

УДК 621.317

¹О.М.Безвесільна, д.т.н., проф.
²А.В.Коваль**ДВОГІРОСКОПНИЙ ГРАВІМЕТР АВІАЦІЙНОЇ ГРАВІМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ**¹Національний технічний університет України “КПІ”, bezvesilna@mail.ru²Житомирський державний технологічний університет, koval.anton@gmail.com

Запропоновано та досліджено двогіроскопний гравіметр авіаційної гравіметричної системи, який забезпечує вищу точність вимірювань, ніж відомі гравіметри, за рахунок усунення похибок від перехресних кутових швидкостей основи і кутової швидкості обертання Землі та вимірювання повного вектора прискорення сили ваги.

Ключові слова: гравіметр, аномалія, гіроскоп

Постановка проблеми

Сьогодні сучасні прилади у галузі авіаційної гравіметрії (струнний ГС та кварцовий ГАЛ-С) мають значні похибки від впливу перехресних кутових швидкостей основи і кутової швидкості обертання Землі (тільки остання похибка становить 584 мГл). Гіроскопічний однороторний гравіметр також має вище зазначені похибки.

Вимоги до точності вимірювань гравітаційного поля Землі, корекції інерціальних навігаційних систем по гравітаційному полю Землі та інших прецизійних задач аерокосмічної галузі з кожним роком зростають.

Тому проблема підвищення точності авіаційних гравіметричних вимірювань шляхом компенсації похибок від впливу перехресних кутових швидкостей основи і кутової швидкості обертання Землі є актуальною.

Аналіз досліджень

Проведені дослідження показали, що великий внесок у теорію і практику наземних гравіметричних вимірювань було зроблено низкою видатних вчених-гравіметристів: В.О. Багрянца, Ю.Д. Буланже, К.Е. Веселова, А.М. Лозинської, А.А. Михайлова, С.А. Піддубного, Є.І. Попова, В.А. Туліна, В.В. Фединського, М.Є. Хейфеца та інших.

Велику роль у розробці гравітаційних вимірювань відіграли роботи закордонних вчених: Л. Ла-Кости, Д. Гаррисона, А. Графа, Ю. Томоди, М. Гольвані та інших.

Інтенсивно проводять гравіметричні дослідження в багатьох великих науково-технічних центрах: ННЦ “Інститут метрології” (м Харків) під керівництвом Г.С. Сидоренка; ЦНДІ “Азимут” (м. Санкт-Петербург) під керівництвом Л.П. Несенюка, Г.Б. Вольфсона, Б.А. Блажнова; ВВІАУ ім. професора М.Є. Жуковського (м. Москва) під керівництвом А.А. Красовського, А.І. Сороки; РВ ВІАУ (м. Рига) під керівництвом А.А. Веселова.

На даний момент існує численна література в області методів і засобів вимірювання аномалій прискорення сили ваги (ПСВ) [1], яка містить як принцип дії, так і технічні характеристики сучасних приладів для вимірювання ПСВ. Велику увагу приділено одногіроскопним гравіметрам [1,2]. Інформація про двогіроскопні гравіметри відсутня.

Мета роботи: запропонувати та дослідити двогіроскопний гравіметр (ДГ) авіаційної гравіметричної системи (АГС), який забезпечить вищу точність вимірювань, ніж відомі системи, за рахунок усунення похибок від перехресних кутових швидкостей основи і кутової швидкості обертання Землі та вимірювання повного вектора прискорення сили ваги (а не одного компонента, як у гравіметрах ГАЛ-С, ГС та одногіроскопному).

Основна частина

Для вимірювання аномалій прискорення сили ваги запропоновано АГС (рис. 1), яка має більшу точність і швидкодію, ніж відомі, та складається з триступеневого гіроскопа 1, розташованого у внутрішній 2 та зовнішній 3 рамках, забезпеченого системами міжрамкової корекції, що містять розташований на осі 4 внутрішньої рамки гіроскопа 1 датчик кута (ДК) 5 і підключений до його виходу датчик моменту (ДМ) 6, розташований на осі 7 зовнішньої рамки 3. До виходу ДК 8 підключено ДМ 9, розташований на осі 4 внутрішньої рамки 2. У

розглядуваній АГС уведено додатковий, ідентичний першому, триступеневий гіроскоп 1, ротор якого обертається в протилежний бік від основного гіроскопа 1. Додатковий гіроскоп АГС також забезпечують аналогічними системами корекції, які складаються з ДК 5, розташованого на осі 4 внутрішньої рамки 2, і підключеного до його виходу ДМ 6, розташованого на осі 7 зовнішньої рамки 3, ДК 8, розташовано на осі 7 зовнішньої рамки 3, до виходу якого підключено ДМ 9, розташований на осі 4 внутрішньої рамки 2. Центри ваги двох однакових (основного і додаткового) гіроскопів 1 зміщені на однакову відстань l в один бік уздовж осей 10 обертання роторів гіроскопів 1 відносно осей 7 зовнішніх рамок 3. Вектори кінетичних моментів двох гіроскопів протилежно спрямовані.

У двогіроскопному гравіметрі формуються два вихідні сигнали f_z, f_x лінійного прискорення як сума сигналів з ДК 8 двох гіроскопів відносно однієї осі z і як сума сигналів з ДК 5 двох гіроскопів відносно другої осі x . Вихідні сигнали f_z, f_x подаються у БЦОМ. Обидва гіроскопи гірогравіметра системи встановлюють на платформі 11, кутовим положенням якої керує двигун (ДВ) 12, встановлений на осі x і ДВ 13 – на осі z . Сигнал лінійного прискорення f_z надходить на ДВ 12, а сигнал f_x – на ДВ 13. Обидва двигуни керують кутовим положенням платформи 11 за сигналами f_x, f_z . У БЦОМ надходять також сигнали від системи визначення навігаційних параметрів і від вимірювача висоти.

За наявності складової g_x лінійного прискорення вздовж осей 4 внутрішніх рамок 2 гіроскопів, рамки починають обертатися навколо осей 4 внутрішніх рамок 2 під дією маятникового моменту $ml g_x$ (ml – маятниковість), спрямованого по осях 7 зовнішніх рамок 3. Повертання гіроскопів під дією цього моменту спричиняє появу електричних сигналів з двох однакових ДК 5, розташованих на осях 4 внутрішніх рамок 2, виходи яких з'єднані з обмотками керування двох однакових ДМ 6, розташованих на осях 7 зовнішніх рамок 3. Два ДМ 6 створюють моменти, які компенсують маятникові моменти $ml g_x$, по осях 7 зовнішніх рамок 3. Під дією маятникового моменту $ml g_z$, зумовленого складовою лінійного прискорення g_z уздовж осей 7 зовнішніх рамок і напрямленого вздовж осей 4 внутрішніх рамок 2 гіроскопів, два триступеневих гіроскопи починають обертатися навколо осей 7 зовнішніх рамок 3. Обертання двох гіроскопів під дією моменту $ml g_z$ спричиняє появу електричних сигналів з двох однакових ДК 8, розташованих на осях 7 зовнішніх рамок 3, виходи яких з'єднані з обмотками керування двох однакових ДМ 9, розташованих на осях 4 внутрішніх рамок 2. Два однакових ДМ 9 створюють моменти, що компенсують маятникові моменти $ml g_z$, які діють по осях 4 внутрішніх рамок 2 гіроскопів. У двогіроскопному гравіметрі формуються вихідні сигнали f_z і f_x лінійного прискорення,

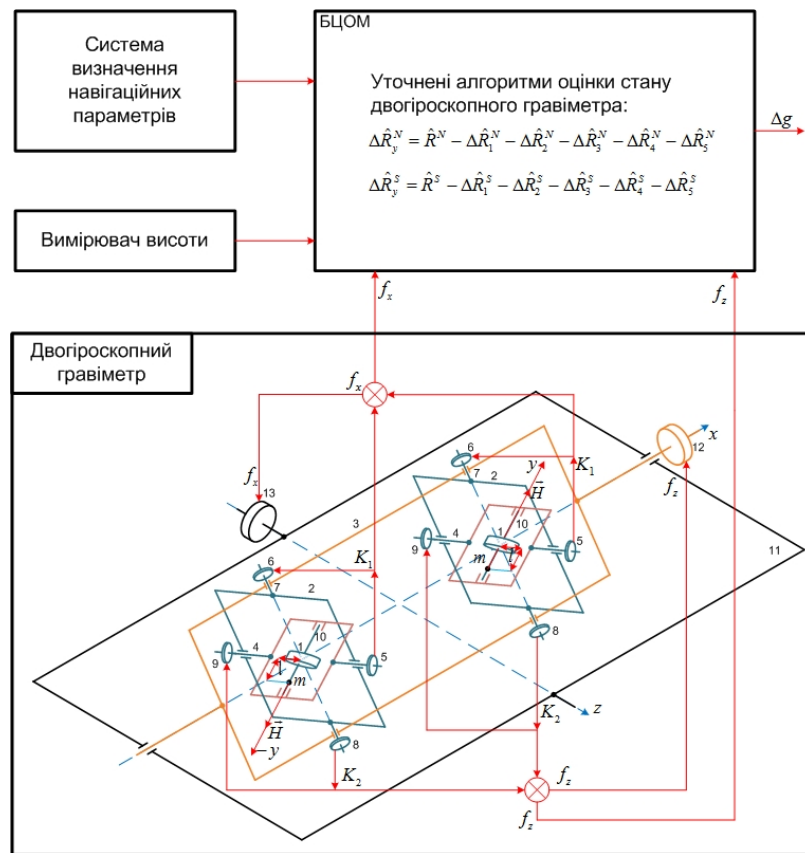


Рис. 1. Авіаційна гравіметрична система з двогіроскопним гравіметром

як сума сигналів з ДК 8 двох гіроскопів на одній осі z і як сума сигналів з ДК 5 двох гіроскопів по другій осі x . Вихідні сигнали f_z, f_x подаються у БЦОМ. Сигнали лінійного прискорення f_z, f_x надходять на ДВ 12, 13, встановлені по осях x, z . Обидва двигуни керують кутовим положенням платформи 11, на якій встановлюють прилад. У БЦОМ подаються також вихідні сигнали v, k, ϕ від системи визначення навігаційних параметрів і вихідний сигнал h від вимірювача висоти. БЦОМ обчислює аномалії прискорення сили ваги.

Пояснимо принцип дії АГС скориставшись системою прецизійних рівнянь руху одного з двох однакових гіроскопів гравіметра системи:

$$\begin{cases} H\dot{\beta} + k_1\beta + n_1\dot{\alpha} = mlw_x - mlg_x - H(\omega_x + \omega_y\alpha) - A\dot{\omega}_z - H\omega_3 \cos\phi, \\ H\dot{\alpha} + k_2\alpha + n_2\dot{\beta} = mlw_z - mlg_z - ml(w_x\alpha - w_y)\beta - B(\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y\alpha) - \\ - H\omega_y\beta - H\omega_3 \sin\phi, \end{cases} \quad (1)$$

де H – кінетичний момент гіроскопа; α, β – кути повороту зовнішньої рамки відносно об'єкта і кожуха гіроскопа відносно зовнішньої рамки; k_1, k_2 – коефіцієнти, що дорівнюють добутку передаточних коефіцієнтів відповідних ДК і ДМ двох каналів корекції; n_1, n_2 – коефіцієнти сил в'язкого тертя відносно відповідних осей; w_x, w_y, w_z – проекції прискорення поступального руху літака на осі Ox, Oy, Oz опорної системи координат $xOyz$, зв'язаної з літаком (початок її O збігається з центром мас рухомої частини приладу; вісь Ox напрямлена паралельно поздовжній осі об'єкта, вісь Oy – паралельно поперечній; вісь Oz – паралельно нормальній осі); $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекції кутової швидкості об'єкта на осі, зв'язані з ним; A – зведений до осі обертання зовнішньої рамки момент інерції системи “гіроскоп у кардановому підвісі”; B – момент інерції “ротатор і внутрішня рамка гіроскопа”; g_z, g_x – вертикальна і горизонтальна складові прискорення сили ваги, що діють на гіроскоп; ω_3 – кутова швидкість обертання Землі; ϕ – широта.

Позначивши збурюючі моменти перешкод відносно осей підвісу рамок гіроскопа

$$M_1 = mlw_x - H(\omega_x + \omega_y\alpha) - A\dot{\omega}_z - H\omega_3 \cos\phi,$$

$$M_2 = mlw_z - ml(w_x\alpha - w_y)\beta - B(\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y\alpha) - H\omega_y\beta - H\omega_3 \sin\phi,$$

перепишемо систему (1) у вигляді

$$\begin{cases} H\dot{\beta} + k_1\beta + n_1\dot{\alpha} = M_1 - mlg_x, \\ H\dot{\alpha} + k_2\alpha + n_2\dot{\beta} = M_2 - mlg_z. \end{cases} \quad (2)$$

Знайдемо розв'язання рівнянь (2):

$$\alpha(p) = [n_2p(M_1 - mlg_x) - (Hp + k_1)(M_2 - mlg_z)] \times \\ \times [n_1n_2p^2 - (Hp + k_1)(Hp + k_2)]^{-1}; \quad (3)$$

$$\beta(p) = [n_1p(M_2 - mlg_z) - (Hp + k_2)(M_1 - mlg_x)] \times \\ \times [n_1n_2p^2 - (Hp + k_1)(Hp + k_2)]^{-1}. \quad (4)$$

Запишемо вирази усталених значень кутів повороту одного з гіроскопів, скориставшись (3), (4):

$$\alpha_{ycm} = k_2^{-1} [-mlg_z + mlw_z - ml(w_x\alpha - w_y)\beta - B(\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y\alpha) - \\ - H\omega_y\beta - H\omega_3 \sin\phi];$$

$$\beta_{ycm} = k_1^{-1} [-mlg_x + mlw_x - H(\omega_x + \omega_y\alpha)\beta - A\dot{\omega}_z - H\omega_3 \cos\phi].$$

Сформуємо сигнали, пропорційні сумі кутів повороту двох гіроскопів. Для цього використаємо два однакових гіроскопи з протилежно спрямованими векторами кінетичних моментів. Сигнали двох гіроскопів мають вигляд відповідно:

$$\alpha_{1ycm} = k_2^{-1} \left[-ml g_z + ml w_z - ml (w_x \alpha - w_y) \beta - B (\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y \alpha) - H \omega_y \beta - H \omega_3 \sin \phi \right],$$

$$\alpha_{2ycm} = k_2^{-1} \left[-ml g_z + ml w_z - ml (w_x \alpha - w_y) \beta - B (\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y \alpha) + H \omega_y \beta + H \omega_3 \sin \phi \right];$$

$$\beta_{1ycm} = k_1^{-1} \left[-ml g_x + ml w_x - H (w_x + w_y \alpha) \beta - A \dot{\omega}_z - H \omega_3 \cos \phi \right],$$

$$\beta_{2ycm} = k_1^{-1} \left[-ml g_x + ml w_x + H (w_x + w_y \alpha) - A \dot{\omega}_z + H \omega_3 \cos \phi \right].$$

Знайдемо два вихідні сигнали двогіроскопного гравіметра:

$$f_z = \alpha_{1ycm} + \alpha_{2ycm} = k_2^{-1} \left[-2ml g_z + 2ml w_z - 2ml (w_x \alpha - w_y) \beta - 2B (\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y \alpha) \right]; \quad (5)$$

$$f_x = \beta_{1ycm} + \beta_{2ycm} = k_1^{-1} \left[-2ml g_x + 2ml w_x - 2A \dot{\omega}_z \right]. \quad (6)$$

З виразів (5) і (6) вихідних сигналів АГС видно:

- складові корисного сигналу $-2ml g_z, -2ml g_x$ подвоюються;
- двогіроскопний гравіметр АГС може вимірювати підсумковий напрямок і модуль прискорення сили ваги за формулами

$$\vec{g} = \vec{g}_z + \vec{g}_x, \quad |g| = \sqrt{g_z^2 + g_x^2},$$

що забезпечує вищу точність вимірювань і виставлення двогіроскопного гравіметра АГС. Для цього вихідні сигнали $f_z \cong 2g_z$ і $f_x \cong 2g_x$ (вирази (5) і (6)) двогіроскопного гравіметра використовують для керування двома додатковими двигунами додатково введеної платформи, на якій встановлюють основний і додатковий гіроскопи;

- деякі моменти-перешкоди внаслідок перехресних лінійних і кутових прискорень подвоюються $\left[2ml w_z - 2ml (w_x \alpha - w_y) \beta - 2B (\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y \alpha); 2ml w_x - 2A \dot{\omega}_z \right]$. Тут можна врахувати тільки вплив моментів $-2ml w_z, -2ml w_x$. Тому можна вважати, що

$$f_z \cong k_2^{-1} (-2ml g_z + 2ml w_z), \quad f_x \cong k_1^{-1} (-2ml g_x + 2ml w_x).$$

Зауважимо, що вказані вище моменти-перешкоди (в сумі з моментами-перешкодами, вплив яких у двогіроскопному гравіметрі виключається) впливають рівною мірою і на роботу одногіроскопного гравіметра АГС.

- усуваються похибки, спричинені гіроскопічними моментами-перешкодами від перехресних кутових швидкостей $\left[H \omega_y \beta, H (\omega_x + \omega_y \alpha) \right]$ і від кутової швидкості обертання Землі $(H \omega_3 \sin \phi, H \omega_3 \cos \phi)$, які можуть бути значними (а саме, останні – 584 мГл).

Висновки. Запропонований ДГ АГС має певні переваги порівняно з іншими відомими гравіметрами:

1. Розглянутий ДГ АГС забезпечує вищу точність вимірювань, ніж з одногіроскопним гравіметром завдяки компенсації похибок внаслідок перехресних кутових швидкостей і кутової швидкості обертання Землі;
2. В ДГ АГС складові корисного сигналу подвоюються;
3. Двогіроскопний гравіметр АГС може вимірювати підсумковий напрямок і модуль прискорення сили ваги, що забезпечує вищу точність як безпосередньо вимірювань Δg , так і виставлення двогіроскопного гравіметра системи завдяки застосуванню двох додаткових двигунів і додаткової платформи.

Список літературних джерел:

1. Безвесільна О.М. Вимірювання прискорень: Підручник. – К.: Либідь, 2001. – 254с.
2. Безвесільна О.М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2007. – 604с.