

БЕЗВЕСІЛЬНА Олена

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-6951-1242>e-mail: o.bezvesilna@gmail.com

ГРИНЕВИЧ Марія

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-9183-5211>e-mail: kakit_gms@ztu.edu.ua

ОСОБЛИВОСТІ ГРАВИМЕТРІВ У СУЧАСНИХ ГРАВИМЕТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

У роботі проведено огляд сучасних гравіметрів авіаційних гравіметричних систем, їх конструкції та принцип дії. Проаналізовано їх переваги та недоліки, особливості їх функціонування та обробку отриманих даних. Показано, що високоточні вимірювання гравітаційного прискорення (ГП) є надзвичайно актуальними і необхідні для багатьох галузей науки і техніки. Надано основні характеристики відомих авіаційних гравіметрів. Встановлено, що відомі авіаційні гравіметри мають недостатню на сьогоднішній день точність (2-10 мГал). Запропоновано новий трансформаторний гравіметр (ТГ). Під дією ГП якор ТГ рухається всередині магнітопроводу вниз і викликає зміну електромагнітного потоку. При дії зовнішнього електромагнітного потоку перешкоди, цей потік буде наводити дві ЕРС перешкоди у двох секціях, які включено послідовно-зустрічно. Сумарна дія цих похибок на вихідний сигнал нового гравіметра буде рівна нулю. Зустрічне з'єднання секцій забезпечує скасування похибок від впливу зовнішніх електромагнітних потоків, які можуть бути значними при встановленні гравіметра на такому рухомому об'єкті, як літак. Так само працює пристрій при дії основної перешкоди для авіаційних гравіметрів - вертикального прискорення, похибки від впливу якого скасовуються у ТГ. У ТГ скасовуються залишкові інструментальні похибки, оскільки вони будуть з протилежними знаками у двох вимірювальних каналах двох секцій вторинної обмотки, що з'єднані зустрічно. Показано, що новий ТГ має набагато кращі характеристики від відомих авіаційних гравіметрів: лінійність вихідної характеристики, більшу точність, потужний вихідний сигнал, надійність. Обґрунтовано, що новий ТГ має значно більшу точність, ніж відомі авіаційні гравіметри за рахунок скасування похибок від впливу вертикального прискорення, впливу зовнішніх електромагнітних полів, впливу залишкових інструментальних похибок.

Ключові слова: гравіметр, гравіметричні системи, авіація, прискорення сили тяжіння, гравітаційне поле Землі.

BEZVESILNA Olena

NTUU «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky»

GRYNEVYCH Mariia

State University «Zhytomyr Polytechnic»

FEATURES OF GRAVIMETERS IN MODERN GRAVIMETRIC SYSTEMS

The paper reviews modern gravimeters of aviation gravimetric systems, their design and principle of operation. Their advantages and disadvantages, features of their functioning and processing of the received data are analyzed. It is shown that high-precision measurements of gravitational acceleration (g) are extremely relevant and necessary for many fields of science and technology. The main characteristics of known aviation gravimeters are given. It has been established that known aviation gravimeters have insufficient accuracy (2-10 mGal). Under the action of the g , the armature moves down inside the magnetic circuit and causes a change in the electromagnetic flux. Under the action of an external electromagnetic flow of an obstacle, this flow will induce two EMF obstacles in two sections, which are included in series-opposite. The total effect of these errors on the output signal of the gravimeter-invention will be zero. The mutual connection of the sections provides cancellation of errors due to the influence of external electromagnetic flows, which can be significant when installing the gravimeter on such a moving object as an airplane. In the same way, the device works under the action of the main obstacle for aviation gravimeters of the vertical acceleration of the aircraft, the errors due to the influence of which are cancelled in the TG. In TG, the residual instrumental errors are cancelled, since they will have opposite signs in the two measuring channels of the two sections of the secondary winding, which are connected oppositely. It is shown that the new TG has significantly greater accuracy than known aviation gravimeters due to the cancellation of errors due to the effects of vertical acceleration of the aircraft, external electromagnetic fields, and residual instrumental errors. It is substantiated that the new TG has significantly greater accuracy than known aviation gravimeters due to the cancellation of errors due to the influence of the vertical acceleration of the aircraft, the influence of external electromagnetic fields, and the influence of residual instrumental errors.

Key words: gravimeter, gravimetric systems, aviation, gravitational acceleration, Earth's gravitational field.

Постановка проблеми

Гравіметрія, як наука, чудово зарекомендувала себе для визначення розподілу корисних копалин, що є необхідним для ряду таких галузей науки і техніки, як геофізика, геологія та ін. Аналіз як часових, так і просторових коливань гравітаційного поля дозволив охарактеризувати такі геофізичні явища, як зміни маси льоду (що актуально у зв'язку з таненням льодовиків на поверхні Землі), моніторинг вулканів і підземних водних ресурсів, дослідження опускання ґрунту у низинних районах, моніторинг геотермальних резервуарів і виявлення підземних порожнин та ін. [1, 3–6, 8–11].

Основною задачею гравіметрії є дослідження гравітаційного прискорення (ГП) Землі. Гравітаційне прискорення Землі g змінюється приблизно від $9,78 \text{ мс}^{-2}$ до $9,83 \text{ мс}^{-2}$ по всій поверхні Землі. Добові коливання, викликані деформаціями планети та припливами, становить у середньому $10^{-7} g$. Варіації g досліджуються науками про Землю та спеціальними приладами, гравіметрами. Відомі наземні, підводні,

надводні та авіаційні гравіметри. Перевагами авіаційних гравіметрів є наступні: вони дозволяють вимірювати g у важкодоступних районах Землі (гірські масиви, зони екватору, полюсів Землі), мають значно більшу швидкодію при задовільній точності). Тому у наступному будемо аналізувати саме авіаційні гравіметричні вимірювання.

Серед авіаційних гравіметрів найбільш відомі [1, 6] струнні ГАЛ-С точність 1-8 мГал, гіроскопічні одноканальні – 1 мГал, гіроскопічні двоканальні 0,5 мГал, нові двоканальні струнний тензометричний, п'єзоелектричний, ємнісний МЕМС - 0,5 мГал (1 мГал = $1 \cdot 10^{-5} \text{ мс}^{-2}$). Ці гравіметри мають як свої переваги, так і недоліки. Розглянемо це більш детально.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розвиток гравіметрії складається із таких основних етапів вимірювання: на нерухомій основі, на підводному та надводному човнах і на літальному апараті (ЛА) [1–11]. Із останніх публікацій по авіаційній гравіметрії [1–11 та ін.] видно, що найбільш ефективними є авіаційні гравіметричні вимірювання, серед яких найбільш відомі вимірювання із струнними, п'єзоелектричними, гіроскопічними, ємнісними МЕМС гравіметрами, точність яких сьогодні недостатня 2–10 мГал.

Метою даної статті є аналітичний огляд літератури у галузі авіаційної гравіметрії, складання порівняльної характеристики існуючих гравіметрів АГС з визначенням їх переваг та недоліків та обґрунтування необхідності використання нового більш точного трансформаторного гравіметра.

Викладення основного матеріалу статті

В останні десятиліття гравіметричні дослідження здійснюються переважно на підводних та надводних судах. Успішні вимірювання гравіметрів у морських умовах спричинили наступне завдання – дослідити можливість проведення гравіметричних вимірювань на борту ЛА.

Вимірювання ГП на борту ЛА є більш складним завданням, аніж на кораблі. Суттєвою є ж відмінність, яка полягає у наявності небажаних вертикальних прискорень у аерогравіметричних вимірюваннях. Якщо для морських гравіметричних вимірювань точність близько 1 мГал реально досяжна, то для повітряних вимірювань указана точність поки що є проблематичною. Перші спроби визначення ПСТ на борту ЛА були здійснені у СРСР і США у 1956–1960 рр. за допомогою морських модифікованих гравіметрів. Уже з 60-х років вже починаються розробки гравіметрів для вимірювання ГП безпосередньо на борту ЛА.

В основі сучасних методів вимірювання ГП лежить використання наступних закономірностей:

1. Залежність від g шляху, пройденого вільно падаючим тілом. Метод спостережень падаючого тіла називається балістичним, або методом вільного падіння;

2. Зв'язок періоду власних коливань маятника постійної довжини з величиною g . На цьому зв'язку оснований маятниковий метод вимірювання;

3. Залежність від g частоти коливань струни, на нижньому кінці якої закріплені вантаж. Заснований на цьому принципі прилад називається струнним гравіметром.

Ці методи передбачають спостереження руху тіла. Тому вони називаються динамічними;

4. Зміна положення рівноваги у пружинних вагах, на яких розташовується вантаж незмінної маси. При зміні g виникає додаткова деформація пружного елемента (пружини або крутильної нитки), пропорційна g . Цю деформацію вимірюють. Цей метод вимірювань називають статичним, а прилади – статичними гравіметрами.

Існують також абсолютні і відносні вимірювання g . При абсолютних вимірюваннях визначають повну величину ГП у точці спостереження. У цьому випадку, окрім часу вимірюють лінійні відстані, наприклад, довжину маятника або шлях, пройдений вільно падаючим тілом. При відносних вимірюваннях визначають не повне значення ПСТ у даному пункті, а приріст (різницю) ГП у даній точці спостереження відносно деякого іншого, вихідного, значення g у якому, звичайно, відоме.

Динамічні методи вимірювання g можуть бути і абсолютними, і відносними, статичні тільки відносними.

На літаках для вимірювання ГП встановлюють автоматизовану авіаційну гравіметричну систему (АГС), чутливим елементом якої є гравіметр.

Ефективність роботи АГС, значною мірою, забезпечується вибором чутливого елемента системи – гравіметра. На сьогоднішній день існує декілька типів гравіметрів АГС, які мають як свої переваги, так і недоліки. Розробками нових моделей гравіметрів АГС та підвищенням їх точності займаються провідні технічні університети США, Японії, Німеччини та інших країн світу. Розглянемо основні різновиди авіаційних гравіметрів.

Кварцові гравіметри типу ГАЛ-С. Для літакових вимірювань у СНД використовувались гравіметри, розроблені в Аерогравіметричній лабораторії під керівництвом Є.І. Попова в Інституті Фізики Землі Російської академії наук, які отримали шифр ГАЛ-С. В основу перших моделей цих гравіметрів була покладена схема кварцового гравіметра, запропонована у 1949 р. С.Є. Александровим. Саме у цьому приладі вперше була використана подвоєна крутильна пружна система з кварцового скла. Однак, остаточна думка про перспективність використання подібних пружних систем, як чутливого елемента для вимірювань гравітаційних аномалій Δg на літаку склалася після теоретичного обґрунтування способу К.Є. Веселовим та успішних експериментів, проведених Л.П. Смирновим із макетом сильно демпфуючого гравіметра. Дослідження 1989–1997 рр. показали, що АГС на основі ГАЛ-С має недостатню точність 8 мГал [2–4].

Гравіметр Ла-Косте-Ромберга (L-R-S) (розроблений Інститутом геофізики США під керівництвом Ла-Коста та Ромберга у 1959 р.), модифікований на основі морського гравіметра. В основу принципу дії гравіметра покладена ідея вертикального сейсмографа Голіцина. На тонкій горизонтальній нитці, яка є віссю обертання, закріплений горизонтально розташований важіль із тягарем на кінці. При зміні g маятник із тягарем відхиляється від горизонтального положення, розтягуючи головну пружину і закручуючи нитку підвісу до тих пір, поки момент сили тяжіння не буде врівноважений моментом головної пружини і моментом закручування осей підвісу (рис. 1) [3, 5, 7–9]. АГС на основі цього гравіметра має недостатню точність 10 мГал [2–4].

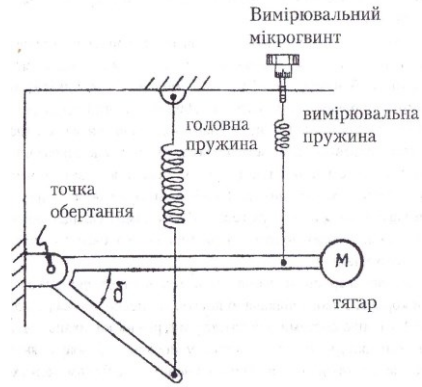


Рис. 1. Гравіметр Ла-Косте-Ромберга [3, 5, 7–9]

Найвідоміший **струнний гравіметр** – це гравіметр ГСД-М (рис. 2), який створений в 1960-х рр. під керівництвом А.М. Лозинської. Подальші дослідження очолював В.О. Багрянц у Всесоюзному науково-дослідному інституті геофізики.

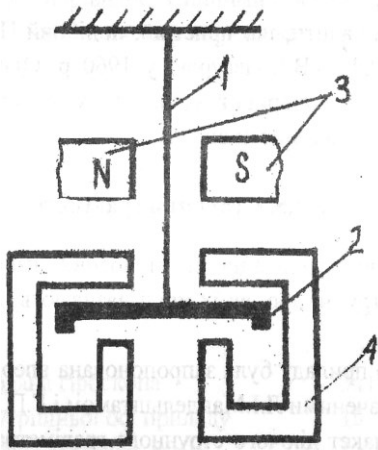


Рис. 2. Струнний гравіметр ГСД-М [3, 5, 7–11]: 1 - струна, 2 - маса, 3 - магніт, 4 - демпферний магніт

Принцип дії струнних гравіметрів оснований на властивості струни змінювати частоту власних коливань при зміні її натягу. Тобто вимірювання ГП зводиться до вимірювання частоти коливання струни.

Вимірювання ГП на базі ГСД-М показали точність у межах 8мГал, що недостатньо.

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 (рис. 3).

Комплекс пройшов випробування на вертольотах Мі-8, Ка-32 і на літаках Ан-30, Ан-12. Вертолітні зйомки над морем показали точність 6-5 мГал [3, 5, 7–9], що недостатньо на сьогоднішній день.

Перевагами струнних гравіметрів є малість сталої часу, що важливо при вимірюваннях прискорення ГП на літаку; майже необмежений діапазон вимірювання вхідних величин без перебудови приладу; частотно-модульований вихідний сигнал. Серед недоліків – можливість виникнення великих системних похибок, схильність до резонансів, невраховані похибки при деяких частотах вібрації.

Відомі на сьогоднішній день гіроскопічні гравіметри, що містять гіроскопічний маятник, зв’язаний з рамою за допомогою горизонтального осьового підвісу, перпендикулярного осі обертання гіроскопа, є одними із найточніших гравіметрів АГС.

Гравіметри типу RIGA, розроблені Массачусетським технологічним інститутом, мають відносно високу чутливість та використовуються, як гравіметри АГС та акселерометри систем навігації (точність 3 мГал). Однак, такий гравіметр має одну вісь чутливості, паралельну осі обертання гіроскопа щодо платформи, і вимірює проекцію гравітаційного прискорення 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 обумовлює появу інструментальних похибок RIGA [3, 5, 7–9].

На кафедрі приладобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського під керівництвом Безвесільної О.М. розроблено та досліджено гіроскопічні гравіметри одноканальні (1 мГал) та двоканальні нових типів (0,5 мГал) (ДНГ, ПЛУ), точність яких в умовах вимірювання на борту ЛА складає 2 мГал [1, 6].

Як показує наведений огляд літератури по відомим типам авіаційних гравіметрів, всі вони мають недостатню точність 2–10 мГал. Сьогодні вона має бути до 0,5 мГал. Це спонукає до пошуку та дослідження



Рис. 3. Гравіметричний комплекс “ГРАВІТОН-М” [3, 5, 7–9]

нових більш перспективних типів авіаційних гравіметрів. Таким є запропонований новий трансформаторний гравіметр (ТГ) [12].

Трансформаторний гравіметр

Розглянуті узагальнені недоліки існуючих гравіметрів АГС повністю або частково усуваються за рахунок того, що у якості гравіметра АГС застосовується трансформаторний гравіметр.

Чутливий елемент ТГ автоматизованої АГС складається із трансформаторного перетворювача (ТрП), що працює на основі закону електромагнітної індукції. ТрП мають значні переваги перед іншими типами перетворювачів (струнними, п'єзоелектричними та ін.): лінійність вихідної характеристики, більшу точність, потужний вихідний сигнал, надійність [12]. Під дією ГП якір рухається всередині магнітопроводу вниз і викликає зміну електромагнітного потоку.

При дії зовнішнього електромагнітного потоку перешкоди, цей потік буде наводити дві ЕРС перешкоди у двох секціях, які включено послідовно-зустрічно. Сумарна дія цих похибок на вихідний сигнал трансформаторного гравіметра буде рівна нулю. Тобто, таке зустрічне з'єднання секцій забезпечує скасування похибок від впливу зовнішніх електромагнітних потоків, які можуть бути значними при встановленні гравіметра на такому рухомому об'єкті, як літак. Так само працює пристрій при дії основної перешкоди для авіаційних гравіметрів вертикального прискорення ЛА, похибки від впливу якого скасовуються у ТГ. У ТГ скасовуються залишкові інструментальні похибки, оскільки вони будуть з протилежними знаками у двох вимірвальних каналах двох секцій вторинної обмотки, що з'єднані зустрічно.

Відмінність ж нового трансформаторного гравіметра полягає у тому, що дві секції вторинної обмотки з'єднані послідовно-зустрічно, а рухомий якір з'єднано з двигуном, який щосекунди послідовно опускає якір вниз та вгору по магнітопроводу, при чому двигуном керує пристрій перемикачів, який підключено до джерела напруги управління, а вихідний сигнал з вторинної вихідної обмотки подається на вхід пристрою обчислення вихідного сигналу, на виході якого сигнал, що пропорційний подвоєному значенню ГП та не має у своєму складі похибок від впливу вертикального прискорення ЛА, залишкових інструментальних похибок, залишкових похибок від проєкцій горизонтальних перехресних прискорень та похибок, спричинених впливом зовнішніх електромагнітних потоків, щоб забезпечити підвищення точності вимірювань ГП g до 0,5 мГал [12].

Таким чином, показано, що новий ТГ має значно більшу точність, ніж відомі авіаційні гравіметри за рахунок скасування похибок від впливу основної перешкоди вертикального прискорення ЛА (воно у 10^5 разів перевищує корисний сигнал ГП) [1, 6], впливу зовнішніх електромагнітних полів (вони значні на ЛА), впливу залишкових інструментальних похибок.

Висновки

Показано, що високоточні вимірювання гравітаційного прискорення є надзвичайно актуальними і необхідні для багатьох галузей науки і техніки.

Надано основні характеристики відомих авіаційних гравіметрів. Встановлено, що відомі авіаційні гравіметри мають недостатню на сьогоднішній день точність (2–10 мГал).

Обґрунтовано, що новий ТГ має значно більшу точність, ніж відомі авіаційні гравіметри за рахунок скасування похибок від впливу вертикального прискорення ЛА, впливу зовнішніх електромагнітних полів, впливу залишкових інструментальних похибок.

Перспективами подальших досліджень у даному напрямку є визначення отримання та дослідження математичної моделі ТГ, основних похибок ТГ, моделювання поведінки ТГ при можливих резонансних режимах на ЛА.

Література

1. Безвесільна О. М. Вимірювання прискорень / О. М. Безвесільна. – К. : Либідь, 2001. – 261 с.
2. Попов Е. И. Определение силы тяжести на подвижном основании / Е. И. Попов. – М. : Наука, 1987. – 218 с.
3. Веселов К. Е. Гравиметрическая разведка / К. Е. Веселов. – М. : Недра, 1986. – 512 с.
4. Веселов К. Е. Гравиметрическая съемка / К. Е. Веселов. – М. : Недра, 1986. – 311 с.
5. Огородова Л. В. Гравиметрия / Л. В. Огородова. – М. : Недра, 1978. – 325 с.
6. Безвесільна О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри : монографія / О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.
7. Пушина Л. З. Измерения с гравиметром на самолете в США / Л. З. Пушина // Геодезия и аэрофотосъемка. – М., 1962. – № 1. – С. 123–130.
8. Нетлтон Л. Испытание аэрогравиметра / Л. Нетлтон, Л. ЛаКост, Дж. Харрисон // Геодезическая серия. – М., 1961. – Вып. 12. – С. 25–29.
9. Wei M., Schwarz K. Flight test results from a strapdown airborne gravity system. Journal of Geodesy. 1998. Vol. 72. P. 323–332.
10. Лозинская А. М. Аэрогравиметрическая аппаратура на базе струнных датчиков / А. М. Лозинская, З. И. Фомина, И. Л. Яшаев // Прикладная геофизика. – М., 1973. – С. 175–186.

11. Лозинская А. М. Измерение силы тяжести на борту самолета / А. М. Лозинская. – М. : ВИАМС, 1978. – 70 с.

12. Патент на корисну модель № 142824 від 25.06.20. Трансформаторний гравіметр. Бюл. № 12 по заявці № у 2020 00884. Безвесільна О.М., Ткачук А.Г. Дата подання заявки 12.02.2020. G01V 7/00. <http://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/7690/142824.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

References

1. Bezvesilna O. M. Measurement of accelerations. K.: Lybid, 2001. 261 p.
2. Popov E. I. Determination of gravity on a movable base. Moscow: Nauka, 1987. 218 p.
3. Veselov K. E. Gravimetric reconnaissance. M.: Nedra, 1986. 512 p.
4. Veselov K. E. Gravimetric surveying. M.: Nedra, 1986. 311 p.
5. Ogorodova L. V. Gravimetry. M.: Nedra, 1978. 325 p.
6. Bezvesilna O. M. Aviation gravimetric systems and gravimeters: monograph. Zhytomyr: Zhdtu, 2007. 604 p.
7. Pushchyna L. Z. Measurements with a gravimeter on an airplane in the USA. Geodesy and aerial photography. M., 1962. No. 1. P. 123–130.
8. Nettleton L., LaCoste L., Harrison J. Aerogravimeter test. Geodetic series. M., 1961. Vol. 12. p. 25–29.
9. Wei M., Schwarz K. Flight test results from a strapdown airborne gravity system. Journal of Geodesy. 1998. Vol. 72. P. 323–332.
10. Lozinskaya A. M., Fomina Z. I., Yashaev I. L. Aerogravimetric apparatus based on string sensors. Applied geophysics. M., 1973. P. 175–186.
11. Lozinskaya A. M. Measurement of gravity on board an airplane. M.: VIEMS, 1978. 70 p.
12. Bezvesilna O.M., Tkachuk A.H. Transformer gravimeter. Utility model patent No. 142824 dated 06/25/20. Bull. No. 12 for application No. u 2020 00884. Application submission date 12.02.2020. G01V 7/00. <http://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/7690/142824.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.