

8. Структурообразование в белковых системах [Текст] /З. Д. Туловская, В. Н. Измайлова, И. Г. Алексеева, Л. И. Жигалова // Вестн. МГУ. – 1973. – № 5 – С. 580 – 585.
9. **Троицкий, Г. В.** Конформационные переходы сывороточного альбумина [Текст] / Г. В. Троицкий, Г. Ю. Ажицкий // Биохимия. – 1971. – Т. 36, № 5. – С. 915 – 919.
10. **Хадарцев, А. А.** Новые медицинские технологии на основе взаимодействия физических полей и излучений с биологическими объектами [Текст] / А. А. Хадарцев // Вестн. новых мед. технологий. – 1999. – № 1. – С. 7–15.
11. **Чернявский, Е. А.** Модификация белков плазмы крови под действием ультразвуковой кавитации [Текст] / Е. А. Чернявский, И. Э. Адзериho, В. М. Шкуматов // 9-я науч. шк.-конф. по орган. химии: тез. докл. – М., 2006. – С. 399.
12. **Чмиленко, Ф. А.** Ультразвук в аналитической химии. Теория и практика [Текст]: [монография] / Ф. А. Чмиленко, А. Н. Бакланов. – Д.: Изд-во Днепропетр. ун-та, 2001. – 264 с.
13. **Чмиленко, Ф. А.** Химический анализ крови [Текст] / Ф. А. Чмиленко, О. В. Саевич // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. «Хімія». – 2012. – Т.20, № 3/1. – С. 47 – 57.
14. **Шишкин, С. С.** Использование связывания красителей для количественного определения содержания белка в растворах (обзор) [Текст] / С. С. Шишкин // Вопр. мед. химии. – 1982. – Т. 28, № 5. – С. 134 – 141.
15. **Gustafsson, J. E. C.** Automated serum albumin determination of plasma albumin by the bromocresol green dye-binding method [Text] / J. E. C. Gustafsson // Clin. Chem. – 1978. – Vol. 24. – P. 369 –373.

Надійшла до редколегії 28.05.2015

УДК 629.764

В. В. Капцова, В. В. Авдєєв

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

КОНТУР КОРЕКЦІЇ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ КУТОВОГО ПОЛОЖЕННЯ СУПУТНИКА

Із застосуванням методу аналітичного конструювання регуляторів встановлені залежності коефіцієнтів закону регулювання, точності і запасу стійкості від коефіцієнтів критерію, який характеризує якість перехідного процесу стабілізації кутового положення супутника.

Ключові слова: супутник, обертальний рух, стабілізація.

С применением метода аналитического конструирования регуляторов установлены зависимости коэффициентов закона регулирования, точности и запаса устойчивости от коэффициентов критерия, который характеризует качество переходного процесса стабилизации углового положения спутника.

Ключевые слова: спутник, вращательное движение, стабилизация.

By using the method for an analytical regulator construction the dependences of a control law coefficients, accuracy and stability factor on coefficients in criteria of a transient process quality during stabilization of a space vehicle angle position are established.

Key words: space vehicle, rotatory motion, stabilization.

Вступ. Дослідження процесів керування орієнтацією супутника фахівці проводять починаючи з 60-х років минулого сторіччя. У зв'язку з ускладненням задач і появою нових технологій вони тривають і в теперішній час. Це обумовлено тим, що ці процеси мають суттєві відмінності у порівнянні з літаками, ракетами та об'єктами на Землі. Перш за все це необхідність економії енергетичних ресур-

сів, відсутність достатнього демпфірувального впливу зовнішнього середовища і наявність специфічних для космосу збурювальних факторів: магнітне поле Землі, світловий тиск, аеродинамічний та гравітаційний обертальні моменти [2 – 5].

Описано методи визначення фактичного кутового положення з використанням таких орієнтирів, як лінія горизонту Землі, її магнітне поле, Сонце, інші небесні світила, а також сигналів навігаційних космічних апаратів. Визначено джерела збурювальних кутових прискорень та проведено їхню оцінку залежно від параметрів супутника і орбіти. Розроблено методи оптимальної фільтрації сигналів датчиків з метою відновити координати вектора стану, необхідних для керування орієнтацією. Проведено аналіз динамічних характеристик процесів орієнтації і стабілізації з використанням різних видів виконавчих пристроїв, описано способи забезпечення асимптотичної стійкості і компенсації зовнішніх та параметричних збурень. Проведено дослідження нелінійної системи стабілізації заданого режиму обертального руху мікросупутника в орбітальній системі координат з використанням магнітного поля Землі. Шляхом моделювання визначено кількісні характеристики точності та швидкодії. Коефіцієнти закону регулювання вибрано з урахуванням умови бажаної швидкості переходу до заданого режиму руху.

Для визначення закону регулювання в системах стабілізації (СС) кінематичних параметрів об'єктів, описуваних лінійними диференціальними рівняннями, переважно застосовують перетворення Лапласа, передатні функції, частотні характеристики, кореневі годографи і критерії якості перехідних процесів. До основних показників СС прийнято відносити коефіцієнти помилок у разі дії збурювальних факторів, запас стійкості та якість перехідних процесів, яку кількісно оцінюють інтегральним критерієм. Під час проектування СС для забезпечення заданих показників нерідко виникає необхідність прийняття компромісних рішень, зокрема, у процесі визначення параметрів контуру корекції – закону регулювання.

Постановка задачі. В даній роботі поставлена задача встановлення зв'язку між коефіцієнтами критерію якості перехідного процесу компенсації збурення кутового положення супутника і коефіцієнтом похибки, запасом стійкості та тривалістю перехідного процесу, що не набуло належного висвітлення в доступних джерелах. Наявність такого зв'язку уможливить прийняття більш обґрунтованих рішень у процесі призначення показників СС.

Методи і способи дослідження. Для вирішення поставленої задачі використовували аналітичні і числові методи дослідження. На першому етапі аналогічно роботі [3] модель обертального руху супутника в одній із площин (об'єкт управління) залишимо їх у вигляді

$$\dot{x} + a \cdot x = u = -k \cdot \gamma \cdot x, \quad (1)$$

де координати вектора x – це кут повороту ϕ та кутова швидкість $\dot{\phi}$; u – кутове прискорення, що створюються виконавчим пристроєм; k – діагональна матриця підсилення каналів;

$$a = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad k = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix},$$

γ – матриця коефіцієнтів квадратичної форми ($\gamma_{ik} = \gamma_{ki}$).

У методі аналітичного конструювання регуляторів [1], започаткованому ще в роботах А. М. Лєтова [3], критерій для мінімізації стосовно моделі (1) такий:

$$I = \int_0^{\infty} (\beta_{11} \cdot \phi^2 + \beta_{22} \cdot \dot{\phi}^2 + u^2) \cdot dt, \quad (2)$$

де β_{11}, β_{22} – задані додатні числа.

У загальному випадку n – вимірного об'єкта управління кількість рівнянь для розрахунку елементів матриці γ дорівнює $n \cdot (n+1)/2$; записуються у вигляді

$$\sum_{p=1}^n (\gamma_{ip} \cdot a_{pk} + \gamma_{pk} \cdot a_{pi}) + \sum_{p=1}^n m_p \cdot \gamma_{pi} \cdot \sum_{p=1}^n m_p \cdot \gamma_{pk} = \beta_{ik}, \quad i, k = 1 \dots n. \quad (3)$$

Результати і їх обговорення. На підставі рівнянь (1, 3) з урахуванням симетрії матриці γ і того, що виконавчий пристрій створює обертальне прискорення, яке безпосередньо діє тільки на другу координату вектора стану (тобто в діагональній матриці підсилення каналів елемент $k_1 = 0$, а елемент $k_2 = 1$), отримуємо зв'язок коефіцієнтів критерію (2) з елементами матриці γ :

$$\gamma_{12}^2 = \beta_{11}, \quad \gamma_{22} \cdot \gamma_{12} = \gamma_{11}, \quad \gamma_{22}^2 - 2\gamma_{12} = \beta_{22}. \quad (4)$$

Із співвідношень (4) визначаємо матрицю коефіцієнтів квадратичної форми залежно від коефіцієнтів критерію (2):

$$\gamma = \begin{bmatrix} \sqrt{\beta_{11}} \cdot \sqrt{\beta_{22} + 2\sqrt{\beta_{11}}} & \sqrt{\beta_{11}} \\ \sqrt{\beta_{11}} & \sqrt{\beta_{22} + 2\sqrt{\beta_{11}}} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Відповідно до (1) оптимальне керування, яке забезпечує мінімум критерію (2), з урахуванням (5) можна виразити через коефіцієнти β_{11}, β_{22} цього критерію:

$$u = -k \cdot \gamma \cdot x = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \gamma_{11}x_1 + \gamma_{12}x_2 \\ \gamma_{21}x_1 + \gamma_{22}x_2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Беручи до уваги (6) з врахуванням збурювального прискорення $m(t)$, що діє на супутник, рівняння СС плоского обертального руху запишемо у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 - x_2 &= 0, \\ \dot{x}_2 + \gamma_{22}x_2 + \gamma_{12}x_1 &= m(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Визначимо залежність коефіцієнта похибки СС c_0 від коефіцієнтів β_{11}, β_{22} критерію (2). Для цього скористаємося теоремою операційного числення про кінцеве значення оригіналу – кута повороту супутника:

$$\Delta\phi = \lim_{t \rightarrow \infty} x_1(t) = \lim_{s \rightarrow 0} (s \cdot X_1(s)) = \lim_{s \rightarrow 0} \left(s \cdot \frac{m_0}{s} \cdot \frac{1}{s^2 + \gamma_{22}s + \gamma_{12}} \right) = \frac{m_0}{\gamma_{12}}. \quad (8)$$

У виразі (8) прийнято позначення: $\Delta\phi$ – статична похибка – кут повороту після закінчення перехідного процесу; s – змінна комплексного типу; $X_1(s)$ – зображення кута повороту за Лапласом; m_0 – постійне збурювальне прискорення. Коефіцієнт похибки

$$c_0 = \frac{\Delta\phi}{m_0} = \frac{1}{\gamma_{12}} = \frac{1}{\sqrt{\beta_{11}}}. \quad (9)$$

Розглянемо приклад: на супутник масою 12 кг і моментом інерції відносно відповідної осі $J = 0.0356 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ діє збурювальний обертальний момент $M_d = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м}$. Виходячи з (9), визначимо коефіцієнт β_{11} критерію (2) для забезпечення похибки кутового положення супутника $\Delta\phi = 0.5''$ у разі дії обертального моменту M_d :

$$\beta_{11} = \left(\frac{m_0}{\Delta\phi} \right)^2 = \left(\frac{M_d}{J \cdot \Delta\phi} \right)^2 = \left(\frac{6 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 \cdot 180}{0.0356 \cdot 0.5 \cdot \pi} \right)^2 = 4834 \text{ с}^{-4}.$$

Для цього прикладу коефіцієнт похибки СС $c_0 = 0.0144 \text{ c}^2$, $\gamma_{12} = 69.5 \text{ c}^{-2}$.

Як відомо, під запасом стійкості η на площині коренів характеристичного полінома маємо на увазі відстань від уявної осі цієї площини до найближчого кореня. Якщо пріоритетним показником СС є коефіцієнт похибки c_0 , то коефіцієнт β_{11} критерію (2) призначають виходячи з (9), а забезпечення заданого значення η досягається відповідним вибором коефіцієнта β_{22} критерію (2). Найбільшою величиною η буде для випадку дійсного кореня кратності двом характеристичного полінома [6], який входить у знаменник виразу (8). При цьому дискримінант D рівняння $s^2 + \gamma_{22}s + \gamma_{12} = 0$ набуває нульове значення:

$$D = \gamma_{22}^2 - 4\gamma_{12} = 0 = \beta_{22} - 2\sqrt{\beta_{11}}. \quad (10)$$

У разі виконання рівності (10) запас стійкості η набуває максимального значення, яке залежить від взятого за пріоритетний показника СС – коефіцієнта похибки c_0 :

$$\eta_m = \frac{\gamma_{22}}{2} = \frac{1}{2}\sqrt{\beta_{22} + 2\sqrt{\beta_{11}}} = \beta_{11}^{0,25} = \frac{1}{\sqrt{\tilde{\eta}_0}}. \quad (11)$$

Для наведеного вище прикладу $\eta_m = 8,34 \text{ c}^{-1}$.

Розв'язок рівнянь (7), коли збурювальне обертальне прискорення постійне ($m(t) = m_0 \cdot 1(t)$) і початкові значення нульові, має вигляд

$$x_1(t) = \phi(t) = m_0 \cdot c_0 \cdot [1 - e^{-\eta_m \cdot t} (\eta_m \cdot t + 1)]. \quad (12)$$

Якщо за тривалість перехідного процесу T_p взяти досягнення куту повороту $x_1(t)$ 95% усталеного значення, то із трансцендентного рівняння (12) ітераційним шляхом отримаємо оцінку

$$T_p = \frac{4,743}{\eta_m} = 4,743 \cdot \sqrt{c_0}, \quad (13)$$

в наведеному прикладі $T_p = 0,57 \text{ c}$.

Для встановлення залежності запасу стійкості η від коефіцієнта β_{22} критерію (2) введемо безрозмірне відношення

$$\nu = \beta_{22} / (2 \cdot \sqrt{\beta_{11}}) = c_0 \cdot \beta_{22} / 2. \quad (14)$$

Тоді після нескладних перетворень отримаємо:

$$\eta = \begin{cases} \eta_m \cdot \sqrt{(1+\nu)/2} = \sqrt{(1+\nu)/(2c_0)}, & \nu \leq 1, \\ \eta_m \cdot (\sqrt{1+\nu} - \sqrt{\nu-1}) / \sqrt{2} = (\sqrt{1+\nu} - \sqrt{\nu-1}) \cdot \sqrt{1/(2c_0)}, & \nu \geq 1. \end{cases} \quad (15)$$

Як впливає з (15), за зростання коефіцієнта ν (14) від нуля до одиниці запас стійкості змінюється пропорційно від значення $\eta_m / \sqrt{2}$ до найбільшої величини η_m , а у разі подальшого зростання ν від одиниці до нескінченності запас стійкості змінюється обернено пропорційно ν від η_m до нуля (Рис. 1).

Найбільш поширеною оцінкою тривалості перехідного процесу є $T_p = 3 / \eta$ [6], але розрахунки показують, що похибка цієї оцінки може бути у межах $\pm 60\%$, якщо за величину T_p взяти тривалість досягнення поточним значенням кута повороту 95% усталеного значення.

Висновки. 1. Методом аналітичного конструювання регуляторів встановлено залежність коефіцієнтів закону регулювання (5, 6) – контуру корекції від коефіцієнтів критерію (2), який характеризує якість перехідного процесу стабілізації кутового положення супутника.

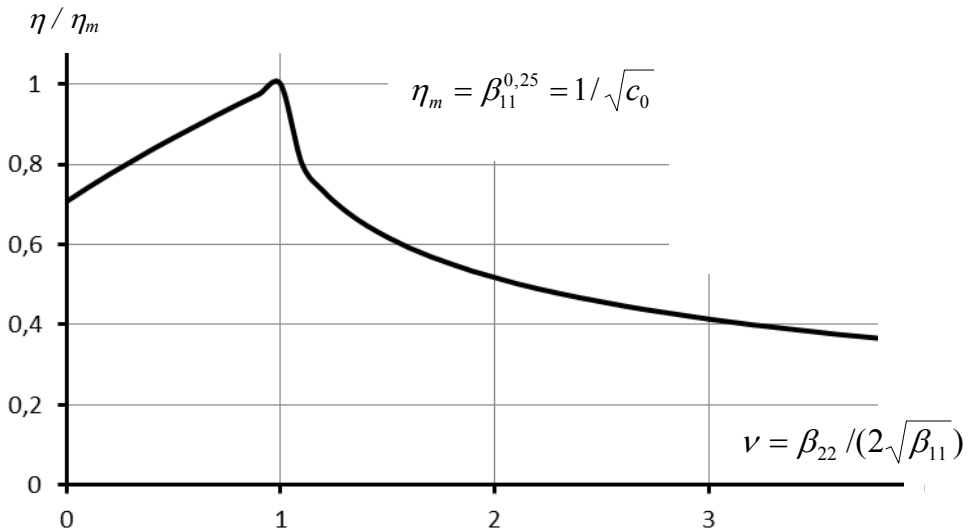


Рис. 1. Відносний запас стійкості СС залежно від коефіцієнтів критерію (2)

2. Визначено вплив коефіцієнта β_{11} на точність СС під час постійного збурювального прискорення (9).

3. Встановлено залежність запасу стійкості СС на площині коренів характеристичного полінома і відповідно тривалості перехідного процесу (11, 13, 15, Рис. 1) від коефіцієнтів критерію (2), мінімум якого забезпечується відповідним вибором закону регулювання.

Результати можуть бути використані для прийняття обґрунтованих рішень у разі визначення пріоритетних показників СС.

Бібліографічні посилання

1. Красовский, А. А. Аналитическое конструирование контуров управления летательными аппаратами [Текст] / А. А. Красовский. – М.: Машиностроение, 1969. – 240 с.
2. Лебедев, Д. В. Навигация и управление ориентацией малых космических аппаратов [Текст] / Д. В. Лебедев, А. И. Ткаченко. – Київ, Наук. думка, 2006. – 300 с.
3. Летов, А. М. Аналитическое конструирование регуляторов [Текст] / А. М. Летов. – М., 1960. – 441 с.
4. Павловський, М. А. Системи керування обертальним рухом космічних апаратів [Текст]: підруч. / М. А. Павловський, В. П. Горбулін, О. М. Клименко. – К: Наук. думка, 1997. – 200 с.
5. Пятак, И. А. Проектирование систем ориентации и стабилизации космических аппаратов [Текст]: уч. пособ. / И. А. Пятак. – Д.: РВВ ДНУ, 2005. – 60 с.
6. Раушенбах, Б. В. Управление ориентацией космических аппаратов [Текст] / Б. В. Раушенбах, Е. Н. Токарь. – М.: Наука, 1974. – 600 с.
7. Справочник по теории автоматического управления [Текст] / Под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.

Надійшла до редколегії 28.05.2015