



УДК 531.383

**FILTERING OF THE OUTPUT SIGNAL OF THE TWO-CHANNEL
TRANSFORMER GRAVIMETER****ФІЛЬТРАЦІЯ ВИХІДНОГО СИГНАЛУ ДВОКАНАЛЬНОГО
ТРАНСФОРМАТОРНОГО ГРАВІМЕТРА****Bezvesilna O.M. / Безвесільна О.М.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0002-6951-1242

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Peremogy Avenue, 37, 03056**Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського", Київ, проспект Перемоги, 37, 03056***Kyrychuk Y.V. / Киричук Ю.В.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0001-8638-6060

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Peremogy Avenue, 37, 03056**Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського", Київ, проспект Перемоги, 37, 03056***Hrynevych M.S. / Гриневиц М.С.***assistant / асистент*

ORCID: 0000-0001-9183-5211

*State University "Zhytomyr Polytechnic", Zhytomyr, Chudnivska street, 103, 10005
Державний університет «Житомирська політехніка»,
м. Житомир, Чуднівська, 103, 10005***Tolochko T.O. / Толочко Т.О.***senior lecturer / старший викладач*

ORCID: 0000-0002-2346-0419

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Peremogy Avenue, 37, 03056**Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського", Київ, проспект Перемоги, 37, 03056*

Анотація. Стаття присвячена дослідженням фільтрації вихідного сигналу авіаційної гравіметричної системи із двоканальним трансформаторним гравіметром. Розроблено методику фільтрації, що дозволяє відокремлювати сигнал аномалії прискорення сили тяжіння двоканального трансформаторного гравіметра від найбільшої перешкоди сигналу вертикального прискорення літального апарату з метою підвищення точності гравіметра у складі авіаційної гравіметричної системи шляхом вибору власної частоти коливань двоканального трансформаторного гравіметра $0,1 \text{ c}^{-1}$ у точці перетину графіків спектральних щільностей корисного сигналу гравітаційної аномалії та основної завади вертикального прискорення.

Ключові слова: двоканальний трансформаторний гравіметр, авіаційна гравіметрична система, гравітаційна аномалія, вертикальне прискорення.

Вступ.

Авіаційна гравіметрична система (АГС) дозволяє здобути гравіметричну інформацію у важкодоступних районах земної кулі набагато швидше та з меншими витратами, ніж за допомогою наземних або морських гравіметричних засобів. Результат вимірювань, отриманий за допомогою авіаційної



гравіметричної системи містить як корисний сигнал аномалії прискорення сили тяжіння (ПСТ), так і сигнал вертикального прискорення – найбільшої перешкоди, що значно впливає на точність вимірювання АГС.

Результат вимірювань, отриманий за допомогою відомих гравіметрів [1-8], містить на порядок більші похибки вимірювань. Інерціальне абсолютне прискорення зумовлене, в основному, вертикальним прискоренням літального апарату (ЛА), на якому встановлено гравіметр. Величина завади може бути значно більшою, ніж величина корисної складової результатів вимірювань. Поступальні і кутові вібрації ЛА також можуть призвести до істотних похибок результатів вимірювань. Фільтрація похибок від вказаних збурень відбувалась в АГС з відомими гравіметрами на Землі протягом місяців часу. Використовувались додаткові фільтри, що зменшувало надійність АГС з відомими гравіметрами.

Таким чином, суттєвим недоліком АГС з відомими гравіметрами є недостатня точність вимірювань.

Аналіз літературних джерел. У роботі [4] Безвесільної О.М. досліджено можливість і доцільність використання, як гравіметра АГС, гіроскопічного вимірювача прискорень. Похибка вимірювання D_g АГС на базі гірогравіметра була [4] 8 мГал. У роботах Безвесільної О.М. і Литвиненка П.Л. обґрунтовано доцільність використання як гравіметра АГС однокільцевого динамічно настроюваного гіроскопа (ДНГ), похибка вимірювання D_g АГС була 5 мГал. Точність АГС з п'езогравіметром [9], струнним [10], та ємнісним [11], гравіметрами також недостатня для сучасних авіаційних гравіметричних вимірювань: 2- 3 мГал. Вказані відомі гравіметри АГС мають свої переваги та недоліки [9-11]. Гіроскопічні гравіметри – дуже коштовні та недостатньо чутливі, п'езогравіметри – занадто інерційні, струнні – схильні до резонансів, ємнісні – мають нестабільні характеристики. Фільтрація похибок від дії збурень цих гравіметрів недосконала.

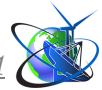
Сьогодні одним із найбільш перспективних вважається двоканальний трансформаторний гравіметр [12], який має наступні переваги перед відомими гравіметрами: потужний вихідний сигнал, лінійну вихідну характеристику та ін. Однак, залишкові похибки від впливу вертикального прискорення \dot{h} ЛА (у 10^3 раз перевищують корисний сигнал) будуть мати місце.

Мета статті – збільшити точність вимірювано ДТГ АГС шляхом вирішення задачі фільтрації шляхом компенсації впливу вертикального прискорення.

Матеріал і результати дослідження.

На рисунку 1 представлено конструкцію двоканального трансформаторного гравіметра. Викладемо принцип його роботи.

Чутливий елемент ДТГ складається із магнітопроводу 1, рухомого якоря 2, первинної обмотки 3 збудження та вторинної вихідної обмотки 4, яка має дві однакові секції. Рухомий якорь 2 з'єднано з двигуном 5, який щосекунди послідовно опускає якорь 2 вниз та вгору по магнітопроводу 1. Двигуном 5 керує пристрій перемикачання 6, який підключено до джерела 7 напруги управління. Вихідний сигнал з вторинної вихідної обмотки 4 подається на вхід пристрою 8 обчислення вихідного сигналу.



Принцип роботи ДТГ полягає у зміні електромагнітного потоку збудження Φ_1 в обмотці збудження W_1 та відповідно двох ЕРС E_2 та $-E'_2$ у двох секціях обмотки W_2 під дією прискорення сили тяжіння g_z . Під дією сили тяжіння якір 2 рухається в середині магнітопроводу 1 вниз і викликає зміну електромагнітного потоку Φ_1 та відповідно E_2 та $-E'_2$. У точці електромагнітної симетрії ДТГ отримуємо $E_2 = |-E'_2|$ і вихідний сигнал $U_2 = 0$.

При зміщенні якоря 2 відносно точки симетрії вниз (рисунок 1) або вгору (рисунок 1, обведено пунктиром) $E_2 \neq |-E'_2|$, вихідний сигнал гравіметра буде пропорційний:

$$U_2 \equiv |E_2 - E'_2| \equiv mg_z \tag{1}$$

У ДТГ пристрій-перемикач (ПП) 6, який живиться від джерела напруги управління 7, через рівні інтервали часу в 1 с перемикає подачу вертикального руху якоря 2 вниз (рисунок 1) та вгору (рисунок 1, обведено пунктиром) через двигун 5.

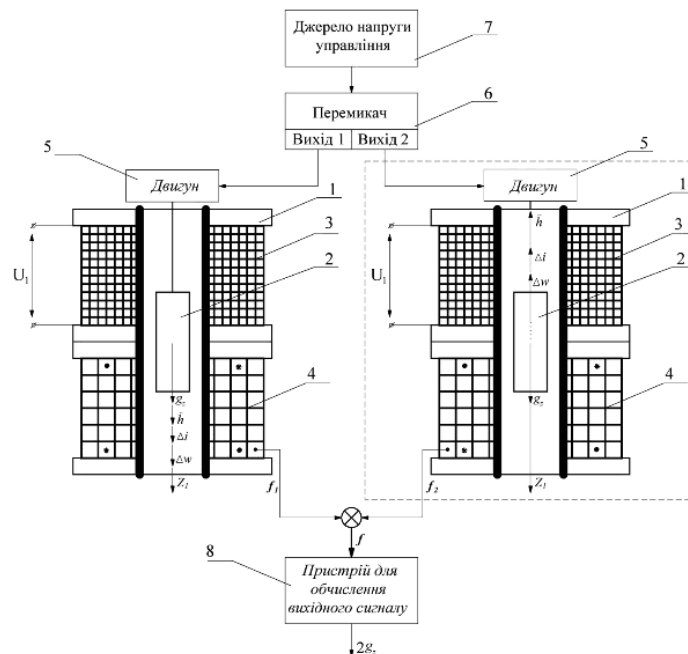


Рисунок 1 - Трансформаторний гравіметр:

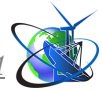
1 – магнітопровід, 2 – рухомий якір, 3 – обмотка збудження W_1 , 4 – вторинна обмотка W_2 , 5 – двигун, 6 – перемикаючий пристрій, 7 – джерело напруги управління, 8 – пристрій обчислення вихідного сигналу [12]

При подачі від ПП 6 імпульсу руху вниз якорю 2, вихідний сигнал f_1 чутливого елемента подається у пристрій обчислення вихідного сигналу 8. Через 1с подається імпульс руху вгору якорю 2 і до пристрою обчислення вихідного сигналу 8 надходить сигнал f_2 .

У пристрої обчислення вихідного сигналу 7 формується кінцевий вихідний сигнал:

$$f = f_1 + f_2 = g_z + \ddot{h} + g_z - \ddot{h} = 2g_z, \tag{2}$$

де $f_1 = g_z + \ddot{h}$ – вихідний сигнал ДТГ при русі якоря 2 вниз; $f_2 = g_z - \ddot{h}$ – вихідний сигнал при русі якоря 2 вгору; \ddot{h} – вертикальне прискорення літака.



Тобто, у пристрої 8 обчислення вихідного сигналу ДТГ формується вихідний сигнал, який рівний подвоєному значенню $2g_z$.

Вплив зовнішніх електромагнітних потоків перешкоди, яких є значним на ЛА, у ДТГ також скасовується завдяки зустрічному з'єднанню вторинних обмоток.

У вихідному сигналі ДТГ відсутні такі похибки вимірювань, які спричинені впливом вертикального прискорення \ddot{h} . Однак, можуть бути присутніми залишкові похибки від впливу вертикального прискорення із-за несиметрії конструкції ДТГ та інших факторів.

Подвоєний сигнал ДТГ $2g_z$ входить до складу вихідного сигналу АГС.

Оскільки у ДТГ виконується безпосереднє вимірювання прискорення сили тяжіння g_z або його аномалії Δg_z , то з'являється можливість виконати фільтрацію вимірювального сигналу.

На рисунку 2 побудовано графік спектральної щільності корисного сигналу прискорення сили тяжіння g_z або його аномалії $G_{\Delta g_z}(\omega)$ – крива 1. Також побудовано графік спектральної щільності сигналу основної перешкоди вертикального прискорення $G_{\ddot{h}}(\omega)$ – крива 2. Переважна частота першого сигналу дорівнює 0,00175 рад/с, переважна частота другого сигналу – 0,269 рад/с. Графіки частотних спектрів 1 і 2 пересікаються у точці $\omega=0,1$ с⁻¹.

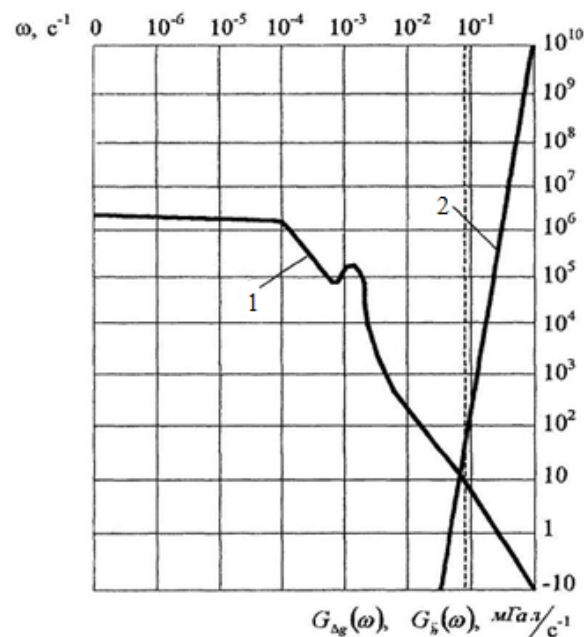
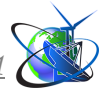


Рисунок 2 - Графіки спектральних щільностей корисного сигналу $2g_z$ (1) і вертикального прискорення ЛА (2) \ddot{h} [4]

Основна частина потужності корисної складової вимірювального сигналу зосереджена на частотах, менших 0,1 рад/с (крива 1, рисунок 2). Основна частина потужності похибок вимірювального сигналу від впливу вертикального прискорення зосереджена на частотах, більших за 0,1 рад/с (крива 2, рисунок 2). Якщо вибрати частоту власних коливань ДТГ $\omega_0 = 0,1$ рад/с, то сам ДТГ буде фільтрувати сигнал похибки вертикального



прискорення (ДТГ буде виступати, як фільтр низьких частот). Введення додаткового фільтра не потрібне. Це збільшує надійність АГС з ДТГ, що є ще одною перевагою ДТГ порівняно з іншими відомими типами гравіметрів АГС.

Висновки.

Було запропоновано метод фільтрації вихідного сигналу двоканального трансформаторного гравіметра авіаційної гравіметричної системи шляхом вибору частоти власних коливань ДТГ $0,1\text{с}^{-1}$ у точці перетину спектральних щільностей прискорення сили тяжіння (або його аномалії) та основного збурення - вертикального прискорення (без фільтрації у 10^3 раз перевищує корисний сигнал), завдяки якому у вихідному сигналі ДТГ усувається вплив вертикального прискорення.

Література:

1. Пельпор Д.С., Матвеев В.С., Арсентьев В.Д. Динамически настраиваемые гироскопы: Теория и конструкция. – М. Машиностроение, 1998. – 264 с.
2. Лозинская А.М., Фомина З.И., Яшаев ИЛ. Аэрогравиметрическая аппаратура на базе струнных датчиков // Прикладная геофизика. – М.: Недра, 1973. – С. 175-186.
3. Багрянец В.О. и др. Аэрогравиметрические измерения с борта самолета//Разведочная геофизика. – М.: Недра, 1986. –Вып. 105. – С. 105-109.
4. Безвесільна О.М. Вимірювання прискорень. Підручник. – Київ: Либідь, 2001. – 264 с.
5. Лозинская А.М. Измерение силы тяжести на борту самолета. – М.: ВИЭМС, 1978. – 70 с.
6. Попов Е.И. Определение силы тяжести на подвижном основании. – М.: Наука, 1987. – 218 с.
7. Одинцов А.А. Динамически настраиваемые гироскопы. – К.: НМК ВО, 1992. – 68 с.
8. Павловский М.А. Теория гироскопов. – К.: Вища школа, 1986. – 303 с.
9. Безвесільна О.М., Ткачук А.Г. П'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи: Монографія – Житомир: ЖДТУ, 2013. – 240 с.
10. Безвесільна О.М., Чепюк Л.О. Струнный гравіметр. – Житомир: ЖДТУ, 2015. – 217 с.
11. Безвесільна О.М., Хильченко Т.В. Двуканальний МЕМС гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи: Монографія. – Київ: ДП НВЦ «Пріоритети», 2017. – 181 с.
12. Ткачук А.Г., Безвесільна О.М. Трансформаторний гравіметр. Патент на корисну модель №142824 від 25.06.20. Бюл.№12 по заявці № u 2020 00884. Дата подання заявки 12.02.2020.G01V 7/00 <http://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/7690/142824.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Abstract. The article is devoted to the research of filtering the output signal of the aviation gravimetric system with a two-channel transformer gravimeter. A filtering technique has been developed that allows to separate the gravity acceleration anomaly signal of the two-channel transformer gravimeter from the largest obstacle of the vertical acceleration signal of the aircraft



in order to increase the accuracy of the gravimeter as part of the aviation gravimetric system by choosing the natural frequency of oscillations of the two-channel transformer gravimeter 0.1 s^{-1} at the intersection point graphs of the spectral densities of the useful signal of the gravitational anomaly and the main disturbance of the vertical acceleration.

Key words: two-channel transformer gravimeter, aviation gravimetric system, gravity anomaly, vertical acceleration.

Науковий керівник: д.т.н., проф. Безвесільна О.М.

Стаття відправлена: 23.02.2023 г.

© Безвесільна О.М., Киричук Ю.В., Гриневич М.С., Толочко Т.О.