



Безвесільна О. М.,
Ткачук А. Г.,
Хильченко Т. В.

РОЗРОБКА НОВОГО ДВОКАНАЛЬНОГО ГРАВІМЕТРА ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ ПРИСКОРЕННЯ СИЛИ ТЯЖІННЯ

Розглянуто новий двоканальний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи, точність і швидкодія (повністю автоматизований) якого вище відомих сьогодні гравіметрів. Описано принцип дії нового двоканального гравіметра, основні його переваги над відомими гравіметрами (відсутність у вихідному сигналі двоканального гравіметра сигналів похибок від впливу вертикального прискорення та від залишкової неідентичності конструкцій двох ємнісних елементів).

Ключові слова: двоканальний гравіметр, авіаційна гравіметрична система, прискорення сили тяжіння, чутливий елемент.

1. Вступ

Сьогодні надзвичайно актуальним є використання авіаційної гравіметричної системи (АГС) для розвідки корисних копалин (геологія, геофізика), для корекції інерціальних навігаційних систем (аерокосмічний комплекс), для локації рухомих об'єктів у екваторіях морів та океанів, для реалізації задач археології, прогнозу землетрусів та ін. Гравіметричні вимірювання проводяться на поверхні Землі, на підводних човнах, на надводних суднах і на літальних апаратах (ЛА). Вимірювання на ЛА дозволяють отримувати інформацію про прискорення земного тяжіння у важкодоступних районах земної кулі зі швидкістю значно більшою, ніж наземні.

Традиційна аероморська гравіметрія відрізняється дещо застарілими технологіями і недостатнім рівнем точності, при цьому для неї характерні низькі продуктивність, деталіність і оперативність, високі матеріальні витрати, в особливості визначаються вартістю експлуатації середнього класу суден і ЛА з екіпажем. У той же час, вирішення проблеми можливе за допомогою застосування бортового мініатюрного навігаційного комплексу [1] на основі мікроелектромеханічних систем та технологій (МЕМС), що поєднують у собі мікроелектронні і мікрOMEХАнічні компоненти.

2. Постановка завдання

Точність існуючих на сьогоднішній день гравіметрів недостатня, всього 2–10 мГал [1]. Більшість із них є неавтоматизованими. Обробка результатів вимірювань проводиться після льоту ЛА на Землі протягом місяців часу. До того ж ці гравіметри вимірюють разом із прискоренням сили тяжіння вертикальне прискорення ЛА \dot{h} , що є складною науково-технічною проблемою і вимагає застосування додаткових фільтрів.

Сьогодні одним із найперспективніших із відомих гравіметрів є ємнісний одноканальний гравіметр (ЄГ). Він є основним чутливим елементом розробленої автоматизованої АГС [2]. Параметри чутливого елемента ЄГ підібрані так, що частота його власних коливань дорівнює найбільшій частоті гравітаційних прискорень, яка

може бути виміряна на фоні завад. Іншими словами, чутливий елемент гравіметра виконує також функції фільтра низьких частот. Це ліквідує вплив на вихідні показання ЄГ похибок, частота яких більша за частоту власних коливань ЄГ, та підвищує точність вимірювання прискорення сили тяжіння. Однак, в одноканальному ЄГ не передбачено ліквідацію похибок, спричинених впливом вертикального прискорення та інструментальних похибок.

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єкт дослідження — новий двоканальний ємнісний МЕМС гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи.

Метою роботи є підвищення точності та швидкодії вимірювань прискорення сили тяжіння шляхом використання нового двоканального ємнісного МЕМС гравіметра автоматизованої авіаційної гравіметричної системи.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Провести аналіз існуючих сьогодні гравіметрів АГС.
2. Розглянути конструкції існуючих ємнісних гравіметрів АГС.
3. Описати принцип дії нового двоканального ємнісного гравіметра, вказати на основні його переваги над відомими гравіметрами.

4. Аналіз літературних даних

Проведені дослідження показали, що великий внесок у теорію і практику чутливих елементів АГС, датчиків кутової швидкості, систем стабілізації в СНД було зроблено рядом видатних учених: А. А. Одінцовим, Б. Б. Самокініним, А. В. Збруцьким, М. А. Павловським, В. В. Карачуном, В. В. Чіковані та ін. [1, 2].

У роботі [3] запропоновано використовувати для аналізу роботи гіростабілізованих платформ на основі гіроскопів АГС метод кватерніонів.

У роботі [4] проведено аналіз рівняння руху АГС, чутливим елементом якої є гіроскопічний гравіметр.

Узагальнено теорію і принципи побудови прецизійних гіроскопічних гравіметрів. Описано проведені експериментальні дослідження АГС з використанням гіроскопічного гравіметра з цифровою обробкою інформації.

У роботах [5, 6] запропоновано використовувати МЕМС-технології в проектуванні сучасних гравіметрів.

У публікаціях [7–9] описано роботу п'єзоелектричного гіроскопа і принцип стеження за резонансною частотою. Досліджено залежність зміни резонансної частоти від впливу температури зовнішнього середовища.

5. Ємнісний датчик прискорення

Ємнісний датчик прискорень складається, принаймні, з двох пластин: стаціонарної, з'єднаної з корпусом, і вільно переміщуваної усередині корпусу, до якого приєднана інерційна маса. Ці пластини формують конденсатор. Диференціальна структура дозволяє збільшити амплітуду і полішити лінійність сигналу, так як залежність ємності від переміщення є нелінійною [9]. Для підвищення чутливості гравіметра доцільно використовувати матеріал, що володіє високою часовою та температурною стабільністю.

Обкладки конденсатора являють собою електроди та мають невелику товщину. У них явище поверхневого ефекту може позначатися тільки при досить високих частотах, порядку 100 МГц. Матеріал, який використовується для виготовлення обкладок, повинен задовольняти наступні вимоги: мати низький електричний опір; температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР), близький до ТКЛР підкладки і діелектрика; гарну адгезію як до підкладки, так і до раніше сформованим плівкам; володіти низькою міграційною рухомістю атомів, високою корозійною стійкістю [8, 9]. Для обкладок не слід використовувати матеріали з високою рухливістю атомів, такі, як мідь або золото. Атоми цих металів, проникаючи в діелектрик, можуть утворювати провідні перемички між обкладками. Матеріал обкладки повинен мати гарну адгезію до матеріалу підкладки і до діелектрика. Найбільш повно цим вимогам задовольняє алюміній.

Між обкладками розміщений діелектрик, матеріал, у якому заряди не можуть пересуватися з однієї частини в іншу (зв'язані заряди). Діелектрик повинен володіти високою електричною міцністю і діелектричною проникністю, малими втратами і повинен утворювати тонкі півки без дефектів (наскрізної пористості і ділянок з підвищеною провідністю), мати гарну адгезію до металів обкладок, бути стійким до температурних впливів, мати мінімальну гіроскопічність. Від усіх цих властивостей діелектрика залежить надійність.

Використання матеріалів з високою діелектричною проникністю дозволяють істотно знизити фізичні розміри датчика. Діелектрична проникність визначається за формулою (1).

$$\varepsilon = \frac{C_x}{C_o}, \quad (1)$$

де ε — діелектрична проникність; C_x — ємність тестового конденсатора з певним діелектриком; C_o — ємність того ж конденсатора у вакуумі.

Для ємнісних датчиків характерне таке явище, як краєвий ефект, що призводить до значних похибок.

Тому для розрахунку ємності конденсатора необхідно використовувати формулу (2) [10].

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 a b}{d} \left(1 + \frac{d}{\pi b} + \frac{d}{\pi b} \ln 2\pi \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4} \frac{(b+a)}{a} \right) + \right. \\ \left. + \frac{d}{\pi a} + \frac{d}{\pi a} \ln 2\pi \left(\frac{a}{d} + \frac{3}{4} \frac{(a+b)}{b} \right) \right), \quad (2)$$

де ε_0 — діелектрична стала, d — зазор між обкладками, a, b — розміри обкладок.

Винахід, який описано в [1], дозволяє підвищити точність завдяки зменшенню дрейфу нуля, збільшенню діапазону лінійності, поліпшенню фільтрації інерціальної завади. У гравіметрі чутливий елемент для визначення прискорення виготовлено з кременію чи скла. Це забезпечує сенсору виключну надійність, високу точність та стійкість показань відносно часу та температури. Ємнісний гравіметр (ЄГ) вимірює прискорення як у додатному, так і у від'ємному напрямках. ЄГ може з високою точністю вимірювати статичні прискорення та вібрації. Основною частиною гравіметра є симетричний чутливий елемент (ЧЕ), виготовлений по технології об'ємної мікроелектроніки, який має два чутливих конденсатора. Цим зменшується залежність від температури та чутливість до перехресних прискорень і збільшується лінійність. Збільшення потужності вихідного сигналу ЄГ забезпечується шляхом з'єднання односторонньо заряджених пластин.

6. Двоканальний ємнісний гравіметр

Запропоновано автоматизовану АГС (рис. 1), яка складається із двоканального ємнісного гравіметра 1, системи 2 визначення поточних навігаційних параметрів і вимірювача 3 поточної висоти, виходи яких підключені до входів БЦОМ 4, причому гравіметр 1 встановлений на горизонтальній стабілізованій платформі (ГСП).

Гравіметр виконано з двома каналами, у кожному із яких встановлено по одному ємнісному елементу ЄГ1 та ЄГ2. Ємнісні елементи ЄГ1 та ЄГ2 обох каналів є ідентичними і виконані у вигляді двох металевих (рухомої і нерухомої) пластин та однакових мас $m_1 = m_2$, кожна з яких прикріплена до низу та верху рухомих пластин ЄГ1 та ЄГ2 відповідно. Пластини двох ємнісних елементів кріпляться до корпусу пружними елементами.

Виходи ємнісних елементів ЄГ1 та ЄГ2 обох каналів з'єднані з виходами суматора, вихід якого з'єднаний із входом модуля (М) перетворення аналогового сигналу у цифровий. Вихід модуля з'єднаний із входом підсилювача (П), вихід якого з'єднано із виходом БЦОМ, у якій розраховується вихідний сигнал гравітаційної аномалії згідно із заданим алгоритмом [1, 10, 11].

Двоканальний ємнісний гравіметр працює наступним чином. На ємнісні елементи обох каналів діє прискорення сили тяжіння g_z , вертикальне прискорення \dot{h} літака та інструментальні похибки Δi від впливу залишкової неідентичності конструкцій однакових пластин та мас, від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища. Якщо спроектувати всі ці впливи на вимірвальну вісь Oz ДЄГ та врахувати те, що ємність ЄГ1 одного каналу збільшується у той час,

коли ємність ЄГ2 на таку ж величину зменшується, то отримуємо (3).

$$u_1 = k(mg_z + m\ddot{h} + \Delta i); \quad u_2 = k(mg_z - m\ddot{h} - \Delta i), \quad (3)$$

де u_1 — вихідний електричний сигнал ємнісного елемента ЄГ1 одного каналу; u_2 — вихідний електричний сигнал ємнісного елемента ЄГ2 другого каналу; m — вага інерційної маси у кожному каналі; k — електрична стала.

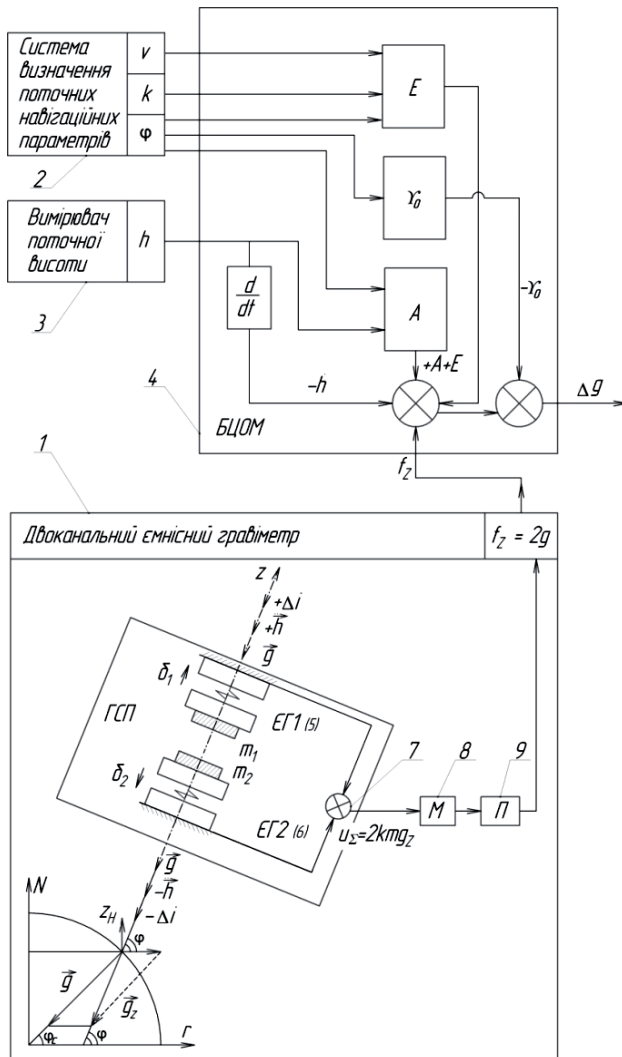


Рис. 1. АГС з двокавальним ємнісним гравіметром

Вихідні електричні сигнали u_1 та u_2 ємнісних елементів обох каналів сумуються у суматорі (4).

$$u_{\Sigma} = u_1 + u_2 = 2kmg, \quad (4)$$

де u_{Σ} — вихідний сигнал суматора.

Вихідний сигнал u_{Σ} суматора 7 перетворюється з аналогової у цифрову форму в модулі 8 та підсилюється за допомогою підсилювача 9. У кінцевому результаті отримуємо вихідний сигнал f_z ДЄГ, який містить подвоєний сигнал прискорення сили тяжіння. У ньому повністю відсутні такі похибки вимірювань, які спричинені впли-

вом вертикального прискорення \ddot{h} та інструментальних похибок Δi .

7. Обговорення результатів дослідження нового двоканального гравіметра для вимірювань прискорення сили тяжіння

Запропоновані ДЄГ та АГС, чутливим елементом якої є ДЄГ, мають такі основні переваги:

- за рахунок використання методу двоканальності повністю ліквідуються у вихідному сигналі системи похибки вимірювань, які спричинені впливом вертикального прискорення та інструментальні похибки;
- похибки від впливу горизонтальних прискорень частково гасяться за рахунок використання ГСП;
- при встановленні власної частоти ДЄГ величиною в 0,1 рад/с будуть відфільтровуватись залишкові високочастотні похибки.

Таким чином, точність АГС з ДЄГ перевищує всі відомі аналоги та дозволяє вимірювати прискорення сили тяжіння та його аномалії із точністю в 1 мГал.

8. Висновки

В результаті проведених досліджень:

1. Проведено аналіз існуючих сьогодні гравіметрів АГС та встановлено, що їх точність 2–10 мГал. Більшість із них є неавтоматизованими. До того ж ці гравіметри вимірюють разом із прискоренням сили тяжіння вертикальне прискорення літака, що є складною науково-технічною проблемою і вимагає застосування додаткових фільтрів.
2. Розглянуто види існуючих ємнісних гравіметрів АГС та проаналізовано недоліки одноканальності їх конструкції.
3. Запропоновано новий двоканальний ємнісний гравіметр автоматизованої АГС, який має більшу точність (1 мГал) та швидкодію (повністю автоматизований), ніж відомі сьогодні. Описано принцип дії нового двоканального ємнісного гравіметра. Завдяки використанню додатково введеного другого каналу забезпечується відсутність у вихідному сигналі гравіметра сигналів похибок від впливу вертикального прискорення, від залишкової неідентичності конструкції двох ємнісних елементів, які можуть бути значними. Вирішено проблему фільтрації вихідного сигналу ДЄГ від високочастотних завад за рахунок встановлення частоти його власних коливань 0,1 рад/с, що дозволяє уникнути необхідності використання додаткових фільтрів низьких частот у складі АГС.

Література

1. Безвесільна, О. М. П'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи [Текст]: монографія / О. М. Безвесільна, А. Г. Ткачук. — Житомир: ЖДТУ, 2013. — 240 с.
2. Безвесільна, О. М. Сучасні гравіметри авіаційної гравіметричної системи [Текст] / О. М. Безвесільна, А. Г. Ткачук, Л. О. Чепок, М. А. Войницький // Геофизический журнал. — 2015. — № 2, Т. 37 — С. 86–94.
3. Tadano, S. Three Dimensional Gait Analysis Using Wearable Acceleration and Gyro Sensors Based on Quaternion Calculations [Text] / S. Tadano, R. Takeda, H. Miyagawa // Sensors. — 2013. — Vol. 13, № 7. — P. 9321–9343. doi:10.3390/s130709321
4. Bezvesilnaya, E. N. Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter [Text] / E. N. Bezvesilnaya, A. H. Tkachuk // Aviation. — 2014. — Vol. 18, № 3. — P. 134–140. doi:10.3846/16487788.2014.969878

5. Xia, D. The Development of Micromachined Gyroscope Structure and Circuitry Technology [Text] / D. Xia, C. Yu, L. Kong // Sensors. — 2014. — Vol. 14, № 1. — P. 1394–1473. doi:10.3390/s140101394
6. Singh, A. K. Piezoelectric Gyro Sensor Technology [Text] / A. K. Singh // Defence Science Journal. — 2007. — Vol. 57, № 1. — P. 95–103. doi:10.14429/dsj.57.1735
7. Shiratori, N. Temperature Characteristic Compensation of a Miniature Bi-Axial Gyro-Sensor Using a Disk-Type Resonator [Text] / N. Shiratori, M. Hatakeyama, S. Okada // Japanese Journal of Applied Physics. — 1999. — Vol. 38, Part 1, No. 9B. — P. 5586–5591. doi:10.1143/jjap.38.5586
8. Bezvesil'naya, E. N. Automatic compensation for the errors of a gyroscopic linear integrating accelerometer [Text] / E. N. Bezvesil'naya // International Applied Mechanics. — 1995. — Vol. 31, № 4. — P. 317–322. doi:10.1007/bf00846782
9. Korobiichuk, I. Aviation gravimetric system [Text] / I. Korobiichuk, O. Bezvesilna, A. Tkachuk, M. Nowicki, R. Szewczyk, V. Shadura // International Journal of Scientific & Engineering Research. — 2015. — Vol. 6, № 7. — P. 1122–1126. doi:10.14299/ijser.2015.07
10. Ткачев, Л. И. Системы инерциальной ориентировки [Текст]. Ч. 1. Основные положения теории / Л. И. Ткачев. — М.: МЭИ, 1993. — 213 с.
11. Wilmoth, E. D. An Investigation of Methods for Determining Gravity Anomalies from an Aircraft [Text]: Sc. D. Thesis / E. D. Wilmoth. — Mass. Inst. of Tech., 1989. — 76 p.

РАЗРАБОТКА НОВОГО ДВУХКАНАЛЬНОГО ГРАВИМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Рассмотрен новый двухканальный гравиметр автоматизированной авиационной гравиметрической системы, точность и быстродействие (полностью автоматизированный) которого выше известных сегодня гравиметров. Описаны принцип действия нового двухканального гравиметра, основные его преимущества над известными гравиметрами (отсутствие в выходном сигнале двухканального гравиметра сигналов ошибок

от влияния вертикального ускорения и остаточной неидентичности конструкций двух емкостных элементов).

Ключевые слова: двухканальный гравиметр, авиационная гравиметрическая система, ускорение силы тяжести, чувствительный элемент.

Безвесільна Олена Миколаївна, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, кафедра приборобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет», Україна.

Ткачук Андрій Геннадійович, кандидат технічних наук, докторант, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп'ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, Україна, e-mail: andrew_tkachuk@i.ua.

Хильченко Тетяна Валентинівна, аспірант, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп'ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, Україна.

Безвесильная Елена Николаевна, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, кафедра приборостроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Ткачук Андрей Геннадьевич, кандидат технических наук, докторант, кафедра автоматизированного управления технологическими процессами и компьютерных технологий, Житомирский государственный технологический университет, Украина.

Хильченко Татьяна Валентиновна, аспирант, кафедра автоматизированного управления технологическими процессами и компьютерных технологий, Житомирский государственный технологический университет, Украина.

Bezvesilna Olena, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Tkachuk Andriy, Zhytomyr State Technological University, Ukraine, e-mail: andrew_tkachuk@i.ua.

Khylichenko Tetiana, Zhytomyr State Technological University, Ukraine

УДК 621.01:531

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.58904

Дяченко П. В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Проанализированы существующие методики инструментальной идентификации собственных частот колебаний механических систем. На основе проведенного анализа, разработана схема экспериментальной установки для получения, исследования и обработки спектра частот собственных колебаний механической системы во временной и частотной областях. Проведен сравнительный анализ полученных спектров с расчетными, чем подтверждена адекватность разработанной ранее математической модели динамики механической системы.

Ключевые слова: математическая модель, вибрационный спектр, частотная область, колебательная система, зубчатая передача.

1. Введение

Физический эксперимент и экспериментальное исследование динамических характеристик механических колебательных систем, являются непосредственным способом подтверждения достоверности и эффективности разработанных математических моделей, описывающих их динамику. Оценку работоспособности программного обеспечения моделирующей среды также можно осу-

ществить благодаря возможности получения экспериментальных данных и сравнительного анализа теоретических расчетов с результатами экспериментальных исследований.

В большинстве механизмов машин и приборов, в приводах следящих систем, зубчатые передачи являются одним из основных источников возникновения вибраций. Возрастание рабочих скоростей, динамической нагруженности современных механизмов с зубчатыми передачами