

УДК 681.2.08

О. М. Безвесільна¹, д.т.н., Л. В. Коломієць², Т. О. Толочко¹¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ²Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса

СУЧАСНІ ГРАВІМЕТРИ АВІАЦІЙНОЇ ГРАВІМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

Інформацію про гравітаційне поле Землі використовують у сейсмології (прогноз землетрусів), авіаційній і космічній техніці (корекція систем інерціальної навігації ракет, літаків, орбіт космічних літальних апаратів), для дослідження геодинамічних явищ, реалізації завдань інженерної геології, археології, картографії тощо.

Обґрунтовано доцільність використання авіаційних гравіметричних систем для проведення гравіметричних вимірювань та отримання інформації про гравітаційне поле Землі. Проведено аналіз відомих нині гравіметрів авіаційних гравіметричних систем, визначено їх переваги та недоліки. Розглянуто сучасні перспективні розробки у галузі конструювання авіаційних гравіметрів нового типу з високою точністю та швидкодією порівняно з відомими.

Ключові слова: чутливий елемент, гравіметр, прискорення сили тяжіння, гравітаційне поле Землі.

О. М. Bezvesilna, DSc, L. V. Kolomiets, DSc, T. O. Tolochko

MODERN GRAVIMETERS OF AVIATION GRAVIMETRIC SYSTEM

Information about the Earth's gravitational field is used in seismology (earthquake forecasting), aviation and space technology (correction of inertial navigation systems of rockets, airplanes, orbits of spacecraft), for the study of geodynamic phenomena, the implementation of tasks in engineering geology, archeology, cartography, etc.

The feasibility of using AGS for gravimetric measurements and obtaining information about the Earth's gravitational field is substantiated. The analysis of currently existing gravimeters of aviation gravimetric systems is carried out, their main shortcomings are identified: low measurement accuracy (3-10 mGal); the mandatory need to apply the procedure for filtering the output signal of the AGS gravimeter; instability of the static transfer coefficient of the AGS gravimeter, caused by changes in the properties of structural elements; low speed.

Modern promising developments (gyroscopic, ballistic, piezoelectric, capacitive, string gravimeters) in the field of creating new-type aviation gravimeters with higher accuracy (1-2 mGal) and speed than known ones, as a result of choosing the natural frequency of the gravimeter at the intersection point of the spectral densities of the useful PST signal and the main interference of vertical acceleration, are considered. This frequency is 0.1 s^{-1} . Then the gravimeter performs the functions of a filter of the main disturbing vibration accelerations, the frequency of which exceeds 0.1 s^{-1} .

It is proposed to use a two-channel (differential) method of measuring PST in all gravimeter designs. Then the useful signal is doubled by $2g$, and the signals of the main disturbing vertical acceleration, instrumental errors from the influence of changes in temperature, pressure and other factors of the external environment are canceled.

Keywords: sensitive element, gravimeter, gravitational acceleration, Earth's gravitational field.

DOI 10.32684/2412-5288-2025-2-27-34-42

Постановка проблеми у загальному вигляді та її актуальність. Вивчення параметрів гравітаційного поля Землі (прискорення сили тяжіння (ПСТ) g та його аномалій Δg) необхідне у геодезії, сейсмології, геофізиці, геодинаміці, океанології. Інформацію про гравітаційне поле

Землі використовують у сейсмології (прогноз землетрусів), авіаційній і космічній техніці (корекція систем інерціальної навігації ракет, літаків, орбіт космічних літальних апаратів), для дослідження геодинамічних явищ, реалізації завдань інженерної геології, картографії тощо.

Гравіметричні вимірювання проводили на поверхні Землі, на підводному човні, на надводному судні і на літальному апараті (ЛА).

Наземні вимірювання забезпечують найвищу точність (0,01 мГал). Однак вони здійснюються повільно. Райони полюсів, екватора, океанів для таких вимірювань недоступні.

Точність морських вимірювань менша за точність, наземних вимірювань (0,1–0,5 мГал). Морські вимірювання неможливі у гірських та у віддалених районах океанів [1–7].

На ЛА вимірюють Δg у важкодоступних районах Землі зі швидкістю, значно більшою, ніж швидкість наземних вимірювань. З цією метою використовують авіаційні гравіметричні системи (АГС), чутливим елементом яких є гравіметр. Дані щодо гравітаційного поля Землі, введені у пам'ять бортової цифрової обчислювальної машини (БЦОМ) АГС, суттєво сприятимуть підвищенню як точності визначення навігаційних параметрів, так і ефективності гравіметричної розвідки [6, 7]. Тому проведення високоточних авіаційних вимірювань є актуальним.

На сьогодні існує багато видів гравіметрів АГС, принцип роботи яких ґрунтується на різних фізичних явищах. Усі типи приладів мають як свої переваги, так і недоліки. Тому доцільно провести порівняльний аналіз існуючих гравіметрів АГС і розглянути сучасні перспективні розробки у цій галузі.

Розвиток методів і засобів гравіметричних вимірювань.

У теорію і практику гравіметричних вимірювань великий внесок зробили багато вчених, які працювали під керівництвом видатних російських і радянських гравіметристів: Ф. М. Красовського, О. О. Михайлова, Б. В. Нумерова, О. В. Мазаєва, П. Ф. Шокіна, К. О. Мудрецової, Ю. Д. Буланже, О. К. Маловічка, А. М. Лозинської, М. П. Грушинського, К. Є. Веселова, М. У. Сагітова, Є. І. Попова, С. А. Піддубного, М. О. Гусєва, В. Л. Крамаренка, С. Н. Щеглова, В. А. Туліна, Л. В. Огородової, В. О. Баграмянца, В. Л. Пантелеєва, О. І. Сороки, М. Л. Макаренка, С. Є. Александрова, А. М. Берези, Б. М. Малахова, І. А. Маслова, Л. Г. Полякова, В. А. Романюка, Л. В. Сорокіна, В. І. Лялька, В. І. Старостенка, А. В. Тіля та ін.

Істотну роль у розробці гравіметричних вимірювань відіграли і роботи закордонних учених: Д. Гаррісона, А. Графа, М. Піка, В. М. Каула, Л. Ла-Коста, Ю. Томоди, М. Гальвані, Т. фон Оппольцера та ін.

У розвиток методів і засобів гравіметричних вимірювань значний внесок зробили колективи ННЦ «Інститут метрології» під керівництвом к.е.н. О. С. Дудолода, НТУУ «КПІ» під керівни-

цтвом заслуженого діяча науки і техніки України, д. т. н., професора О. М. Безвесільної.

Мета статті – аналіз існуючих на сьогодні гравіметрів авіаційної гравіметричної системи, визначення їх переваг і недоліків.

Викладення основного матеріалу дослідження. Ефективність роботи АГС значною мірою забезпечується вибором чутливого елемента системи – гравіметра. Нові моделі гравіметрів АГС з підвищенням їх точності розробляють провідні технічні університети США, Японії, Німеччини та інших провідних країн світу. Наведено основні різновиди авіаційних гравіметрів.

Гравіметри на основі скомпенсованих маятникових елементів

1. *Кварцовий гравіметр типу ГАЛ-С.* Для літакових вимірювань у країнах СНД використовували переважно гравіметри, розроблені в Аерогравіметричній лабораторії під керівництвом Є. І. Попова в Інституті фізики Землі Російської академії наук, які отримали шифр ГАЛ-С [8–10]. В основу перших моделей цих гравіметрів покладено схему кварцового гравіметра, яку запропонував у 1949 р. С. Є. Александров. У цьому приладі вперше була використана подвоєна крутильна пружна система з кварцового скла. Остаточна думка про перспективність використання подібних пружних систем для вимірювань Δg на літаку склалася після теоретичного обґрунтування способу К. Є. Веселовим та успішних експериментів, проведених Л. П. Смирновим з макетом ГАЛ-С. Дослідження 1989–1997 рр. показали, що АГС на основі ГАЛ-С має точність 8 мГал [11].

2. *Гравіметр Ла-Коста—Ромберга (L-R-S).* Розроблений Інститутом геофізики США під керівництвом Ла-Коста та Ромберга у 1959 р. В основу принципу дії гравіметра покладено ідею вертикального сейсмографа Голиціна. На тонкій горизонтальній нитці, яка є віссю обертання, закріплений горизонтально розташований важіль з тягарем на кінці (маятник). За зміни ПСТ маятник із тягарем на кінці відхиляється від горизонтального положення, розтягуючи головну пружину і закручуючи нитку підвісу доти, доки момент ПСТ не буде врівноважений моментом головної пружини і моментом закручування осей підвісу. Дослідження показали, що точність АГС на основі L-R-S не перевищує 10 мГал [1, 4].

3. *Гравіметр Асканія-Граф GSS-2.* Розроблений А. Графом у лабораторії фірми Асканія-Верке, Німеччина. Пружна система приладу складається із важеля з тягарем, що на кінці підтримується двома горизонтально розташованими гвинтовими пружинами. Мірою виміру ПСТ

служує переміщення тягаря. Тягар переміщують за допомогою мікрометричного пристрою. Випробування показали точність 10мГал [1, 12].

4. *Гравіметр ПІ 1/1* (рис. 1). Розроблений ВАТ «Раменський приладобудівний завод», Росія, призначений для визначення ПСТ із рухомих об'єктів з метою геологічної розвідки нафтогазоносних структур та інших корисних копалин за Δg Землі. Основна сфера застосування гравіметра – літакові і вертолітні геофізичні комплекси, які здійснюють високопродуктивну розвідку корисних копалин, особливо у важкодоступних районах Землі та у морських геофізичних комплексах.

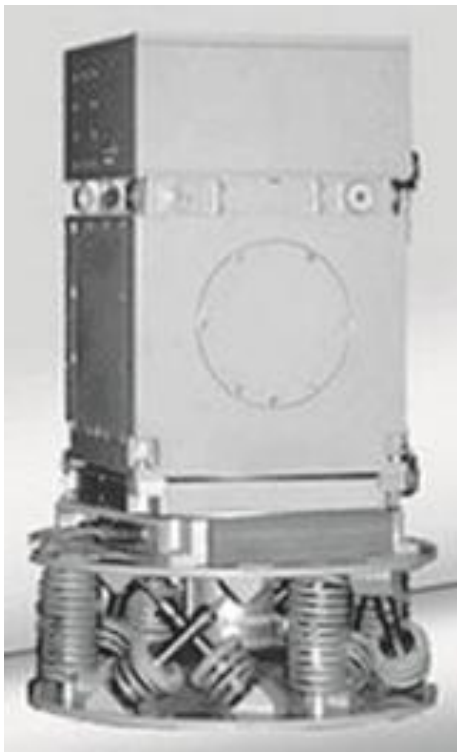


Рисунок 1 – Гравіметр ПІ 1/1

Точність вимірювання ПСТ без урахування похибки зовнішньої інформації, мГал: з морських носіїв 4,3–5,5; з наземних – 4,2–5,3; з повітряних носіїв 6,0 з урахуванням похибки зовнішньої інформації при інтервалі осереднення 100 с [1, 4].

5. *Гравіметр «Чекан-АМ»* (рис. 2). Розроблений ВАТ концерн «ЦНДІ «Електроприлад», Росія, призначений для проведення повітряного і морського гравіметричного знімання поверхні. Гравіметр складається з гравіметричного датчика і гіростабілізатора з вбудованою системою керування на мікроконтролерах. Гравіметричний датчик виконаний на основі подвійної кварцової пружної системи з оптикоелектронним перетворювачем лінійного типу. Точність вимірювань 6 мГал [1, 13, 14].



Рисунок 2 – Гравіметр «Чекан-АМ»

6. *Гравіметричний комплекс «ГРІН-2000/М»* (рис. 3). Складається із двох кварцових датчиків з рідинним демпфіруванням, охоплених форсувальним зворотним зв'язком, що забезпечує сильне приглушення перешкод і широку смугу пропускання для корисного сигналу [4, 5]. Точність в умовах експлуатації на морських судах 1 мГал, на ЛА 5 мГал.



Рисунок 3 – Гравіметричний комплекс «ГРІН-2000/М»

7. *Магнітні гравіметри МАГ-1М, GT-1А, GT-2А*. Розроблені в ЗАТ «Гравіметричні технології», Росія. Чутливий елемент містить інерційну масу у вигляді плоскої котушки у зазорі диференціальної магнітної системи, яка складається із чотирьох магнітів. Метод компенсації маятничого моменту у таких гравіметрах полягає у повороті постійного магніту відносно маятничового ротора навколо вихідної осі приладу і взаємодії радіального магнітного поля, що утворюється двома постійними магнітами симетричної конструкції, та контрольного струму, що проходить через котушку чутливого елемента.

Дослідження АГС на основі перелічених магнітних гравіметрів показали точність на рівні 5 мГал [1, 13, 14].

Струнні гравіметри

Перший макет струнного гравіметра був створений у 1948 р. у Кембриджському інституті геодезії і геофізики, а ідею цього приладу запропонували вчені Росії Л. І. Мендельштам і Г. П. Папелески. Найвідоміший струнний гравіметр — це *гравіметр ГСД-М*, створений в 1960-х роках під керівництвом А. М. Лозинської [1]. Подальші дослідження очолював В. О. Багрянц у ВНДГеофізики. Принцип дії струнних гравіметрів ґрунтується на властивості струни змінювати частоту власних коливань за зміни її натягу. Вимірювання ПСТ зводиться до вимірювання частоти коливання струни.

Дослідні вимірювання ПСТ на базі ГСД-М показали точність у межах 8 мГал [1].

На сьогодні достатньо відомий та застосований гравіметричний комплекс «ГРАВІ-ТОНМ» (розробка ВНДГеофізики, ДНВП «Аерогеофізика» та МДТУ ім. М. Е. Баумана), який містить вимірювальний блок з трьох струнних гравіметрів, гіроінерціальну платформу, двочастотні індикатори приймачів супутникової навігаційної системи GPS, блок реєстрації та обробки даних з відповідним пакетом програм (рис. 4).

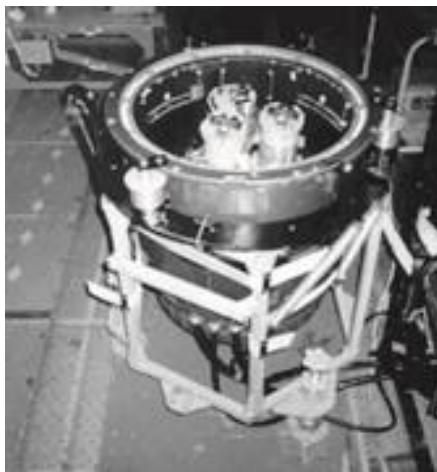


Рисунок 4 – Гравіметричний комплекс «ГРАВІТОН-М»

Комплекс випробуваний на вертольотах Мі-8, Ка-32 і на літаках Ан-30, Ан-12. Вертолітні знімання над морем показали точність 5 мГал [13, 14].

Гіроскопічні гравіметри

Відомі на цей час гіроскопічні гравіметри, що містять гіроскопічний маятник, зв'язаний з рамою за допомогою горизонтального осьового підвісу, перпендикулярного до осі обертання гіроскопа, є одними із найточніших гравіметрів АГС [13]. Гравіметри типу PIGA, розроблені Массачусетським технологічним інститутом, мають відносно високу чутливість, їх використовують як гравіметри АГС та елементи систем

навігації (точність 3 мГал). Однак такий гравіметр має одну вісь чутливості, паралельну осі обертання гіроскопа щодо платформи, і вимірює проекцію g на цю вісь. Для визначення напрямку гравітаційної вертикалі потрібна дуже точна стабілізація осі чутливості гравіметра у напрямку гравітаційного поля Землі. Крім того, обертання гіроскопа навколо осі зовнішньої рамки зумовлює появу інструментальних похибок PIGA. Відомі гравіметри АГС, які описано вище, мають переваги, а також суттєві недоліки (див. таблицю), основні з них такі:

1. Недостатньо висока точність вимірювання (3–10 мГал)

2. Обов'язкова необхідність застосування процедури фільтрації вихідного сигналу гравіметра АГС

3. Нестабільність статичного передатного коефіцієнта гравіметра АГС, спричинена змінами властивостей конструктивних елементів

4. Невисока швидкодія і відсутність можливості оперативної обробки інформації та ін.

Перспективні розробки у галузі конструювання гравіметрів АГС нового типу.

На сьогодні, як показав аналіз характеристик гравіметрів АГС, досяжною є точність авіаційних гравіметричних вимірювань 3–10 мГал (табл. 1). Однак аерогравіметричне знімання для розв'язання задач пошукової гравіметрії потребує суттєвого підвищення точності та швидкодії авіаційних гравіметричних вимірювань. Це пов'язане насамперед із необхідністю підвищення точності гравіметра, розвитком методів автоматичної компенсації похибок вимірювань Δg , з удосконаленням математичної моделі АГС, розв'язанням проблем фільтрації збурюючих впливів у вихідному сигналі гравіметра АГС.

На кафедрі автоматизації та систем неруйнівного контролю НТУУ «КПІ» під керівництвом О. І. Безвесільної розроблено та досліджено нові типи гравіметрів АГС: гіроскопічні на основі динамічно настроюваного гіроскопа (ДНГ), гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень (ГІЛП) [15, 16]; п'єзоелектричні, ємнісні та струнні. Точність розроблених гравіметрів 0,1–2,0 мГал [6, 7].

Гірогравіметр, побудований на основі гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень (рис. 5) [17, 18].

Основні елементи: гіромотор 1 із берилієвим ротором 2, який встановлено на осі 12 внутрішнього підвісу так, щоб була створена маятниковість відносно цієї осі. Зовнішньою рамкою є поворотна платформа 6, на якій розміщено стійки з підшипниковими вузлами для кріплення осі 12 внутрішнього підвісу гіромотора.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика існуючих гравіметрів АГС

Тип	Марка	Точність вимірювань g , мГа	Поріг чутливості, мГал	Недоліки
Кварцові	ГАЛ-С	8	0,3	Велика стала часу; недостатні швидкодія та точність; низька чутливість
	ГІ 1/1 «Чекан-АМ»	6	0,1	
	«ГРІН-2000/М»	5	0,2	
Пружинні	GSS L-R-S	10	0,2 0,1	Важкопрогнозований дрейф пружних властивостей пружинного елемента; недостатні швидкодія та точність
Магнітні	Bell BGM-2, Bell VM-IX, Automatics VM-7G, МАГ-1М, GT-1А, GT-2А	8	0,2	Нестабільність магнітних властивостей постійного магніту; недостатні швидкодія та точність
Струнні	ГСД-М «ГРАВІТОН-М»	8,5	0,1 0,1	Нестабільність пружних властивостей струни; можливість резонансів; недостатні швидкодія та точність
Гіроскопічні	PIGA 16, 25	3	0,1	Висока собівартість; складність конструкції; недостатні швидкодія та точність

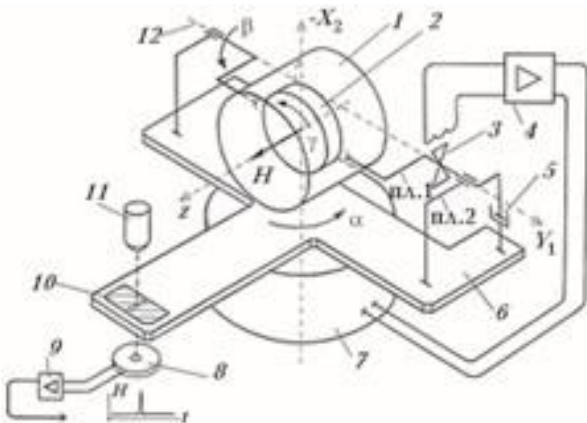


Рисунок 5 – Інтегровальний гіроскопічний гравіметр

На осі 12 внутрішнього підвісу гіромотора закріплено ротор датчика 3 кута β повертання гіромотора, статор датчика 3 закріплено на платформі 6. Для демпфірування кутових коливань гіромотора 1 навколо осі 12 внутрішнього підвісу передбачено рідинний демпфер 5. Підбором робочого зазору між лопаткою та корпусом рідинного демпфера забезпечують підвищення коефіцієнта в'язкого тертя до $f_1=2,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$. Сигнал з датчика 3 підсилюють і спрямовують на датчик моменту, яким слугує серводвигун 7, що прикладає до поворотної платформи оберто-

вий момент, пропорційний сигналу з датчика 3 кута β . На поворотній платформі 6 передбачено зміщену у радіальному напрямку світлопроникну мембрану 10 із щільною, над якою розташоване джерело 11 вузького спрямованого світла. На кожному оберті поворотної платформи 6 зосереджений світловий промінь проходить над фотоприймачем 8. При цьому виникає короткий імпульс, що інформує про здійснений поворотною платформою 6 повний оберт навколо осі 12. Точність відліку становить 5 мкрад. Цей імпульс (сигнальний вихід гірогравіметра) спрямований через підсилювач 9 на схему блока електронних лічильників. Пристрій вміщений у алюмінієвий захисний циліндр (магнітний захист).

Балістичний лазерний гравіметр (БЛГ) з двовимірним відеозображенням (рис. 6) [15, 16]. Пробне тіло 1 закріплюють в електромагніті 10. З виходу цифрової ЕОМ 9 на вхід електромагніту 10 надходить сигнал, за яким електромагніт відпускає пробне тіло 1. Воно починає рухатися вниз по прозорій трубці 2 під дією ПСТ. Оскільки пробне тіло 1 виконано у формі шару з магнітними властивостями, то під час його проходження повз котушки 3–5 у них виникає електрорушійна сила (ЕРС).

З виходів котушок 3–5 на вхід цифрової ЕОМ 9 надходить електричний сигнал, що скла-

дається з трьох імпульсів напруги, кожен з яких зумовлений виникненням ЕРС у котушках.

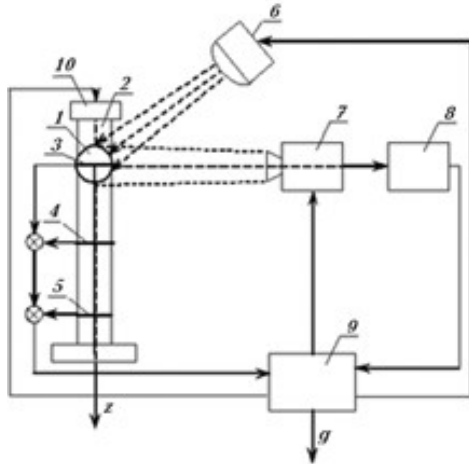


Рисунок 6 – Балістичний лазерний гравіметр (БЛГ) з двовимірним відеозображенням

Часові затримки W_1, W_2, W_3 кожного з імпульсів відносно моменту початку руху пробного тіла 1 пропорційні абсолютному значенню ПСТ g та відстаням u_1-u_3 від електромагніту 10 до котушок $3-5$.

Для підвищення точності вимірювання у БЛГ використовують також другий канал вимірювання абсолютного значення ПСТ. У цьому каналі цифрова ЕОМ 9 керує роботою джерела 6 імпульсного освітлення та відеокамерою 7 . При цьому відеокамера 7 формує зображення електромагніту 10 , прозорої трубки 2 та самого пробного тіла 1 . Пристрій 8 апроксимації за зображенням, що надійшло від цифрової ЕОМ 9 , визначає поточні координати центра маси пробного тіла 1 , зафіксованих на зображенні відеокамерою 7 , що відповідають періодам генерування імпульсів освітлення джерелом 6 імпульсного освітлення. Потім у ЕОМ 9 об'єднуються результати вимірювань абсолютного значення ПСТ, отримані у першому та другому вимірювальних каналах цього БЛГ.

Двогіроскопний гравіметр (ДГ) (рис. 7) [13, 14]. Основними складовими елементами конструкції двогіроскопного гравіметра є датчик моментів 4 , поплавків 5 , що закріплені за допомогою опор 2 до корпусу 1 , перетворювач 7 кута повороту у вихідний сигнал, ротор 8 , датчик кута 9 , додаткова маса 10 , датчик моментів 12 та планка 11 . Додатково на рис. 7 позначено вісь чутливості та вихідну вісь гравіметра. Ротор 8 гіромотора з внутрішнім розташуванням статора розміщений у циліндричному поплавку 5 . Нерухомою вісь гіромотора закріплена у планці 11 поплавка 5 . Повздовжня вісь u підвісу поплавка 5 суміщена з поздовжньою віссю корпусу 1 приладу. Поплавки має цапфи (виготовлені з

високоміцних сталей, діаметр $0,4-1,0$ мм), за допомогою яких гіроскопічний чутливий елемент фіксується у каменевих опорах 2 (сапфір, корунд, рубін).

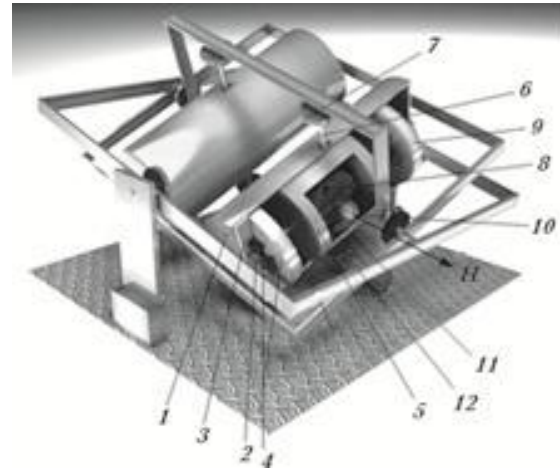


Рисунок 7 – Двогіроскопний гравіметр

Вони сприймають незкомпенсовану вагу поплавка та зусилля, що виникають під час роботи приладу на рухомій основі. Зазор ($0,1-0,15$ мм) між зовнішньою циліндричною поверхнею поплавка 5 та внутрішньою поверхнею корпусу 1 заповнений рідиною 3 (ПМС-1000), що створює демпфівальний момент відносно вимірювальної осі гіроскопа та ізолює каменеві опори від ударів та вібрацій. Для того щоб в'язкість та густина рідини 3 були стабільними під час роботи приладу, обладнаний системою термостатування, яка забезпечує постійну температуру з точністю до $0,1-0,01$ °С. Робочу температуру ДГ вибирають у діапазоні $70-85$ °С. Центр ваги поплавка 5 зміщений на 10 мм від центра підтримних сил, що створюються рідиною. На цапфах поплавка (гіромотора) закріплені ротори датчиків кута 9 та моменту корекції 4 , статори яких кріпляться у корпусі 1 .

П'єзоелектричний гравіметр (ПГ) (рис. 8) [19]. Чутливий елемент ПГ складається із п'єзоелектричного елемента (ПЕ) 1 , що працює на деформації стиснення – розтягування, ізоляторів 2 на торцях ПЕ та інерційної маси (ІМ) 3 .

З метою підвищення надійності та міцності конструкції чутливий елемент притиснений до основи 4 гвинтом 6 . ПГ за допомогою кабелю 7 з'єднаний із операційним підсилювачем. П'єзоелектричний елемент 1 є багат шаровою конструкцією (п'єзопакетом), що складається із шарів кристалічного ніобату літію. Під дією прискорення сили тяжіння g на ІМ виникає сила тяжіння, внаслідок дії якої ІМ переміщується на величину x .

Такий рух ІМ спричинює стиснення або розтягування ПЕ і появу на його поверхні електричного заряду Q (явище прямого п'єзоєфекту), який прямо пропорційний g [2].

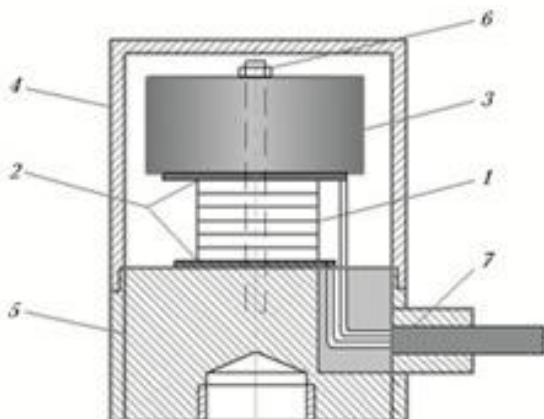


Рисунок 8 – Конструкція п'єзоелектричного гравіметра: 1 – п'єзоелектричного елемент, 2 – ізолятори, 3 – інерційна маса, 4 – основа, 5 – герметичний корпус, 6 – гвинт, 7 – вивідний кабель

У новому ПГ автоматизованої АГС розв'язано проблему фільтрації вихідного сигналу – встановлена частота власних коливань ПГ дорівнює частоті перетину спектральних щільностей корисного сигналу прискорення сили тяжіння та сигналу основної завади вертикального прискорення ЛА. Це забезпечує відсутність впливу основної завади – вертикального прискорення ЛА, та суттєво підвищує точність вимірювання.

Ємнісний гравіметр (ЄГ) [20]. Чутливий елемент ЄГ розміщений у герметичному корпусі і виконаний у вигляді верхньої та нижньої металевих обкладок, розділених діелектриком. Верхня металева обкладка з'єднана з герметичним корпусом, а нижня – через ізолятори із пружною мембраною, до якої прикріплена сейсмічна маса. Ці обкладки, розділені діелектриком, утворюють конденсатор зі змінним зазором δ та ємністю q . Під час дії прискорення сили тяжіння gz на сейсмічну масу виникає сила тяжіння, яка зумовлює її рух. Унаслідок такого руху пружна мембрана починає згинатися, чим змінює зазор δ між верхньою та нижньою металевими обкладками, розділеними діелектриком, а отже, і ємність q , яка обернено пропорційна прискоренню gz .

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, час-

тота яких більша за частоту власних коливань ЄГ, та підвищує точність вимірювання прискорення сили тяжіння.

Струнний гравіметр (СГ) (рис. 9) має чутливий елемент (позначено пунктиром), виконаний у вигляді двох ідентичних струнних пристроїв, струни яких виконані із тензочутливого матеріалу, розміщених у герметичному корпусі і електрично увімкнених за мостовою схемою у два протилежні плечі моста, а вихід моста підключено до пристрою обчислення вихідного сигналу гравіметра.

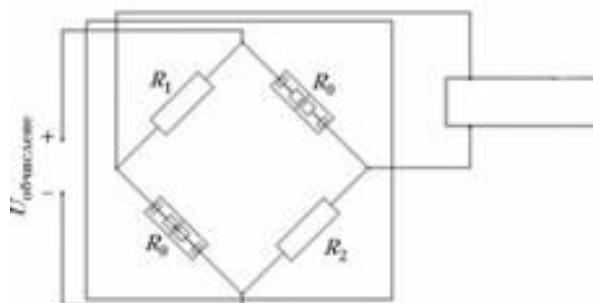


Рисунок 9 – Струнний гравіметр

Така конструкція СГ забезпечує лінійну залежність вихідного сигналу від g , що дає змогу значно збільшити точність вимірювань g . Вихідний сигнал досліджуваного СГ не залежатиме від змін температури, тиску, вологості, оскільки вони впливають на частоти обох струн двох ідентичних струнних гравіметрів однаково, але з протилежними знаками. Це також забезпечує підвищення точності вимірювань g у досліджуваному СГ порівняно із відомими [21].

Висновки

1. Обґрунтовано доцільність використання АГС для проведення гравіметричних вимірювань та отримання інформації про гравітаційне поле Землі. Проведено аналіз існуючих на сьогодні гравіметрів авіаційних гравіметричних систем, виявлено їх основні недоліки: низька точність вимірювання (3–10 мГал); обов'язкова необхідність застосування процедури фільтрації вихідного сигналу гравіметра АГС; нестабільність статичного передатного коефіцієнта гравіметра АГС, спричинена змінами властивостей конструктивних елементів; невисока швидкодія.

2. Розглянуто сучасні перспективні розробки (гіроскопічний, балістичний, п'єзоелектричний, ємнісний, струнний гравіметри) у галузі створення авіаційних гравіметрів нового типу із вищими точністю (1–2 мГал) та швидкодією, ніж у відомих, у результаті вибору власної частоти гравіметра у точці перетину спектральних щільностей корисного сигналу ПСТ та основної зава-

ди вертикального прискорення. Ця частота дорівнює $0,1 \text{ c}^{-1}$. Тоді гравіметр виконує функції фільтра основних збудовальних віброприскорень, частота яких перевищує $0,1 \text{ c}^{-1}$.

3. Запропоновано використовувати в усіх конструкціях гравіметрів двоканальний (диференціальний) метод вимірювання ПСТ. Тоді корисний сигнал подвоюється $2g$, а сигнали основного збудовального вертикального прискорення, інструментальні похибки від впливу змін температури, тиску та інших факторів впливу зовнішнього середовища скасовуються.

Список використаних джерел

1. Безвесільна О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри. Житомир: ЖДТУ, 2007. 604 с.
2. Безвесільна О. М., Коломієць Л. В., Гриневич М. С., Толочко Т. О. авіаційна гравіметрична система з трансформаторним гравіметром. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2022. № 1(20). С. 17–28. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2022-1-20-17-28>.
3. Korobiichuk, I. (2015). Stabilization system of aviation gravimeter. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(8), 956–959.
4. Безвесільна О. М., Ткачук А. Г. П'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи. Житомир: ЖДТУ, 2013. 240 с.
5. Korobiichuk, I., Bezvesilna, O., Tkachuk, A., Nowicki, M., Szewczyk, R. (2016). Piezoelectric Gravimeter of the Aviation Gravimetric System. In: Szewczyk, R., Zieliński, C., Kaliczyńska, M. (eds) *Challenges in Automation, Robotics and Measurement Techniques*. ICA 2016. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 440, 753–761, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29357-8_65.
6. Безвесильная Е. Н., Ткачук А. Г. Авиационная гравиметрическая система. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2014. № 6. С. 32–37.
7. Безвесільна, О., Ткачук, А., Нечай, С., Хильченко, Т. Введення принципу побудови авіаційної гравіметричної системи з будь-яким типом гравіметра, *Східноєвропейський журнал передових технологій*, 2017, т. 1 (7-85), С. 45–56. URL: <https://journals.urau.ua/eejet/article/view/92941> [російською мовою].
8. Безвесільна О. М., Цірук В. Г. Наукові, технологічні, організаційні та впроваджувальні основи створення нового комплексу стабілізатора озброєння легких броньованих автомобілів. Державне підприємство «Пріоритети», Київ, 2015. 176 с.
9. Цірук, В. Г., Безвесільна, О. М., Маляров, С. П., Таланчук, П. М. Основи теорії та принципи побудови стабілізатора озброєння легкоброньованої техніки: монографія, Київ: ДП «Пріоритети», 2016. 230 с.
10. Akizuki, K., Yamaguchi, K., Morita, Y., Ohashi Y. (2016). The effect of proficiency level on measurement error of range of motion. *Journal of Physical Therapy Science*, 28(9). 2644–2651.
11. Bezvesilna, O., Kamiński, M. (2017). Gravimeters of Aviation Gravimetric System: Classification, Comparative Analysis, Prospects. In: Szewczyk, R., Zieliński, C., Kaliczyńska, M. (eds) *Automation 2017. ICA 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 550, 496–504, Springer, Cham https://doi.org/10.1007/978-3-319-54042-9_48.
12. Безвесільна О. М., Чепок Л. О. Струнний гравіметр авіаційної гравіметричної системи. Житомир: ЖДТУ, 2015. 208 с.
13. Безвесільна О. М., Коваль А. В. Двогіроскопний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи. Житомир: ЖДТУ, 2013. 252 с.
14. Bezvesilna O., Kolomiets L., Kyrychuk Yu., Tolochko T. Two-gyroscopic sensitive element of the stabilization complex. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2023. № 2(23). С. 30–39. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2023-2-23-30-39>.
15. Безвесільна О. М., Остапчук О. О., Тимчик Г. С. Автоматизований лазерний балістичний гравіметр. Житомир: ЖДТУ, 2014. 180 с.
16. Тимчик Г. С., Безвесільна О. М. Наукові дослідження в галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій: Київ, НВО Пріоритети: 2018. 592 с.
17. Пат. 88473 Україна. Двороторний інтегруючий гіроскопічний гравіметр з контрольованими параметрами. О. М. Безвесільна, О. О. Добрянський. Опубл. 26.10.2009, Бюл. № 20.
18. Безвесільна О. М., Ткачук А. Г., Козько К. С. Сучасні гравіметри авіаційної гравіметричної системи. *Геофизический журнал*. 2015. № 2 (Т37). С. 86–94.
19. Пат. 99084 Україна. П'єзогравіметр. О. М. Безвесільна, А. Г. Ткачук. Опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.
20. Пат. 105122 Україна. Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння. О. М. Безвесільна, А. Г. Ткачук, К. С. Козько. Опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7.
21. Безвесільна О. М., Чепок Л. О. Струнний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи. Житомир: ЖДТУ, 2015. 224.

References

1. Bezvesilna O. M. Aviatsiini hravimetrychni systemy ta hravimetry. Zhytomyr: ZhDTU, 2007. 604 s.
2. Bezvesilna O. M., Kolomiets L. V., Hrynevych M. S., Tolochko T. O. Aviatsiina hravimetrychna systema z transformatornym hravimetrom. *Zbìrnik naukovih prac' Odes'koï deržavnoi akademii tehničnogo reguluvannâ ta âkosti*. 2022. # 1(20). S. 17–28. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2022-1-20-17-28>.
3. Korobiichuk, I. (2015). Stabilization system of aviation gravimeter. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(8), 956–959.
4. Bezvesilna O. M., Tkachuk A. H. Piezoelektrychnyi hravimetr aviatsiinoi hravimetrychnoi systemy. Zhytomyr: ZhDTU, 2013. 240 s.
5. Korobiichuk, I., Bezvesilna, O., Tkachuk, A., Nowicki, M., Szewczyk, R. (2016). Piezoelectric Gravimeter of the Aviation Gravimetric System. In: Szewczyk, R., Zieliński, C., Kaliczyńska, M. (eds) *Challenges in Automation, Robotics and Measurement Techniques. ICA 2016. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 440, 753–761, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29357-8_65.
6. Bezvesylnaia E. N., Tkachuk A. H. Avyatsyonnaia hravimetrycheskaia systema. *Sborka v mashynostroenny, pryborostroenny*. 2014. # 6. S. 32–37.
7. Bezvesilna, O., Tkachuk, A., Nechai, S., Khylichenko, T. Vvedennia pryntsyphu pobudovy aviatsiinoi hravimetrychnoi systemy z bud-yakym typom hravimetra, *Skhidnoievropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 2017, t.1 (7-85), S. 45–56. URL: <https://journals.urau.ua/eejet/article/view/92941> [rosiiskoiu movoiu].
8. Bezvesilna O. M., Tsiрук V. H. Naukovi, tekhnolohichni, orhanizatsiini ta vprovadzhu-valni osnovy stvorennia novoho kompleksu stabilizatora ozbroiennia lehkykh bronovanykh avtomobiliv. Derzhavne pidpriemstvo «Prioritytety», Kyiv, 2015. 176 s.
9. Tsiрук, V. H., Bezvesilna, O. M., Maliarov, S. P., Talanchuk, P. M. Osnovy teorii ta pryntsyphu pobudovy stabilizatora ozbroiennia lehkobronovanoi tekhniki: monohrafiia, Kyiv: DP «Prioritytety», 2016. 230 s.
10. Akizuki, K., Yamaguchi, K., Morita, Y., Ohashi Y. (2016). The effect of proficiency level on measurement error of range of motion. *Journal of Physical Therapy Science*, 28(9). 2644–2651.
11. Bezvesilna, O., Kamiński, M. (2017). Gravimeters of Aviation Gravimetric System: Classification, Comparative Analysis, Prospects. In: Szewczyk, R., Zieliński, C., Kaliczyńska, M. (eds) *Automation 2017. ICA 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 550, 496–504, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54042-9_48.
12. Bezvesilna O. M., Chepiuk L. O. Strunnyi hravimetr aviatsiinoi hravimetrychnoi systemy. Zhytomyr : ZhDTU, 2015. 208 s.
13. Bezvesilna O. M., Koval A. V. Dvohiroskopnyi hravimetr avtomatyzovanoi aviatsiinoi hravimetrychnoi systemy. Zhytomyr: ZhDTU, 2013. 252 s.
14. Bezvesilna O., Kolomiets L., Kyrychuk Yu., Tolochko T. Two-gyroscopic sensitive element of the stabilization complex. *Zbìrnik naukovih prac' Odes'koï deržavnoi akademii tehničnogo reguluvannâ ta âkosti*. 2023. # 2(23). S. 30–39. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2023-2-23-30-39>.
15. Bezvesilna O. M., Ostapchuk O. O., Tymchuk H. S. Avtomatyzovanyi lazernyi balistychnyi hravimetr. Zhytomyr: ZhDTU, 2014. 180 s.
16. Tymchuk H. S., Bezvesilna O. M. Naukovi doslidzhennia v haluzi avtomatyzatsii ta kompiuterno-intehrovanykh tekhnolohii: Kyiv, NVO Prioritytety: 2018. 592 s.
17. Pat. 88473 Ukraina. Dvorotornyi intehruuiuchy hiroskopichnyi hravimetr z kontrolovanyimi parametramy. O. M. Bezvesilna, O. O. Dobrzhanskyi. Opubl. 26.10.2009, Biul. # 20.
18. Bezvesilna O. M., Tkachuk A. H., Kozko K. S. Suchasni hravimetry aviatsiinoi hravimetrychnoi systemy. *Heofyzycheskyi zhurnal*. 2015. # 2 (T37). S. 86–94.
19. Pat.99084 Ukraina. Piezohravimetr. O. M. Bezvesilna, A. H. Tkachuk. Opubl. 10.07.2012, Biul. # 13.
20. Pat. 105122 Ukraina. Aviatsiina hravimetrychna systema dlia vymiriuvan anomalii pryskorennia syly tiazhinnia. O. M. Bezvesilna, A. H. Tkachuk, K. S. Kozko. Opubl. 10.04.2014, Biul. # 7.
21. Bezvesilna O. M., Chepiuk L. O. Strunnyi hravimetr avtomatyzovanoi aviatsiinoi hravimetrychnoi systemy. Zhytomyr: ZhDTU, 2015. 224.

Надійшла до редакції 15.09.2025