

**О.М. Безвесільна, д.т.н., проф.**  
*Національний технічний університет України «КПІ»*  
**О.О. Добржанський, аспір.**  
*Житомирський державний технологічний університет*

## ГІРОДАТЧИК ГРАВІТАЦІЙНОГО ПРИСКОРЕННЯ

*В статті представлено опис конструкції гіродатчика гравітаційного прискорення (ГДГП), технічні характеристики якої забезпечують підвищення стабільності статичного передавального коефіцієнта ГДГП, можливість визначення поточного статичного передавального коефіцієнта ГДГП, зниження рівня шумових ефектів у вихідному сигналі ГДГП, що у сукупності призводить до суттєвого підвищення точності вимірювання вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення з борту рухомого апарата.*

**Постановка проблеми.** Гіродатчики гравітаційного прискорення (ГДГП) сьогодні є найперспективнішими з точки зору широкомасштабного вивчення аномалій гравітаційного прискорення. ГДГП розглядається як чутливий елемент авіаційної гравіметричної системи (АГС). Актуальним є впровадження технологій автоматизації в систему функціонування приладу, що уможливило комп'ютерну обробку інформаційних сигналів приладу. Проблемою є створення ГДГП для АГС з метою підвищення точності вимірювань аномалій гравітаційного прискорення. Точні знання аномалій гравітаційного поля Землі необхідні в авіаційній та космічній техніці, геології, геофізиці, геодезії.

**Аналіз останніх досліджень.** Патентна база даних містить інформацію про новий (2003 рік) гравіметр [1] на основі гіроскопа. Гравіметр [1] обрано за прототип.

Гравіметр-прототип, як і об'єкт, що заявляється, містить гіроскопічний датчик гравітаційного прискорення, систему визначення поточних навігаційних параметрів та вимірювач поточної висоти, які підключені до бортової цифрової обчислювальної машини (БЦОМ).

В гравіметрі-прототипі як гіроскопічний датчик гравітаційного прискорення застосований один двоступеневий гіроскоп. Центр мас ротора зміщений у площині обертання ротора, створюючи маятниковість, а сам ротор кріпиться на осі підвісу за допомогою пружних торсионів, що працюють, в основному, на скручення. В початковому положенні ротор обертається в площині, перпендикулярній до вертикалі місця (нормалі до еліпсоїда обертання). Під час роботи гравіметра-прототипу відхилення ротора від його початкового положення вимірюється датчиком кута, вихід якого є вихідним сигналом гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення і вхідним сигналом для датчика моменту, який створює додатковий момент відносно осі підвісу ротора.

Зазначені особливості конструкції зумовлюють те, що при обранні певного значення швидкості обертання приводного двигуна ротора момент сил пружного опору торсионів відносно осі підвісу ротора компенсується моментом відцентрових сил інерції ротора відносно тієї ж осі, що виникає внаслідок обертання ротора від приводного двигуна. Тому в ідеалі в гравіметрі-прототипі статичний передавальний коефіцієнт гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення залежить тільки від маятниковості та від передавального коефіцієнта датчика моменту. Але на практиці в гравіметрі-прототипі стабільність статичного передавального коефіцієнта гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення обмежена через сильну залежність пружних властивостей торсионів від температури та параметрів вібрацій у місці установки приладу, які спричиняють втомлюваність пружного елемента. Температурні зміни спричиняють також зміну електричних параметрів у електромеханічній системі датчика моменту і таким чином впливають на значення його передавального коефіцієнта. Нестабільність передавального коефіцієнта датчика моменту спричиняє додаткову нестабільність статичного передавального коефіцієнта гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення.

У процесі роботи гравіметра-прототипу відносно осі підвісу ротора одночасно діють «корисний» момент від вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення, моменти-перешкоди від горизонтальних складових вектора гравітаційного прискорення, моменти-перешкоди від вертикальної та горизонтальних складових вектора лінійного прискорення рухомої основи, моменти-перешкоди від вертикальної та горизонтальних складових вектора кутової швидкості рухомої основи та моменти-перешкоди від горизонтальних складових вектора кутового прискорення рухомої основи. Вказані моменти викликають появу відповідних складових у вихідному сигналі гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення. Моменти-перешкоди, окрім тих, що спричинені горизонтальними складовими вектора гравітаційного прискорення, обумовлені тим, що гіроскопічний датчик гравітаційного прискорення встановлений на рухомій основі.

**Загальна проблема.** Суттєві недоліки гравіметра-прототипу – це:

1) нестабільність статичного передавального коефіцієнта гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення, спричинена змінами пружних властивостей торсионів та змінами електричних параметрів у електромеханічній системі датчика моменту;

2) неможливість визначення поточного статичного передавального коефіцієнта гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення;

3) наявність у вихідному сигналі гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення складових-перешкод, обумовлених тим, що гіроскопічний датчик гравітаційного прискорення встановлений на рухомій основі, а також складових-перешкод від горизонтальних складових вектора гравітаційного прискорення.

Зазначені фактори суттєво знижують точність вимірювання вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення даним приладом з борту рухомого апарата.

**Цілі статті.** Запропонувати ГДГП нової конструкції, в якому вдається забезпечити:

1) підвищення стабільності статичного передавального коефіцієнта гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення;

2) можливість визначення поточного статичного передавального коефіцієнта гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення;

3) зниження рівня перешкод у вихідному сигналі гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення, що у сукупності призводить до суттєвого підвищення точності вимірювань вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення з борту рухомого апарата.

**Основний матеріал.** Поставлені цілі досягаються за рахунок того, що як ГДГП застосовується двороторний інтегруючий гіроскопічний датчик гравітаційного прискорення та додаткові інформаційні канали.

Суть запропонованого ГДГП пояснюється кресленням (рис. 1), де зображено запропонований ГДГП у складі системи гравіметра.

*Гравіметр містить* ГДГП 1, систему 2 визначення поточних навігаційних параметрів (швидкості руху, курсу та географічної широти розташування рухомої основи) та вимірювач 3 поточної висоти, виходи яких підключені до БЦОМ 4.

ГДГП 1 містить однакові перший гіромотор 5 та другий гіромотор 6, встановлені в зовнішній рамці 7, з можливістю обертання першого гіромотора 5 навколо осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора та другого гіромотора 6 навколо осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора в протилежних напрямках на рівні кути за допомогою електромеханічного сельсинного зв'язку. Сельсини 8 та 9 електрично поєднані в протифазі, що дозволяє створити еквівалент механічного зв'язку з від'ємним одиничним кінематичним передавальним коефіцієнтом.

Вісь 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора та вісь 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора зміщені по різні боки на однакову відстань відносно площини зовнішньої рамки 7, а центр мас першого гіромотора 5 розташований на осі 12 обертання ротора першого гіромотора і центр мас другого гіромотора 6 розташований на осі 13 обертання ротора другого гіромотора так, що якщо вісь 12 обертання ротора першого гіромотора та вісь 13 обертання ротора другого гіромотора перпендикулярні до площини зовнішньої рамки 7, то центр мас першого гіромотора 5 та центр мас другого гіромотора 6 розміщені на осі 17 підвісу зовнішньої рамки, яка встановлена вздовж вертикалі місця.

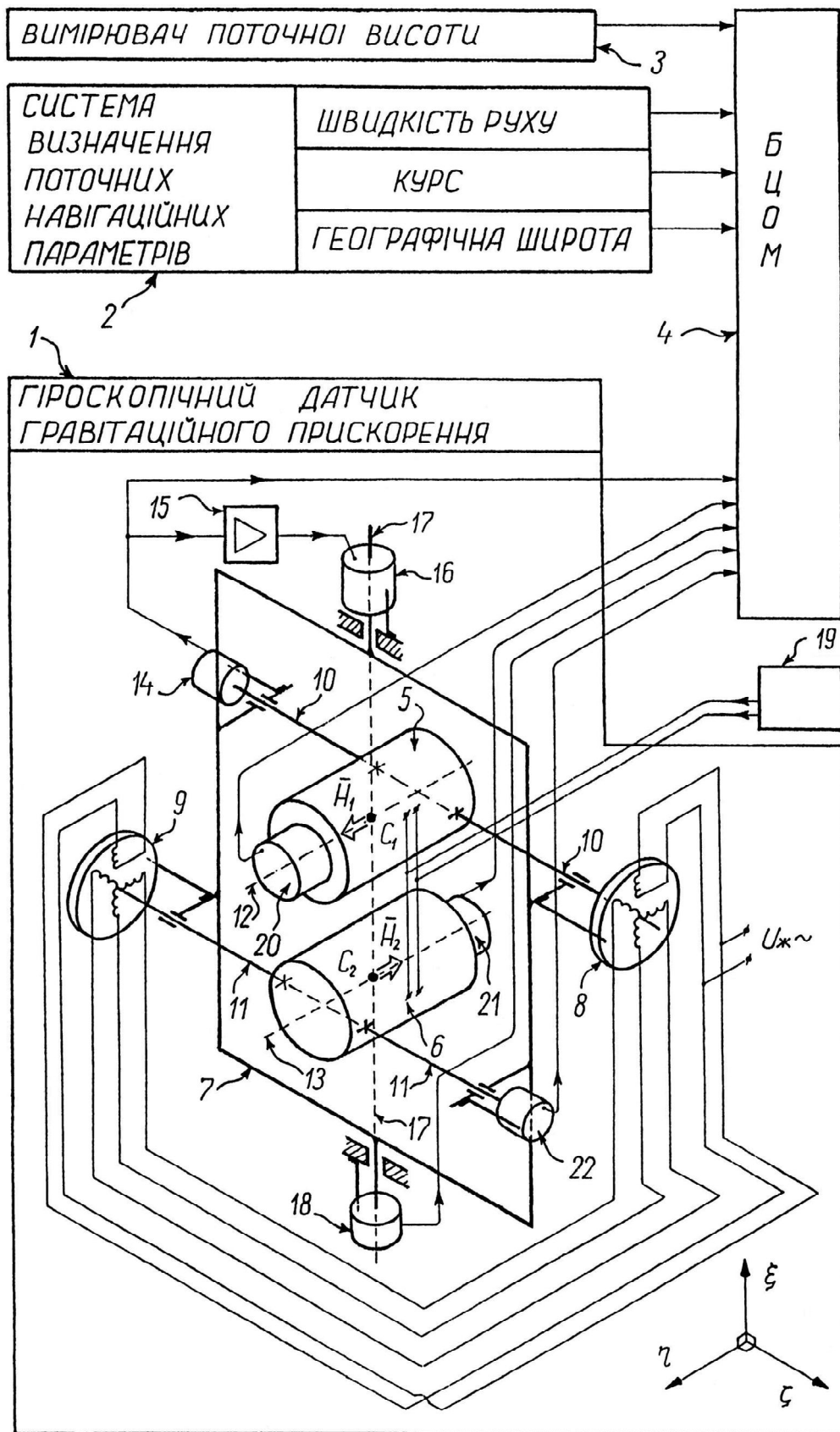


Рис. 1. Двороторний інтегруючий гіроскопічний датчик гравітаційного прискорення як елемент системи гравіметра

Встановлення осі 17 підвісу зовнішньої рамки вздовж вертикалі місця реалізується, наприклад, монтажем ГДГП 1 на горизонтально-стабілізовану платформу, причому вісь 17 підвісу зовнішньої рамки встановлюється вздовж вертикальної осі  $\xi$  горизонтально-стабілізованої платформи, а осі  $\eta$ ,  $\zeta$  – горизонтальні осі цієї платформи.

На осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора розташований перший датчик 14 кута повороту, вихід якого підключений до підсилюючого елемента 15, вихід якого підключений до датчика 16 моменту, який встановлений на осі 17 підвісу зовнішньої рамки разом з другим датчиком 18 кута повороту, вихід якого підключений до БЦОМ 4, а на осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора встановлений третій датчик 22 кута повороту, вихід якого підключений до БЦОМ 4. Вихід другого датчика 18 кута повороту підключений до БЦОМ 4 для можливості обробки сигналу програмними засобами. Вихід першого датчика 14 кута повороту та третього датчика 22 кута повороту підключені до БЦОМ 4 для організації контролю коректності роботи системи двох пов'язаних сельсинів 8 та 9.

Перший гіромотор 5 та другий гіромотор 6 підключені до блока 19 живлення стабілізованої частоти, причому на осі 12 обертання ротора першого гіромотора встановлений перший датчик 20 частоти обертання, вихід якого підключений до БЦОМ 4, а на осі 13 обертання ротора другого гіромотора встановлений другий датчик 21 частоти обертання, вихід якого підключений до БЦОМ 4. Вихід першого датчика 20 частоти обертання та вихід другого датчика 21 частоти обертання підключені до БЦОМ 4 для можливості визначення поточного статичного передавального коефіцієнта гіроскопічного датчика 1 гравітаційного прискорення.

*Гравіметр працює наступним чином.* Ротор першого гіромотора 5 обертається з частотою  $\dot{\gamma}_1$  навколо осі 12 обертання ротора першого гіромотора, створюючи кінетичний момент  $H_1$ . Ротор другого гіромотора 6 обертається з частотою  $\dot{\gamma}_2$  навколо осі 13 обертання ротора другого гіромотора, створюючи при цьому кінетичний момент  $H_2$ . При цьому виконуються умови:

$$\dot{\gamma}_1 = -\dot{\gamma}_2, H_1 = -H_2. \quad (1)$$

Вертикальна складова  $g_\xi$  та горизонтальні складові  $g_\eta$ ,  $g_\zeta$  вектора гравітаційного прискорення разом із вертикальною складовою  $W_\xi$  та горизонтальними складовими  $W_\eta$ ,  $W_\zeta$  вектора лінійного прискорення горизонтально-стабілізованої платформи діють на зміщений відносно осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора центр мас С1 першого гіромотора 5 та зміщений відносно осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора центр мас С2 другого гіромотора 6, створюючи при цьому момент  $M_{g,W_{10}}$  відносно осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора та момент  $M_{g,W_{11}}$  відносно осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора, які, якщо використовувати загальні принципи опису динаміки гіроскопічних систем [4], [5], визначаються наступним чином:

$$M_{g,W_{10}} = -m_1 \cdot l_1 \cdot [(W_\xi - g_\xi) \cdot \cos \beta_1 + (W_\eta - g_\eta) \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta_1 - (W_\zeta - g_\zeta) \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta_1], \quad (2)$$

$$M_{g,W_{11}} = -m_2 \cdot l_2 \cdot [(W_\xi - g_\xi) \cdot \cos \beta_2 + (W_\eta - g_\eta) \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta_2 - (W_\zeta - g_\zeta) \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta_2], \quad (3)$$

де  $l_1 \cdot m_1$  – маятниковість першого гіромотора 5;  $l_2 \cdot m_2$  – маятниковість другого гіромотора 6;  $\beta_1$  – кут повороту першого гіромотора 5 навколо осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора;  $\beta_2$  – кут повороту другого гіромотора 6 навколо осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора;  $\alpha$  – кут повороту зовнішньої рамки 7 навколо осі 17 підвісу зовнішньої рамки.

При наявності горизонтальних складових  $\dot{\omega}_\zeta$ ,  $\dot{\omega}_\eta$  вектора кутового прискорення горизонтально-стабілізованої платформи, де безпосередньо встановлено гіроскопічний датчик 1 гравітаційного прискорення, виникають момент  $M_{k_{10}}$  сил інерції відносно осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора та момент  $M_{k_{11}}$  сил інерції відносно осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора, які визначаються наступним чином:

$$M_{i_{H_{10}}} = -B_1 \cdot (\dot{\omega}_\eta \cdot \cos \alpha + \dot{\omega}_\zeta \cdot \sin \alpha), \quad (4)$$

$$M_{i_{H_{11}}} = -B_2 \cdot (\dot{\omega}_\eta \cdot \cos \alpha + \dot{\omega}_\zeta \cdot \sin \alpha), \quad (5)$$

де  $B_1$  – момент інерції першого гіромотора 5 відносно осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора;  $B_2$  – момент інерції другого гіромотора 6 відносно осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора.

Вертикальна складова  $\omega_\xi$  та горизонтальні складові  $\omega_\eta$ ,  $\omega_\zeta$  вектора кутової швидкості горизонтально-стабілізованої платформи, де безпосередньо встановлено гіроскопічний датчик 1

гравітаційного прискорення, викликають появу моментів  $M_{k_{10}}$  та  $M_{k_{11}}$  кориолісових сил інерції (гіроскопічних моментів) від переносної кутової швидкості горизонтально-стабілізованої платформи. Момент  $M_{k_{10}}$ , який прикладений відносно осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора, та момент  $M_{k_{11}}$ , який прикладений відносно осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора, визначаються наступним чином:

$$M_{k_{10}} = H_1 \cdot (\omega_\xi \cdot \cos \beta_1 + \omega_\eta \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta_1 - \omega_\zeta \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta_1), \quad (6)$$

$$M_{k_{11}} = H_2 \cdot (\omega_\xi \cdot \cos \beta_2 + \omega_\eta \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta_2 - \omega_\zeta \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta_2), \quad (7)$$

де  $H_1$  – кінетичний момент, що створюється обертанням ротора першого гіромотора 5;  $H_2$  – кінетичний момент, що створюється обертанням ротора другого гіромотора 6.

Також при обертанні першого гіромотора 5 навколо осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора та другого гіромотора 6 навколо осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора через наявність сил тертя в підшипниках цих осей виникають моменти відповідно  $M_{T_{10}}$  та  $M_{T_{11}}$ :

$$M_{T_{10}} = -M_{T_1} \cdot \text{sign} \dot{\beta}_1 - f_1 \cdot \dot{\beta}_1, \quad (8)$$

$$M_{T_{11}} = -M_{T_2} \cdot \text{sign} \dot{\beta}_2 - f_2 \cdot \dot{\beta}_2, \quad (9)$$

де  $M_{T_1}$ ,  $M_{T_2}$  – моменти сил сухого тертя, а  $f_1 \cdot \dot{\beta}_1$ ,  $f_2 \cdot \dot{\beta}_2$  – моменти сил в'язкого тертя в підшипниках осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора та осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора відповідно.

Моменти  $M_{g_{W_{10}}}$ ,  $M_{g_{W_{11}}}$ ,  $M_{k_{10}}$ ,  $M_{k_{11}}$  намагаються повернути перший гіромотор 5 навколо осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора та другий гіромотор 6 навколо осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора. Моменти  $M_{i_{H_{10}}}$ ,  $M_{i_{H_{11}}}$ ,  $M_{T_{10}}$ ,  $M_{T_{11}}$  протидіють цьому. Такий поворот регулюється електромеханічним селісинним зв'язком між першим гіромотором 5 та другим гіромотором 6 і контуром корекції між віссю 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора та віссю 17 підвісу зовнішньої рамки.

Утворений з'єднаними в протифазі селісинами 8 та 9 електромеханічний зв'язок між першим гіромотором 5 та другим гіромотором 6 має передавальний коефіцієнт:

$$j = -1, \quad (10)$$

що означає взаємовіднімання моментів, прикладених до осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора та осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора, а також створює такі умови, що:

$$\beta_1 = -\beta_2 = \beta. \quad (11)$$

Додаткові конструктивні умови:

$$l_1 = -l_2 = l, \quad (12)$$

$$H_1 = -H_2 = H, \quad (13)$$

$$m_1 = m_2 = m \quad (14)$$

спричиняють те, що сумарний момент відносно осі, паралельної осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора та осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора, не містить взагалі моментів  $M_{i_{H_{10}}}$ ,  $M_{i_{H_{11}}}$  і складових моментів  $M_{k_{10}}$ ,  $M_{k_{11}}$ ,  $M_{g_{W_{10}}}$ ,  $M_{g_{W_{11}}}$ , що залежать від  $\sin \beta$ .

Таким чином, дана система призводить до компенсації моментів від горизонтальних складових  $W_\xi$ ,  $W_\eta$  вектора лінійного прискорення горизонтально-стабілізованої платформи, моментів від горизонтальних складових  $g_\eta$ ,  $g_\xi$  вектора гравітаційного прискорення, моментів від горизонтальних складових  $\omega_\eta$ ,  $\omega_\xi$  вектора кутової швидкості горизонтально-стабілізованої платформи, а також моментів від горизонтальних складових  $\dot{\omega}_\eta$ ,  $\dot{\omega}_\xi$  вектора кутового прискорення горизонтально-стабілізованої платформи.

Незкомпенсовані складові моментів  $M_{g_{W_{10}}}$ ,  $M_{g_{W_{11}}}$ ,  $M_{k_{10}}$ ,  $M_{k_{11}}$  викликають обертання першого гіромотора 5 навколо осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора та обертання другого гіромотора 6 навколо осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора, і тому:

$$\beta \neq 0. \quad (15)$$

Тут починає діяти контур корекції між віссю 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора та віссю 17 підвісу зовнішньої рамки. Перший датчик 14 кута повороту, встановлений на осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора, вимірює кут  $\beta$  і передає сигнал пропорційний куту  $\beta$  на підсилюючий елемент 15, вихід якого підключено до датчика 16 моменту. Датчик 16 моменту, відповідно до вхідного сигналу, створює корекційний момент  $M_{кор}$ :

$$M_{кор} = -K_{\kappa} \cdot \beta, \tag{16}$$

де  $K_{\kappa}$  – загальний передавальний коефіцієнт описаного каналу.

Датчик 16 моменту прикладає  $M_{кор}$  до осі 17 підвісу зовнішньої рамки. Під дією  $M_{кор}$  рамка 7 набуває кутової швидкості  $\dot{\alpha}$ , достатньої, щоб скомпенсувати сумарний момент відносно осі, яка паралельна осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора та осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора і таким чином забезпечити малість кута  $\beta$  так, щоб значення  $\cos \beta$  було якомога ближче до одиниці.

Виходячи із загальних принципів опису динаміки гіроскопічних систем [4], [5], кут  $\alpha(t)$  повороту зовнішньої рамки 7 в усталеному режимі:

$$\begin{aligned} \alpha_{уст}(t) &= -\frac{1}{(H_1 - H_2)} \int_{t_{поч}}^t (M_{g,W_{10}} - M_{g,W_{11}} + M_{iH_{10}} - M_{iH_{11}} + M_{\kappa_{10}} - M_{\kappa_{11}} + \\ &\quad - (M_{T1} \cdot \text{sign} \dot{\beta} + M_{T2} \cdot \text{sign} \dot{\beta})) dt = \\ &= \frac{ml}{H} \int_{t_{поч}}^t (W_{\xi} - g_{\xi}) dt + \frac{1}{H} \int_{t_{поч}}^t (-H \cdot \omega_{\xi}) dt + \\ &\quad + \frac{1}{H} \int_{t_{поч}}^t \left( \frac{M_{T1} + M_{T2}}{2} \cdot \text{sign} \dot{\beta} \right) dt, \end{aligned} \tag{17}$$

де  $t_{поч}$  – момент часу початку відліку даних;  $t$  – момент часу кінця відліку даних.

«Корисною» складовою сигналу в такому випадку є:

$$\alpha_{кор.уст}(t) = -\frac{m \cdot l}{H} \int_{t_{поч}}^t g_{\xi} dt. \tag{18}$$

Інші складові є сигналами перешкод:

$$\alpha_{пер.уст}(t) = \frac{m \cdot l}{H} \cdot \int_{t_{поч}}^t W_{\xi} dt + \int_{t_{поч}}^t (-\omega_{\xi}) dt + \frac{1}{H} \int_{t_{поч}}^t \left( \frac{M_{T1} + M_{T2}}{2} \cdot \text{sign} \dot{\beta} \right) dt. \tag{19}$$

Сигнал  $\alpha(t)$  сприймається другим датчиком 18 кута повороту, встановленим на осі 17 підвісу зовнішньої рамки, і є основним вихідним сигналом гіроскопічного датчика 1 гравітаційного прискорення. З виходу другого датчика 18 кута повороту даний сигнал потрапляє в БЦОМ 4 для обробки.

Наявність підключених до БЦОМ 4 першого датчика 14 кута повороту та третього датчика 22 кута повороту створює можливість для БЦОМ 4 перед початком обробки основного сигналу  $\alpha(t)$  ГДПІ 1, отриманого з другого датчика 18 кута повороту, проводити моніторинг коректності роботи системи двох пов'язаних сельсинів 8 та 9. БЦОМ 4 зчитує дані про кут  $\beta_1$  з виходу першого датчика 14 кута повороту, який встановлений на осі 10 внутрішнього підвісу першого гіромотора, та про кут  $\beta_2$  з виходу третього датчика 22 кута повороту, який встановлений на осі 11 внутрішнього підвісу другого гіромотора, для перевірки умови:

$$\beta_1 = -\beta_2 \pm \Delta\beta, \tag{20}$$

де  $\Delta\beta$  – модуль різниці між кутами  $\beta_1$  та  $\beta_2$ , якою можна знехтувати і вважати такою, що прямує до нуля.

Для обчислення середнього значення вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення  $\bar{g}_{\xi}$  БЦОМ 4 обирає інтервали вимірювань значень сигналу  $\alpha(t)$  за даними про стабільність на цих інтервалах кінетичних моментів першого гіромотора 5 та другого гіромотора 6. Для цього БЦОМ 4 впродовж всього часу, доки тривають вимірювання, зчитує дані про частоту  $\dot{\gamma}_1$  з виходу першого датчика 20 частоти обертання, який встановлений на осі 12 обертання ротора першого гіромотора, та про частоту  $\dot{\gamma}_2$  з виходу другого датчика 21 частоти обертання, який встановлений на осі 13 обертання ротора другого гіромотора.

За отриманими даними БЦОМ 4 обирає інтервали, для яких виконуються умови щодо стабільності й рівності частот обертання ротора першого гіромотора 5 та ротора другого гіромотора 6:

$$\dot{\gamma}_{1,i} = -\dot{\gamma}_{2,i} \pm \Delta\dot{\gamma}, \tag{21}$$

де  $\dot{\gamma}_{1,i}$  – відповідне  $i$ -тому інтервалу значення частоти обертання  $\dot{\gamma}_1$  ротора першого гіромотора 5;  $\dot{\gamma}_{2,i}$  – відповідне  $i$ -тому інтервалу значення частоти обертання  $\dot{\gamma}_2$  ротора другого гіромотора 6;  $\Delta\dot{\gamma}$  – модуль різниці між частотами обертання  $\dot{\gamma}_{1,i}$  та  $\dot{\gamma}_{2,i}$ , якою можна знехтувати і вважати такою, що прямує до нуля.

Для кожного  $i$ -того обраного інтервалу БЦОМ 4 виконує операцію обчислення поточного статичного передавального коефіцієнта гіроскопічного датчика 1 гравітаційного прискорення з урахуванням відповідних кожному такому інтервалу значень  $\dot{\gamma}_{1,i}$  та  $\dot{\gamma}_{2,i}$ :

$$R_{cm,i} = \frac{m \cdot l}{H_i} = \frac{m \cdot l}{J \cdot \dot{\gamma}_i}, \quad (22)$$

$$\dot{\gamma}_i = \frac{\dot{\gamma}_{1,i} + (-\dot{\gamma}_{2,i})}{2}, \quad (23)$$

$$J = J_1 = J_2, \quad (24)$$

де  $J_1$  – момент інерції ротора першого гіромотора 5 відносно осі 12 обертання ротора першого гіромотора;  $J_2$  – момент інерції ротора другого гіромотора 6 відносно осі 13 обертання ротора другого гіромотора.

Одночасно із зчитуванням основного сигналу  $\alpha(t)$  і додаткових сигналів  $\beta_1, \beta_2, \dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2$ . БЦОМ 4 зчитує дані з під'єднаних до неї пристроїв: системи 2 визначення поточних навігаційних параметрів та вимірника 3 поточної висоти. За отриманими даними БЦОМ 4 для кожного  $i$ -того обраного інтервалу розраховує величини:

$$\int_{t_{n,i}}^{t_{k,i}} W_{\xi,i} dt, \quad \int_{t_{n,i}}^{t_{k,i}} \omega_{\xi,i} dt, \quad (25)$$

де  $t_{n,i}, t_{k,i}$  – моменти часу початку і кінця відліку  $i$ -того інтервалу даних;  $W_{\xi,i}, \omega_{\xi,i}$  – діючі на  $i$ -му інтервалі величини вертикальної складової  $W_{\xi}$  вектора лінійного прискорення та вертикальної складової  $\omega_{\xi}$  вектора кутової швидкості горизонтально-стабілізованої платформи.

Виконавши зазначені обчислення, БЦОМ 4 розраховує середнє значення вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення  $\bar{g}_{\xi,i}$  для кожного  $i$ -того обраного інтервалу:

$$\bar{g}_{\xi,i} = \frac{-1}{R_{cm,i}} \cdot \left[ (\alpha(t_{k,i}) - \alpha(t_{n,i})) - \frac{R_{cm,i}}{1} \cdot \left( \int_{t_{n,i}}^{t_{k,i}} W_{\xi,i} dt \right) + \left( \int_{t_{n,i}}^{t_{k,i}} \omega_{\xi,i} dt \right) \right] \cdot \frac{1}{(t_{k,i} - t_{n,i})}. \quad (26)$$

В загальному випадку БЦОМ 4 виконує додатково редукцію отриманого значення вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення.

**Висновки.** Двороторний інтегруючий гіроскопічний датчик гравітаційного прискорення належить до засобів вимірювання вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення з борту рухомого апарата і може бути використаний в галузі геодезії, геофізики, геологорозвідування, зокрема, при формуванні опорних гравіметричних сіток важкодоступних районів Земної кулі, а також в авіа- та ракетобудуванні.

Запропоноване використання як гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення – двороторного інтегруючого гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення дозволяє підвищити стабільність статичного передавального коефіцієнта вказаного датчика за рахунок того, що в цьому випадку статичний передавальний коефіцієнт визначається лише значеннями маятниковостей, осевими моментами інерції та частотами обертання роторів першого та другого гіромоторів. Оскільки значення маятниковості та осевих моментів інерції роторів першого та другого гіромоторів можливо застабілізувати лише підбором матеріалів з малим температурним розширенням, а стабільність значення частоти обертання роторів першого та другого гіромоторів забезпечити за рахунок використання якісних прецизійних синхронних першого та другого гіромоторів у сукупності з блоком живлення стабілізованої частоти, то забезпечується отримання стабільного статичного передавального коефіцієнта гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення. Це є значною перевагою, оскільки стабільність даного коефіцієнта є одним з головних факторів, що визначають вихідну точність двороторного інтегруючого гіроскопічного гравіметра з контрольованими параметрами, а отже і точність вимірювань вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення з борту рухомого апарата за допомогою даного приладу.

Система підключених до БЦОМ першого датчика частоти обертання, який контролює частоту обертання ротора першого гіромотора, та другого датчика частоти обертання, який контролює частоту обертання ротора другого гіромотора, створює додатковий інформаційний канал і дозволяє, особливо у випадку неможливості забезпечити довготривалу стабільність частоти обертання роторів першого та

другого гіромоторів, програмними засобами обирати із всієї сукупності вимірювань інтервали з необхідною, для заданої точності, стабільністю частоти обертання роторів першого та другого гіромоторів і визначати для кожного такого інтервалу поточне значення статичного передавального коефіцієнта гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення у відповідності до поточних, для таких інтервалів, значень частот обертання роторів першого та другого гіромоторів.

Вихідний сигнал гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення містить складові-перешкоди, обумовлені тим, що гіроскопічний датчик гравітаційного прискорення встановлений на рухомій основі. За даними від системи визначення поточних навігаційних параметрів визначають низькочастотні складові-перешкоди, а потім в БЦОМ програмно віднімають їх від вихідного сигналу гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення. Наявність високочастотних складових-перешкод зумовлює необхідність усереднення вихідного сигналу гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення, що передбачає застосування процедури інтегрування. Запропонований двороторний інтегруючий гіроскопічний датчик гравітаційного прискорення має в цьому сенсі значну перевагу, оскільки, з точки зору прецесійної теорії, є ідеальним інтегратором. В даному випадку зникає необхідність проведення процедури дискретного інтегрування сигналу програмними засобами в БЦОМ, а отже відсутня і похибка дискретного інтегрування, що підвищує точність вимірювання вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення з борту рухомого апарата.

Застосування системи двох пов'язаних селісинів, які дозволяють обертатися першому гіромотору навколо осі внутрішнього підвісу першого гіромотора та другому гіромотору навколо осі підвісу другого гіромотора лише в протилежних напрямках на рівні кути, обумовлює те, що між першим та другим гіромоторами створюється зв'язок, аналогічний кінематичному зв'язку з одиничним за модулем і від'ємним за знаком передавальним коефіцієнтом. Саме таке рішення дозволяє уникнути появи додаткових моментів тертя, які б обов'язково з'явилися, якщо б застосовувався виключно механічний зв'язок, і викликали б появу додаткових складових-перешкод у вихідному сигналі гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення. При цьому з урахуванням однаковості першого та другого гіромоторів створюються умови для взаємної компенсації моментів-перешкод від горизонтальних складових вектора кутового прискорення рухомої основи. Крім того, описаний вище зв'язок між однаковими першим та другим гіромоторами у сукупності з розміщенням центрів мас першого та другого гіромоторів, а також розміщенням осей внутрішніх підвісів першого та другого гіромоторів зумовлює те, що утворюються маятниковості першого та другого гіромоторів, рівні за модулем, але протилежні за знаком, і таким чином створюються умови для взаємної компенсації моментів-перешкод від горизонтальних складових вектора лінійного прискорення рухомої основи, в тому числі від горизонтальних складових вектора гравітаційного прискорення, а також, оскільки частоти обертання роторів першого та другого гіромоторів рівні за модулем та протилежні за знаком, створюються умови для взаємної компенсації моментів-перешкод від горизонтальних складових вектора кутової швидкості рухомої основи.

Точність взаємної компенсації вищезазначених моментів-перешкод залежить від рівності модулів і протилежності знаків маятниковостей двох однакових першого та другого гіромоторів та від рівності модулів і протилежності знаків кутів повороту першого та другого гіромоторів навколо осей внутрішніх підвісів першого та другого гіромоторів. Перша умова забезпечується точністю виготовлення конструктивних елементів, друга – залежить від точності роботи системи двох пов'язаних селісинів. Система двох пов'язаних селісинів працює в динамічному режимі, тому впровадження ще одного додаткового інформаційного каналу, який дозволив би контролювати кути повороту першого та другого гіромоторів навколо осей внутрішніх підвісів першого та другого гіромоторів, створює можливість для БЦОМ програмно обирати із всієї сукупності вимірювань інтервали, на яких вищезазначена друга умова виконується з потрібною точністю. Конструктивно такий інформаційний канал забезпечується підключеними до БЦОМ першим датчиком кута повороту, який контролює кут повороту першого гіромотора навколо осі внутрішнього підвісу першого гіромотора, та другим датчиком кута повороту, який контролює кут повороту другого гіромотора навколо осі внутрішнього підвісу другого гіромотора. Отже в даному випадку створюються умови для вилучення тих результатів вимірювання, під час отримання яких компенсація моментів-перешкод виконана недостатньо якісно.

Отже взаємна компенсація вищезазначених моментів-перешкод та контроль за електромеханічною системою, що забезпечує таку компенсацію, призводить до того, що у вихідному сигналі гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення відсутні складові, пропорційні даним моментам-перешкодам, що підвищує точність вимірювання вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення з борту рухомого апарата.

Розташування першого та другого гіромоторів, а також розташування осей внутрішніх підвісів першого та другого гіромоторів так, що центри мас першого та другого гіромоторів підтримуються максимально близько до осі підвісу зовнішньої рамки, дозволяє звільнитись від складових-перешкод у вихідному сигналі гравіметра, спричинених відцентровими прискореннями, що діють на центри мас першого та другого гіромоторів під час обертання зовнішньої рамки разом з першим та другим



гіромоторами навколо осі підвісу зовнішньої рамки. Якщо б вказані центри мас знаходились на певній відстані від осі обертання зовнішньої рамки, то з'явилися би відцентрові прискорення прямо пропорційні цій відстані й квадрату кутової швидкості обертання зовнішньої рамки навколо осі підвісу зовнішньої рамки. Звільнення від описаних складових-перешкод у вихідному сигналі гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення підвищує точність вимірювання вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення з борту рухомого апарата.

Для запропонованого варіанта конструкції внутрішніх підвісів першого та другого гіромоторів, коли створені протилежні маятниковості, за правилом Резаля [6] кінетичні моменти першого та другого гіромоторів повинні мати протилежні знаки для того, щоб моменти від дії вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення на центри мас першого та другого гіромоторів викликали однаково направлений прецесійний рух зовнішньої рамки навколо осі підвісу зовнішньої рамки.

Передбачений контур корекції, що складається з першого датчика кута повороту, вихід якого підключений до підсилюючого елемента, вихід якого підключений до датчика моменту, встановленого на осі підвісу зовнішньої рамки, дозволяє забезпечити мінімальність кутів відхилення осей обертання роторів першого та другого гіромоторів від перпендикулярності до площини зовнішньої рамки і отже від перпендикулярності до осі підвісу зовнішньої рамки. Оскільки осі підвісу зовнішньої рамки надане положення вздовж вертикалі місця (нормалі до еліпсоїда обертання), моменти, створені дією вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення на центри мас першого та другого гіромоторів, будуть мати стабільно максимальне значення, при стабільності положення осей обертання роторів першого та другого гіромоторів. Таким чином забезпечується стабільність «нуль-пункту» і максимальна чутливість запропонованого гіроскопічного датчика гравітаційного прискорення, що є стандартною вимогою до приладів такого типу.

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Патент України на винахід № 53478 А, G 01 V 7/00. Гравіметр / С.О. Нечай, Д.Г. Тулупов, О.М. Безвесільна, К.В. Меньшикова, Є.І. Бобруйко. – № 2002064813; Заявл. 11.06.2002; Опубл. 15.01.2003, Бюл. № 1.
2. *Безвесільна О.М.* Про підвищення точності вимірювання прискорення сили тяжіння // Прикладна механіка. – 1995. – № 2. – С. 92–96.
3. *Одинцов А.А.* Динамически настраиваемые гироскопы. – К.: НМК ВО, 1992. – 68 с.
4. *Черников С.А.* Динамика нелинейных гироскопических систем. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
5. *Каргу Л.И.* Точность гироскопических устройств систем управления летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.
6. *Павловский М.А., Путята Т.В.* Теоретическая механика: Учебное пособие. – К.: Выща школа, 1985. – 328 с.

БЕЗВЕСІЛЬНА Олена Миколаївна – Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор кафедри приладобудування Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

- гравіметричні прилади і системи;
- математичне моделювання систем автоматичного керування та управління.

ДОБРЖАНСЬКИЙ Олександр Олексійович – аспірант кафедри автоматизації і комп’ютеризованих технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- гравіметричні прилади і системи;
- математичне моделювання систем автоматичного керування та управління.

Тел.: 8(0412)22-91-95.

Подано 20.03.2007