

УДК 681.518

І. В. Зімчук, В. І. Іщенко

Житомирський військовий інститут радіоелектроніки імені С. П. Корольова

Алгоритм цифрової корекції орбітального гірокомпаса космічного апарата

Надійшла до редакції 03.06.05

Синтезовано алгоритм цифрового управління орбітальним гірокомпасом космічного апарата. Наводяться результати цифрового моделювання.

Розв'язання задач, що ставляться перед штучними супутниками Землі, потребує високоточної орієнтації супутника відносно орбітальної системи координат, яка пов'язана з вертикаллю місця та площиною орбіти [1]. Для імітації на борту космічного апарата площини орбіти та вимірювання кутового положення супутника відносно площини орбіти використовуються орбітальні гірокомпаси (ОГК) або гіроорбітанти [1, 3—5]. Гіроорбітанти відносяться до класу гіроскопічних вимірювачів, які будуються за принципом вільного гіроскопа і ґрунтуються на властивостях останнього зберігати положення осі власного обертання незмінним відносно інерційного простору. Для вимірювання двох кутів, наприклад, курсу та крену, на борту КА достатньо розташувати один триступеневий гіроскоп, головна вісь якого в зорієнтованому положенні збігається з напрямком вектора кутової орбітальної швидкості, а вісь зовнішньої рамки підвісу виставляється за геоцентричною вертикаллю. Інформація про кутове положення КА знімається з датчиків кутів, ротори яких жорстко пов'язані з відповідними осями гіроскопа, а статори пов'язані з корпусом КА. Для вимірювання трьох кутів необхідно мати не менше двох триступневих гіроскопів, головні осі яких взаємно перпендикулярні [2—4].

На точність гіроорбітанта впливають помилки стабілізації осі зовнішньої рами гіроскопа відносно сигналу місцевої вертикалі та наявність дрей-

фу осі кінетичного моменту відносно його початкового положення, який виникає внаслідок дії зовнішніх збурень (тертя в опорах підвісу, тяжіння тощо) та різного роду неминучих технологічних відхилень від ідеальної форми деталей підвісу і ротора гіроскопа. Внаслідок цього для забезпечення високої точності орієнтації КА у просторі виникає необхідність здійснювати періодичну корекцію положення осі гіроскопа за допомогою спеціальних керуючих контурів. Однак використання аналогових регуляторів положенням не завжди забезпечує бажану швидкість приладу під час виставлення та відсутність помилок у сталому режимі орієнтації. Підвищення точності ОГК може бути досягнуте використанням ряду методів, серед яких застосування високоточних гіроскопів, комплексування вимірювальних пристроїв, використання априорної інформації про модель відходів гіроскопів з подальшою їхньою компенсацією, додаткова обробка коригувальних сигналів та вектора помилок [1, 3, 5]. Вказані шляхи спрямовані на апаратне удосконалення гірокомпасу. Альтернативним шляхом підвищення точності ОГК є застосування цифрових коригувальних пристроїв з реалізованими на їхній базі алгоритмами управління [1]. Впровадження цифрових пристроїв управління дозволяє досягти принципів змін характеристик приладу, забезпечити програмування та високу обчислювальну потужність і надійність, низькі техніко-економічні

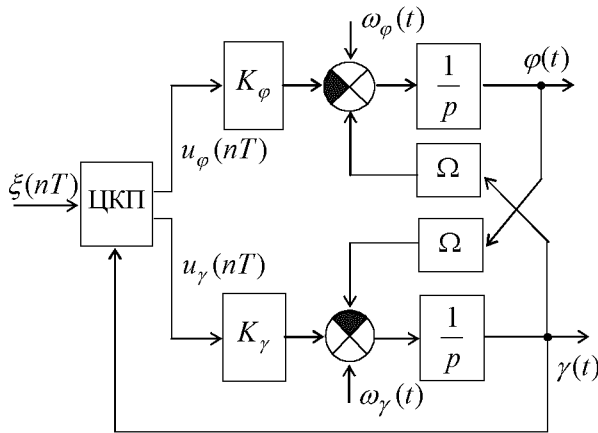


Рис. 1. Структурна схема однороторної гіроорбіти з цифровим управлінням

показники. Застосуванню цифрових алгоритмів для управління ОГК присвячено ряд публікацій [1, 4]. Однак у переважній більшості робіт розглядаються питання застосування алгоритмів оптимальної фільтрації вимірювань відповідних датчиків та використання апріорної інформації про модель дрейфу гіроскопів з подальшою його компенсацією. При цьому питання формування сигналу управління аналоговою частиною не розглядаються. В зв'язку з цим метою даної роботи є покращення динамічних та статичних характеристик ОГК за рахунок доповнення існуючої аналогової системи підсистемою цифрової корекції.

Задача синтезу алгоритму цифрової корекції ставиться за допомогою структурної схеми однороторної гіроорбіти, що приведена на рис. 1 [1]. Гіроорбіта представлена цифровим коригувальним пристроєм (ЦКП) та неперервною частиною у складі підсилювачів з коефіцієнтами підсилення K_γ , K_ϕ та датчиків моментів з передаточною функцією $1/p$. Вхідними діями є сигнал місцевої вертикалі $\xi(nT)$ та відходи гіроскопа $\omega_\gamma(t)$ і $\omega_\phi(t)$, а вихідними — оціночні значення кутів орієнтації супутника відносно площини орбіти: кут крену $\gamma(t)$ та курсу $\phi(t)$. Вплив перехресних зв'язків визначається величиною орбітальної швидкості Ω . Цифровий коригувальний пристрій може входити до складу бортової ЕОМ. Він виконує функції вимірювача сигналу розузгодження $\varepsilon(nT)$ між сигналами $\xi(nT)$ та

$\gamma(nT)$, а також здійснює управління аналоговою частиною гіроорбіти.

Припускається, що вхідна дія на систему управління ОГК в дискретні моменти часу $t_n = nT$ в режимі стабілізації описується рівнянням

$$\xi(n) = \xi, \quad (1)$$

а в режимі виставлення (приведення КА до осей орбітальної системи координат) — рівнянням

$$\xi(n) = \xi(n-1) + \Delta\xi(n-1)T, \quad (2)$$

де T — інтервал часової дискретизації, n — номер дискрети, ξ , $\Delta\xi$ — сигнали місцевої вертикалі та її перша різниця. Необхідно синтезувати алгоритм управління неперервною частиною ОГК, структура та параметри якої вважаються відомими. Критерій якості — мінімум середнього значення доданку абсолютних значень помилок стабілізації:

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\varepsilon(n)| \rightarrow \min, \quad (3)$$

де $\varepsilon(n) = \xi(n) - \gamma(n)$ — помилка стабілізації гіроорбіти відносно геоцентричної вертикалі.

Для синтезу алгоритму цифрової корекції орбітального гірокомпаса КА використовується метод, що оснований на теорії інваріантності [6]. Згідно з цим методом передаточна функція цифрового регулятора визначається виразом

$$F(z) = \frac{C(z) - A(z)}{A(z)\psi(z)}, \quad (4)$$

де $C(z)$ — характеристичний поліном замкненої системи, який визначає її стійкість; $\psi(z)$ — дискретна передаточна функція об'єкта управління; $A(z)$ — поліном, який визначає точність системи управління та розраховується з умови

$$A(z)\xi(n) = 0.$$

Дискретні передаточні функції каналів крену та курсу з урахуванням екстраполаторів нульового порядку визначаються у вигляді [1]

$$2\psi_\gamma(z) = \frac{K_1 T z^{-1}}{1 - z^{-1}}, \quad (5)$$

$$2\psi_\phi(z) = \frac{K_2 T z^{-1}}{1 - z^{-1}}, \quad (6)$$

де $K_1 = K_\gamma T + K_\phi \Omega T^2 / 2$, $K_2 = K_\phi T - K_\gamma \Omega T^2 / 2$.

Для забезпечення другого порядку астатизму цифрового регулятора за каналом крену поліном

$A(z)$ матиме вигляд

$$A_y(z) = (1 - z^{-1})^2. \quad (7)$$

Характеристичний поліном замкненої системи визначається у вигляді [6]

$$C_y(z) = (1 - Q_1 z^{-1})(1 - Q_2 z^{-1}). \quad (8)$$

Підстановкою рівнянь (5), (7) та (8) до виразу (4) розраховується передаточна функція цифрового регулятора:

$$F_y(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}}, \quad (9)$$

де

$$a_0 = \frac{2 - Q_1 - Q_2}{K_1}, \quad a_1 = \frac{Q_1 Q_2 - 1}{K_1}.$$

На підставі рівняння [6] для управляючої дії

$$u(n) = F(z)\varepsilon(n) \quad (10)$$

визначається алгоритм управління аналоговою частиною:

$$u_y(n) = a_0 \varepsilon(n) + a_1 \varepsilon(n-1) + u_y(n-1). \quad (11)$$

Такий же підхід використовується і для синтезу алгоритму цифрової корекції каналу курсу. При визначених поліномах

$$A_\varphi(z) = (1 - z^{-1})^2,$$

$$C_\varphi(z) = (1 - Q_3 z^{-1})(1 - Q_4 z^{-1})$$

та передаточній функції об'єкта управління (6) за виразами (4) і (10) розраховується передаточна функція цифрового регулятора

$$F_\varphi(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (12)$$

та алгоритм управління

$$u_\varphi(n) = b_0 \varepsilon(n) + b_1 \varepsilon(n-1) + u_\varphi(n-1), \quad (13)$$

де

$$b_0 = \frac{2 - Q_3 - Q_4}{K_2}, \quad b_1 = \frac{Q_3 Q_4 - 1}{K_2}.$$

Дослідження синтезованого алгоритму управління ОГК КА проводилось шляхом математичного моделювання. При моделюванні неперервної частини використовувались рекурентні формули за методом трапецій [2]. Для інтегровальних ланок маємо такі рекурентні рівняння:

$$\dot{\varphi}(k) = -K_\varphi u_\varphi(k) + \Omega \gamma(k-1) + \omega_\varphi(k),$$

$$\varphi(k) = \frac{T}{2} [\dot{\varphi}(k) + \dot{\varphi}(k-1)] + \varphi(k-1),$$

$$\dot{\gamma}(k) = K_\gamma u_\gamma(k) - \Omega \varphi(k-1) + \omega_\gamma(k),$$

$$\gamma(k) = \frac{T}{2} [\dot{\gamma}(k) + \dot{\gamma}(k-1)] + \gamma(k-1).$$

Моделювання проводилось при таких умовах [1]: $K_\gamma = 0.1 \text{ с}^{-1}$, $K_\varphi = 0.012 \text{ с}^{-1}$, $\Omega = 0.001 \text{ с}^{-1}$, $Q_1 = 0.95$, $Q_2 = 0.85$, $Q_3 = 0.95$, $Q_4 = 0.85$. Слід відмітити, що часовий параметр n змінюється через такт квантування $T = 0.1 \text{ с}$, а часовий параметр k змінюється через такт моделювання $T_0 = 0.01 \text{ с}$. Результати дослідження у вигляді помилки $\varepsilon(n)$ стабілізації осі зовнішньої рами для аналогового та синтезованого регуляторів при одиничній вхідній дії $\varphi(nT) = 1^\circ$ приведені на рис. 2, а, а при лінійній вхідній дії $\varphi(nT) = nT$ — на рис. 2, б. Із отриманих результатів видно, що порівняно з аналоговим регулятором

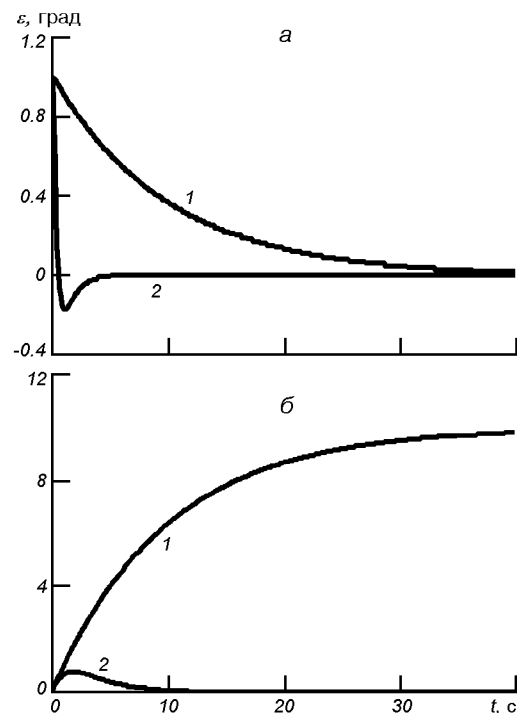


Рис. 2. Помилка стабілізації осі зовнішньої рами гіроскопа: а — при одиничній вхідній дії $\varphi = 1^\circ$, б — при лінійній вхідній дії $\varphi = nT$. Крива 1 — для аналогової системи, 2 — для цифрового регулятора

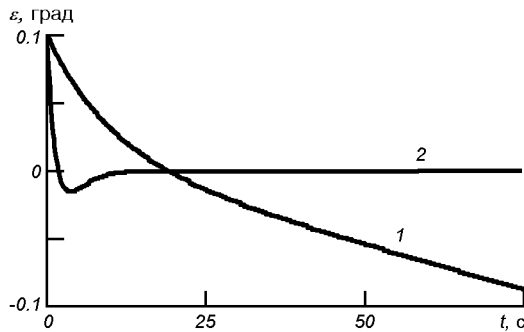


Рис. 3. Помилка стабілізації осі зовнішньої рами гіроскопа при наявності дрейфу. Крива 1 — для аналогової системи, 2 — для цифрового регулятора

застосування синтезованого алгоритму управління дозволяє зменшити час регулювання у шість разів при одиничній входній дії та уникнути динамічної помилки орієнтації при лінійній входній дії. Такий результат отримано завдяки тому, що синтезований цифровий регулятор відноситься до класу компенсаційних. В системах управління з такими регуляторами нулі та полюси передаточної функції об'єкта управління повністю компенсуються, а властивості системи визначаються лише параметрами цифрового регулятора і не залежать від параметрів об'єкта.

Дослідження провадилось також при входній дії $\varphi(nT) = 1^\circ$ та наявності відходів гіроскопа $\omega_\gamma(kT_0) = 0.00014$ град/с, $\omega_\varphi(kT_0) = 0.00014$ град/с [4]. Результати дослідження у вигляді помилки стабілізації осі зовнішньої рами гіроскопа відносно сигналу місцевої вертикалі для аналогового та синтезованого регуляторів приве-

дені на рис. 3. Видно, що при наявності дрейфу гіроскопа застосування синтезованого алгоритму управління дозволяє уникнути помилки стабілізації.

Таким чином, використання синтезованого алгоритму цифрового управління дає змогу покращити динамічні та статичні характеристики орбітального гірокомпаса і, як наслідок, покращити якість системи управління кутовим положенням корпусу космічного апарата.

1. Бесекерский В. А., Иванов В. А., Самошкин Б. Б. Орбитальное гироскопирование / Под ред. Б. Б. Самошкина. — СПб: Политехника, 1993.—256 с.
2. Гостев В. И., Стеклов И. К. Системы автоматического управления с цифровыми регуляторами: Справочник. — К.: Радиоаматор, 1998.—704 с.
3. Каргу Л. И. Системы угловой стабилизации космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1980.—172 с.
4. Павловський М. А., Горбулін В. П., Клименко О. М. Системы керування обертальним рухом космічних апаратів. — К.: Наук. думка, 1997.—200 с.
5. Пельпор Д. С., Михалев И. А., Бауман В. А. и др. Гироскопические системы. Гироскопические приборы и устройства: Учеб. для вузов. Изд. 2-е перераб. и доп. / Под ред. Д. С. Пельпора. — М.: Высшая школа, 1988.—424 с.
6. Пушкарев Ю. А. Анализ и синтез дискретных систем оценивания. — Житомир: ЖВУРЭ, 1989.—326 с.

AN ALGORITHM FOR DIGITAL CORRECTION OF THE ORBITAL GYROCOMPASS OF A SPACE VEHICLE

I. V. Zimchuk, V. I. Ischenko

An algorithm for digital correction of the orbital gyrocompass of a space vehicle is proposed. Some results of digital simulation are presented.