1981. – 336 с.



БЕЗВЕСІЛЬНА Олена Миколаївна – доктор технічних наук, професор кафедри приладобудування Національного технічного університету України "КПІ".

Тел.: (044) 229-33-75.

КВАСНІКОВ Володимир Павлович – кандидат технічних наук, докторант Національного технічного університету України "КПІ".

Тел.: (0472) 45-87-16.


Подано 14.01.2003