

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

АВІАЦІЙНИЙ ГРАВИМЕТРИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ АНОМАЛІЙ ПРИСКОРЕННЯ СИЛИ ТЯЖІННЯ

Вивчення гравітаційного поля Землі – цікава та швидко розвиваюча область геодезії, геофізики та геодинаміки. Успіхи теоретичних розділів геодезії та геофізики, удосконалення методів вивчення гравітаційного поля Землі та обробка вимірювань, нові види гравіметричної апаратури призвели до різкого підвищення точності гравіметричних даних та значно розширили області практичного застосування гравіметрії. На сьогоднішній день інформація про гравітаційне поле Землі необхідна в авіаційній і космічній техніці (корекція систем інерціальної навігації ракет, літаків, орбіт космічних літальних апаратів), для дослідження геодинамічних явищ, для реалізації цілей інженерної геології, археології, прогнозу землетрусів і т.д. Розвиток гравіметрії складається із таких основних етапів вимірювання – на нерухомій основі, на підводному човні, на надводному судні та на літаку. Для визначення характеристик гравітаційного поля Землі найзручніше використовувати авіаційні гравіметричні комплекси (АГК), чутливим елементом яких є гравіметр. За допомогою саме АГК можна здобути гравіметричну інформацію у важкодоступних районах земної кулі набагато швидше та з меншими витратами, ніж за допомогою інших гравіметричних засобів чи систем.

Останні дослідження у галузі АГК підтверджують, що точність вимірювань АГК значним чином залежить від точності визначення прискорення сили тяжіння гравіметром. 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 вищезгаданих гравіметрів, містять великі похибки вимірювань, спричинені впливом перехресних кутових швидкостей основи і кутової швидкості обертання Землі, змінами температури, атмосферного тиску, появи шумів різного походження та вібрацій у місці встановлення приладу та інші, що не лише зменшує точність вимірювання прискорення сили тяжіння, а й знижує надійність всього АГК.

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.

Тому запропоновано АГК, який має більші точність і швидкодію, ніж відомі на сьогоднішній день. Новий АГК що містить систему визначення поточних навігаційних параметрів, вимірювач поточної висоти і гравіметр, виходи яких підключені до бортової обчислювальної машини (БЦОМ), причому гравіметр встановлений на двовісній платформі, осі якої забезпечені спеціальними двигунами та лінійними акселерометрами. Чутливий елемент гравіметра розміщений у герметичному корпусі і виконаний у вигляді закріпленого на стрижні п'єзоелемента, на вільному кінці якого розміщено інерційну масу.

Принцип роботи гравіметра оснований на явищі прямого п'єзоефекту. Тобто, під дією прискорення сили тяжіння g_z на інерційну масу гравіметра виникає сила тяжіння G , внаслідок дії якої п'єзоелемент згинається (деформується) на деякий кут α :

$$G \equiv m \cdot g_z; \quad (1)$$

$$\alpha \equiv f(g_z), \quad (2)$$

де m – вага інерційної маси.

У результаті такого деформування на поверхні п'єзоелемента утворюється електричний заряд, який прямо пропорційний прискоренню сили тяжіння. У гравіметрі, зазвичай, вимірюється не заряд Q , а напруга U :

$$U \equiv \frac{Q(g_z)}{C_{\text{ПЕ}}}, \quad (3)$$

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

Рівняння руху АГК 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:

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

$$- 2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \ddot{h} - \gamma_0,$$
(4)

де f_z – вихідний сигнал гравіметра АГК; v – швидкість літального апарату (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.

З метою уникнення розбіжності між показами гравіметра та істинним значенням повного вектора прискорення сили тяжіння запропоновано створити систему стабілізації вимірювальної осі гравіметра. Тому гравіметр встановлено на двовісній платформі, яка має у своєму складі два лінійні акселерометри та виконавчі механізми у вигляді двигунів.

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

П'єзоелемент має схильність до розряджання, тому конструктивно реалізовано його силове компенсування, яке реалізується шляхом введення в схему прямого перетворення сигналу прискорення сили тяжіння у напругу від'ємного електромеханічного зворотного зв'язку, який оснований на явищі зворотного п'єзо ефекту.

Результати вимірювань прискорення сили тяжіння, отримані за допомогою будь-якого гравіметра, містять великі похибки вимірювань, які викликані перш за все тим, що гравіметр вимірює проекцію сукупності сигналів на вісь чутливості: корисного сигналу (прискорення сили тяжіння) та сигналу перешкоди, що визначається, здебільшого, вертикальним прискоренням (яке значно перевищує корисний сигнал). На сьогоднішній день найпоширенішим методом компенсації цих похибок є застосування процедури фільтрації вихідного сигналу гравіметра за допомогою фільтра низьких частот. Однак, даний метод не є оптимальним, оскільки фільтр має нестабільні характеристики у несприятливих умовах, якими, зазвичай, характеризується гравіметричне вимірювання на рухомій основі. Ці умови впливають на електричні компоненти фільтра низьких частот, що призводить до зміни його частоти зрізу. У результаті, фільтр починає пропускати завади на вихід гравіметра (при збільшенні частоти зрізу) або не пропускати частину корисного сигналу взагалі (при зменшенні частоти зрізу). Пропонується спосіб ліквідації вищезгаданих похибок шляхом розробки чутливого елемента нового АГК у вигляді п'єзопакета, частота власних коливань якого дорівнює найбільшій частоті гравітаційних прискорень, що може бути виміряна на фоні перешкод. Частота власних коливань п'єзопакета підібрана так, щоб забезпечити відокремлення корисного сигналу прискорення сили тяжіння від завад. Отже, частота власних коливань гравіметра дорівнює:

$$\omega_0 = \frac{K}{2\pi \sum_{i=1}^n d_i},$$
(5)

де ω_0 – власна частота гравіметра; K – коефіцієнт пропорційності для кварцу; d_i – товщина i -ї п'єзопластини; n – кількість пластин у п'єзопакеті.

Саме за допомогою низькочастотної фільтрації з частотою зрізу 0,1 рад/с, можна відокремлювати сигнал прискорення сили тяжіння (переважна частота 0,00175 рад/с) від вертикального прискорення (переважна частота 0,269 рад/с) з похибкою, меншою ніж 0,1 мГл. При цьому у вихідному сигналі гравіметра також усуваються інші компоненти збурень, переважна частота яких більша за 0,1 рад/с. До таких збурень належать поступальні віброприскорення та кутові віброприскорення.