

УДК 621.317

Безвесільна О.М.*, д.т.н. Ткачук А.Г.**

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

**Житомирський державний технологічний університет

ДІАГНОСТИКА П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ГРАВІМЕТРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ АВІАЦІЙНОЇ ГРАВІМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ШЛЯХОМ ПОБУДОВИ ЙОГО ГРАДУЮВАЛЬНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ

У статті розглянуто новий п'єзоелектричний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи (АГС), який має більшу точність (1 мГал) та швидкодію (повністю автоматизований), ніж відомі на сьогоднішній день. Принцип дії п'єзоелектричного гравіметра оснований на фізичному явищі прямого п'єзоефекту, а саме, перетворення механічного напруження, яке створюється прискоренням сили тяжіння, у вихідну напругу. Виведено рівняння руху п'єзоелектричного гравіметра та охарактеризовано кожен його складову. Встановлено, що шляхом підбору конструктивних параметрів чутливого елемента п'єзоелектричного гравіметра можна встановити його власну частоту 0.1 рад/с і уникнути необхідності використовувати фільтр низьких частот у складі автоматизованої АГС. Розраховано аналітично градуювальну характеристику п'єзоелектричного гравіметра автоматизованої АГС та порівняно її із градуювальною характеристикою отриманою експериментально за допомогою розробленого лабораторного макету. Встановлено, що точність нового п'єзоелектричного гравіметра складає 1 мГал, а кут повороту його вимірювальної осі відносно довідкової вертикалі впливає прямо пропорційно на його вихідні покази та величину його похибки.

П'єзоелектричний гравіметр, градуювальна характеристика, автоматизована авіаційна гравіметрична система.

Постановка проблеми. Вивченню та дослідженню коливальних процесів приділяється велика увага при розробці та експлуатації різноманітних технічних і технологічних пристроїв, в енергетиці, металургії, машинобудуванні, авіаційній та ракетно-космічній техніці, суднобудуванні, геології, медицині. В останні роки широке поширення набувають вимірювально-інформаційні системи віброконтролю, моніторингу, діагностики та автоматичного керування складними технічними системами і технологічними процесами, що дають не тільки великий техніко-економічний ефект, а й сприяють запобіганню аварій та можливих екологічних катастроф.

Початковою ланкою таких систем є датчики параметрів вібраційних та ударних коливань, які здійснюють перетворення вимірюваної механічної величини в електричний сигнал, що надходить на реєструючий пристрій.

Зосередимо детальніше увагу на датчиках параметрів вібраційних коливань в авіаційних гравіметричних системах (АГС) для дослідження параметрів гравітаційного поля Землі (зокрема, її гравітаційних аномалій Δg). В АГС такі датчики називаються гравіметрами і вимірюють вони прискорення сили тяжіння.

Відомі на сьогоднішній день наступні гравіметри АГС: ГАЛ-С, ГС, PIGA-16, 25, "Чекан-АМ", "ГИ 1/1", "LaCoste & Ромберга (LRS)". Реально досяжна точність авіаційних гравіметричних вимірювань із використанням перерахованих гравіметрів – (3 ... 10) мГал [1,2]. Сьогодні така точність авіаційних гравіметрів недостатня. До того ж, перераховані гравіметри також вимірюють разом із прискоренням сили тяжіння вертикальне прискорення літака, що потребує застосування додаткових фільтрів у складі АГС.

Тому авторами розроблено новий п'єзоелектричний гравіметр (ПГ) автоматизованої авіаційної гравіметричної системи [3,4] для підвищення точності вимірювання прискорення сили тяжіння.

На даний момент існує численна література в області методів та засобів вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння, яка містить як принцип дії, так і технічні характеристики сучасних вимірювальних приладів. Однак, інформація про п'єзоелектричні гравіметри відсутня.

Аналіз наукових досліджень. Проведені дослідження показали, що великий внесок у теорію та практику гравіметричних вимірювань в СНД було зроблено низкою видатних вчених: В.О. Багрянцем, А.М. Лозинською, В.В. Фединським, Н.П. Грушинським, Є.І. Поповим та іншими. Не менш велику роль відіграли й іноземні вчені: А. Граф, В.Т. Орте, М. Гольвані, Д. Гаррісон. В Україні широковідомі, досліджені під керівництвом заслуженого діяча науки і техніки України, д.т.н., професора Безвесільної О.М., різні типи гіроскопічних гравіметрів.

Розвиток теорії п'єзоелектричних перетворювачів пов'язано з іменами та науковими роботами А.А. Андрєєва, А.Є. Колесникова, Н.А. Шульги, В.В. Лаврінєнко, С.І. Пугачьова, В.В. Малова, П.О. Грибовського, В.М. Шарапова та інших.

Метою статті є відображення результатів проведеної метрологічної операції градування п'єзоелектричного гравіметра авіаційної гравіметричної системи.

Викладення основного матеріалу роботи.

Чутливий елемент (ЧЕ) ПГ АГС складається із п'єзоелектричного елемента 1, що працює на основі деформації стиснення-розтягування, із ізоляторів 2 на торцях та інерційної маси 3. З метою підвищення надійності та міцності конструкції, ЧЕ пружно піджятий до основи гвинтом 6. Гравіметр за допомогою кабелю 7 з'єднаний із операційним підсилювачем (рис. 1). П'єзоелемент являє собою багатшарову конструкцію (п'єзопакет), що складається із шарів кристалічного ніобату літію з антипаралельною поляризацією і електродами, розділеними з'єднувальними шарами. Це можуть бути зварювальні шви, клейові шари або інші контактні з'єднання. Шари п'єзоелектричного елемента з'єднані електрично паралельно.

Принцип дії гравіметра оснований на фізичному явищі прямого п'єзоєфекту [5].

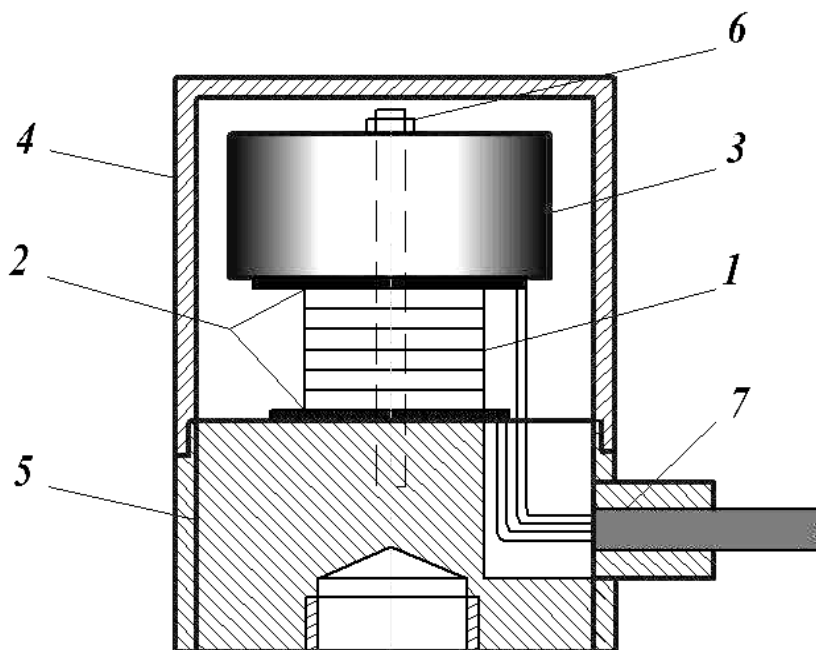


Рис. 1. Конструкція ПГ АГС: 1 – п'єзоелемент; 2 – ізолятори; 3 – інерційна маса; 4 – кришка, 5 – основа; 6 – гвинт; 7 – кабель

Розглянемо коливальну систему ПГ, яку можна представити у вигляді принципової динамічної схеми на рис. 2. Дана схема включає у себе наступні елементи: інерційну масу m , елемент жорсткості k і демпфуючий елемент n . У якості демпфуючого елемента виступає повітря, яке створює опір руху інерційної маси. Елемент жорсткості характеризується пружними властивостями п'єзоелемента.

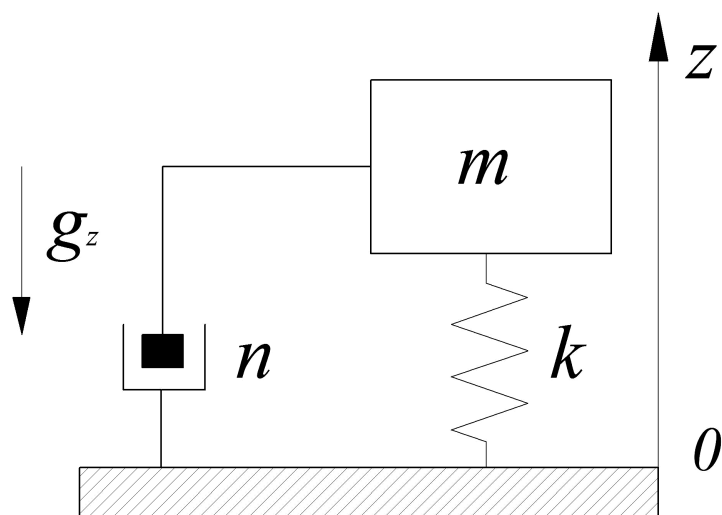


Рис. 2. Коливальна система ПГ автоматизованої АГС

У відповідності до рис. 2, рівняння руху ПГ буде мати вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + n \frac{dx}{dt} + kx = -mg_z, \quad (1)$$

де x – зміщення інерційної маси ПГ по вимірювальній осі Oz відносно нульового положення; g_z – прискорення сили тяжіння; $G = -mg_z$ – сила, яка діє на інерційну масу згідно із 2-м законом Ньютона; $F_{np} = kx$ – сила пружності п'єзоелемента; $F_{co} = n \frac{dx}{dt}$ – сила опору руху інерційної маси [6].

Результати вимірювань прискорення сили тяжіння, отримані за допомогою існуючих авіаційних гравіметрів, як було зазначено раніше, містять великі похибки вимірювань, які викликані, перш за все, тим, що гравіметр вимірює проекцію сукупності сигналів на вісь чутливості: корисного сигналу прискорення сили тяжіння (переважна частота 0.00175 рад/с) та сигналу перешкоди, що визначається, здебільшого, вертикальним прискоренням (переважна частота 0.269 рад/с). На сьогоднішній день найпоширенішим методом компенсації цих похибок є застосування процедури фільтрації вихідного сигналу гравіметра за допомогою фільтра низьких частот [3]. Однак, даний метод не є оптимальним, оскільки фільтр має нестабільні характеристики у несприятливих умовах, якими, зазвичай, характеризується гравіметричні 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).

У запропонованому авіаційному гравіметрі із низькочастотним вихідним сигналом за рахунок вибору геометричних параметрів і матеріалу п'єзоелемента можна регулювати його частоту власних коливань ω_0 [3,4]:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{s_n E_n}{h_n m}}, \quad (2)$$

де m – вага інерційної маси; s_n , E_n та h_n – площа, модуль пружності матеріалу та висота п'єзоелемента відповідно.

Підбором конструктивних параметрів ЧЕ (s_n , h_n , m) можна встановити власну частоту гравіметра 0.1 рад/с і уникнути необхідності використовувати фільтр низьких частот.

Саме за допомогою низькочастотної фільтрації з частотою зрізу 0.1 рад/с, можна відокремлювати сигнал прискорення сили тяжіння від вертикального прискорення із похибкою, меншою ніж 1 мГал. 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.

Отримаємо градувальну характеристику ПГ.

Градуювання – це метрологічна операція, за допомогою якої засіб вимірювань (міра або вимірювальний прилад) забезпечується шкалою або градуовальною таблицею (кривою) [6]. Для цього використаємо установку (рис. 3), яка складається із оптичної ділильної головки 1, ПГ 2, встановленого на кронштейні 3, блоку підсилення 4, модуля введення-виведення 5 та ЕОМ 6.

Градуювання ПГ відбувається при нахиленні його вимірювальної осі OZ за допомогою оптичної ділильної головки на деякий кут α_z (рис. 4). Градування ПГ реалізується за допомогою поворотної ручки 7 оптичної ділильної головки 1. При цьому повертається вал 8, кронштейн 3, а також закріплений на кронштейні ПГ 2. Кут повороту α_z керується по відліковій шкалі 9. Вихідний сигнал ПГ 2 відображається на ЕОМ 6.

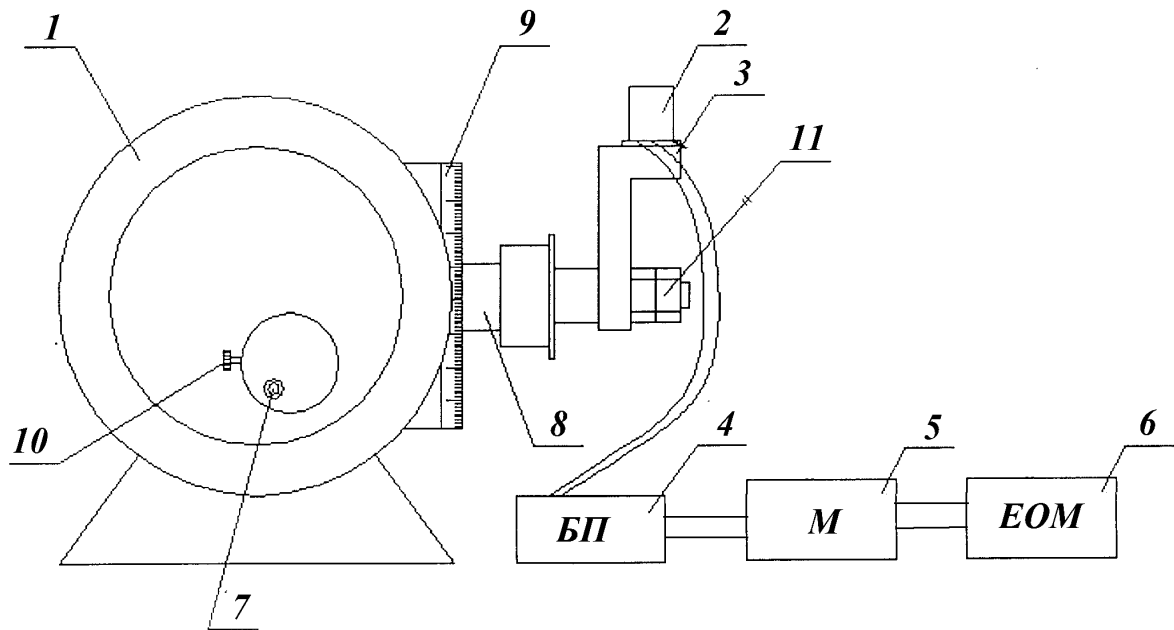


Рис. 3. Експериментальна установка для градування ПГ: 1 – оптична ділильна головка; 2 – ПГ; 3 – кронштейн; 4 – блок підсилення; 5 – модуль введення-виведення; 6 – ЕОМ; 7,10 – поворотні ручки; 8 – вал; 9 – відлікова шкала; 11 – прижимні гайки

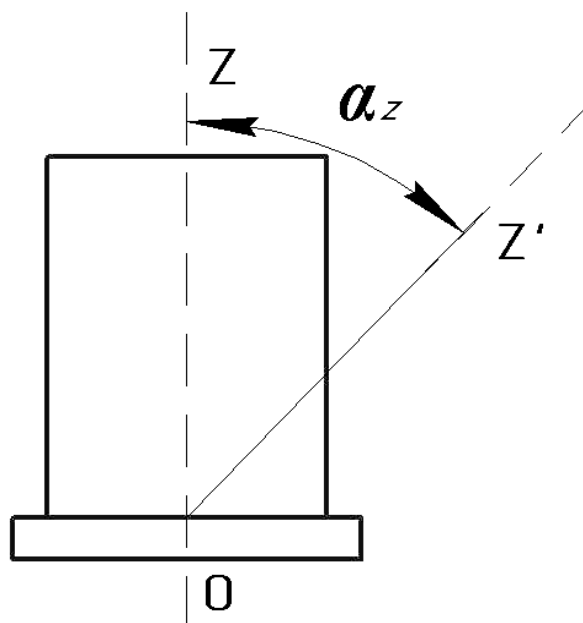


Рис. 4. Кут нахилу ПГ

Отримані результати $g_{ЭКСП}$ градування ПГ експериментальним шляхом відобразимо у табл. 1 та порівняємо їх із аналітичними розрахунками ($g_{ТЕОР} = g \cdot \cos \alpha_z$). Побудуємо графіки залежностей сигналу ПГ g_z від кута повороту α_z (рис.5).

Таблиця 1

Градувальна таблиця ПГ АГС

№	α_z , рад	$g_{ЭКСП}$, мГл	$g_{ТЕОР}$, мГл	Відхилення експерт. від теорет. по модулю, мГл	Відхилення від поточного значення, %
1	2	3	4	5	6
1	0	981100,375	981100,376	0,001	0
2	10	966195,234	966195,257	0,023	1,52
3	20	921932,665	921932,784	0,119	6,03
4	30	849658,072	849657,849	0,223	13,39
5	40	751566,893	751566,491	0,402	23,40
6	50	630639,662	630639,161	0,501	35,72
7	60	490549,470	490550,188	0,718	50,01
8	70	335556,981	335556,091	0,890	65,79
9	80	17365,725	17364,818	0,907	98,23
10	90	0	0	0	100

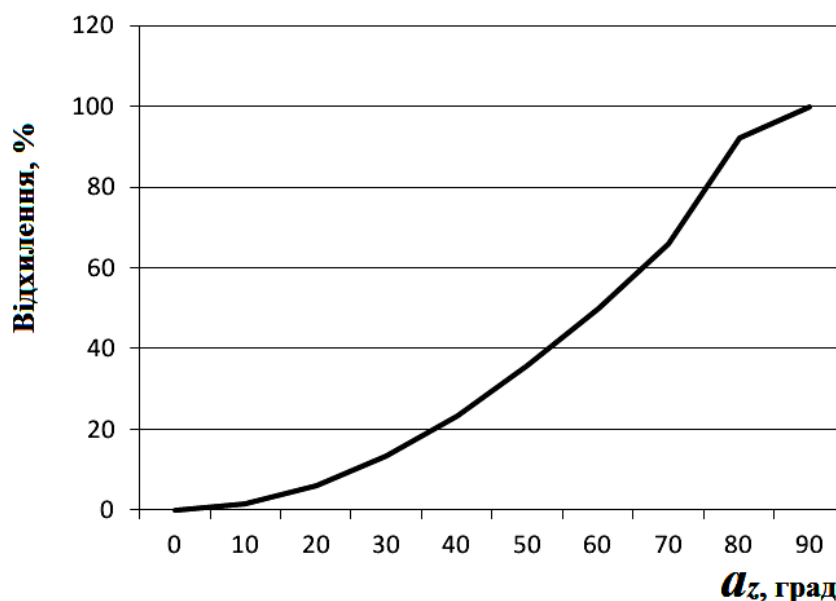


Рис. 5. Графік залежності відхилення вимірювальної осі ПГ α_z від відхилення від поточного значення прискорення сили тяжіння

Як бачимо із табл. 1, різниця між відхиленнями вимірювальної осі ПГ автоматизованої АГС на кут α_z обчисленими аналітично та отримані експериментально не перевищує 1 мГал. Кут повороту його вимірювальної осі відносно довідкової вертикалі впливає прямо пропорційно на його вихідні покази та величину його похибки.

Оскільки гравіметричні вимірювання проводяться на рухомій у просторі основі, тому необхідно постійно забезпечувати збіг вимірювальної осі ПГ АГС із довідковою вертикаллю. Для реалізації цього процесу запропоновано побудувати систему стабілізації АГС, яка забезпечує рівень допустимої похибки стабілізації осі чутливості ПГ у положення вертикалі у межах 0,5–15 кут. хв. [7].

Висновки

Розглянуто новий ПГ автоматизованої АГС, який має більшу точність та швидкодію, ніж відомі на сьогоднішній день. Принцип дії ПГ оснований на фізичному явищі прямого п'єзоефекту. Приведено рівняння руху ПГ АГС. Розраховано аналітично градувальну характеристику ПГ автоматизованої АГС та порівняно її із градувальною характеристикою отриманою за допомогою розробленого лабораторного макету. Встановлено, що точність нового ПГ складає 1 мГал, а кут повороту його вимірювальної осі відносно довідкової вертикалі впливає прямо пропорційно на його вихідні покази та величину його похибки.

1. Безвесільна О.М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: монографія / Безвесільна О. М. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.
2. Bezvesilnaya E.N. System for airborne gravimetry / E.N. Bezvesilnaya, A.G. Tkachuk, K.S. Kozko // European Applied Sciences (Germany). – 2013. – № 5(2). – P. 37–39.
3. П'єзогравіметр: Патент України на винахід 99084, МПК G 01 V 7/00 / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський, А.Г. Ткачук – № а201113894; Заявл. 25.11.2011; Опубл. – 10.07.2012. – Бюл. № 13.
4. Безвесільна О.М. П'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи: монографія / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук. – Житомир : ЖДТУ, 2013. – 240 с.
5. Безвесільна О.М. Структурна схема перетворення вхідного сигналу чутливим елементом п'єзоелектричного гравіметра авіаційної гравіметричної системи / О. М. Безвесільна, А.Г. Ткачук // Міжнар. наук. журнал «Технологічні комплекси». – 2013. – № 1(7). – С. 43–50.
6. Безвесільна О. М. Перетворювальні пристрої приладів / О. М. Безвесільна, П.М. Таланчук – К. : ІСДО, 1994. – 448 с.
7. Безвесільна О.М. Система стабілізації вимірювальної осі п'єзогравіметра авіаційної гравіметричної системи у положення вертикалі / О. М. Безвесільна, А.Г. Ткачук // Вісник інженерної академії України. – 2013. – № 1. – С. 10–12.