

О.М. Тачиніна, д.т.н.
(Національний авіаційний університет)
О.І. Лисенко, д.т.н., П.І., Кірчу, к.т.н, І.О. Сушин
(Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»)

Процедура синтезу оптимальної адаптивної системи керування літаючим інформаційно-телекомунікаційним роботом з використанням функції Ляпунова

У доповіді наведено процедуру оперативного структурно-параметричного синтезу оптимального за енерговитратами закону керування літаючим інформаційно-телекомунікаційним роботом, який представляє собою ретрансляційно-телекомунікаційну аероплатформу на базі безпілотної літального апарату легкого класу літакового типу

Розглядається об'єкт керування (ОК), що описується рівнянням у просторі станів. Передбачається можливість вимірювання всього вектору стану ОК, або відновлення його за відомими вимірами, так що $Y=X(t)$.

Ставиться задача забезпечення ОК бажаної динаміки, яка задається за допомогою еталонної моделі

$$\dot{X}_M = A_M X_M(t) + B_M R(t), \quad (1)$$

де $X_M(t) \in R^n$ – вектор стану еталонної моделі $R(t) \in R^m$ – бажана вхідна дія.

Вибір еталонної моделі залежить від вимог, які висуваються до замкнутої системи (час перехідного процесу, перерегулювання, астатизм і т. д.). При цьому вона повинна бути стійкою, тобто матриця A_M – гурвіцева.

Вважається, що вектор параметрів ξ ОК, який складається із коефіцієнтів матриць А, В, заздалегідь не визначений. Відомо, що $\xi \in \Xi$. Множину Ξ можна задати, наприклад, за допомогою мінімальних та максимальних значень, яких можуть набувати параметри ОК залежно від умов виготовлення і функціонування.

Формалізуємо ціль керування (ЦК), поставивши вимогу

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = 0, \quad (2)$$

де $E(t) = X(t) - X_M(t)$ – похибка системи.

Отже, ставиться задача побудови самонастроювальної системи (СНС) з явною еталонною моделлю. Задачу можна розв'язати, відповідно до дворівневої структури СНС, у два етапи: синтез основного контуру і синтез контуру адаптації.

Синтез основного контуру. Задача розв'язується за припущення, що параметри ОК відомі. Для отримання структури «ідеального» регулятора запишемо рівняння у відхиленнях

$$\dot{E}(t) = A_M E(t) + (A - A_M)X(t) + BU(t) - B_M R(t). \quad (3)$$

Поставимо вимогу виконання умови розв'язання рівняння

$$(A - A_M)X(t) + BU(t) - B_M R(t) = 0, \quad (4)$$

відносно $U_* \in R^m$ при будь-яких $X \in R^n$, $R \in R^m$.

При цьому рівняння (3) набуде вигляду:

$$\dot{E}(t) = A_M E(t),$$

розв'язок якого асимптотично стійкий через гурвіцеву матрицю A_M , і відповідно, за ідеальних умов ЦК досягається.

Ідеальне керування описується рівнянням

$$U_*(t) = K_*^X X(t) + K_*^R R(t), \quad (5)$$

яке можна записати у формі

$$U_*(t) = \bar{K}_*^R \bar{K}_*^X X(t) + \bar{K}_*^R R(t), \quad (6)$$

де $K_*^X, K_*^R, \bar{K}_*^X, \bar{K}_*^R$ – матриці ідеальних коефіцієнтів регулятора, які задовольняють рівняння:

$$BK_*^X = A_M - A, \quad BK_*^R = B_M. \quad (7)$$

$$B_M \bar{K}_*^X = A_M - A, \quad B_M \bar{K}_*^R = B_M. \quad (8)$$

Умови (7), (8) називаються умовами узгодженості моделі і ОК. Вони визначають можливість розв'язання поставленої задачі якщо точно відомі коефіцієнти ОК. Відповідно до (7), (8) матриці ідеальних коефіцієнтів регулятора залежать від конкретних параметрів ОК $\xi \in \Xi$. Тому в ситуаціях невизначеності параметрів ОК доцільно налаштовувати матриці коефіцієнтів регулятора для досягнення в системі ЦК (2).

Виберемо структуру основного контуру відповідно до (6)

$$U_*(t) = \bar{K}^R(t) \bar{K}^X(t) X(t) + \bar{K}^R(t) R(t), \quad (9)$$

де $\bar{K}^X(t), \bar{K}^R(t)$ – матриці коефіцієнтів регулятора, які підлягають налаштуванню.

Підставляючи (9) у (3), отримуємо описання узагальненого налаштовуваного об'єкта (УНО), який складається з ОК, моделі (1) і регулятора основного контуру (9) у формі

$$\begin{aligned} \dot{E}(t) &= A_M E(t) + B_M (\bar{K}^X(t) - \bar{K}_*^X) X(t) + \\ &+ B_M [(\bar{K}_*^R)^{-1} - \bar{K}^R(t) - I] (\bar{K}^X(t) X(t) + R(t)) = \\ &= A_M E(t) + B_M [\Phi(t) X(t) + \Psi(t) \bar{K}^R(t) (R(t) + \bar{K}^X(t) X(t))], \end{aligned} \quad (10)$$

де $I - m \times m$ одинична матриця $\Phi(t), \Psi(t)$ – матриці відхилення коефіцієнтів регулятора від «ідеальних» значень

$$\Phi(t) = \bar{K}^X(t) - \bar{K}_*^X, \quad \Psi(t) = (\bar{K}_*^R)^{-1} - (\bar{K}^R(t))^{-1}. \quad (11)$$

Структуру УНО показано на рис.1.

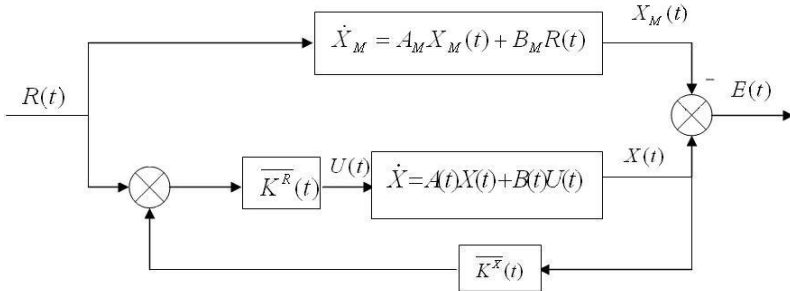


Рис. 1. Структурна схема узагальненого налаштовуваного об'єкта

Синтез контуру адаптації. Для алгоритмів налаштування матриць $\bar{K}^X(t)$ і $\bar{K}^Y(t)$ запишемо рівняння УНО (10) у вигляді

$$\dot{E}(t) = A_M E(t) + B_M \Theta(t) \Sigma(t), \quad (12)$$

де $\Theta(t) = (\Phi(t); \Psi(t))$ – розширена матриця відхилень настроюваних коефіцієнтів від їх «ідеальних» значень,

$$\Sigma(t) = \begin{pmatrix} X(t) \\ \bar{K}^Y(t)[Y(t) + \bar{K}^X(t)X(t)] \end{pmatrix}$$

– $p \times 1$ вектор сенсорів (вектор, елементи якого виміряні або розраховані на основі вимірювань функціями), $p = n + m$.

У якості функції Ляпунова візьмемо квадратичну скалярну функцію вигляду

$$V = 0.5 E^T H E + 0.5 \text{tr}(\Theta^T \Gamma^{-1} \Theta), \quad H = H^T, \quad \Gamma = \Gamma^T. \quad (13)$$

Визначимо похідну функції (13), використовуючи рівняння УНО (12)

$$\begin{aligned} \dot{V} &= E^T H \dot{E} + \text{tr}(\dot{\Theta}^T \Gamma^{-1} \Theta) = \\ &= E^T H A_M E + E^T H B_M \Theta \Sigma + \text{tr}(\dot{\Theta}^T \Gamma^{-1} \Theta) = \\ &= E^T H A_M E + \text{tr}[(B_M^T H E \Sigma^T + \Gamma^{-1} \dot{\Theta})^T \Theta]. \end{aligned}$$

Якщо алгоритм адаптації вибрати у вигляді

$$\dot{\Theta} = -\Gamma B_M^T H E \Sigma^T(t), \quad \Gamma = \Gamma^T > 0, \quad (14)$$

то функція V має властивості $V < 0$ і $\dot{V} < 0$, тобто є функцією Ляпунова.

Це витікає із гурвіцевої матриці A_M , для якої в силу леми Ляпунова існує $H = H^T > 0$, яка задовольняє матричне рівняння

$$A_M^T H + H A_M = -Q, \quad Q = Q^T > 0,$$

і, відповідно,

$$\dot{V} = -0.5 E^T Q E. \quad (15)$$

Отже, система (12), (14) стійка і в силу (15) ЦК $E(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow 0$ досягається. Оскільки \dot{V} (15) не містить у явному вигляді налаштовуваних параметрів, то із сказаного вище слідує лише обмеженість матриці Θ . Це зводить задачу синтезу адаптивної системи керування до конструювання структури основного контуру, який забезпечує приведення описання УНО до вигляду (12) і використання для налаштування невідомих параметрів регулятора (чи самого ОК) алгоритму (14).

Для реалізації алгоритму адаптації треба записати рівняння (14) у термінах матриць настроєваних коефіцієнтів $\bar{K}^X(t)$ і $\bar{K}^R(t)$. Для цього необхідно навести матрицю Γ у вигляді

$$\Gamma = (\Gamma_1, \Gamma_2),$$

де $\Gamma_i > 0$ – квадратні матриці відповідних розмірів. При цьому система (14) записується у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{\Phi} &= -\Gamma_1 B_M^T H E(t) X^T(t); \\ \dot{\Psi} &= -\Gamma_2 B_M^T H E(t) (R + \bar{K}^X X)^T (\bar{K}^R)^T. \end{aligned}$$

З урахуванням $\dot{\bar{K}}_*^X \equiv 0$, $\dot{\bar{K}}_*^Y \equiv 0$ отримуємо

$$\begin{aligned} \dot{\bar{K}}^X(t) &= -\Gamma_1 B_M^T H E(t) X^T(t), \\ \dot{\bar{K}}^R(t) &= -\bar{K}^R \Gamma_2 B_M^T H E(t) (R + \bar{K}^X X(t))^T (\bar{K}^R)^T \bar{K}^R. \end{aligned} \quad (16)$$

Структурну схему адаптивної системи ((12), (14)) з урахуванням структури УНО (рис.1) наведено на рис.2.

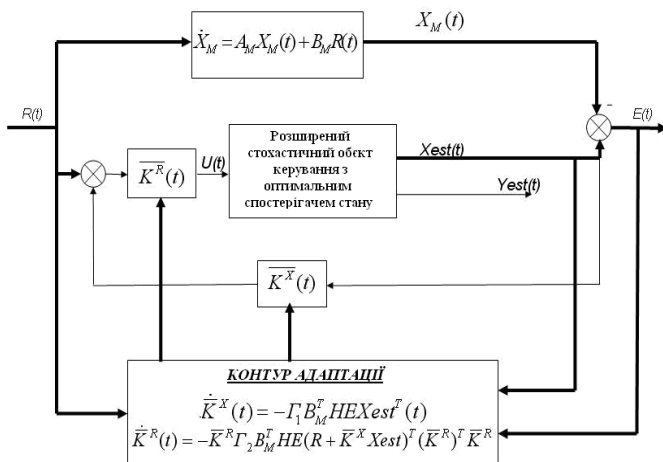


Рис. 2. Структурна схема оптимальної адаптивної системи керування

У зазначеному алгоритмі зовнішні збурення w_1 та шуми датчиків вимірювання w_2 можна розглядати як випадкову зміну параметрів ОК, яку відслідковує контур адаптації та налаштовує матриці параметрів регулятора $\bar{K}^x(t)$, $\bar{K}^y(t)$ для досягнення цілі керування $E(t) \rightarrow 0$.

Висновок

Реалізація запропонованої системи адаптивного оптимального керування польотом дозволяють:

- значно розширити діапазони умов застосування літаючих інформаційно-телекомунікаційних роботів (ЛІТР);
- забезпечити комплексну оптимізацію виконання покладених на систему функцій;
- підвищити безпеку польоту ЛІТР, в тому числі і на граничних режимах (поблизу границь експлуатаційних областей режимів);
- в значній мірі знизити часові і матеріальні затрати на розробку і освоєння окремих зразків техніки, як за рахунок високого, недоступного раніше рівня уніфікації елементної бази систем керування, так і за рахунок зниження вимог до натурних випробувань ЛІТР на початкових стадіях їх освоєння.

Список літератури

1. Tunik A. A. Ahn I.K., Yeom C.H. Robust optimization of control law of flight in stochastically disturbed atmosphere. Proceeding of millennium conference on air and space sciences, Technology and Industries. Hankook Aviation University. – Apr. 28, 2000. – Seoul, Korea. – P. 122 – 133.
2. Tachinina O., Lysenko O., Nesterenko K., Zybin S., Alekseeva I. Tuning Methodology for Multi-circuit Digital Regulators of Robot Drives with Adjustable Dynamic Characteristics. Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering—Synergetic Engineering. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 367. P. 874 – 886.
3. Uryvsky L., Lysenko O., Novikov V., Osypchuk S. Control Methods Research of Indicators for Intelligent Adaptive Flying Information-Telecommunication Platforms in Mobile Wireless Sensor Networks. Future Intent-Based Networking. Lecture Notes in Electrical Engineering, – 2022. vol 831. P. 444-467.
4. Lysenko O., Romaniuk V, Sushyn I, Novikov V. The Improvement Direct Method for Collecting Monitoring Data from the Wireless Sensor Network Nodes with their Clustering by Telecommunications Aerial Platforms. IEEE - International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics . UkrMiCo'2021, Kyiv, Ukraine, November 29 – December 3, 2021. - P. 123-126.
5. Tachinina O., Lysenko O., Alekseeva I, Novikov V., Sushyn I. Methods for Parametric Adjustment of a Digital System and Precision Automatic Stabilization of an Unmanned Aerial Vehicle. IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD). Oktober 19-21, 2021, Kyev, Ukraine, P. 76-79.