



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 4526

(13) U

(51) 7 B64G1/28

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ  
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під  
відповідальність  
власника  
патенту

(54) СИСТЕМА КУТОВОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

1

2

(21) 20040503944

(22) 25.05.2004

(24) 17.01.2005

(46) 17.01.2005, Бюл. № 1, 2005 р.

(72) Тронь Юрій Опанасович, Кузякін Юрій Петрович

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИ-  
ТУТ"

(57) Система кутової стабілізації космічних апаратів, що містить послідовно з'єднані електропривід, редуктор і маховик, яка відрізняється тим, що вона оснащена другим електроприводом, другим редуктором, причому виходи першого та другого редукторів підключені до першого та другого входів диференціала, вихід якого з'єднаний з маховиком, вихід першого редуктора через перший вимі-

рювач кутової швидкості першого електропривода та перший масштабний перетворювач з'єднаний з другим входом другого суматора, вихід якого з'єднаний з входом другого підсилювача, вихід якого з'єднаний з входом другого електропривода, вихід другого редуктора через другий вимірювач кутової швидкості другого електропривода і другим масштабного перетворювача з'єднаний з другим входом першого суматора, вихід якого з'єднаний з входом першого підсилювача, вихід якого з'єднаний з входом першого електропривода, перші входи першого і другого суматорів з'єднані і створюють керуючий вхід системи кутової стабілізації космічних апаратів, виходи першого і другого вимірювачів кутової швидкості першого та другого електропривода з'єднані з входом мікропроцесора.

Корисна модель відноситься до галузі космонавтики і може бути використаний для системи кутової стабілізації космічних апаратів (КА) у яких в якості виконавчих органів використовуються тіла обертання.

Відома системи кутової стабілізації (КА) з використанням в якості виконавчих органів двигунів маховиків (ДМ) [1].

Недоліками відомої системи є те, що інерційний момент створений таким маховиком залежить від маси використаного маховика.

Відома системи кутової стабілізації (КА) з використанням електроприводу [2].

Відома система має наступні недоліки.

Перший недолік пов'язаний з нелінійним характером зміни інерції маховика, причому, в процесі наростання кутової швидкості електропривода прискорення зменшується від максимуму до нуля.

Другий недолік пов'язаний з коротким проміжком часу існування керуючого моменту за рахунок режиму насичення.

Третій недолік пов'язаний з впливом на точність формування керуючого моменту параметричних збурювань передаточної функції електроприводу.

Четвертий недолік пов'язаний зі скороченим

ресурсом електропривода, так як при його відмові об'єкт стає некерованим.

Відома системи кутової стабілізації (КА) з використанням маховиків зі змінним моментом інерції [3], що складається з одного ДВ, редуктора та маховика є прототипом.

Недоліками таких систем є складність реалізації механізмів дозволяючих зробити розкриття маховика, знижена точність реалізації необхідного закону та мають низький ресурс використання обумовлений відмовою спрацьованістю одного електропривода (ЕП).

В основу корисної моделі поставлено задачу удосконалити систему кутової стабілізації (КА) шляхом підвищення точності реалізації лінійного закону керування, забезпечення інваріантності передаточної функції ЕП від параметричних збурювань, підвищення ресурсу системи кутової стабілізації КА, що забезпечує досконалість технічного рішення.

Поставлена задача вирішується тим, що в системі кутової стабілізації КА, яка містить послідовно з'єднані ЕП, редуктор і маховик, новим є те, що система отримує другий ЕП, другий редуктор, причому виходи першого та другого редукторів, підключені до першого та другого входів дифере-

(13) U

(11) 4526

(19) UA

ніцала, вихід якого з'єднаний з маховиком, вихід першого редуктора через перший вимірювач кутової швидкості першого ЕП та перший масштабний перетворювач (МП) з'єднаний з другим входом другого суматора, вихід якого з'єднаний з входом другого підсилювача, вихід якого з'єднаний з входом другого ЕП, вихід другого редуктора через другий вимірювач кутової швидкості другого ЕП і другого МП з'єднаний з другим входом першого суматора, вихід якого з'єднаний з входом першого підсилювача, вихід якого з'єднаний з входом першого ЕП, перші входи першого і другого суматорів з'єднані і створюють керуючий вхід системи кутової стабілізації КА, виходи першого і другого вимірювачів кутової швидкості першого та другого ЕП з'єднані з входом мікропроцесора.

На Фіг.1 представлена кінематична схема кутової стабілізації КА в трьохмірному просторі по осям X Y Z.

На Фіг.2 представлена принципова схема системи кутової стабілізації КА по одній вісі орієнтації.

Фіг.3 ілюструє властивість інваріантності результуючого коефіцієнту передачі одною канала стабілізації від параметричних збурювань другою каналу.

Фіг.4-5 представлені перехідні процеси в системі при формуванні кінетичного моменту керування.

Фіг.6-7 представлені перехідні процеси в системі при параметричних збуреннях статичних коефіцієнтів в діапазоні  $\pm 20\%$ .

Системи кутової стабілізації КА, у відповідності до запропонованого технічного рішення складається з першого і другого ЕП 1 і 2, першого і другого редукторів 3 і 4, першого і другого вимірювачів кутової швидкості (ТГ) 5 і 6, диференціала 7, маховика 8, першого і другого суматорів 9 і 10, першого і другого підсилювачів 11 і 12, першого і другого МП 13 і 14, модулів вводу аналогових сигналів (АЦП) 15, 16, інтерфейс 17, мікропроцесор 18, модуль виводу цифрових сигналів (ЦАП) 19. Причому, вихід першого ТГ 5 після першого МП 13 підключений до 2-го входу 2-го суматора 10, а вихід 2-го ТГ 6 після другого МП 14 підключений до 2-го входу 1-го суматора 9, а перші входи 1-го і 2-го суматорів 9 і 10 поєднані і створюють вхід приладу. Елементи 9, 11, 1 і 3 створюють перший канал формування керуючого моменту. Елементи 10, 12, 2 і 4 створюють другий канал формування керуючого моменту.

Системи кутової стабілізації КА функціонує наступним чином.

Нехай передаточні функції 1-го і 2-го ЕП 1 і 2, з приведеним моментом інерції маховика до входу ЕП мають наступний вигляд:

$$W(s)_1 = \frac{\omega_1}{\varepsilon} = \frac{K_1}{a_1 \cdot s + 1} \quad (1)$$

$$W(s)_2 = \frac{\omega_2}{\varepsilon} = \frac{K_2}{a_2 \cdot s + 1} \quad (2)$$

де  $\varepsilon$  - сигнал задання;  $\omega_1$  і  $\omega_2$  - відповідно кутова швидкість 1-го і 2-го ЕП;  $K_1$  і  $K_2$  - передаточні коефіцієнти 1-го і 2-го каналів;  $a_1$  і  $a_2$  - коефіцієнти характеризуючі постійні часу 1-го і 2-го ЕП.

У відповідності з запропонованим способом кутова швидкість 1-го ЕП  $\omega_1$  перетворюється в

сигнал  $U_1$  1-го ТГ5, масштабується в МП 13 і алгебраїчно сумується в другому суматорі 10 з сигналом задання і формується сигнал управління 2-м ЕП 2 у відповідності з рівнянням

$$U_2 = \varepsilon - \beta_1 U_1 \quad (3)$$

де  $U_1 = K_{\omega 1} \omega_1$ ,  $U_2$  - сигнал на вході 2-го підсилювача 12;  $\varepsilon$  - сигнал задання;  $U_1$  - сигнал на виході ТГ5;  $\beta_1$  - коефіцієнт передачі МП 12;  $K_{\omega 1}$  - коефіцієнт передачі ТГ5.

Далі, кутова швидкість 2-го ЕП 2  $\omega_2$  перетворюється в сигнал  $U_2$  2-го ТГ6, масштабується в МП 14 і алгебраїчно сумується в 1-му суматорі 9 з сигналом задання і формується сигнал управління 1-м ЕП 1 у відповідності з рівнянням

$$U_1 = \varepsilon + \beta_2 U_2 \quad (4)$$

де  $U_1$  - сигнал на вході 1-го підсилювача 11;  $U_2 = K_{\omega 2} \omega_2$  - сигнал на виході ТГ6;

$\beta_2$  - коефіцієнт передачі МП 13;  $K_{\omega 2}$  - коефіцієнт передачі ТГ6.

На основі рівнянь (1) - (4) можна скласти наступну систему

$$\omega_1(s) = W_1(s) \varepsilon + W_2(s) \beta_2 \omega_2(s) \quad (5)$$

$$\omega_2(s) = W_2(s) \varepsilon - W_1(s) \beta_1 \omega_1(s) \quad (6)$$

Рівняння (5) - (6) можна представити в наступному вигляді

$$\omega_1(s) - W_2(s) \beta_1 \omega_2(s) = W_1(s) \varepsilon \quad (7)$$

$$\omega_2(s) + W_1(s) \beta_2 \omega_1(s) = W_2(s) \varepsilon \quad (8)$$

Рівняння (7) - (8) можна представити в матричній формі

$$\begin{pmatrix} 1 & -W_2(s) \cdot \beta_1 \\ W_1(s) \cdot \beta_2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega(s)_1 \\ \omega(s)_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W(s)_1 \\ W(s)_2 \end{pmatrix} \cdot \varepsilon \quad (9)$$

Розв'язком системи (9) буде система 2-х параметрично взаємозалежних рівнянь

$$(1 + W_1(s) W_2(s) \beta_1 \beta_2) \omega_1(s) = W_1(s) (1 + W_2(s) \beta_2) \varepsilon \quad (10)$$

$$(1 + W_1(s) W_2(s) \beta_1 \beta_2) \omega_2(s) = W_2(s) (1 - W_1(s) \beta_1) \varepsilon \quad (11)$$

З урахуванням передаточних функцій (1), (2) отримаємо

$$\omega_1(s) = \frac{K_1 \cdot a_1 \cdot s + K_1 \cdot (1 + K_2 \cdot \beta_2)}{a_1 \cdot a_2 \cdot s^2 + (a_1 + a_2) \cdot s + 1 + K_1 \cdot K_2 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2} \quad (12)$$

$$\omega_2(s) = \frac{K_2 \cdot a_2 \cdot s + K_2 \cdot (1 - K_1 \cdot \beta_1)}{a_1 \cdot a_2 \cdot s^2 + (a_1 + a_2) \cdot s + 1 + K_1 \cdot K_2 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2} \quad (13)$$

Таким чином, в результаті, взаємозалежних і цілеспрямованих дій, виконуючих над математичними об'єктами, першим з яких являється 1-й ЕП 1, а другим - 2-й ЕП 2, створені дві структури, функціонально визначені рівняннями (12) - (13).

Подібні рівняння визначають рефлексивну взаємодію, бо перший об'єкт за допомогою рефлексивних зв'язків 5-13, взаємодіє з другим об'єктом, а другий об'єкт, в свою чергу, за допомогою рефлексивних зв'язків 5-13, взаємодіє з першим об'єктом.

При виконанні умови:

$$K_1 \beta_1 = 1, \quad (14)$$

що досить просто досягається вибором коефіцієнта МП 5  $\beta_1 = 1/K_1$  система (12) і (13) зводиться до вигляду:

$$\omega(s)_1 = \frac{K_1 \cdot a_2 \cdot s + K_1 \cdot (1 + K_2 \cdot \beta_2)}{a_1 \cdot a_2 \cdot s^2 + (a_1 + a_2) \cdot s + 1 + K_2 \cdot \beta_2} \quad (15)$$

$$\omega(s)_2 = \frac{K_2 \cdot a_1 \cdot s}{a_1 \cdot a_2 \cdot s^2 + (a_1 + a_2) \cdot s + 1 + K_2 \cdot \beta_2} \quad (16)$$

Рівняння (15) - (16) зводяться до стандартного вигляду:

$$\omega(s)_1 = \frac{b_1 \cdot s + b_0}{C_2 \cdot s^2 + C_1 \cdot s + 1} \quad (17)$$

$$\omega(s)_2 = \frac{b_2 \cdot s}{C_2 \cdot s^2 + C_1 \cdot s + 1} \quad (18)$$

де

$$b_1 = \frac{K_1 \cdot a_2}{1 + K_2 \cdot \beta_2}$$

$$b_0 = \frac{K_1 \cdot a_2}{1 + K_2 \cdot \beta_2}$$

$$b_0 = K_1$$

$$C_1 = \frac{a_1 + a_2}{1 + K_2 \cdot \beta_2}$$

$$C_2 = \frac{a_1 \cdot a_2}{1 + K_2 \cdot \beta_2}$$

Статична передаточна функція при цьому буде мати наступний вигляд

$$A_1 = \frac{K_1(1 + K_2 \cdot \beta_2)}{1 + K_1 \cdot \beta_1 \cdot K_2 \cdot \beta_2} \quad (19)$$

- передаточна функція 1-го каналу

$$A_2 = \frac{K_2(1 - K_1 \cdot \beta_1)}{1 + K_1 \cdot \beta_1 \cdot K_2 \cdot \beta_2} \quad (20)$$

- передаточна функція 2-го каналу

$$A = A_1 + A_2 = \frac{K_1 \cdot (1 + K_2 \cdot \beta_2) + K_2 \cdot (1 - K_1 \cdot \beta_1)}{1 + K_1 \cdot \beta_1 \cdot K_2 \cdot \beta_2} \quad (21)$$

- результуючий коефіцієнт передачі системи.

Для отримання залежностей (19) - (21), задамося наступними розрахунковими значеннями:  $K_1=K_2=10$ ,  $\beta_1=0,1$ ,  $\beta_2=0,5$ .

Результати розрахунків наведені в таблиці 1 і показані на Фіг.3.

Таблиця 1

$K_1$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$A_1$	0	6	8	9	9,6	10	10,285	10,5	10,666	10,8	10,9
$A_2$	10	4	2	1	0,4	0	-0,285	-0,5	-0,666	-0,8	-0,9
$A$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

З таблиці 1 очевидно, що результуючий коефіцієнт передачі системи  $A$  інваріантним відносно параметричних збурень коефіцієнта прямого перетворення  $K_1$  1-го каналу.

Це відбувається тому, що при зменшенні коефіцієнта  $K_1$  на величину  $\Delta K_1$  коефіцієнт  $A_1$  зменшується на величину  $\Delta A_1$ . При цьому, коефіцієнт  $A_2$  збільшується на величину  $\Delta A_2$ , причому  $\Delta A_1 = \Delta A_2$  внаслідок чого результуючий коефіцієнт передачі системи залишається незмінним  $A = \text{const}$ . Ця властивість рефлексивних систем відносить їх до класу самоорганізаційних.

Покажемо, що абсолютна похибка результуючого коефіцієнта передачі запропонованого способу менше, ніж в одноканальній схемі (прототипу) при одночасному параметричному збуренні коефіцієнтів передачі  $K_1$  і  $K_2$ .

Нехай  $K_1=K_2=8$ . Тоді  $A_1=9,523$ ,  $A_2=0,381$ ,  $A=9,904$ , а абсолютна похибка коефіцієнта передачі системи буде:

$$\Delta A = \frac{10 - 9,904}{10} \cdot 100\% = 0,9\%$$

Таким чином, при похибці обох каналів на 20% загальний коефіцієнт передачі зменшиться лише на 0,9%. Причому, система залишається працездатною навіть при "відмові" одного з ЕП.

Для побудови перехідних процесів, відповідних передаточним функціям (17) і (18), приведемо розрахунковий приклад.

Задамося наступними параметрами системи:  $K_1=K_2=10$ ,  $\beta_1=0,1$ ,  $\beta_2=0,01$ ,  $a_1=0,5$ ,  $a_2=0,6$ .

$$W(s)_1 = \frac{6s + 10}{0,3s^2 + 1,1s + 1} = \frac{41,916}{2s + 1} - \frac{31,916}{1666s + 1} \quad (19)$$

$$W(s)_2 = \frac{5s}{0,3s^2 + 1,1s + 1} = \frac{14,97}{1666s + 1} - \frac{14,97}{2s + 1} \quad (20)$$

Тоді рівняння (17) і (18) будуть мати наступний вигляд:

Передаточним функціям (19) і (20) будуть відповідати наступні рівняння перехідних процесів:

Перехідні процеси відповідні цим рівнянням отримані на комп'ютері та приведені на Фіг.4-7.

Аналіз сумарного перехідного процесу на виході диференціального механізму 7, Фіг.2, кінетичний момент якого прикладений до маховика, показує,

$$\omega(t)_1 = 10 + 31,916e^{-0,75t} - 41,916e^{-0,501t}$$

$$\omega(t)_2 = 14,97(e^{-2t} - e^{-1,666t})$$

$$\omega(t)_\Sigma = 10 + 31,916(e^{-0,75t} - 1,313e^{-0,501t}) + 14,97(e^{-2t} - e^{-1,666t})$$

що він підпорядковується лише в певному діапазоні (проміжок часу лінійного закону), у відповідності з рівнянням:

$$\omega(t)_\Sigma = K \cdot t = 115 \cdot t$$

де  $K = \tan \alpha$  - кут нахилу часової характеристики по відношенню до вісі часу.

Дійсно це можна відобразити даними, викладеними в таблиці 2.

Таблиця 2

t	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
$\omega_z(t)$	2,3	4,6	6,9	9,2	10,15

Наявність лінійної залежності, в певному проміжку часу, сумарної кутової швидкості від часу, свідчить про постійний кут нахилу вектора кутової швидкості до осі часу, що приводить до кінетичного моменту, прикладеного до КА. Це важлива властивість системи Фіг.2, так як спрощує використання моменту маховика в системі керування (СК) КА.

При обертанні маховика безперервно змінюються кутові швидкості  $\omega_1$  і  $\omega_2$  першого і другого ЕП шляхом вводу сигналів з тахогенератора 5 і 6 в мікропроцесор і розв'язання рівнянь

$$\omega_1 = K_5 U_5$$

$$\omega_2 = K_6 U_6$$

$$\omega_z = \omega_1 + \omega_2$$

де  $U_5$  і  $U_6$  - сигнали тахогенераторів 5 і 6;  $K_5$  і  $K_6$  - коефіцієнти пропорційності.

Отримане значення кутової швидкості  $\omega_z$  порівнюється з заданим значенням  $\omega_3$  і в момент їх рівності формується сигнал в систему кутової стабілізації на скидання кінетичного моменту шляхом включення реактивних двигунів КА.

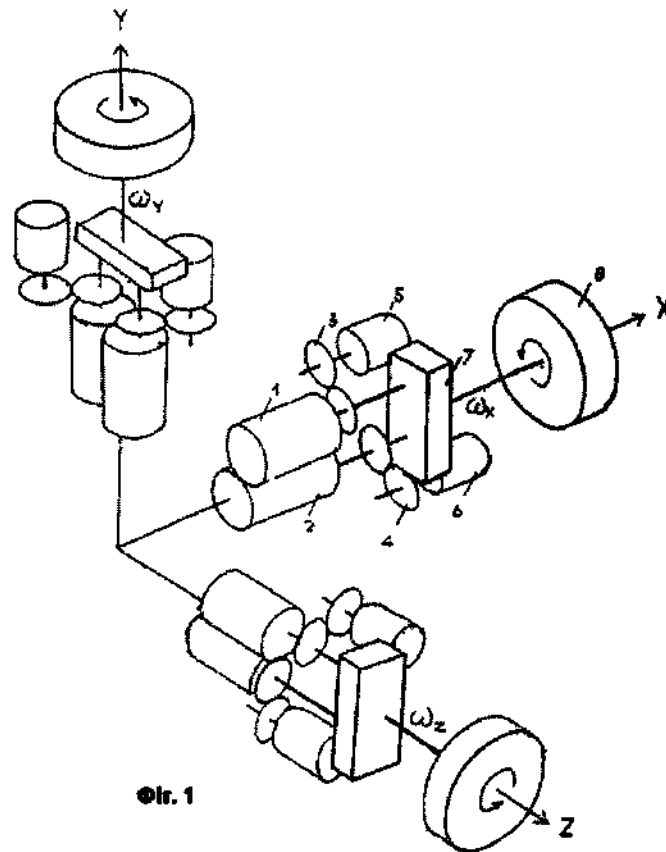
На Фіг.8 представлені перехідні процеси в сис-

темі коли коефіцієнт  $K_1$  зменшився на 20% тобто  $K_1=8$ . Тоді, перехідний процес в 1-му каналі прямує до статичного значення  $H_1=8$ , а в 2-му каналі до статичного значення  $H_2=2$ . Це означає, що сумарний перехідний процес залишається незмінним,  $H=10$ .

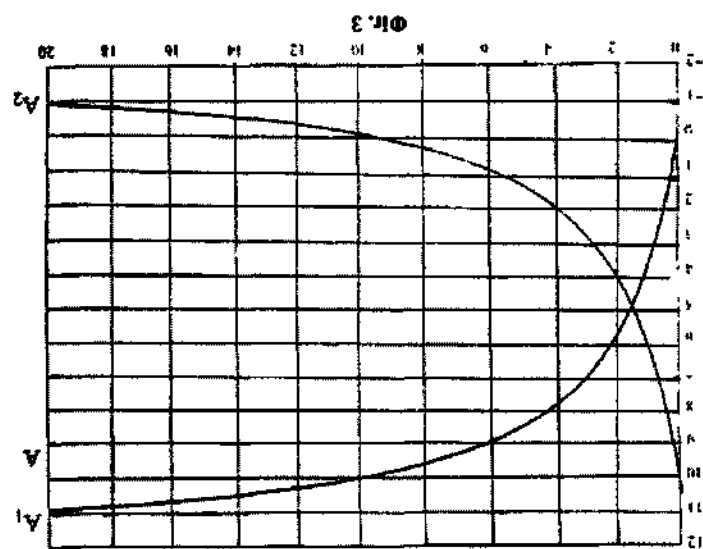
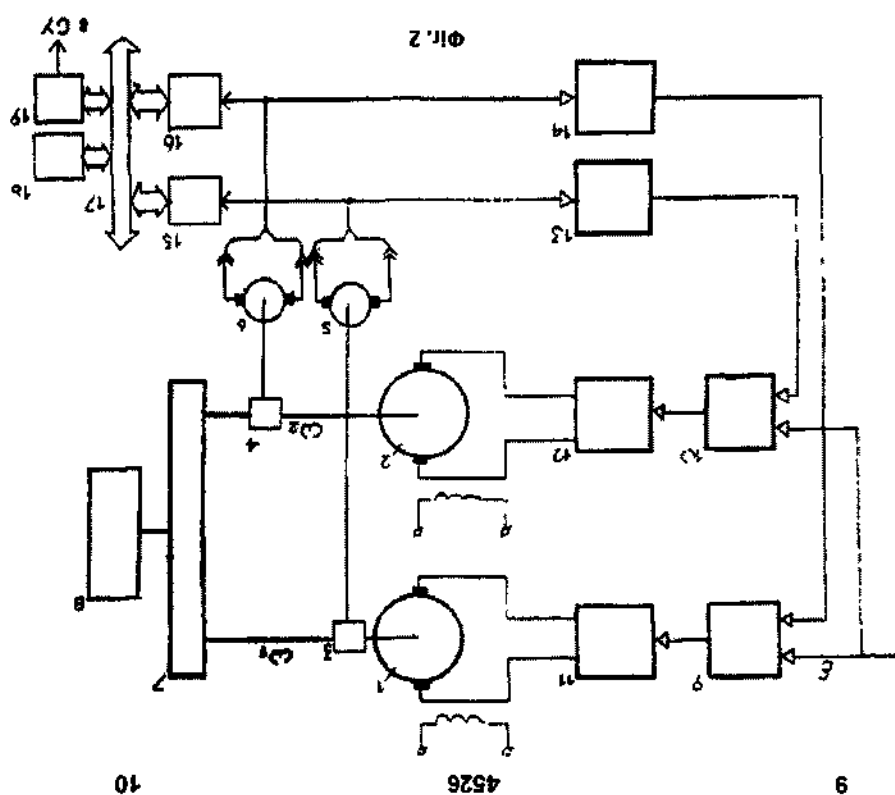
На Фіг.9 представлені перехідні процеси в системі при  $K_1=12$ . Представлені розрахунки доводять переваги запропонованого способу в порівнянні з прототипом, що полягає в підвищенні надійності, швидкодії і інваріантності сумарного коефіцієнту передачі від параметричних збурювань окремих каналів.

Література:

1. Космические аппараты. Под общей ред. К.П. Феоктистова. М., Воениздат, 1983, стр. 240;
2. Системы угловой стабилизации космических аппаратов. М., Машиностроение, 1980 стр. 48;
3. Каргу Л.И. Системы угловой стабилизации космических аппаратов. М., Машиностроение, 1980 стр. 68-71.



Фіг. 1



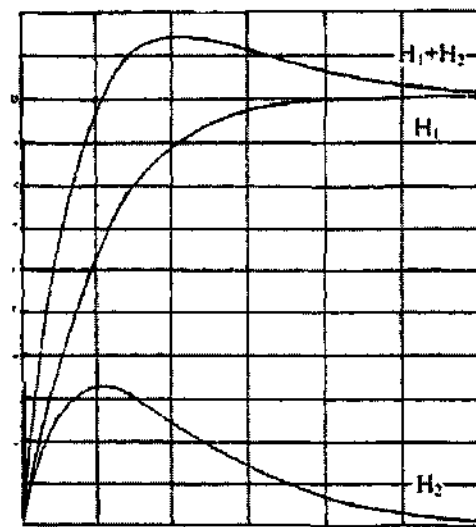


Fig. 4

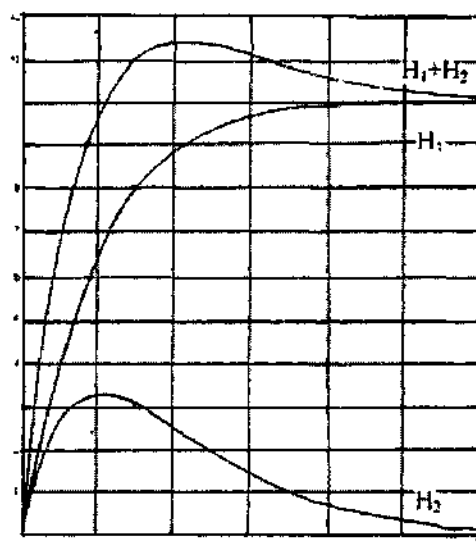


Fig. 5

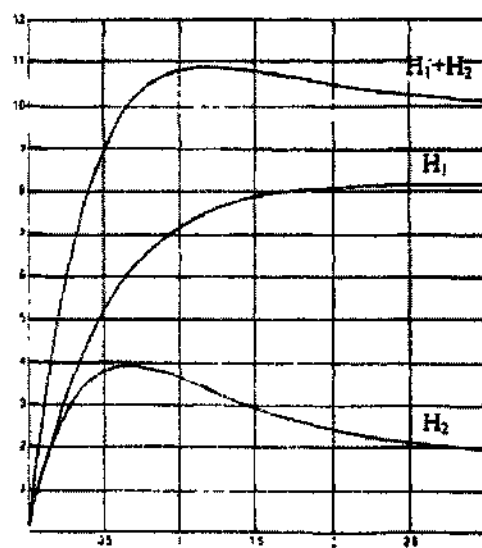
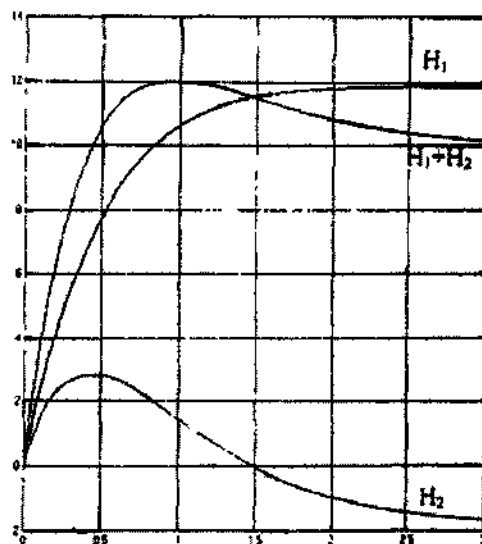


Fig. 6



Фиг. 7







УКРАЇНА

(19) UA (11) 4526 (13) U

(51) 7 B64G1/28

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ  
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під  
відповідальність  
власника  
патенту

## (54) СИСТЕМА КУТОВОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

1

(21) 20040503944

(22) 25.05.2004

(24) 17.01.2005

(46) 17.01.2005, Бюл. № 1, 2005 р.

(72) Тронь Юрій Опанасович, Кузякін Юрій Петрович

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

(57) Система кутової стабілізації космічних апаратів, що містить послідовно з'єднані електропривід, редуктор і маховик, яка відрізняється тим, що вона оснащена другим електроприводом, другим редуктором, причому виходи першого та другого редукторів підключені до першого та другого входів диференціала, вихід якого з'єднаний з маховиком, вихід першого редуктора через перший вимірювач

2

кутовий швидкості першого електропривода та перший масштабний перетворювач з'єднаний з другим входом другого суматора, вихід якого з'єднаний з входом другого підсилювача, вихід якого з'єднаний з входом другого електропривода, вихід другого редуктора через другий вимірювач кутової швидкості другого електропривода і другого масштабного перетворювача з'єднаний з другим входом першого суматора, вихід якого з'єднаний з входом першого підсилювача, вихід якого з'єднаний з входом першого електропривода, перші входи першого і другого суматорів з'єднані і створюють керуючий вхід системи кутової стабілізації космічних апаратів, виходи першого і другого вимірювачів кутової швидкості першого та другого електропривода з'єднані з входом мікропроцесора.

Корисна модель відноситься до галузі космонавтики і може бути використаний для системи кутової стабілізації космічних апаратів (КА) у яких в якості виконавчих органів використовуються тіла обертання.

Відома системи кутової стабілізації (КА) з використанням в якості виконавчих органів двигунів маховиків (ДМ) [1].

Недоліками відомої системи є те, що інерційний момент створений таким маховиком залежить від маси використаного маховика.

Відома системи кутової стабілізації (КА) з використанням електроприводу [2].

Відома система має наступні недоліки.

Перший недолік пов'язаний з нелінійним характером зміни інерції маховика, причому, в процесі наростання кутової швидкості електропривода прискорення зменшується від максимуму до нуля.

Другий недолік пов'язаний з коротким проміжком часу існування керуючого моменту за рахунок режиму насичення.

Третій недолік пов'язаний з впливом на точність формування керуючого моменту параметричних збурювань передаточної функції електроприводу.

Четвертий недолік пов'язаний зі скороченим

ресурсом електропривода, так як при його відмові об'єкт стає некерованим.

Відома системи кутової стабілізації (КА) з використанням маховиків зі змінним моментом інерції [3], що складається з одного ДВ, редуктора та маховика є прототипом.

Недоліками таких систем є складність реалізації механізмів дозволяючих зробити розкриття маховика, знижена точність реалізації необхідного закону та мають низький ресурс використання обумовлений відмовою спрацьованістю одного електропривода (ЕП).

В основу корисної моделі поставлено задачу удосконалити систему кутової стабілізації (КА) шляхом підвищення точності реалізації лінійного закону керування, забезпечення інваріантності передаточної функції ЕП від параметричних збурювань, підвищення ресурсу системи кутової стабілізації КА, що забезпечує досконалість технічного рішення.

Поставлена задача вирішується тим, що в системі кутової стабілізації КА, яка містить послідовно з'єднані ЕП, редуктор і маховик, новим є те, що система отримує другий ЕП, другий редуктор, причому виходи першого та другого редукторів, підключені до першого та другого входів дифере-

(19) UA (11) 4526 (13) U

ніцала, вихід якого з'єднаний з маховиком, вихід першого редуктора через перший вимірювач кутової швидкості першого ЕП та перший масштабний перетворювач (МП) з'єднаний з другим входом другого суматора, вихід якого з'єднаний з входом другого підсилювача, вихід якого з'єднаний з входом другого ЕП, вихід другого редуктора через другий вимірювач кутової швидкості другого ЕП і другого МП з'єднаний з другим входом першого суматора, вихід якого з'єднаний з входом першого підсилювача, вихід якого з'єднаний з входом першого ЕП, перші входи першого і другого суматорів з'єднані і створюють керуючий вхід системи кутової стабілізації КА, виходи першого і другого вимірювачів кутової швидкості першого та другого ЕП з'єднані з входом мікропроцесора.

На Фіг.1 представлена кінематична схема кутової стабілізації КА в трьохмірному просторі по осям X Y Z.

На Фіг.2 представлена принципова схема системи кутової стабілізації КА по одній вісі орієнтації.

Фіг.3 ілюструє властивість інваріантності результуючого коефіцієнту передачі одною канала стабілізації від параметричних збурювань другою каналу.

Фіг.4-5 представлені перехідні процеси в системі при формуванні кінетичного моменту керування.

Фіг.6-7 представлені перехідні процеси в системі при параметричних збуреннях статичних коефіцієнтів в діапазоні  $\pm 20\%$ .

Системи кутової стабілізації КА, у відповідності до запропонованого технічного рішення складається з першого і другого ЕП 1 і 2, першого і другого редукторів 3 і 4, першого і другого вимірювачів кутової швидкості (ТГ) 5 і 6, диференціала 7, маховика 8, першого і другого суматорів 9 і 10, першого і другого підсилювачів 11 і 12, першого і другого МП 13 і 14, модулів вводу аналогових сигналів (АЦП) 15, 16, інтерфейс 17, мікропроцесор 18, модуль виводу цифрових сигналів (ЦАП) 19. Причому, вихід першого ТГ 5 після першого МП 13 підключений до 2-го входу 2-го суматора 10, а вихід 2-го ТГ 6 після другого МП 14 підключений до 2-го входу 1-го суматора 9, а перші входи 1-го і 2-го суматорів 9 і 10 поєднані і створюють вхід приладу. Елементи 9, 11, 1 і 3 створюють перший канал формування керуючого моменту. Елементи 10, 12, 2 і 4 створюють другий канал формування керуючого моменту.

Системи кутової стабілізації КА функціонує наступним чином.

Нехай передаточні функції 1-го і 2-го ЕП 1 і 2, з приведеним моментом інерції маховика до входу ЕП мають наступний вигляд:

$$W(s)_1 = \frac{\omega_1}{\varepsilon} = \frac{K_1}{a_1 \cdot s + 1} \quad (1)$$

$$W(s)_2 = \frac{\omega_2}{\varepsilon} = \frac{K_2}{a_2 \cdot s + 1} \quad (2)$$

де  $\varepsilon$  - сигнал задання;  $\omega_1$  і  $\omega_2$  - відповідно кутові швидкості 1-го і 2-го ЕП;  $K_1$  і  $K_2$  - передаточні коефіцієнти 1-го і 2-го каналів;  $a_1$  і  $a_2$  - коефіцієнти характеризуючі постійні часу 1-го і 2-го ЕП.

У відповідності з запропонованим способом кутова швидкість 1-го ЕП  $\omega_1$  перетворюється в

сигнал  $U_1$  1-го ТГ5, масштабується в МП 13 і алгебраїчно сумується в другому суматорі 10 з сигналом задання і формується сигнал управління 2-м ЕП 2 у відповідності з рівнянням

$$U_2 = \varepsilon - \beta_1 U_1 \quad (3)$$

де  $U_1 = K_{\omega 1} \omega_1$ ,  $U_2$  - сигнал на вході 2-го підсилювача 12;  $\varepsilon$  - сигнал задання;  $U_1$  - сигнал на виході ТГ5;  $\beta_1$  - коефіцієнт передачі МП 12;  $K_{\omega 1}$  - коефіцієнт передачі ТГ5.

Далі, кутова швидкість 2-го ЕП 2  $\omega_2$  перетворюється в сигнал  $U_2$  2-го ТГ6, масштабується в МП 14 і алгебраїчно сумується в 1-му суматорі 9 з сигналом задання і формується сигнал управління 1-м ЕП 1 у відповідності з рівнянням

$$U_1 = \varepsilon + \beta_2 U_2 \quad (4)$$

де  $U_1$  - сигнал на вході 1-го підсилювача 11;  $U_2 = K_{\omega 2} \omega_2$  - сигнал на виході ТГ6;

$\beta_2$  - коефіцієнт передачі МП 13;  $K_{\omega 2}$  - коефіцієнт передачі ТГ6.

На основі рівнянь (1) - (4) можна скласти наступну систему

$$\omega_1(s) = W_1(s) \varepsilon + W_2(s) \beta_2 \omega_2(s) \quad (5)$$

$$\omega_2(s) = W_2(s) \varepsilon - W_1(s) \beta_1 \omega_1(s) \quad (6)$$

Рівняння (5) - (6) можна представити в наступному вигляді

$$\omega_1(s) - W_2(s) \beta_1 \omega_2(s) = W_1(s) \varepsilon \quad (7)$$

$$\omega_2(s) + W_1(s) \beta_2 \omega_1(s) = W_2(s) \varepsilon \quad (8)$$

Рівняння (7) - (8) можна представити в матричній формі

$$\begin{pmatrix} 1 & -W_2(s) \cdot \beta_1 \\ W_1(s) \cdot \beta_2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_1(s) \\ \omega_2(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_1(s) \\ W_2(s) \end{pmatrix} \cdot \varepsilon \quad (9)$$

Розв'язком системи (9) буде система 2-х параметрично взаємозалежних рівнянь

$$(1 + W_1(s) W_2(s) \beta_1 \beta_2) \omega_1(s) = W_1(s) (1 + W_2(s) \beta_2) \varepsilon \quad (10)$$

$$(1 + W_1(s) W_2(s) \beta_1 \beta_2) \omega_2(s) = W_2(s) (1 - W_1(s) \beta_1) \varepsilon \quad (11)$$

З урахуванням передаточних функцій (1), (2) отримаємо

$$\omega_1(s) = \frac{K_1 \cdot a_1 \cdot s + K_1 \cdot (1 + K_2 \cdot \beta_2)}{a_1 \cdot a_2 \cdot s^2 + (a_1 + a_2) \cdot s + 1 + K_1 \cdot K_2 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2} \quad (12)$$

$$\omega_2(s) = \frac{K_2 \cdot a_2 \cdot s + K_2 \cdot (1 - K_1 \cdot \beta_1)}{a_1 \cdot a_2 \cdot s^2 + (a_1 + a_2) \cdot s + 1 + K_1 \cdot K_2 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2} \quad (13)$$

Таким чином, в результаті, взаємозалежних і цілеспрямованих дій, виконуючих над математичними об'єктами, першим з яких являється 1-й ЕП 1, а другим - 2-й ЕП 2, створені дві структури, функціонально визначені рівняннями (12) - (13).

Подібні рівняння визначають рефлексивну взаємодію, бо перший об'єкт за допомогою рефлексивних зв'язків 5-13, взаємодіє з другим об'єктом, а другий об'єкт, в свою чергу, за допомогою рефлексивних зв'язків 5-13, взаємодіє з першим об'єктом.

При виконанні умови:

$$K_1 \beta_1 = 1, \quad (14)$$

що досяється просто досягається вибором коефіцієнта МП 5  $\beta_1 = 1/K_1$  система (12) і (13) зводиться до вигляду:

$$\omega(s)_1 = \frac{K_1 a_2 s + K_1 (1 + K_2 \beta_2)}{a_1 a_2 s^2 + (a_1 + a_2) s + 1 + K_2 \beta_2} \quad (15)$$

$$\omega(s)_2 = \frac{K_2 a_1 s}{a_1 a_2 s^2 + (a_1 + a_2) s + 1 + K_2 \beta_2} \quad (16)$$

Рівняння (15) - (16) зводяться до стандартного вигляду

$$\omega(s)_1 = \frac{b_1 s + b_0}{C_2 s^2 + C_1 s + 1} \quad (17)$$

$$\omega(s)_2 = \frac{b_2 s}{C_2 s^2 + C_1 s + 1} \quad (18)$$

де

$$b_1 = \frac{K_1 a_2}{1 + K_2 \beta_2}$$

$$b_0 = \frac{K_1 a_2}{1 + K_2 \beta_2}$$

$$b_0 = K_1$$

$$C_1 = \frac{a_1 + a_2}{1 + K_2 \beta_2}$$

$$C_2 = \frac{a_1 a_2}{1 + K_2 \beta_2}$$

Статична передаточна функція при цьому буде мати наступний вигляд

$$A_1 = \frac{K_1 (1 + K_2 \beta_2)}{1 + K_1 \beta_1 K_2 \beta_2} \quad (19)$$

- передаточна функція 1-го каналу

$$A_2 = \frac{K_2 (1 - K_1 \beta_1)}{1 + K_1 \beta_1 K_2 \beta_2} \quad (20)$$

- передаточна функція 2-го каналу

$$A = A_1 + A_2 = \frac{K_1 (1 + K_2 \beta_2) + K_2 (1 - K_1 \beta_1)}{1 + K_1 \beta_1 K_2 \beta_2} \quad (21)$$

- результуючий коефіцієнт передачі системи

Для отримання залежностей (19) - (21), задано наступними розрахунковими значеннями  $K_1 = K_2 = 10$ ,  $\beta_1 = 0,1$ ,  $\beta_2 = 0,5$

Результати розрахунків наведені в таблиці 1 і показані на Фіг 3

Таблиця 1

$K_1$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$A_1$	0	6	8	9	9,6	10	10,285	10,5	10,666	10,8	10,9
$A_2$	10	4	2	1	0,4	0	-0,285	-0,5	-0,666	-0,8	-0,9
$A$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

З таблиці 1 очевидно, що результуючий коефіцієнт передачі системи  $A$  інваріантний відносно параметричних збурень коефіцієнта прямого перетворення  $K_1$  1-го каналу

Це відбувається тому, що при зменшенні коефіцієнта  $K_1$  на величину  $\Delta K_1$  коефіцієнт  $A_1$  зменшується на величину  $\Delta A_1$ . При цьому, коефіцієнт  $A_2$  збільшується на величину  $\Delta A_2$ , причому  $\Delta A_1 = \Delta A_2$  внаслідок чого результуючий коефіцієнт передачі системи залишається незмінним  $A = \text{const}$ . Ця властивість рефлексивних систем відносить їх до класу самоорганізаційних.

Покажемо, що абсолютна похибка результуючого коефіцієнта передачі запропонованого способу менше, ніж в одноканальній схемі (прототипу) при одночасному параметричному збуренні коефіцієнтів передачі  $K_1$  і  $K_2$ .

Нехай  $K_1 = K_2 = 8$ . Тоді  $A_1 = 9,523$ ,  $A_2 = 0,381$ ,  $A = 9,904$ , а абсолютна похибка коефіцієнта передачі системи буде

$$\Delta A = \frac{10 - 9,904}{10} 100\% = 0,9\%$$

Таким чином, при похибці обох каналів на 20% загальний коефіцієнт передачі зменшиться лише на 0,9%. Причому, система залишається працездатною навіть при "відмові" одного з ЕП.

Для побудови перехідних процесів, відповідних передаточним функціям (17) і (18), наведемо розрахунковий приклад.

Задамося наступними параметрами системи  $K_1 = K_2 = 10$ ,  $\beta_1 = 0,1$ ,  $\beta_2 = 0,01$ ,  $a_1 = 0,5$ ,  $a_2 = 0,6$

$$W(s)_1 = \frac{6s + 10}{0,3s^2 + 1,1s + 1} = \frac{41,916}{2s + 1} - \frac{31,916}{1666s + 1} \quad (19)$$

$$W(s)_2 = \frac{5s}{0,3s^2 + 1,1s + 1} = \frac{14,97}{1666s + 1} - \frac{14,97}{2s + 1} \quad (20)$$

Тоді рівняння (17) і (18) будуть мати наступний вигляд

Передаточним функціям (19) і (20) будуть відповідати наступні рівняння перехідних процесів

Перехідні процеси відповідні цим рівнянням отримані на комп'ютері та приведені на Фіг 4-7

Аналіз сумарного перехідного процесу на виході диференціального механізму 7, Фіг 2, кінетичний момент якого прикладений до маховика, показує,

$$\begin{aligned} \omega(t)_1 &= 10 + 31,916e^{-0,75t} - 41,916e^{-0,50t} \\ \omega(t)_2 &= 14,97(e^{-2t} - e^{-1,666t}) \\ \omega(t)_\Sigma &= 10 + 31,916(e^{-0,75t} - 1,313e^{-0,50t}) + 14,97(e^{-2t} - e^{-1,666t}) \end{aligned}$$

що він підпорядковується лише в певному діапазоні (проміжок часу лінійного закону), у відповідності з рівнянням

$$\omega(t)_\Sigma = K t = 115 t$$

де  $K = \tan \alpha$  - кут нахилу часової характеристики по відношенню до вісі часу

Дійсно це можна відобразити даними, викладеними в таблиці 2

Таблиця 2

t	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
$\omega_z(t)$	2,3	4,6	6,9	9,2	10,15

Наявність лінійної залежності, в певному проміжку часу, сумарної кутової швидкості від часу, свідчить про постійний кут нахилу вектора кутової швидкості до осі часу, що приводить до кінетичного моменту, прикладеного до КА. Це важлива властивість системи Фіг.2, так як спрощує використання моменту маховика в системі керування (СК) КА.

При обертанні маховика безперервно змінюються кутові швидкості  $\omega_1$  і  $\omega_2$  першого і другого ЕП шляхом вводу сигналів з тахогенераторів 5 і 6 в мікропроцесор і розв'язання рівнянь

$$\omega_1 = K_5 U_5$$

$$\omega_2 = K_6 U_6$$

$$\omega_z = \omega_1 + \omega_2$$

де  $U_5$  і  $U_6$  - сигнали тахогенераторів 5 і 6;  $K_5$  і  $K_6$  - коефіцієнти пропорційності.

Отримане значення кутової швидкості  $\omega_z$  порівнюється з заданим значенням  $\omega_3$  і в момент їх рівності формується сигнал в систему кутової стабілізації на скидання кінетичного моменту шляхом включення реактивних двигунів КА.

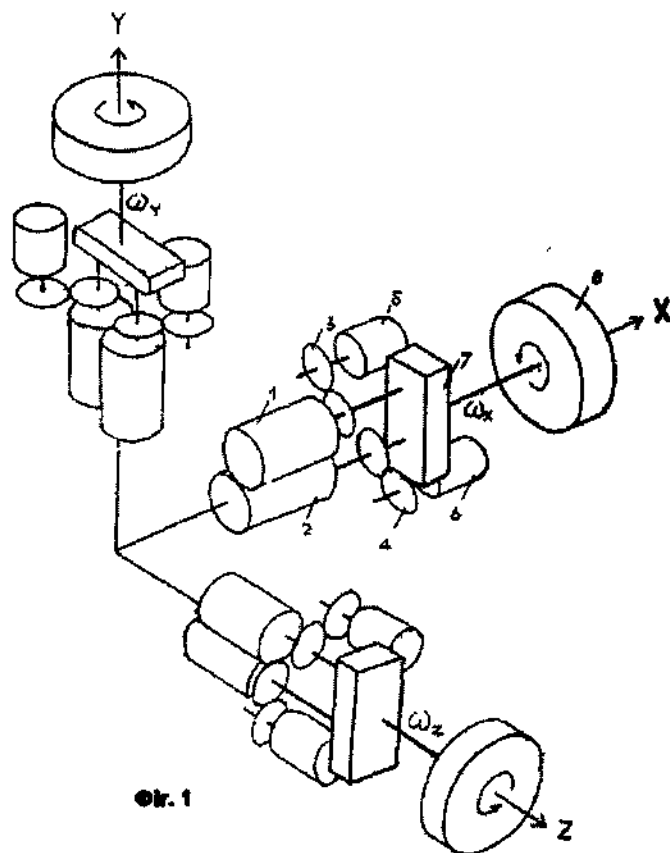
На Фіг.8 представлені перехідні процеси в сис-

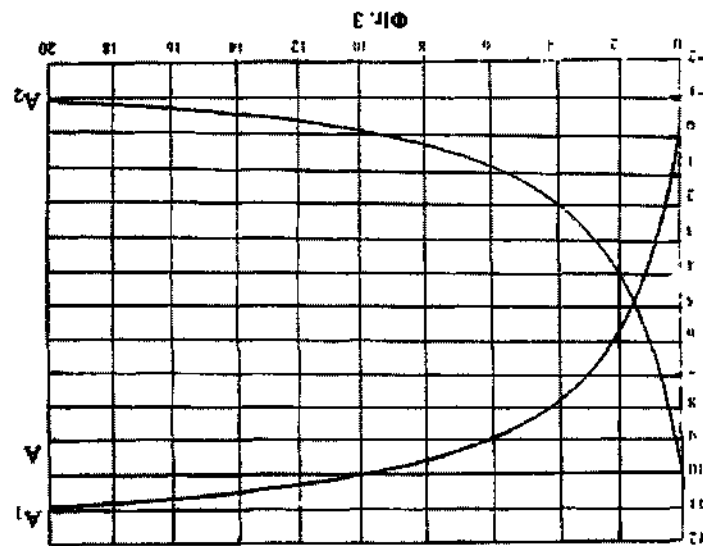
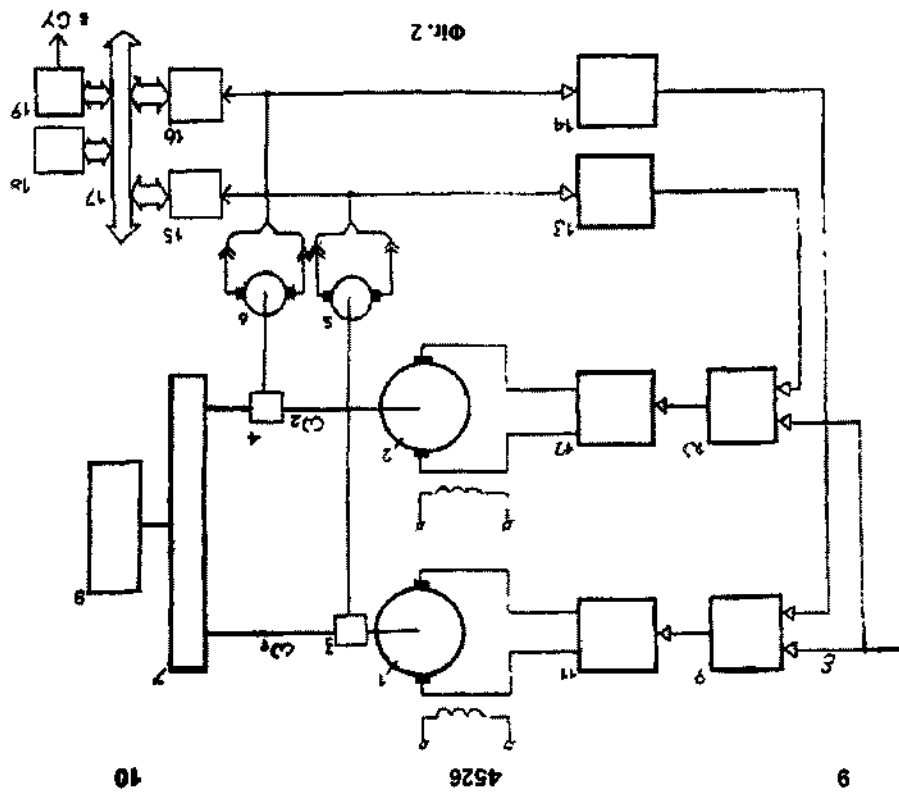
темі коли коефіцієнт  $K_1$  зменшився на 20% тобто  $K_1=8$ . Тоді, перехідний процес в 1-му каналі прямує до статичного значення  $H_1=8$ , а в 2-му каналі до статичного значення  $H_2=2$ . Це означає, що сумарний перехідний процес залишається незмінним,  $H=10$ .

На Фіг.9 представлені перехідні процеси в системі при  $K_1=12$ . Представлені розрахунки доводять переваги запропонованого способу в порівнянні з прототипом, що полягає в підвищенні надійності, швидкодії і інваріантності сумарного коефіцієнту передачі від параметричних збурювань окремих каналів.

#### Література:

1. Космические аппараты. Под общей ред. К.П. Феоктистова. М., Воениздат, 1983, стр. 240;
2. Системы угловой стабилизации космических аппаратов. М., Машиностроение, 1980 стр. 48;
3. Каргу Л.И. Системы угловой стабилизации космических аппаратов. М., Машиностроение, 1980 стр. 68-71.





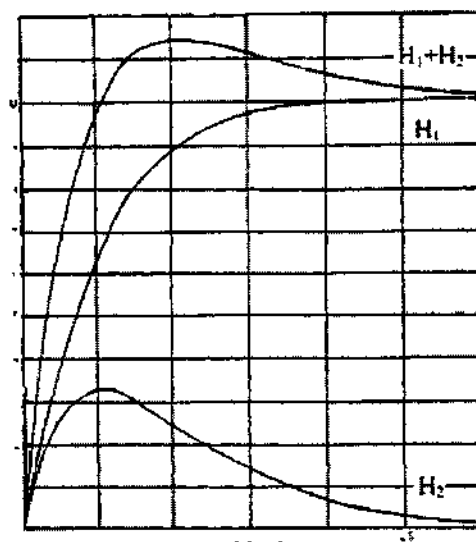


Fig. 4

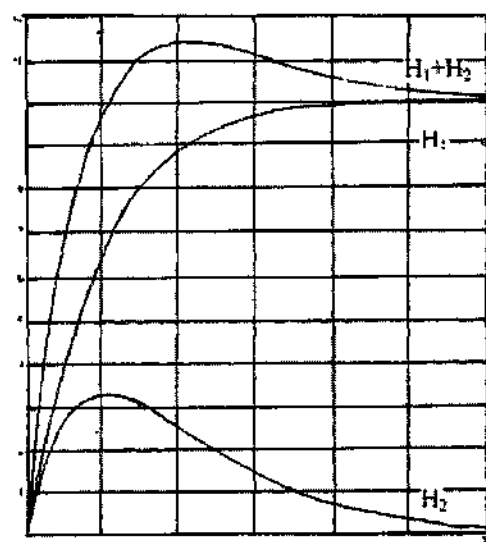


Fig. 5

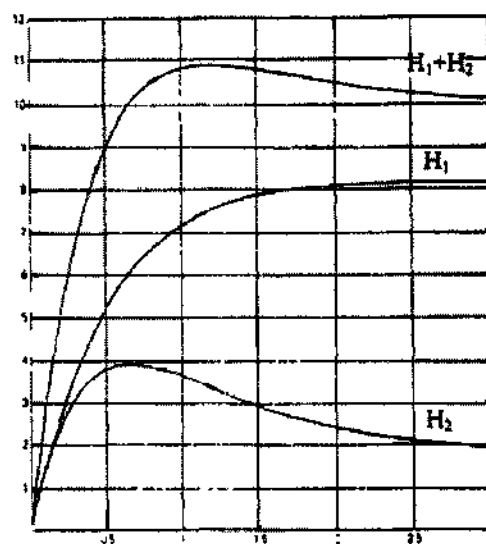
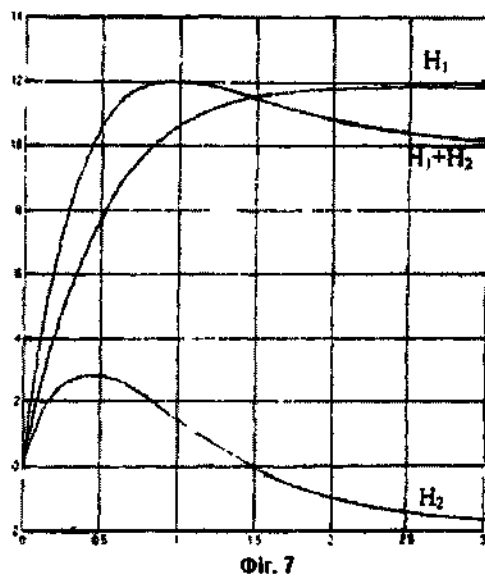


Fig. 6



Комп'ютерна верстка А. Крулевский

Підписне

Тираж 37 прим

Міністерство освіти і науки України

Державний департамент інтелектуальної власності, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

