

О.М. Безвесільна, д.т.н., проф.
Національний технічний університет України "КПІ"
А.Г. Ткачук, аспір.
Житомирський державний технологічний університет

**АВІАЦІЙНА ГРАВИМЕТРИЧНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ
 АНОМАЛІЙ ПРИСКОРЕННЯ СИЛИ ТЯЖІННЯ**

У статті розглянуто рівняння руху авіаційної гравіметричної системи для визначення аномалії прискорення сили тяжіння та представлено його функціональну схему. Запропоновано новий спосіб підвищення точності вимірювання прискорення сили тяжіння за рахунок створення нового гравіметра, який працює на основі прямого п'єзоефекту та встановлення його на автономній двовісній платформі.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її актуальність. Точні знання гравітаційного прискорення g та аномалій Δg гравітаційного поля Землі необхідні як в авіаційній і космічній техніці (корекція систем інерціальної навігації ракет, літаків, орбіт космічних літальних апаратів), так і в інших галузях науки і техніки – у геології, геодезії (розвідка корисних копалин, вивчення форми поверхні Землі тощо).

Для визначення характеристик гравітаційного поля Землі можна побудувати авіаційну гравіметричну систему (АГС), чутливим елементом якої є гравіметр. За допомогою АГС можна здобути гравіметричну інформацію у важкодоступних районах земної кулі набагато швидше та з меншими витратами, ніж за допомогою наземних морських або сухопутних гравіметричних засобів. Дані про гравітаційне поле Землі, введені у пам'ять бортової цифрової обчислювальної машини (БЦОМ) АГС, суттєво сприятимуть підвищенню як точності визначення навігаційних параметрів, так і ефективності гравіметричної розвідки [1].

Ефективність роботи АГС значною мірою забезпечується вибором чутливого елемента системи – гравіметра. На сьогоднішній день найбільш відомими є такі авіаційні гравіметри, як струнний (ГС), кварцовий (ГАЛ-С) та гіроскопічний (ГГ).

Результати вимірювань прискорення сили тяжіння, отримані за допомогою згаданих вище гравіметрів, містять великі похибки вимірювань, спричинені впливом перехресних кутових швидкостей основи і кутової швидкості обертання Землі (584 мГл), змінами температури, атмосферного тиску, появи шумів різного походження та вібрацій у місці встановлення приладу, що не лише зменшує точність вимірювання прискорення сили тяжіння, а й знижує надійність всієї АГС.

Для високоточних вимірювань гравітаційного поля Землі наявність означених вище похибок є неприпустимою. Тому проблема їх компенсації чи ліквідації і, як наслідок, підвищення точності авіаційних гравіметричних вимірювань є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведені дослідження показали, що в авіаційній гравіметрії у СНД найбільш відомими є роботи: Є.І. Попова (кварцовий гравіметр), А.М. Лозинської (струнний гравіметр); за кордоном – ЛаКоста, Ромберга (гравіметр Акоста–Ромберга), Графа (гравіметр Асканія–Граф). Інтенсивно проводять гравіметричні дослідження у 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.

В Україні широковідомі та досліджені під керівництвом заслуженого діяча науки і техніки України, доктора технічних наук, професора О.М. Безвесільної різні типи гіроскопічних гравіметрів.

У відомій літературі [1–3] описано принцип дії та технічні характеристики сучасних приладів для вимірювання прискорення сили тяжіння. Але немає детальних відомостей щодо методів підвищення точності гравіметричних вимірювань.

Метою даної роботи є розробка та дослідження нової авіаційної гравіметричної системи для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння із чутливим елементом у вигляді п'єзoeлектричного гравіметра, яка забезпечить вищу точність вимірювання, ніж відомі системи.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння запропоновано авіаційну гравіметричну систему (рис. 1), яка має більшу точність і швидкодію, ніж відомі, та складається із гравіметра 1, системи 2 визначення поточних навігаційних параметрів та вимірювача 3 поточної висоти, які підключені до БЦОМ 4.

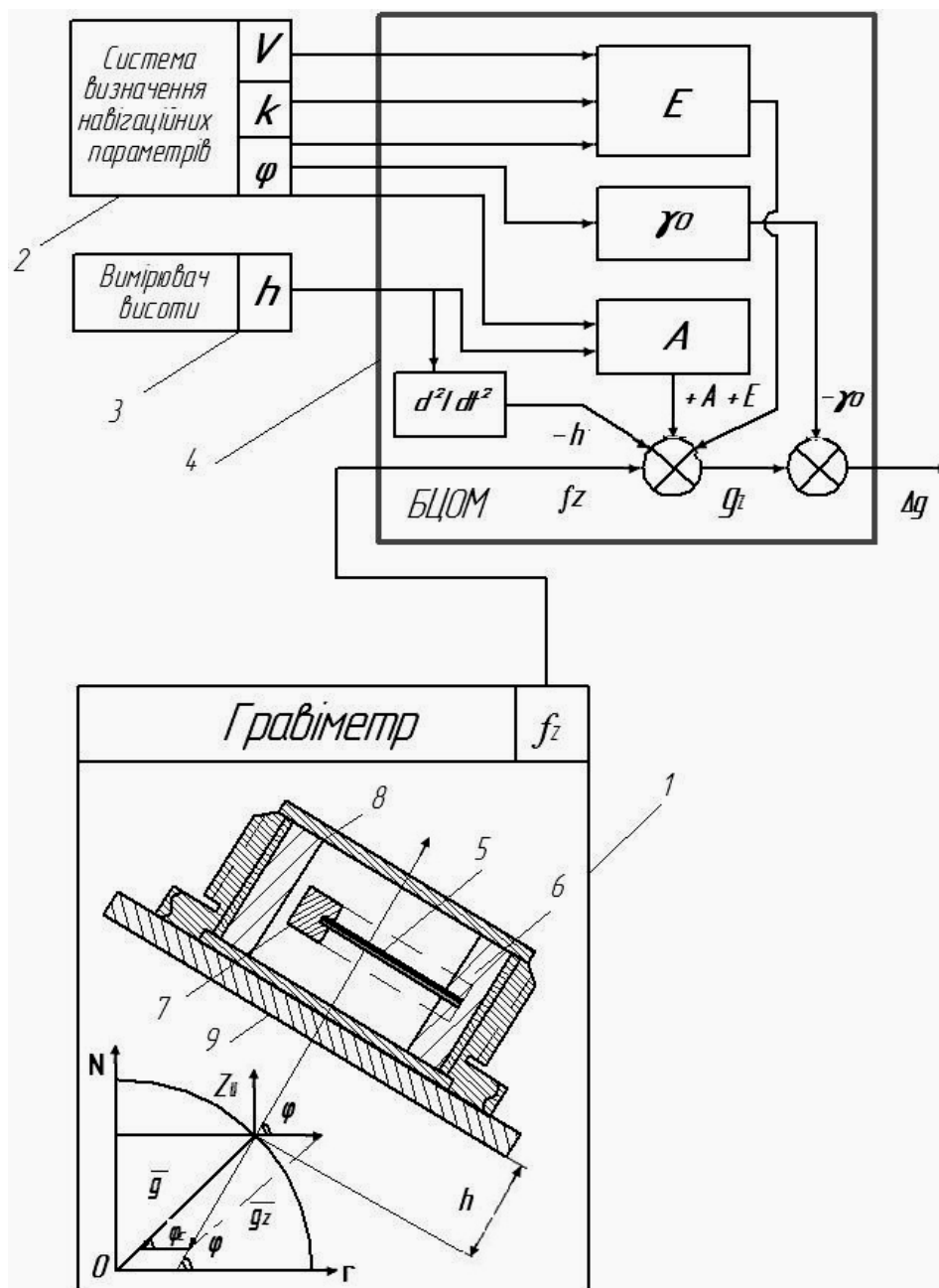


Рис. 1. Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння: 1 – гравіметр АГС; 2 – система визначення навігаційних параметрів; 3 – вимірювач висоти; 4 – БЦОМ; 5 – п'єзoeлемент; 6 – стрижень; 7 – інерційна маса; 8 – герметичний корпус; 9 – двовісна платформа; N – північний полюс Землі; g – гравітаційне прискорення або прискорення сили тяжіння; g_z – проекція прискорення сили тяжіння на вісь чутливості гравіметра АГС; Δg – аномалія прискорення сили тяжіння; φ – географічна широта; φ_c – геоцентрична широта; r – радіус місцезнаходження літального апарата (ЛА); h – висота ЛА над еліпсоїдом

Гравіметр АГС 1 у своєму складі містить чутливий елемент у вигляді закріпленого на стрижні 6 п'єзоелемента 5, розміщеного у герметичному корпусі 8. На вільному кінці п'єзоелемента 5 розміщено інерційну масу 7.

Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння працює таким чином.

Під дією прискорення g_z сили тяжіння на інерційну масу 4 гравіметра 1 виникає сила тяжіння G , внаслідок дії якої п'єзоелемент 5 згинається (деформується) на деякий кут α :

$$\alpha \equiv f(g_z). \quad (1)$$

У результаті такого деформування спостерігається явище прямого п'єзоелектричного ефекту – утворення на поверхні п'єзоелемента 5 електричного заряду Q , який прямо пропорційний g_z .

У такому гравіметрі, зазвичай, вихідною величиною є напруга U , а не заряд Q :

$$U \equiv \frac{Q(g_z)}{C_{\text{ПЕ}}}, \quad (2)$$

де $C_{\text{ПЕ}}$ – електрична ємність п'єзоелемента 5.

Аналітичний вираз для розрахунку вихідної напруги гравіметра із врахуванням його фізичних параметрів має такий вигляд:

$$U = \frac{d_{ij} \cdot m \cdot g_z}{C_{\text{ПЕ}}}, \quad (3)$$

де d_{ij} – п'єзомодуль (параметр п'єзоелемента 5, який залежить від матеріалу його виготовлення); m – вага п'єзоелемента 5 та інерційної маси 7 разом.

Спираючись на принцип дії гравіметра АГС, його можна назвати п'єзоелектричним.

Таким чином, вихідний сигнал напруги з п'єзоелектричного гравіметра 1 пропорційний гравітаційному прискоренню g_z , який у подальшому будемо позначати через f_z .

Рівняння руху АГС [1] для визначення аномалії прискорення сили тяжіння Δg з урахуванням того, що аномалія прискорення сили тяжіння дорівнює різниці g вздовж осі чутливості гравіметра та довідкового значення прискорення сили тяжіння, має вигляд:

$$\Delta g = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[1 - \cos^2 \varphi \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v \sin k \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \ddot{h} - \gamma_0, \quad (4)$$

де f_z – вихідний сигнал гравіметра АГС; v – швидкість ЛА; r – радіус місцезнаходження ЛА; e – стиск еліпсоїда; φ – географічна широта; k – курс ЛА; ω_3 – кутова швидкість обертання Землі; h – висота ЛА над еліпсоїдом; \dot{h} – вертикальна швидкість ЛА; \ddot{h} – вертикальне прискорення ЛА; γ_0 – довідкове значення прискорення сили тяжіння.

Перепишемо рівняння руху АГС у вигляді:

$$\Delta g = f_z + E + A - \ddot{h} - \gamma_0, \quad (5)$$

де f_z – вихідний сигнал гравіметра АГС; $E = \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[1 - \cos^2 \varphi \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v \sin k \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi$ –

поправка Етвеша; $A = 2\gamma_0 h r^{-1} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi$ – поправка на висоту; $\gamma_0 = \gamma_{0e} (1 + 0,0052884 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi)$ – довідкове значення прискорення сили тяжіння; $\gamma_{0e} = 9,78049 \text{ м/с}^2$ – довідкове екваторіальне значення прискорення сили тяжіння.

Вісь чутливості п'єзоелектричного гравіметра може відхилитися на деякий кут від напрямку місцевої вертикалі. Оскільки напрямок повного вектора прискорення сили тяжіння співпадає із напрямком істинної вертикалі, то внаслідок відхилення осі чутливості п'єзоелектричний гравіметр вимірює не істинне значення повного вектора прискорення сили тяжіння, а його проекцію на миттєве або змінне положення цієї осі чутливості.

З метою уникнення такої розбіжності між показами п'єзоелектричного гравіметра та істинним значенням повного вектора прискорення сили тяжіння запропоновано створити систему стабілізації вимірювальної осі п'єзоелектричного гравіметра. Тому п'єзоелектричний гравіметр встановлено на двовісній платформі 9, яка має у своєму складі два лінійні акселерометри 10, 11 та виконавчі механізми у вигляді двигунів 12, 13 (рис. 2).

Система стабілізації працює таким чином. Вихідні сигнали лінійних акселерометрів, установлених на платформі, орієнтованій у географічній системі координат, осі чутливості яких спрямовані на північ та на схід відповідно, реагують на зміщення платформи і посилають сигнал відхилення до БЦОМ, а БЦОМ, у свою чергу, вирівнює двовісну платформу за допомогою двигунів.

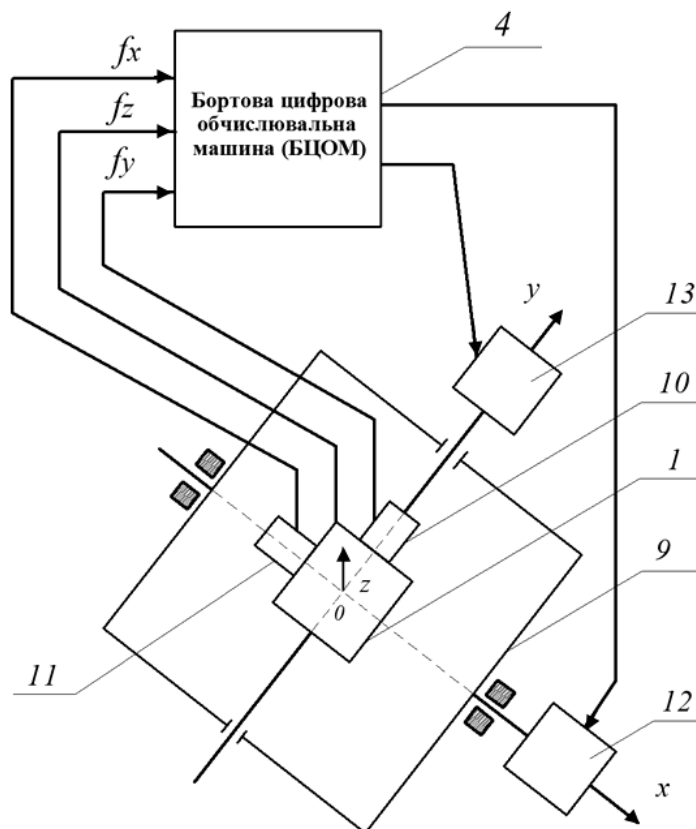


Рис. 2. Стабілізація осі чутливості гравіметра у положенні вертикалі:
 1 – гравіметр АГС; 4 – БЦОМ; 9 – двовісна платформа;
 10, 11 – лінійні акселерометри; 12, 13 – двигуни

Як вже було зазначено, чутливий елемент п'єзоелектричного гравіметра АГС виконано у вигляді закріпленого на стрижні п'єзоелемента, а принцип роботи оснований на явищі п'єзоелектричного ефекту. Рекомендованим матеріалом для п'єзоелемента є кварц, а принцип роботи оснований на деформації згинання. Такий чутливий елемент забезпечує вимірювання прискорення сили тяжіння лише в одному напрямку – вздовж осі, перпендикулярній площині встановлення п'єзоелектричного гравіметра (Oz), що зменшує чутливість гравіметра до поперечних коливань та перехресних швидкостей, а тому підвищує точність вимірювання прискорення сили тяжіння.

Повернення п'єзоелемента у початкове положення, тобто його силове компенсування, відбувається шляхом введення в схему прямого перетворення сигналу прискорення сили тяжіння у напругу від'ємного електромеханічного зворотного зв'язку, який оснований на явищі зворотного п'єзоелекту. Принципова електрична схема реалізації даного силового компенсування передбачає нанесення на п'єзоелемент трьох електродів: перший – підключений до входу підсилювача напруги, другий – до загального проводу схеми і третій – до виходу підсилювача напруги [4]. Очевидно, що п'єзоелемент одночасно є і силовим компенсатором, що дозволяє забезпечити максимальну його пружність, стабільність роботи протягом тривалого часу і, як наслідок, високу надійність.

За рахунок вибору п'єзоматеріалу та геометричних розмірів п'єзоелемента можна регулювати власну частоту гравіметра АГС, а саме зменшувати її, що дозволить використовувати даний п'єзоелемент і у вигляді фільтра низьких частот. Це ліквідує вплив на вихідні покази похибок, частота яких більша за власну частоту гравіметра (поступальні віброприскорення, переважна частота яких 3140 рад./с; кутові віброприскорення, переважна частота яких понад 0,1 рад./с).

Чутливий елемент гравіметра АГС розміщено у герметичному корпусі, що дозволяє забезпечити стабільність передавального коефіцієнта гравіметра шляхом захисту його від впливу змін температури, атмосферного тиску, вологості повітря тощо. П'єзоелемент і система корпус–основа гравіметра АГС добре ізольовані один від одного, а це забезпечує значну стійкість до впливу акустичних шумів. Все це підвищить не лише точність АГС, а й її надійність.

Таким чином, завдяки використанню як чутливий елемент АГС саме п'єзоелемента із необхідними параметрами та розміщення гравіметра на двовісній платформі, незалежній від показів гравіметра, дозволять підвищити точність вимірювання прискорення сили тяжіння і, як наслідок, його аномалії.

Висновок. Визначено рівняння (4) руху гравіметричної системи, що працює на рухомій основі, зокрема на літаку, яке відрізняється від відомих наявністю таких додаткових поправок, як поправки Етвеша та поправка на висоту. Аналіз цього рівняння показує, що АГС складається із підсистем, які виконують функції: вимірюють силу тяжіння, стабілізують вісь чутливості гравіметра у положенні вертикалі, визначають координати місцезнаходження і швидкості, вимірюють висоту, здійснюють обчислювальні операції.

Запропоновано й досліджено нову схему АГС, чутливим елементом якої є п'єзоелектричний гравіметр, розташований на автономній двовісній платформі. Дана АГС забезпечує вищу точність вимірювань, ніж відомі системи, за рахунок усунення похибок кутової швидкості обертання Землі, вертикального прискорення, вимірювання повного вектора прискорення сили тяжіння, похибок, викликаних змінами температури, атмосферного тиску, вібрацій у місці встановлення приладу.

АГС із п'єзоелектричним гравіметром має вищу швидкодію, оскільки забезпечує безперервний процес вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння на борту ЛА під час польоту, на відміну від відомих систем (на основі ГС та ГАЛ-С), у яких обробку результатів виконують після польоту.

Список використаної літератури:

1. *Безвесільна О.М.* Вимірювання прискорень / *О.М. Безвесільна.* – К. : Либідь, 2001. – 261 с.
2. *Безвесільна О.М.* Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри : монографія / *О.М. Безвесільна.* – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.
3. *Янчич В.В.* Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения : учеб. пособие / *В.В. Янчич.* – Ростов-на-Дону, 2008. – 77 с.
4. *Шарапов В.М.* Пьезоэлектрические датчики / *В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко* ; под ред. *В.М. Шарапова.* – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.

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

Наукові інтереси:

- гравіметричні системи та гравіметри;
- прилади та методи вимірювання механічних величин;
- комп'ютеризовані інформаційні системи.

ТКАЧУК Андрій Геннадійович – аспірант кафедри автоматизації та комп'ютеризованих технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- гравіметричні системи та гравіметри;
- системи автоматичного керування.

Стаття надійшла до редакції 30.10.2012