

# Сучасні гравіметри авіаційної гравіметричної системи

© О. М. Безвесільна<sup>1</sup>, А. Г. Ткачук<sup>2</sup>, Л. О. Чепюк<sup>2</sup>, К. С. Козько<sup>1</sup>, 2015

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
Київ, Україна

<sup>2</sup>Житомирський державний технологічний університет,  
Житомир, Україна

Надійшла 16 лютого 2015 р.

*Представлено членом редколегії В. І. Старостенко*

Обоснована целесообразность использования авиационных гравиметрических систем для проведения гравиметрических измерений и получения информации о гравитационном поле Земли. Проведен анализ известных в настоящее время гравиметров авиационных гравиметрических систем, определены их преимущества и недостатки. Рассмотрены современные перспективные разработки в области конструирования авиационных гравиметров нового типа с высокой точностью и быстродействием по сравнению с известными.

**Ключевые слова:** чувствительный элемент, гравиметр, ускорение силы тяжести, гравитационное поле Земли.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її актуальність.** Вивчення параметрів гравітаційного поля Землі (прискорення сили тяжіння (ПСТ)  $g$  та його аномалій  $\Delta g$ ) 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, археології, 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 [Безвесільна, 2007; Безвесільна, Ткачук, 2013; Bezvesilna, Tkachuk, 2014].

На ЛА вимірюють  $\Delta g$  у важкодоступних районах Землі зі швидкістю, значно більшою, ніж швидкість наземних вимірювань. З цієї 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 [Безвесільна, Ткачук, 2014]. 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. Пантелєєва, 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 ви-

мірювань 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 канд. екон. наук О. С. Дудолада, НТУУ «КПІ» під керівництвом заслуженого діяча науки і техніки України, д-ра техн. наук 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 Росії, 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 [Попов, 1987]. 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  $\Delta g$  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 [Веселов, 1968].

2. *Гравіметр Ла-Косте—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 Голицина. 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 [Безвесільна, 2007; Безвесільна, Ткачук, 2013].

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 слугує переміщення тягаря. Тягар переміщують за допомогою мікрометричного пристрою. Випробування показали точність 10 мГал [Безвесільна, 2007; Bezvesilna et al., 2013].

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  $\Delta g$  Землі. Основна сфера застосування гравіметра — літакові і вертолітні геофізичні комплекси, які здійснюють високоефективну розвідку корисних копалин, особливо у важкодоступних районах Землі та у морських геофізичних комплексах.

Точність вимірювання ПСТ без урахування похибки зовнішньої інформації, мГал: з морських носіїв 4,3—5,5; з наземних — 4,2—5,3; з



Рис. 1. Гравіметр ПІ 1/1.

повітряних носіїв 6,0 з урахуванням похибки зовнішньої інформації при інтервалі осереднення 100 с [Безвесільна, 2007; Безвесільна, Ткачук, 2013].

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 оптико-електронним перетворювачем лінійного типу. Точність вимірювань 6 мГал [Безвесільна, 2007; Bezvesilna et al., 2013a].



Рис. 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 [Безвесільна, Ткачук, 2013]. Точність в умовах експлуатації на морських судах 1 мГал, на ЛА 5 мГал.

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 маятникового моменту у таких гравіметрах полягає у повороті постійного магніту відносно маяткового ротора навколо вихідної осі приладу і взаємодії радіального магнітного поля, що утворюється двома постійними магніта-

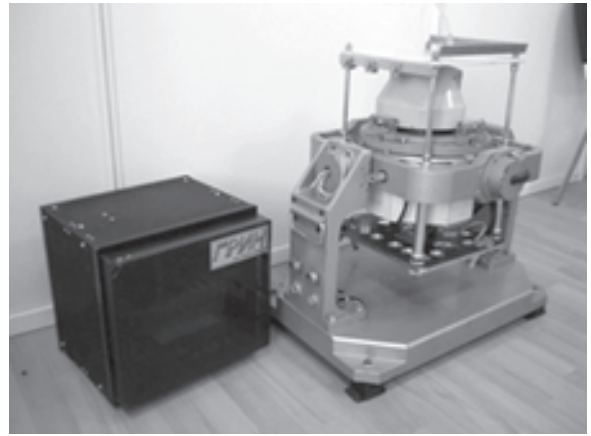


Рис. 3. Гравіметричний комплекс «ГРІН-2000/М».

ми симетричної конструкції, та контрольного струму, що проходить через котушку чутливого елемента.

Дослідження АГС на основі перелічених магнітних гравіметрів показали точність на рівні 5 мГал [Безвесільна, Коваль, 2013].

#### **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 [Безвесільна, 2007]. Подальші дослідження очолював В.О. Багрянц у ВНДІГеофізики. 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 [Безвесільна, 2007].

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

Комплекс випробуваний на вертольотах Мі-8, Ка-32 і на літаках Ан-30, Ан-12. Вертолітні знімання над морем показали точність 5 мГал [Безвесільна, Коваль, 2013].

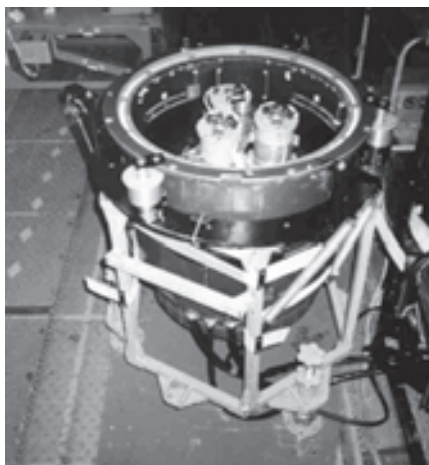


Рис. 4. Гравіметричний комплекс «ГРАВИТОН-М».

### Гіроскопічні гравіметри

Відомі на цей час гіроскопічні гравіметри, що містять гіроскопічний маятник, зв'язаний з рамою за допомогою горизонтального осевого підвісу, перпендикулярного до осі обертання гіроскопа, є одними із найточніших гравіметрів АГС [Безвесільна, Коваль, 2013].

Гравіметри типу РІГА, розроблені Масшасетським 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 вісі обертан-

ня 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 РІГА.

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. Однак аерогравіметричне знімання для розв'язання задач пошукової гравіметрії потребує суттєвого підвищення точності та швидкодії авіацій-

### Порівняльна характеристика існуючих гравіметрів АГС

Тип	Марка	Точність вимірювань $g$ , мГал	Поріг чутливості, мГал	Недоліки
Кварцові	ГАЛ-С	8	0,3	Велика стала часу; недостатні швидкодія та точність; низька чутливість
	П 1/1	6	0,1	
	«Чекан-АМ»	6	0,1	
	«ГРІН-2000/М»	5	0,2	
Пружинні	GSS	10	0,2	Важкопрогнозований дрейф пружних властивостей пружинного елемента; недостатні швидкодія та точність
	L-R-S		0,1	
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	8	0,1	Нестабільність пружних властивостей струни; можливість резонансів; недостатні швидкодія та точність
	«ГРАВИТОН-М»	5	0,1	
Гіроскопічні	РІГА 16, 25	3	0,1	Висока собівартість; складність конструкції; недостатні швидкодія та точність

них гравіметричних вимірювань. Це пов'язане насамперед із необхідністю підвищення точності гравіметра, розвитком методів автоматичної компенсації похибок вимірювань  $\Delta g$ , з удосконаленням математичної моделі АГС, розв'язанням проблем фільтрації збурюючих впливів у вихідному сигналі гравіметра АГС.

На кафедрі приладобудування 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 (ГЛП) [Bezvesilna et al., 2014]; п'єзоелектричні, ємнісні та струнні. Точність розроблених гравіметрів 0,1—2,0 мГал [Безвесільна, Ткачук, 2013].

**Гірогравіметр, побудований на основі гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень** (рис. 5) [Пат. 88473, 2009]. 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. На осі 12 внутрішнього підвісу гіромотора закріплено ротор датчика 3 кута  $\beta$  повороту 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  $f_1 = 2,3 \cdot 10^{-3}$  кг·м<sup>2</sup>/с. Сигнал з датчика 3 підсилюють і спрямовують на датчик моменту, яким слугує серводвигун 7, що прикладає до поворотної платформи обертовий момент, 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 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).

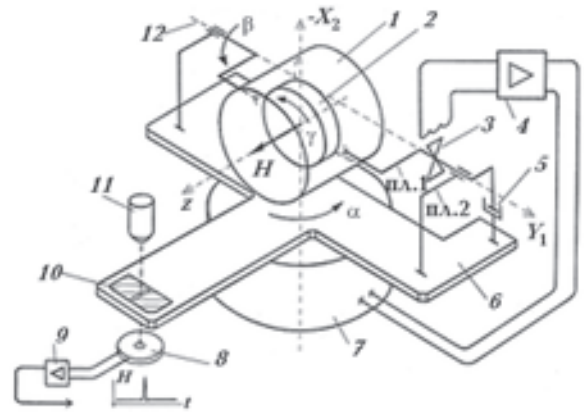


Рис. 5. Інтегрувальний гіроскопічний гравіметр.

**Балістичний лазерний гравіметр (БЛГ) з двовимірним відеозображенням** (рис. 6) [Безвесільна та ін., 2014]. 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 складається з трьох імпульсів напруги, кожен з яких зумовлений виникненням ЕРС у котушках. Часові затримки  $\hat{\tau}_1$ ,  $\hat{\tau}_2$ ,  $\hat{\tau}_3$  кожного з імпульсів відносно моменту початку руху пробного тіла 1 пропорційні абсолютному значенню ПСТ  $g$

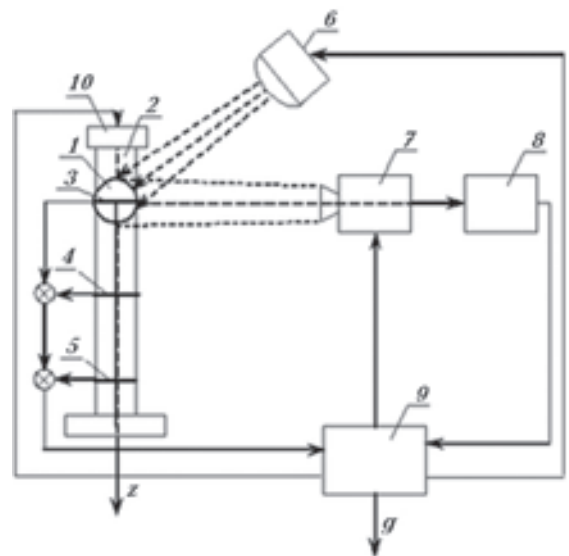


Рис. 6. Балістичний лазерний гравіметр (БЛГ) з двовимірним відеозображенням.

та відстаням  $x_1$ — $x_3$  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) [Безвесільна, Коваль, 2013]. Основними складовими елементами конструкції двогіроскопного гравіметра є датчик моментів 4, поплавок 5, що закріплений 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. Нерухома вісь гіромотора закріплена у планці 11 поплавка 5. Повздовжня вісь  $x$  підвісу поплавка 5 суміщена з поздовжньою віссю корпусу 1 приладу. Поплавок 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). 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.

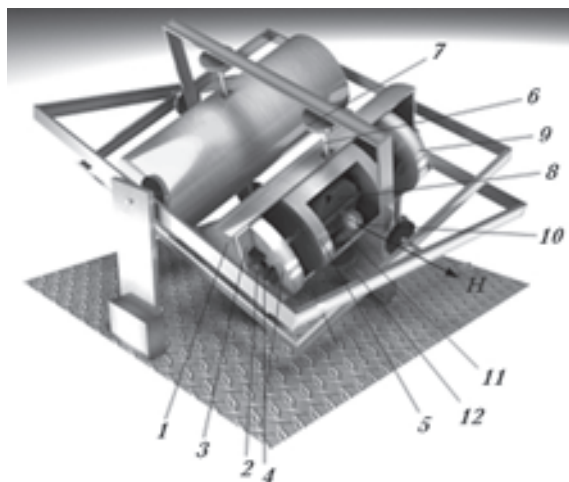


Рис. 7. Двогіроскопний гравіметр.

**П'єзоелектричний гравіметр (ПГ)** (рис. 8) [Пат. 99084, 2012]. Чутливий елемент ПГ складається із п'єзоелектричного елемента (ПЕ) 1, що працює на деформації стиснення—розтягання, 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 багатошаровою конструкцією (п'єзопакетом), що складається із шарів кристалічного ніобату літію.

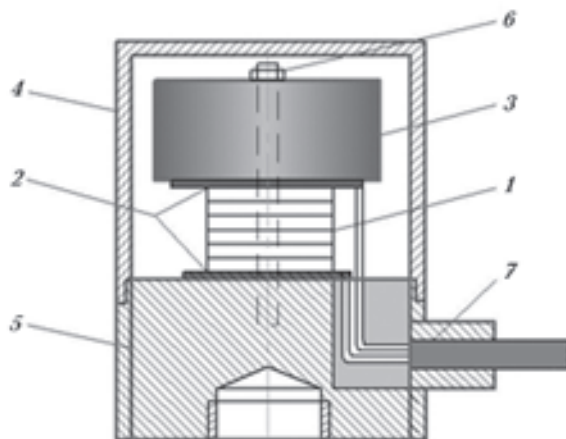


Рис. 8. Конструкція п'єзоелектричного гравіметра: 1 — п'єзоелектричний елемент, 2 — ізолятори, 3 — інерційна маса, 4 — основа, 5 — герметичний корпус, 6 — гвинт, 7 — вивідний кабель.

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'єзоефекту), який прямо пропорційний  $g$  [Безвесільна, Ткачук, 2013].

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)** [Пат. 105122, 2014]. 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 ізолятор із пружною мембраною, до якої прикріплена сейсмічна маса. Ці обкладки, 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. Унаслідок такого руху пружна мембрана починає згинатися, чим змінює зазор  $\delta$  між верхньою та нижньою металевими обкладками, розділеними діелектриком, а отже, і ємність  $C$ , яка обернено пропорційна прискоренню  $g_z$ .

Параметри чутливого елемента ЄГ підібрані так, що частота його власних коливань дорівнює найбільшій частоті гравітаційних прискорень, яка може бути виміряна на фоні завад. Іншими словами, чутливий елемент гравіметра виконує також функції фільтра низьких частот. Це ліквідує вплив на вихідні показання ЄГ похибок, частота яких більша за частоту власних коливань ЄГ, та підвищує точність вимірювання прискорення сили тяжіння.

**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. 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 ви-

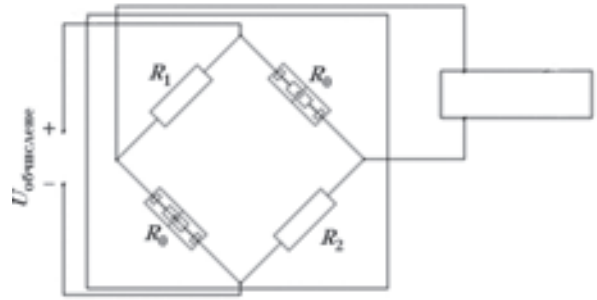


Рис. 9. Струнний гравіметр.

мірювань  $g$  у досліджуваному СГ порівняно із відомими [Безвесільна, Чепюк, 2013, 2015].

**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 завади вертикального прискорення. Ця частота дорівнює  $0,1 \text{ с}^{-1}$ . Тоді гравіметр виконує функції фільтра основних збурювальних віброприскорень, частота яких перевищує  $0,1 \text{ с}^{-1}$ .

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

Список літератури

- Безвесільна О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри. Житомир: ЖДТУ, 2007. 604 с.
- Безвесільна О. М., Коваль А. В. Двогіроскопний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи. Житомир: ЖДТУ, 2013. 252 с.
- Безвесільна О. М., Остапчук О. О., Тимчик Г. С. Автоматизований лазерний балістичний гравіметр. Житомир: ЖДТУ, 2014. 180 с.
- Безвесильная Е. Н., Ткачук А. Г. Авиационная гравиметрическая система. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2014. № 6. С. 32—37.
- Безвесільна О. М., Ткачук А. Г. П'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи. Житомир: ЖДТУ, 2013. 240 с.
- Безвесільна О. М., Чецюк Л. О. Струнний гравіметр авіаційної гравіметричної системи. *Вісник Інженерної академії України*. 2013. № 2. С. 26—30.
- Безвесільна О. М., Чецюк Л. О. Струнний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи. Житомир: ЖДТУ, 2015. 224 с.
- Веселов К. Е. Гравиметрическая разведка. Москва: Недра, 1968. 512 с.
- Пат. 88473 Україна. Двороторний інтегруючий гіроскопічний гравіметр з контрольованими параметрами. О. М. Безвесільна, О. О. Добжанський. Опубл. 26.10.2009, Бюл. № 20.
- Пат. 99084 Україна. П'єзогравіметр. О. М. Безвесільна, А. Г. Ткачук. Опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.
- 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.
- Попов Е. И. Определение силы тяжести на подвижном основании. Москва: Наука, 1987. 218 с.
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., 2014. Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter. *Aviation* (18), 134—140. doi:10.3846/16487788.2014.969878.
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., Chepyuk L. O., Ostapchuk O. O., 2013a. Angle measurement device for posting the sensitivity axis of aviation gravimeter. *Adv. Sci. J.* (12), 31—37.
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., Chepyuk L. O., Ostapchuk O. O., 2014. Electromechanical gravimeter. *Adv. Sci. J.* (7), 45—48, doi: 10.15550/ASJ.2014.07.045.
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., Kozko K. S., 2013b. System for airborne gravimetry. *Eur. Appl. Sci. J.* (5), 37—40.

## Modern gravimeters of aviation gravimetric system

© О. М. Bezvisilna, А. G. Tkachuk, L. O. Chepyuk, K. S. Kozko, 2015

The expediency of using aviation gravimetric systems for gravimetric measurements and receiving information about the Earth's gravitational field is proved. An analysis of existing gravimeters of aviation gravimetric systems is done, identified their strengths and weaknesses. Modern perspective developments in the area of designing a new type of aviation gravimeters with higher accuracy and speed than the known ones are considered.

**Key words:** sensor element, gravimeter, gravity acceleration, gravitational field of the Earth.

### References

- Bezvesilna O. M., 2007. Aviation gravimetric systems and gravimeters. Zhytomyr: ZSTU, 604 p. (in Ukrainian).
- Bezvesilna O. M., Koval A. V., 2013. Twogyro gravimeter of automated aviation gravimetric system. Zhytomyr: ZSTU, 252 p. (in Ukrainian).
- Bezvesilna O. M., Ostapchuk O. O., Tymchuk G. S., 2014. Automated laser ballistic gravimeter. Zhytomyr: ZSTU, 180 p. (in Ukrainian).
- Bezvesilnaya E. N., Tkachuk A. G., 2014. Aviation gravimetric system. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* (6), 32—37 (in Russian).
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., 2013. Piezoelectric gravimeter of aviation gravimetric system. Zhytomyr: ZSTU, 240 p. (in Ukrainian).
- Bezvesilna O. M., Chepyuk L. O., 2013. String gravimeter of aviation gravimetric system. *Visnyk Inzhenernoi akademii Ukrainy* (2), 26—30 (in Ukrainian).



- Bezvesilna O. M., Chepyuk L. O.*, 2015. String gravimeter of automated aviation gravimetric system. Zhytomyr: ZSTU, 224 p. (in Ukrainian).
- Veselov K. E.*, 1968. Gravimetric exploration. Moscow: Nedra, 512 p. (in Russian).
- Pat. 88473 Ukraine, 2009. Two rotary integrating gyro gravimeter with controlled parameters. O. M. Bezvesilna, O. O. Dobrzhanskiy. Published 26.10.2009. Bull. № 20 (in Ukrainian).
- Pat. 99084 Ukraine, 2012. Piezogravimeter. O. M. Bezvesilna, A. G. Tkachuk. Published 10.07.2012. Bull. № 13 (in Ukrainian).
- Pat. 105122 Ukraine, 2014. Aviation Gravimetric system for measuring the gravity anomalies. O. M. Bezvesilna, A. G. Tkachuk, K. S. Kozko. Published 10.04.2014. Bull. № 7 (in Ukrainian).
- Popov E. I.*, 1987. Determination of gravity on the moving base. Moscow: Nauka, 218 p. (in Russian).
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G.*, 2014. Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter. *Aviation* (18), 134—140. doi:10.3846/16487788.2014.969878.
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., Chepyuk L. O., Ostapchuk O. O.*, 2013a. Angle measurement device for posting the sensitivity axis of aviation gravimeter. *Adv. Sci. J.* (12), 31—37.
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., Chepyuk L. O., Ostapchuk O. O.*, 2014. Electromechanical gravimeter. *Adv. Sci. J.* (7), 45—48, doi: 10.15550/ASJ.2014.07.045.
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., Kozko K. S.*, 2013b. System for airborne gravimetry. *Eur. Appl. Sci. J.* (5), 37—40.