

## АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ГРАВИМЕТРІВ АВІАЦІЙНОЇ ГРАВИМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

Безвесільна О. М., Чепюк Л. О., Ткачук А. Г., Нечай С. О., Хильченко Т. В.

### 1. Вступ

Вивчення параметрів гравітаційного поля Землі (прискорення сили тяжіння (ПСТ)  $g$  та його аномалій  $\Delta g$ ) необхідне у:

- сейсмології, (прогноз землетрусів);
- авіаційній і космічній техніці (корекція систем інерціальної навігації ракет, літаків, орбіт космічних літальних апаратів);
- для дослідження геодинамічних явищ;
- для реалізації задач інженерної геології, геофізики, археології, картографії, океанології тощо.

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

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

Морські вимірювання мають точність меншу, ніж наземні вимірювання (0,1–0,5 мГал). Однак морські вимірювання неможливі у гірських та у віддалених районах океанів [1].

Вимірювання на ЛА дозволяють здійснювати вимірювання  $\Delta g$  у важкодоступних районах Землі зі швидкістю значно більшою, ніж наземні. Також, можна здійснювати вимірювання у таких місцях, які раніше були недоступними (морські впадини, гірські вершини, райони полюсів тощо). Для цих цілей використовують авіаційні гравіметричні системи (АГС), чутливим елементом яких є гравіметр.

Вивчення нових типів гравіметрів, рекомендацій щодо їх виготовлення та сучасних досліджень в даній галузі – є першим і основним етапом при розробці нового приладу. А тому, проведення порівняльного аналізу сучасних гравіметрів є актуальною задачею. Адже така інформація значно допоможе і зорієнтує розробника.

### 2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

*Об'єкт дослідження* – гравіметри авіаційних гравіметричних систем.

Гравіметрам АГС притаманні такі суттєві недоліки:

- 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 та відсутність можливості оперативної обробки інформації та інші.

Ці та інші [2, 3] гравіметри зведемо до порівняльної табл. 1.

**Таблиця 1**

Порівняльна характеристика найновіших існуючих гравіметрів авіаційних гравіметричних систем

Тип	Назва	Зображення	Особливості
Кварцовий	CG-5 AutoGrav (РФ)		Автоматична компенсація і корекція, відсутність впливу температури, тиску, магнітного поля, автоматичне шумозаглушення, придушення сейсмічних шумів, низький залишковий дрейф Точність: 0,01*мГал Зміщення нуля пункту: < 0.02 мГал/ добу
Струнний з рідинним демпфуванням	Гравітон-М (РФ)		Мала вага та чутливість до струсів, великий діапазон вимірювання та зручна система цифрової реєстрації даних, складається з трьох струнних гравіметрів, поміщених у спеціальні вузли і блоку управління гравіметрами Точність: 0,01*мГал Зміщення нуля пункту: < 0.02 мГал/ добу
Манітний	GT-2A (РФ)		Встановлений на платформі тривісної гіровертикалі, маса гравіметра виконана у вигляді плоскої двообмоткової котушки у зазорі диференціальної магнітної системи, (з чотирьох термокомпенсованих магнітів) Точність: 0,01*мГал

Кварцовий	ЧЕКАН-АМ (РФ)		<p>Програмне забезпечення дозволяє проводити на борту повну обробку результатів зйомки з оцінкою точності і побудовою гравіметричних карт</p> <p>Точність: 0,01*мГал</p> <p>Зміщення нуля пункту: &lt; 0,1 мГал / добу</p>
Пружинний	TAGS-6 (Канада)		<p>Поєднує новітні технології GPS і збору даних з міцним фундаментом Lacoste динамічного гравіметра. Система включає у себе пружинний перетворювач, з низьким рівнем дрейфу, встановлений на гіростабілізованій карданній платформі</p> <p>Точність: 0,01*мГал</p> <p>Зміщення нуля пункту: &lt; 3 мГал/ місяць</p>

**Примітка:** вказана підприємствами точність 0,01 мГал на поверхні Землі (абсолютні вимірювання), але конкретних даних про авіаційні гравіметричні дослідження з цими гравіметрами немає. За реальних умов похибка є значно вищою – у діапазоні 2–8 мГал [1, 4].

З табл. 1 видно, що навіть найсучаснішим аерогравіметрам притаманні наступні недоліки:

- велика постійна часу;
- недостатня швидкодія;
- низька чутливість;
- важкопрогнозований дрейф пружних властивостей пружинного елемента;
- нестабільність магнітних властивостей постійного магніту;
- нестабільність пружних властивостей струни; можливість резонансів;
- висока собівартість;
- складність конструкції.

### 3. Мета та задачі дослідження

*Метою роботи* є проведення аналізу існуючих сьогодні гравіметрів авіаційної гравіметричної системи, визначення їх переваг та недоліків.

Для досягнення сформульованої мети були поставлені наступні задачі:

1. Провести порівняльний аналіз існуючих сьогодні гравіметрів авіаційних гравіметричних систем.
2. Розглянути сучасні перспективні розробки у галузі створення авіаційних гравіметрів.
3. Запропонувати шляхи підвищення точності гравіметрів.

#### 4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Ефективність роботи АГС, значною мірою, забезпечується вибором чутливого елемента системи – гравіметра. Розробками нових моделей гравіметрів АГС та підвищенням їх точності займаються провідні технічні університети Росії, США, Японії, Німеччини та інших провідних країн світу.

Гравіметр ПІ 1/1 (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  $\Delta g$  Землі. Основна область застосування гравіметра – літакові і вертолітні геофізичні комплекси, які здійснюють високопродуктивну розвідку корисних копалин особливо у важкодоступних районах Землі та у морських геофізичних комплексах.

Точність вимірювання ПСТ, без урахування похибки зовнішньої інформації при інтервалі осереднення 100 с [1, 5]:

- з морських носіїв (4,3–5,5) мГал;
- з наземних носіїв (4,2–5,3) мГал;
- з повітряних носіїв 6,0 мГал.

*Гравіметр «Чекан-АМ»* (розроблений ВАТ концерн «ЦНДІ «Електроприлад», Росія) – призначений для проведення повітряної і морської гравіметричної зйомки поверхні. Гравіметр складається з гравіметричного датчика і гіростабілізатора з вбудованою системою управління на мікроконтролерах. Гравіметричний датчик виконаний на основі подвійної кварцовою пружної системи з оптико-електронним перетворювачем лінійного типу. Точність вимірювань 6 мГал [6].

*Гравіметричний комплекс «ГРІН-2000/М»* – складається із двох кварцових датчиків з рідинним демпфуванням, охоплених форсуючим зворотним зв'язком, що забезпечує сильне придушення перешкод і широку смугу пропускання для корисного сигналу [7]. Точність в умовах експлуатації на морських судах 1 мГал, на ЛА 5 мГал.

*Магнітні гравіметри МАГ-1М, GT-1А, GT-2А* розроблені в ЗАТ «Гравіметричні технології», Росія. В них чутливий елемент складається з інерційної маси, що має вигляд плоскої котушки у зазорі диференціальної магнітної системи. Метод компенсації маятникового моменту у таких гравіметрах відбувається шляхом повороту постійного магніту відносно маятничого ротора навколо вихідної осі приладу. В цьому випадку, радіальне магнітне поле, що утворюється двома постійними магнітами симетричної конструкції, взаємодіє з контрольним струмом, що проходить через котушку чутливого елемента. Дослідження АГС на основі перерахованих магнітних гравіметрів показали точність на рівні 5 мГал [8].

Принцип дії струнних гравіметрів заснований на властивості струни змінювати частоту власних коливань при зміні її натягу. Вимірювання ПСТ зводиться до вимірювання частоти коливання струни.

На сьогоднішній день є досить відомим та застосовуваним гравіметричний комплекс «ГРАВІТОН–М» (розробка ВНДІ Геофізики, ДНВП «Аерогеофізика»

та МДТУ ім. М. Е. Баумана), який включає у себе вимірювальний блок з трьох струнних гравіметрів, гіроінерціальну платформу, двочастотні індикатори приймачів супутникової навігаційної системи GPS, блок реєстрації та обробки даних з відповідним пакетом програм.

Комплекс пройшов випробування на вертольотах та на літаках. Вертолiтні зйомки над морем показали точність 5 мГал [9].

Вiдомi на сьогоднішнiй день гiроскопiчнi гравiметри, що мiстять гiроскопiчний маятник, зв'язаний з рамою за допомогою горизонтального осевого пiдвiсу, перпендикулярного осi обертання гiроскопа, є одними iз найточнiших гравiметрiв АГС [4, 10].

Гравiметри типу PIGA, розробленi Масачусетським технологiчним iнститутом (США), мають вiдносно високу чутливiсть та використовуються як гравiметри АГС та елементи систем навігацiї (точнiсть 3 мГал) [2]. Однак, такий гравiметр має одну вiсь чутливостi, паралельну осi обертання гiроскопа щодо платформи, i вимiрює проекцiю  $g$  на цю вiсь. Для визначення напрямку гравітацiйної вертикалi потрiбна дуже точна стабiлiзацiя осi чутливостi гравiметра у напрямку гравітацiйного поля Землi. Крім того, обертання гiроскопа навколо осi зовнiшньої рамкi обумовлює появу iнструментальних похибок PIGA.

iснує багато сучасних теоретичних розробок гравіметрiв АГС: кварцовий [11], струнний з рiдинним демпфуванням [9], магнiтний [8, 12], кварцовий [6], пружинний [12], принцип роботи яких оснований на рiзних фiзичних явищах [10]. Вони мають як свої переваги, так i недолiки. Майже всi вiдомi гравіметри вимiрюють похибку вертикального прискорення [14, 15], яка у десятки разiв перевищує корисний сигнал [16]. Ускладненi допомiжними системами (система глобального позицiонування (GPS)) [17]. Потребують довгого ретельного калiбрування [18] й налаштування [19], що значно ускладнює роботу. iснуючi новiтнi розробки належать до пiд-, надводних [20, 21] та наземних [18] методiв вимiрювання, якi не застосовуються у авіацiйній гравіметрії.

Проведення високоточних авіацiйних вимiрювань лишається необхідним завданням. Тому доцiльно буде провести порiвняльний аналіз iснуючих гравіметрiв АГС та розглянути сучаснi перспективнi розробки у цій галузi.

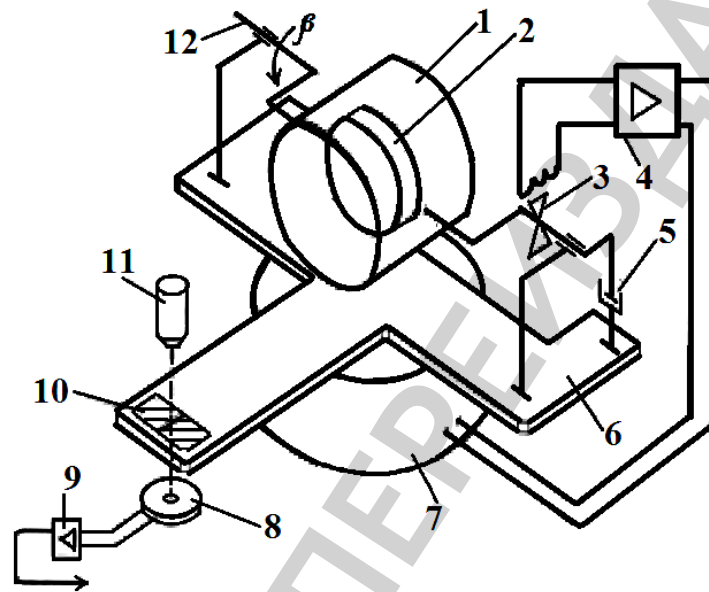
## **5. Методи дослідження**

На сьогоднішнiй день, як показав проведений аналіз гравіметрiв АГС, досяжною є точнiсть авіацiйних гравіметричних вимiрювань (3–10) мГал. Однак, аерогравіметрична зйомка для розв'язання задач пошукової гравіметрії потребує суттєвого пiдвищення точностi та швидкодiї авіацiйних гравіметричних вимiрювань [22]. Це пов'язано, насамперед, iз необхіднiстю пiдвищення точностi гравіметра, розвитком методiв автоматичної компенсацiї похибок вимiрювань  $\Delta g$ , з удосконаленням математичної моделi АГС, вирiшенням проблем фiльтрацiї збурюючих впливiв у вихiдному сигналі гравіметра АГС [1, 23].

Розробки, якi б задовольняли всiм сучасним вимогам є тiльки теоретичнi.

Так на кафедрi приладобудування НТУУ «КПі» (Київ, Україна) спiльно з ЖДТУ (Житомир, Україна) розроблено та досліджено новi типи гравіметрiв АГС:

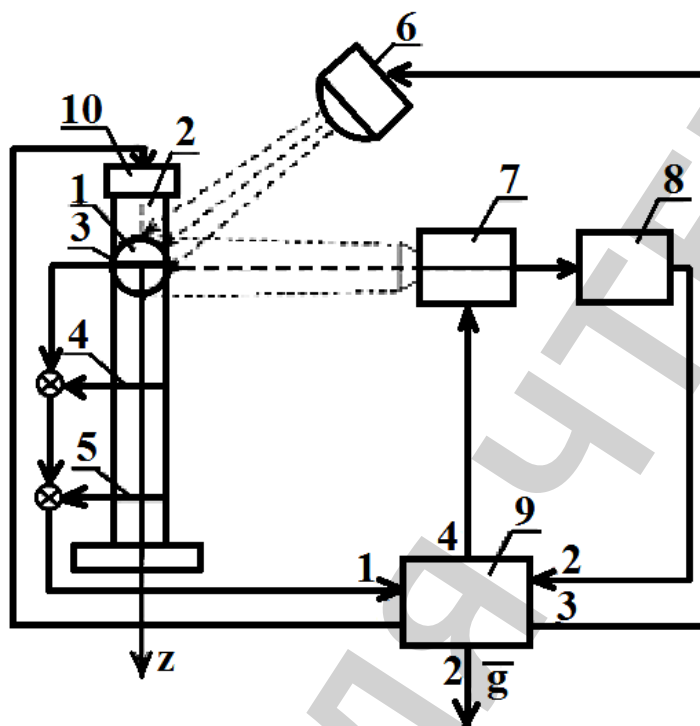
- гіроскопічні гравіметри на основі динамічно настоюваного гіроскопа (ДНГ) (рис. 1);
  - балістичні лазерні гравіметри (БЛГ) з двовимірним відеозображенням (рис. 2) [24];
  - двогіроскопні (рис. 3) [25];
  - п'єзоелектричні (рис. 4) [26];
  - ємнісні та струнні [27] (рис. 5) гравіметри.
- Точність розроблених гравіметрів складає (0.1–2.0) мГал.



**Рис. 1.** Інтегруючий гіроскопічний гравіметр

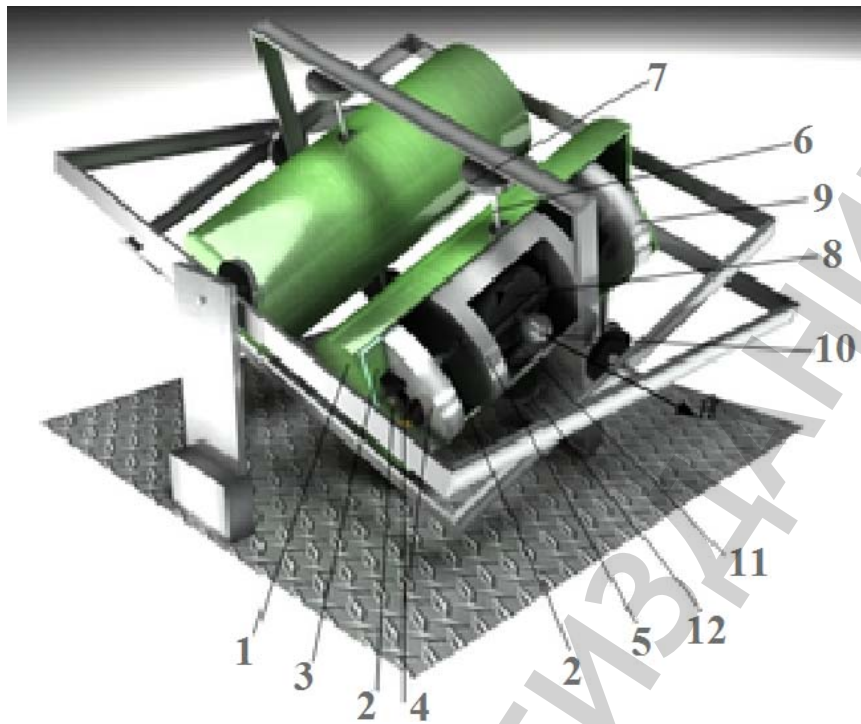
Основні елементи, показані на рис. 1: гіромотор 1 із берилієвим ротором 2. Останній встановлено на осі 12 внутрішнього підвісу так, щоб була створена маятниковість. Центр мас гіромотора розташовувався на осі обертання зовнішньої рамки. Зовнішньою рамкою є поворотна платформа 6, на якій розташовано стійки з підшипниковими вузлами для кріплення осі 12 внутрішнього підвісу гіромотора. На осі 12 внутрішнього підвісу гіромотора закріплено ротор датчика 3 кута  $\beta$  повороту гіромотора, а статор датчика 3 закріплено на платформі 6. Для демпфірування кутових коливань гіромотора 1 навколо осі 12 внутрішнього підвісу гіромотора передбачено рідинний демпфер 5. Підбором робочого зазору між лопаткою та корпусом рідинного демпфера забезпечується підвищення коефіцієнту в'язкого тертя до  $f_i = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ . Сигнал з датчика 3 підсилюється і направляється на датчик моменту, в якості якого працює серводвигун 7, що прикладає до поворотної платформи обертовий момент, який пропорційний сигналу з датчика 3 кута  $\beta$ . На поворотній платформі 6 передбачено зміщену у радіальному напрямку світлонепроникну мембрану 10 із щілиною, над якою розташоване джерело 11 вузько направленої світла. На кожному оберті поворотної платформи зосереджений світловий промінь проходить над фотоприймачем 8. При цьому виникає короткий імпульс, що інформує про здійснений поворотною

платформою 6 повний оберт навколо осі обертання. Точність відліку становить 5 мікрорадіан. Цей імпульс (сигнальний вихід гірогравіметра) направляєтся через підсилювач 9 на схему блоку електронних лічильників. Пристрій поміщений у алюмінієвий захисний циліндр (магнітний захист) [25].



**Рис. 2.** Балістичний лазерний гравіметр з двовимірним відео зображенням

Пробне тіло 1 закріплюється в електромагніті 10 (рис. 2). З першого виходу цифрової ЕОМ 9 на вхід електромагніту 10 надходить сигнал, по якому електромагніт відпускає пробне тіло 1. Воно починає рухатися вниз по прозорій трубці 2 на нерухомій основі під дією ПСТ. Оскільки пробне тіло 1 виконано у формі шару з магнітними властивостями, то при його проходженні повз котушки 4, 5, 6 у них наводиться ЕРС. З виходів котушок 4, 5, 6 на перший вхід цифрової ЕОМ надходить електричний сигнал, що складається з трьох імпульсів напруги, кожен з яких обумовлений виникненням ЕРС у котушках 4, 5, 6. Часові затримки  $\hat{t}_1, \hat{t}_2, \hat{t}_3$  кожного з імпульсів відносно моменту початку руху пробного тіла 1 пропорційні абсолютному значенню ПСТ  $g$  та відстаням  $x_1, x_2, x_3$  від електромагніту 10 до котушок 4, 5, 6.



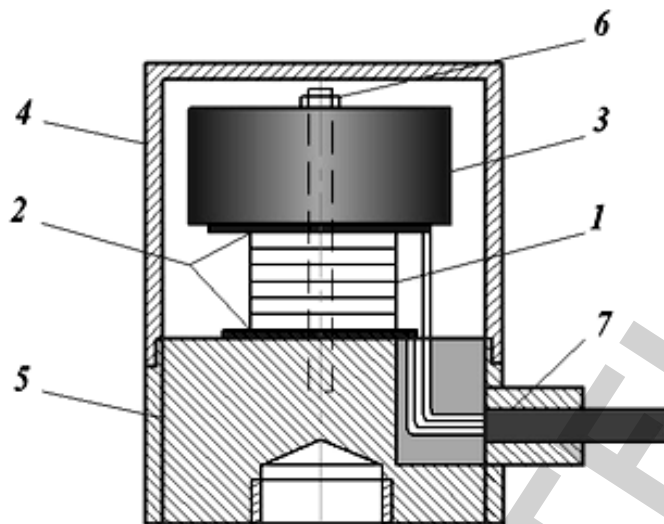
**Рис. 3.** Двогіроскопний гравіметр

Гравіметр на рис. 3 складається із ротора 8 гіромотора з внутрішнім розташуванням статора розміщеним у циліндричному поплавку 5. Нерухома вісь гіромотора закріплена у планці 11 поплавка 5. Повздовжня вісь  $x$  підвісу поплавка 5 суміщена з повздовжньою віссю корпуса 1 приладу. Поплавок має цапфи (виготовляються з високоміцних сталей діаметром 0,4...1,0 мм), за допомогою яких гіроскопічний чутливий елемент фіксується у каменевих опорах 2 (сапфір, корунд, рубін). Вони сприймають некомпенсовану вагу поплавка та зусилля, що виникають при роботі приладу на рухомій основі. Зазор (0,1–0,15 мм) між зовнішньою циліндричною поверхнею поплавка 5 та внутрішньою поверхнею корпуса 1 заповнений рідиною (ПМС-1000), що створює демпфуючий момент відносно осі  $x$  гіроскопа та ізолює каменеві опори від ударів та вібрацій.

Чутливий елемент п'єзоелектричного гравіметра (ПГ) складається із п'єзоелектричного елемента (ПЕ) 5, що працює на деформації стиснення-розтягування, ізоляторів 7 на торцях ПЕ та інерційної маси (ІМ) 6. З метою підвищення надійності та міцності конструкції, чутливий елемент пружно притиснений до основи 8 гвинтом 10. ПГ за допомогою кабелю 11 з'єднаний із операційним підсилювачем. П'єзоелектричний елемент 5 являє собою багатошарову конструкцію (п'єзопакет), 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 спричиняє стиснення або розтягування ПЕ і появу на його поверхні електричного заряду  $Q$  (явище прямого п'єзоефекту), який прямо пропорційний  $g$  [26].





**Рис. 4.** Конструкція п'єзогравіметра: 1 – п'єзоелементи; 2 – ізолятори; 3 – інерційна маса; 4 – основа; 5 – герметичний корпус; 6 – гвинт; 7 – вивідний кабель

У новому п'єзогравіметрі (ПГ) автоматизованої АГС вирішено проблему фільтрації вихідного сигналу шляхом встановлення частоти власних коливань ПГ рівній 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.

Чутливий елемент ємнісного гравіметра ЄГ розміщений у герметичному корпусі. Він виконаний у вигляді верхньої та нижньої металевих обкладинок, розділених діелектриком. Причому верхня металева обкладка з'єднана з герметичним корпусом, а нижня металева обкладка із пружною мембраною, до якої через ізолятори прикріплена сейсмічна маса [27]. Верхня та нижня металеві обклади чутливого елемента ЄГ, розділені діелектриком, утворюють конденсатор зі змінним зазором  $\delta$  та ємністю  $C$ . Під час дії прискорення сили тяжіння  $g_z$  на сейсмічну масу, виникає сила тяжіння, яка зумовлює її рух. Внаслідок такого руху пружна мембрана починає згинатися, чим змінює зазор  $\delta$  між верхньою та нижньою металевими обкладинками, розділених діелектриком, а отже, і ємність  $C$ , яка обернено пропорційна прискоренню  $g_z$ .

Параметри чутливого елемента ЄГ підібрані так, що його частота власних коливань дорівнює найбільшій частоті гравітаційних прискорень, що може бути виміряна на фоні завад [28]. Тобто, 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.

Струнний гравіметр (СГ) (рис. 5) має чутливий елемент, виконаний у вигляді двох ідентичних струнних гравіметрів, струни яких виконані із тензочутливого матеріалу. Вони розміщені у герметичному корпусі і електрично ввімкнені за мостовою схемою у два протилежні плечі моста. Вихід моста підключено до пристрою обчислення вихідного сигналу гравіметра.

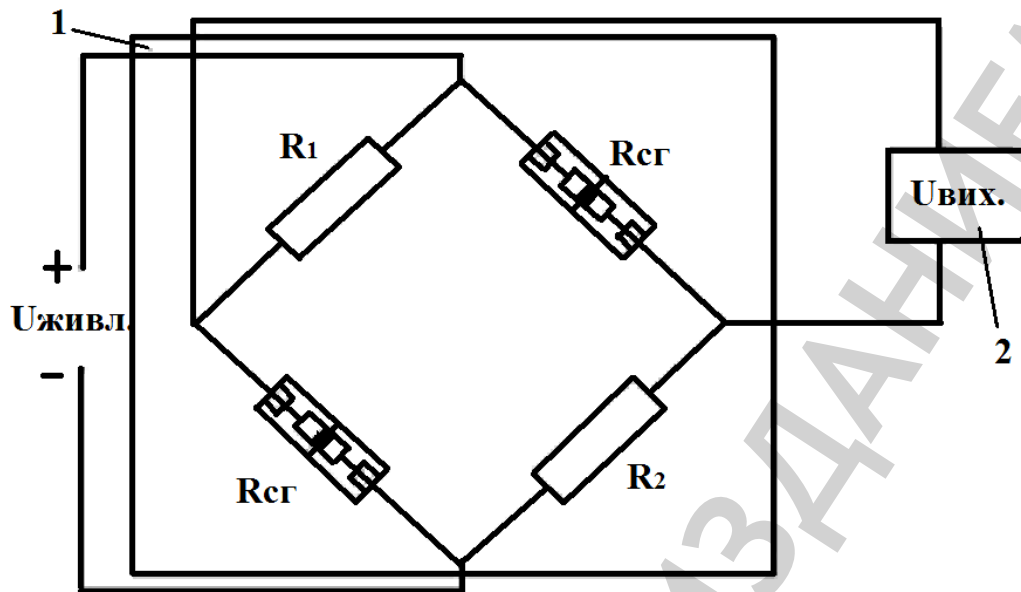


Рис. 5.Струнний гравіметр

Така конструкція СГ забезпечує лінійну залежність вихідного сигналу від  $g$ , що дозволяє значно збільшити точність вимірювань  $g$ . Вихідний сигнал досліджуваного СГ не буде залежати 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 [29].

## 6. Результати дослідження

В результаті проведення найбільш повного аналізу гравіметрів АГС, було виявлено, що існує ще багато невирішених проблем в аерогравіметрії. Серед них основними є:

- недостатня швидкодія та відсутність можливості оперативної обробки інформації;
- важкопрогнозований дрейф пружних властивостей пружинного елемента;
- нестабільність магнітних властивостей постійного магніту;
- нестабільність пружних властивостей струни; можливість резонансів;
- недостатньо висока точність вимірювання;
- обов'язкова необхідність застосування процедури фільтрації вихідного сигналу гравіметра АГС;
- складність конструкції.

Надалі, планується більш детально вивчити іноземний ринок та наукові прототипи аерогравіметрів. Особливо, порівняти з такими країнами як Китай, Японія та Корея.

Всі новітні розробки, які могли б повністю або частково вирішити вищеописані недоліки існують, в основному, у вигляді наукових прототипів [30]. Та аерогравіметрична зйомка для розв'язання задач пошукової гравіметрії потребує суттєвого підвищення точності та швидкодії авіаційних

гравіметричних вимірювань. Тому вивчення даного питання лишається перспективною проблемою.

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* Аналіз сучасних аерографіметрів та їх порівняння дає змогу визначити їх основні переваги та недоліки. Це значно допомагає при розробці нових приладів. Опіраючись на даний аналіз, було запропоновано шляхи підвищення точності аерографіметрів.

*Weaknesses.* Існує ще багато невирішених проблем в аерографіметрії. Серед них основними є: недостатня швидкодія та точність; нестабільність характеристик використовуваних матеріалів; складність конструкції.

*Opportunities.* Надалі планується більш детально вивчити іноземний ринок та наукові прототипи аерографіметрів. Особливо, порівняти з такими країнами як Китай, Японія та Корея.

*Threats.* В Україні дуже мало підприємств і наукових шкіл займаються питаннями гравіметрії. Це, звісно, не сприяє розвитку даної галузі. Закордонні аналоги стрімко займають перші позиції на ринку. В той час, як українське виробництво тільки удосконалює існуючі прилади, не вдаючись до новітніх розробок.

## 8. Висновки

1. Проведено порівняльний аналіз сучасних аерографіметрів та наукових прототипів. Було 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; невисока швидкодія.

2. Розглянуто сучасні перспективні розробки у галузі авіаційних гравіметрів: гіроскопічний, балістичний, п'єзоелектричний, ємнісний, струнний гравіметри. Вони відзначаються вищою точністю (1–2 мГал) та швидкодією. Це досягається шляхом вибору власної частоти гравіметра у точці перетину спектральних щільностей корисного сигналу ПСТ та основної завади вертикального прискорення. Ця частота складає  $0,1 \text{ c}^{-1}$ . Тоді гравіметр виконує функції фільтра основних збурюючих віброприскорень, частота яких більша  $0,1 \text{ c}^{-1}$ .

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

## Література

1. Bezvesilna, O. 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.

2. Gravimetry [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://www.all-pribors.ru/groups/gravimetry-61>. – 21.01.2017.

3. Matveev, V. V. The engineering analysis of lapses of strapdown inertial

navigational system [Text] / V. V. Matveev // Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2014. – Vol. 9, № 2. – P. 251–267.

4. Kaufman, A. A. Printsipy metoda gravimetrii [Text] / A. A. Kaufman. – Tver', 2011. – 360 p.

5. Bykovskii, A. V. Aerogravimetriceskii metod izmereniia gravitatsionnykh anomalii [Text] / A. V. Bykovskii, A. V. Polynkov, V. D. Arseniev // Aviakosmicheskoe priborostroenie. – 2013. – № 12. – P. 11–19.

6. Mobil'nyi gravimetr «Chekan-AM» [Electronic resource] // State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC. – Available at: \www/URL: [http://www.elektropribor.spb.ru/prod/rgydro\\_1](http://www.elektropribor.spb.ru/prod/rgydro_1). – 26.10.2016.

7. Gravimetry [Electronic resource] // JSC YUZHMOREGEOLOGIYA – On land and at sea. – Available at: \www/URL: <http://www.ymg.ru/ru/content/gravimetr>– 21.01.2017.

8. Inertsial'no-gravimetriceskii kompleks MAG-1A [Electronic resource] // Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe nauchno-proizvodstvennoe predpriatie «GEOLOGORAZVEDKA». – Available at: \www/URL: <http://geolraz.com/page/GSA-2010/>. – 18.10.2016.

9. Strunnyi aerogravimetr «Graviton-M» [Electronic resource] // GNPP «Aerogeophysica». – Available at: \www/URL: [http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=ru](http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=ru). – 18.10.2016.

10. Bezvesilna, O. Gravimeters of Aviation Gravimetric System: Classification, Comparative Analysis, Prospects [Text] / O. Bezvesilna, M. Kaminski // Automation 2017. – Springer International Publishing, 2017. – P. 496–504. doi:[10.1007/978-3-319-54042-9\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54042-9_48)

11. Gravimetr CG-5 AutoGrav [Electronic resource] // Geotsentr-Moskva. – Available at: \www/URL: <http://geocentr-msk.ru/content/view/441/137>. – 18.10.2016.

12. Aerogravimetr GT-2A [Electronic resource] // GNPP «Aerogeophysica». – Available at: \www/URL: [http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=ru](http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=ru). – 18.10.2016.

13. TAGS-6 Gravity Meter (Turnkey Airborne Gravity System) with Aerograv Data Processing Software [Electronic resource] // Micro-g LaCoste, Inc. – Available at: \www/URL: <http://www.microglacoste.com/tags-6.php>. – 26.10.2016.

14. Bykovskii, A. V. K voprosu o razrabotke malogabaritnogo aerogravimetra [Text] / A. V. Bykovskii, A. V. Polynkov // Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. – 2013. – № 2 (14). – P. 32–41.

15. Osborne, I. S. An on-chip cold-atom gravimeter [Text] / I. S. Osborne // Science. – 2016. – Vol. 354, № 6317. – P. 1246–1247. doi:[10.1126/science.354.6317.1246-f](https://doi.org/10.1126/science.354.6317.1246-f)

16. Afonin, A. A. O vozmozhnosti postroeniia besplatformennogo upravliaiushchego navigatsionno-gravimetriceskogo kompleksa bespilotnogo letatel'nogo apparata [Text] / A. A. Afonin, A. S. Sulakov, G. G. Yamashev, D. A. Mihailin, L. A. Mirzoian, D. V. Kurmakov // Trudy MAI. – 2013. – № 66. –

P. 47–53.

17. Huang, Y. SGA-WZ: A New Strapdown Airborne Gravimeter [Text] / Y. Huang, A. V. Olesen, M. Wu, K. Zhang // *Sensors*. – 2012. – Vol. 12, № 12. – P. 9336–9348. doi:[10.3390/s120709336](https://doi.org/10.3390/s120709336)

18. Kazama, T. Gravity measurements with a portable absolute gravimeter A10 in Syowa Station and Langhovde, East Antarctica [Text] / T. Kazama, H. Hayakawa, T. Higashi, S. Ohsono, S. Iwanami, T. Hanyu, H. Ohta, K. Doi, Y. Aoyama, Y. Fukudaa, J. Nishijimag, K. Shibuyab // *Polar Science*. – 2013. – Vol. 7, № 3–4. – P. 260–277. doi:[10.1016/j.polar.2013.07.001](https://doi.org/10.1016/j.polar.2013.07.001)

19. Calvo, M. Time stability of spring and superconducting gravimeters through the analysis of very long gravity records [Text] / M. Calvo, J. Hinderer, S. Rosat, H. Legros, J.-P. Boy, B. Ducarme, W. Zurn // *Journal of Geodynamics*. – 2014. – Vol. 80. – P. 20–33. doi:[10.1016/j.jog.2014.04.009](https://doi.org/10.1016/j.jog.2014.04.009)

20. Agostino, G. D. The new IMGC-02 transportable absolute gravimeter: measurement apparatus and applications in geophysics and volcanology [Text] / G. D. Agostino, S. Desogus, A. Germak, C. Origlia, D. Quagliotti, G. Berrino, G. Corrado, V. Derrico, G. Ricciardi // *Annals of geophysics*. – 2008. – Vol. 51, № 1. – P. 39–49.

21. Roussela, C. Integration of a strapdown gravimeter system in anautonomous under water vehicle [Text] / C. Roussel, J. Verdun, J. Cali, M. Maia, J. F. d'EU // *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2015. – Vol. XL-5/W5. – P. 199–206. doi:[10.5194/isprsarchives-xl-5-w5-199-2015](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-5-w5-199-2015)

22. Hudzinskiy, L. L. Issledovanie absolyutnogo ballisticheskogo gravimetra i puti povysheniya tochnosti izmereniy [Text]: Vseros. nauch. konf. / L. L. Hudzinskiy, L. M. Bartashevich, V. L. Sorokin // *Geologiya, geohimiya i geofizika na rubezhe XX i XXI vekav*. – 2002. – Vol. 3.

23. Bezvesilna, O. Introducing the principle of constructing anaviation gravimetric system with any type of gravimeter [Text] / O. Bezvesilna, A. Tkachuk, L. Chepyuk, S. Nechai, T. Khylichenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – № 1/7 (85). – P. 45–56. doi:[10.15587/1729-4061.2017.92941](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.92941)

24. Bezvesilna, O. System of aviation gravimeter [Text] / O. Bezvesilna, M. Nowicki, R. Szewczyk, A. Tkachuk // *International Journal of Scientific&Engineering Research*. – 2015. – Vol. 6, № 8. – P. 956–958.

25. 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](https://doi.org/10.3846/16487788.2014.969878)

26. Korobiichuk, I. Design of piezoelectric gravimeter for automated aviation gravimetric system [Text] / I. Korobiichuk, O. Bezvesilna, A. Tkachuk, T. Chilchenko, M. Nowicki, R. Szewczyk // *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems*. – 2016. – Vol. 10, № 1. – P. 43–47. doi:[10.14313/jamris\\_1-2016/6](https://doi.org/10.14313/jamris_1-2016/6)

27. Korobiichuk, I. Two-Channel MEMS Gravimeter of the Automated Aircraft

Gravimetric System [Text] / I. Korobiichuk, O. Bezvesilna, M. Kachniarz, A. Tkachuk, T. Chilchenko // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – P. 481–487. doi:[10.1007/978-3-319-48923-0\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48923-0_51)

28. Korobiichuk, I. Filtering of the output signal of dynamically tuned gravimeters [Text] / I. Korobiichuk, O. Bezvesilna, M. Nowicki, R. Szewczyk // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2015. – Vol. 6, № 7. – P. 1332–1338.

29. Korobiichuk, I. The goniometer on laser gyrobase [Text] / I. Korobiichuk, O. Bezvesilna, M. Nowicki, R. Szewczyk // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2015. – Vol. 6, № 9. – P. 256–258.

30. Meurers, B. Scintrex CG5 used for superconducting gravimeter calibration [Text] / B. Meurers // Geodesy and Geodynamics. – 2017. doi:[10.1016/j.geog.2017.02.009](https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.02.009)

НЕ ЯВЛЯЕТСЯ ПЕРЕКРЕСТНЫМ