

УДК 621.317

О. М. Безвесільна¹, д.т.н., **Л. В. Коломієць²**, д.т.н., **М. С. Гриневич³**, **Т. О. Толочко⁴**¹Національний технічний університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ²Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса³Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир⁴Національний технічний університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ

АВІАЦІЙНА ГРАВІМЕТРИЧНА СИСТЕМА З ТРАНСФОРМАТОРНИМ ГРАВІМЕТРОМ

Показано актуальність авіаційних гравіметричних вимірювань. Визначено переваги та недоліки відомих гравіметрів. Метою роботи є висвітлення методів та засобів підвищення точності та швидкодії авіаційної гравіметричної системи. Показано доцільність використання методу двоканальності для побудови гравіметра, адже цей метод дозволяє компенсувати залишкові інструментальні похибки. Обґрунтовано важливість врахування поправки від впливу кутової швидкості обертання Землі. Для її врахування необхідно обов'язкове введення відповідної поправки у рівняння руху авіаційної гравіметричної системи. Обґрунтовано, що використання нового двоканального трансформаторного гравіметра забезпечує необхідне підвищення точності. Проаналізовано методичні та інструментальні похибки системи. Сформульовано точнісні вимоги до компонентів вимірювальної системи.

Ключові слова: гравіметр, прискорення сили тяжіння, гравітаційне поле Землі, авіаційна гравіметрична система, трансформаторний гравіметр.

Olena Bezvesilna, DSc, Leonid Kolomiets, DSc, Mariia Hrynevych, Tetiana Tolochko

AVIATION GRAVIMETRIC SYSTEM WITH TRANSFORMER GRAVIMETER

The relevance of aviation gravimetric measurements is shown. Advantages and disadvantages of known gravimeters are determined. The purpose of the work is to highlight the methods and means of increasing the accuracy and speed of the aviation gravimetric system. Tasks of the article: to provide the equations of motion and a list of the main components of the system; justify the choice of the natural frequency of the gravimeter oscillations; show the expediency of using the two-channel method to build a gravimeter; conduct an analysis of methodical errors; show the importance of taking into account the correction due to the influence of the angular velocity of the Earth's rotation; to propose and investigate a new transformer gravimeter of greater accuracy than the known ones.

The equations of motion and a list of the main components of the aviation gravimetric system are given. It is substantiated that the selection of the gravimeter's own frequency equal to 0.1 s^{-1} ensures the absence of the influence of the largest disturbances (vertical acceleration and other accelerations whose frequency is greater than 0.1 s^{-1}) on the operation of the gravimeter and the absence of the need to use additional electronic filters. The expediency of using the two-channel method for the construction of a gravimeter is shown, because this method allows you to compensate for residual instrumental errors. Methodological errors of the measuring system were analyzed. The importance of taking into account the correction due to the influence of the angular velocity of the Earth's rotation is substantiated. To take it into account, it is necessary to make a corresponding correction in the equation of motion of the aviation gravimetric system. The final equation of the measuring system with this correction was obtained. It is substantiated that the use of a new two-channel transformer gravimeter provides the necessary increase in accuracy. The methodical and instrumental errors of the system were analyzed. The accuracy requirements for the components of the measuring system are formulated.

Keywords: gravimeter, gravitational acceleration, Earth's gravitational field, aviation gravimetric system, transformer gravimeter.

DOI 10.32684/2412-5288-2022-1-20-17-28

Вступ

Дослідження гравітаційного поля Землі є важливою науковою проблемою. Інформація щодо гравітаційного поля Землі необхідна у геодезії, геофізиці для розвідки корисних копалин; сейсмології для прогнозування землетрусів та цунамі; авіаційній і космічній техніці для корекції систем інерціальної навігації аерокосмічних об'єктів; в оборонній галузі для корекції систем керування та стабілізації легких броньованих машин [1].

Сьогодні найбільш актуальними є вимірювання параметрів гравітаційного поля Землі на літальному апараті (ЛА). Вони дозволяють здійснювати вимірювання гравітаційних аномалій Δg у таких важкодоступних районах Землі, як зони гірських масивів, полюсів Землі, екватору – дешевше та зі значно більшою швидкістю, ніж наземні чи морські вимірювання. Для цих цілей, зазвичай, використовують авіаційні гравіметричні системи (АГС), чутливим елементом яких є гравіметр. Дані про гравітаційні аномалії Δg або гравітаційне прискорення g , введені у пам'ять бортового комп'ютера (БК) АГС, суттєво сприятимуть підвищенню як точності визначення навігаційних параметрів рухомих об'єктів, так і ефективності гравіметричної розвідки. Тому проведення високоточних авіаційних гравіметричних вимірювань високої швидкодії є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сьогодні існує багато видів гравіметрів АГС: кварцовий [2], струнний гравіметр [3], магнітний [4, 5], мобільний гравіметр [6], пружинний [7], робота яких заснована на різних фізичних явищах [1]. Вони мають свої переваги і недоліки. Майже всі відомі гравіметри мають значні похибки від впливу вертикального прискорення ЛА [8-10], які у 10^3 разів перевищують корисний сигнал Δg . Відомі авіаційні гравіметри дещо ускладнені необхідністю використовувати допоміжні системи (зокрема, систему глобального позиціонування (GPS)) [11]. Вони потребують періодичного калібрування й налаштування [12], що значно ускладнює роботу і займає багато часу. Відомі сучасні гравіметри (гравіметричні системи) належать до наземних, надводних та підводних [13-15] методів вимірювання, які не застосовуються у авіаційній гравіметрії.

Аналізу та дослідженню деяких сучасних різновидів гравіметрів присвячено наступні праці: по гіроскопічним одноканальним та двоканальним гравіметрам [16], по п'єзoeлектричним одноканальним та двоканальним гравіметрам [17, 18], по струнним гравімет-

рам [19, 20], по ємнісним одноканальним та двоканальним гравіметрам [21, 22].

Однак, у літературі з авіаційної гравіметрії [2, 23, 24] надано відомості щодо окремих типів гравіметрів і не висвітлено методи та засоби підвищення точності та швидкодії АГС.

Мета та задачі дослідження

Метою роботи є висвітлення методів та засобів підвищення точності та швидкодії АГС.

Для досягнення сформульованої мети були поставлені наступні задачі:

- навести рівняння руху та перелік основних компонентів АГС;
- обґрунтувати вибір власної частоти коливань гравіметра АГС;
- показати доцільність використання методу двоканальності для побудови гравіметра АГС;
- провести аналіз методичних похибок;
- показати важливість врахування поправки від впливу кутової швидкості обертання Землі;
- запропонувати та дослідити новий трансформаторний гравіметр більшої точності від відомих.

Виклад основного матеріалу

Рівняння руху та перелік основних компонентів АГС

Надамо схему та основні компоненти авіаційної гравіметричної системи, у складі якої розміщено гравіметр [1].

Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння Δg містить (рис. 1): систему визначення навігаційних параметрів 1; вимірювач 2 висоти; встановлений на двовісній стабілізованій платформі гравіметр 3; БК 4.

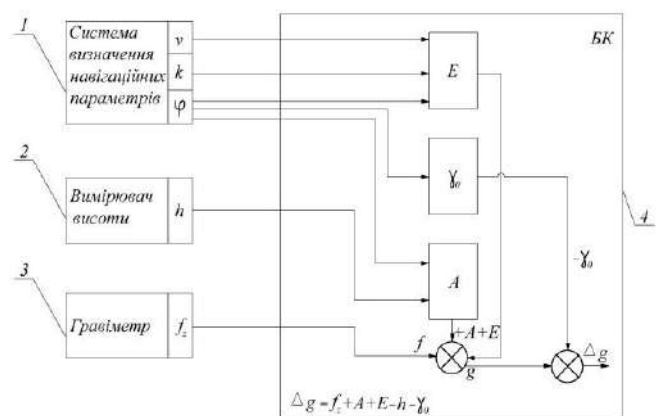


Рисунок 1 – Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння:

- 1 – система визначення навігаційних параметрів; 2 – вимірювач висоти; 3 – гравіметр; 4 – БК [1]

В [1] отримано рівняння руху АГС з будь-яким типом гравіметра:

$$f_z = g_z - \frac{v^2}{r} + 2e \frac{v^2}{r} \left[1 - 2 \cos^2 \varphi \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] - \\ - 2\omega_3 v \cos \varphi \sin k + 2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi - \\ - 2 \frac{\gamma_0 h}{r} - \omega_3^2 h \cos^2 \varphi + \ddot{h}, \quad (1)$$

де f_z – вихідний сигнал гравіметра; g_z – прискорення сили тяжіння (ПСТ) вздовж осі чутливості гравіметра; v – швидкість ЛА; r – радіус місцезнаходження ЛА; e – стиск еліпсоїда Землі; φ – географічна широта; k – курс ЛА; ω_3 – кутова швидкість обертання Землі; h – висота ЛА над еліпсоїдом; $\dot{h}$ – вертикальна швидкість ЛА; $\ddot{h}$ – вертикальне прискорення ЛА; γ_0 – довідкове значення ПСТ.

У рівнянні (1) g_z – корисний сигнал, всі інші сигнали – перешкоди, які потрібно враховувати чи усувати.

Представимо рівняння (1) у вигляді:

$$g_z = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[1 - \cos^2 \varphi \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + \\ + 2\omega_3 v \cos \varphi \sin k - 2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi + \\ + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \ddot{h}. \quad (2)$$

Оскільки аномалія прискорення сили тяжіння дорівнює різниці ПСТ вздовж осі чутливості гравіметра та довідкового значення прискорення сили тяжіння, то отримаємо [1]:

$$\Delta g = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[1 - 2 \cos^2 \varphi \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + \\ + 2\omega_3 v \cos \varphi \sin k - \\ - \frac{m}{k_2} \left(\frac{k(t_2) - k(t_1)}{t_2 - t_1} + \omega_3 \sin \bar{\varphi} + \frac{\lambda(t_2) - \lambda(t_1)}{t_2 - t_1} \sin \bar{\varphi} \right) - \\ - 2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \gamma_0. \quad (3)$$

Перепишемо (3) у вигляді [1]:

$$\Delta g = f_z + E + A - \ddot{h} - \gamma_0, \quad (4)$$

де f_z – вихідний сигнал гравіметра АГС;

$$E = \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[1 - \cos^2 \varphi \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} - \\ + 2\omega_3 v \cos \varphi \sin k - 2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi$$

поправка Етвеша [1] має додатковий член $\omega_3^2 h \cos^2 \varphi$, вплив якого складає більше 1 мГал і який потрібно враховувати при вимірюваннях ПСТ з точністю до 1 мГал;

$$A = 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \text{поправка за висоту [1]}$$

має додатковий член $2\dot{h} e^{-1} v \cos k \sin 2\varphi$, вплив якого складає більше 1 мГал і який потрібно враховувати при вимірюваннях ПСТ з точністю до 1 мГал;

$\gamma_0 = \gamma_{0e} (1 + 0,0052884 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi)$ – довідкове значення ПСТ (формула Кассініса) [24]; $\dot{h}$ – вертикальне прискорення ЛА [1]; $\gamma_{0e} = 9,78049 \text{ м/с}^2$ – довідкове значення ПСТ (екваторіальне) [25].

У відомих гравіметрах [2-7 та ін.] додаткові складові в поправках Етвеша та за висоту не враховуються, що знижує точність гравітаційних вимірювань.

З рівняння руху (3) видно, що АГС має складатися із наступних компонентів:

- гравіметра для вимірювання ПСТ;
- системи стабілізації осі чутливості гравіметра у стан вертикалі;
- системи навігації для визначення навігаційних параметрів місця знаходження ЛА;
- вимірювача висоти;
- бортового комп'ютера БК для здійснення обчислювальних операцій згідно алгоритму (3) або (4) [1].

Вибір власної частоти коливань гравіметра

Основні похибки відомих гравіметрів викликані тим, що гравіметр вимірює проекцію сукупності сигналів на вісь чутливості: корисного сигналу ПСТ та сигналу перешкоди, який викликаний, в основному, вертикальним прискоренням, що перевищує корисний сигнал ПСТ у 10^3 [1, 26].

Необхідно вирішити проблему фільтрації вихідного сигналу гравіметра автоматизованої АГС.

Вихідний сигнал гравіметра АГС після обчислення і введення поправок E , A , γ_0 в (4) можна записати у вигляді:

$$T = f_z = g_z + \ddot{h}, \quad (5)$$

де $\ddot{h}$ – похибка від впливу вертикального прискорення ЛА.

У відомих гравіметрів, як правило, використовують низькочастотні фільтри для фільтрації $\ddot{h}$. Наявність фільтра низьких частот у складі гравіметра суттєво зменшує надійність гравіметра та його точність [1, 27]. З часом робота електронних компонентів фільтра стає нестабільною: фільтр буде пропускати завади на вихід гравіметра або не пропускати частину корисного сигналу.

Пропонується інший підхід.

Аналітичні вирази спектральних щільностей корисного сигналу ПСТ $G_{Ag}(\omega)$ та основної перешкоди вертикального прискорення ЛА $G_h(\omega)$ та їх графіки (рис. 2) отримано у роботі [1].

Із рис. 2 видно, що графіки спектральних щільностей корисного сигналу ПСТ та основної перешкоди перетинаються в одній точці $\omega = 0,1$ рад/с. Запропоновано спосіб фільтрації вихідного сигналу гравіметра шляхом обрання частоти власних коливань гравіметра $0,1$ рад/с, що дорівнює частоті перетину двох графіків на рис. 2.

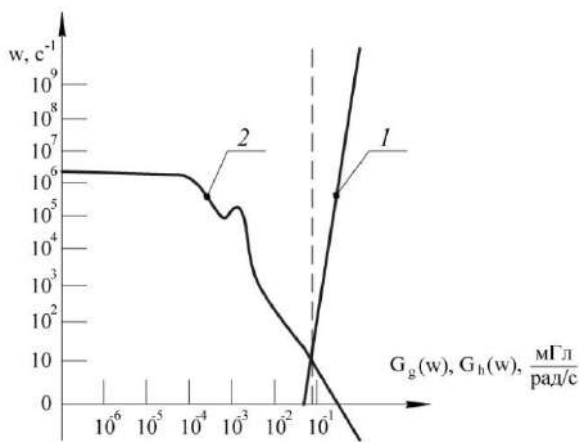


Рисунок 2 – Залежності від частоти:
1 – спектральної щільності вертикального прискорення ЛА, 2 – спектральної щільності корисного сигналу ПСТ [1]

За допомогою низькочастотної фільтрації з частотою зрізу $0,1$ рад/с, можна відокремлювати ПСТ g від вертикального прискорення $\ddot{h}$ із точністю 1 мГал. У вихідному сигналі гравіметра усуваються й такі збурення, переважна частота яких більша за $0,1$ рад/с:

– поступальні віброприскорення (переважна частота яких 3140 рад/с);

– кутові віброприскорення (переважна частота яких понад $0,1$ рад/с) [1].

Отже, обираємо частоту власних коливань гравіметра $0,1$ с⁻¹.

У результаті отримуємо вихідний сигнал T' гравіметра, який містить лише корисний сигнал ПСТ. У ньому відсутні вказані вище похибки, переважна частота яких більша за $0,1$ рад/с [1].

Рівняння руху АГС із гравіметром для визначення Δg буде [1]:

$$\Delta g = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[1 - 2 \cos^2 \varphi \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v \cos \varphi \sin k - 2\ddot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi + 2\frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \gamma_0. \quad (6)$$

У рівнянні (6), на відміну від відомих робіт, відсутній вплив вертикального прискорення $\ddot{h}$.

Вибір власної частоти гравіметра рівною $0,1$ с⁻¹ забезпечує відсутність впливу вертикального прискорення на роботу гравіметра АГС і відсутність необхідності використання додаткових електронних фільтрів.

Також запропоновано вирішення проблеми фільтрації впливу вертикального прискорення на вихідні покази шляхом використання двоканального методу вимірювання.

Використання методу двоканальності для побудови гравіметра АГС

При побудові гравіметра будь-якого типу доцільно використовувати метод двоканальності (метод інваріантності), який дозволяє скасувати ряд суттєвих похибок:

– від впливу вертикального прискорення;
– інструментальні похибки від впливу залишкової неідентичності конструкцій чутливих елементів;

– інструментальні похибки від впливу змін температур, вологості, тиску навколишнього середовища та інших факторів.

Розглянемо узагальнену схему побудови двоканального гравіметра (рис. 3).

На інерційну масу M діє прискорення сили тяжіння g , вертикальне прискорення $\ddot{h}$ літака та сумарні інструментальні похибки Δi зазначені вище. Чутливі елементи розташовані так, що вертикальні прискорення в них діють зустрічно. Більш детально спосіб розташування двох однакових чутливих елементів висвітлено (залежно від типу гравіметра) у: струнному [20], ємнісному, двоканальному МЕМС ємнісному [21].

Рівняння сил уздовж осі O_z чутливості двоканального гравіметра, спрямованої уздовж географічної вертикалі, буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} f_z = f_1 + f_2 = mg + m\Delta\ddot{h} + \Delta i \\ + mg - m\Delta\ddot{h} - \Delta i = 2mg, \end{aligned} \quad (7)$$

де f_1 – вихідний сигнал з чутливого елемента 1; f_2 – вихідний сигнал з чутливого елемента 2; f_z – вихідний сигнал двоканального гравіметра; m – вага інерційної маси M .

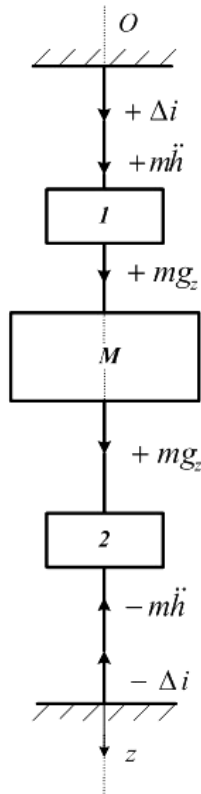


Рисунок 3 – Узагальнена схема побудови двоканального гравіметра: 1, 2 – чутливі елементи двоканального гравіметра, M – інерційна маса [19, 21]

З рівняння (7) видно, що вихідний сигнал двоканального гравіметра містить подвоєне значення корисного сигналу ПСТ і не містить вертикального прискорення $\ddot{h}$ ЛА та сумарних інструментальних похибок Δi .

Вихідний сигнал f_z двоканального гравіметра подається у БК, куди також подаються вихідні сигнали від системи визначення навігаційних параметрів та вимірювача висоти. У БК обчислюється значення аномалії Δg прискорення сили тяжіння за формулою [1]

$$\Delta g = f_z + E + A - \gamma_0, \quad (8)$$

де f_z – вихідний сигнал двоканального гравіметра; E – поправка Етвеша; A – поправка за висоту; γ_0 – довідкове значення прискорення сили тяжіння.

З рівняння (8) видно, що у ньому відсутня складова найбільшої похибки $\ddot{h}$. Всі відомі одноканальні гравіметри вимірюють $\ddot{h}$ одночасно з g . Це приводить до великих похибок (величина $\ddot{h}$ у 10^3 більша g).

Таким чином, у двоканальному гравіметрі забезпечується суттєве підвищення точності вимірювань шляхом компенсації дії вертикального прискорення $\ddot{h}$ літака та сумарних інструментальних похибок Δi .

Обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Результати досліджень обрахунку похибок АГС

Аналіз методичних похибок АГС

Для визначення допустимих похибок вимірювання параметрів руху ЛА компонентами АГС скористаємося методикою, викладеною в [1].

$$\Delta g = f_z + D, \quad (19)$$

де D – сумарна похибка АГС:

$$\begin{aligned} D = \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[1 - 2 \cos^2 \varphi \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + \\ + 2\omega_3 v \cos \varphi \sin k - 2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi + \\ + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \gamma_0. \end{aligned} \quad (20)$$

Окремими підсистемами АГС визначають параметри, що входять у рівняння (19).

Повний диференціал функції D визначає зв'язок між абсолютними значеннями похибок підсистем АГС вимірювання параметрів: Δv швидкості, Δk курсу, $\Delta \varphi$ широти, Δh висоти, $\Delta \dot{h}$ вертикальної швидкості [1]:

$$\begin{aligned} \Delta D = \left(\frac{dD}{dv} \right) \Delta v + \left(\frac{dD}{dk} \right) \Delta k + \\ + \left(\frac{dD}{d\varphi} \right) \Delta \varphi + \left(\frac{dD}{dh} \right) \Delta h + \left(\frac{dD}{d\dot{h}} \right) \Delta \dot{h}, \end{aligned} \quad (21)$$

де

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dv} = \frac{2v}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[1 - 2 \cos^2 \varphi \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + \\ + 2\omega_3 \cos \varphi \sin k - 2\dot{h} \frac{e}{r} \cos k \sin 2\varphi \end{aligned}$$

коефіцієнт чутливості АГС до похибок вимірювання швидкості;

$$\frac{dD}{dk} = 2\omega_3 v \cos \varphi \cos k - 2e \frac{v^2}{r} \cos^2 \varphi \sin 2k +$$

$$+ 2h \frac{e}{r} v \sin k \sin 2\varphi$$

коефіцієнт чутливості АГС до похибок вимірювання курсу;

$$\frac{dD}{d\varphi} = 2\omega_3 v \sin k \sin \varphi - \omega_3^2 h \sin 2\varphi -$$

$$4e \frac{v^2}{r} \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2}\right) \sin 2\varphi - 4h \frac{e}{r} v \cos k \cos 2\varphi -$$

$$- \gamma_{0e} \cdot 5,3 \cdot 10^{-3} \left(1 - 2 \frac{h}{r}\right) \sin 2\varphi$$

коефіцієнт чутливості АГС до похибок вимірювання широти;

$$\frac{dD}{dh} = \omega_3^2 \cos^2 \varphi + 2 \frac{\gamma_{0e}}{r} - \text{коефіцієнт чутливості}$$

АГС до похибок вимірювання висоти;

$$\frac{dD}{dh} = -2 \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi - \text{коефіцієнт чутливості}$$

АГС до похибок вимірювання вертикальної швидкості.

Максимально допустимі похибки вимірювання основних параметрів компонентами АГС можна визначити за даними табл. 1.

Таблиця 1 – Значення максимальних коефіцієнтів чутливості похибки вихідного сигналу авіаційної гравіметричної системи до похибок вимірювання параметрів

Максимальні коефіцієнти чутливості похибки вихідного сигналу АГС до похибок вимірювання параметрів			
v , м/с	260	140	85
$\dot{h}$, м/с	45	28	19
$\frac{dD}{dv}$, мГал/м·с ⁻¹	22,67	17,68	16,47
$\frac{dD}{dk}$, мГал/кут.хв	1,08	0,65	0,39
$\frac{dD}{d\varphi}$, мГал/кут.хв	2,29	1,93	1,77
$\frac{dD}{dh}$, мГал/м	0,29	0,29	0,29
$\frac{dD}{d\dot{h}}$, мГал/м·с ⁻¹	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \cdot 10^{-1}$

Параметрам: $h = 5 \cdot 10^3$ м, $e = 3,4 \cdot 10^{-3}$, $r = 6,4 \cdot 10^6$ м, $\omega_3 = 7,3 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹, $\gamma_{0e} = 9,78049$ м/с² відповідають числові значення коефіцієнтів чутливості, наведені у табл. 1.

З табл. 2 видно, з якою точністю потрібно вимірювати навігаційні параметри руху ЛА з

АГС для забезпечення заданої точності вимірювань. Максимальні значення похибок вимірювання параметрів АГС наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Максимальні значення похибок вимірювання досліджуваних параметрів АГС

Похибки вимірювання	Максимальне значення похибки вимірювання гравітаційної аномалії (Δg)	
	1 мГал	3 мГал
Шляхова швидкість v , м/с	0,05	0,15
Курс k , кут. хв.	1,43	3,0
Географічна широта φ , кут. хв.	0,5	1,
Висота h , м	3,3	10,0
Вертикальна швидкість $\dot{h}$, м/с	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Шлях s , м	1,5	4,5
Похибка стабілізації осі чутливості гравіметра, кут.	5	15

Врахування похибок гравіметра АГС від переносної (відносно приладу) кутової швидкості обертання Землі

В [1] наведено формули обчислення похибки від переносної (відносно гравіметра) кутової швидкості ω_z обертання Землі:

$$\Delta_3 = K_r \omega_3, \quad (22)$$

$$\delta_3 = \frac{\Delta_3}{\alpha_{кор}} \cdot 100\%, \quad (23)$$

де K_r – коефіцієнт передачі гравіметра;

ω_3 – швидкість обертання Землі; $\alpha_{кор}$ – корисний сигнал гравіметра.

Вертикальна складова переносної кутової швидкості головної осі $xOyz$, зумовлена обертанням Землі і власним рухом ЛА:

$$\omega_z = \omega_3 \sin \varphi + \frac{v_y}{r} \operatorname{tg} \varphi; \quad (24)$$

$$v_y = r \dot{\lambda} \cos \varphi; \quad (25)$$

$$\frac{v_y}{r} \operatorname{tg} \varphi = \dot{\lambda} \sin \varphi; \quad (26)$$

де v_y – східна складова шляхової швидкості ЛА; r – геоцентричний радіус Землі; $\dot{\lambda}$ – швидкість зміни довготи.

Запишемо формулу (24) із урахуванням (26):

$$\omega_z = (\omega_3 + \dot{\lambda}) \sin \varphi. \quad (27)$$

З урахуванням, що ЛА повертається навколо осі Oz з кутовою швидкістю $\dot{k}$ у випадку руху:

$$\omega_z = (\omega_3 + \dot{\lambda}) \sin \varphi + \dot{k}. \quad (28)$$

де k – курсовий кут у площині горизонту, що відлічується за рухом годинникової стрілки від напрямку на північ до повздовжньої осі об'єкта.

Запишемо формулу (22) із урахуванням (28):

$$\Delta_3 = K_r [(\omega_3 + \dot{\lambda}) \sin \varphi + \dot{k}] \quad (29)$$

За інтервал усереднення $(t_2 - t_1)$ отримаємо середнє значення абсолютної похибки $\bar{\Delta}_3$ [1]:

$$(t_2 - t_1) \bar{\Delta} = K_r [k(t_2) - k(t_1)] + K_r \int_{t_1}^{t_2} \omega_3 \sin \varphi(t) dt + K_r \int_{t_1}^{t_2} \dot{\lambda} \sin \varphi(t) dt. \quad (30)$$

Максимальне значення $K_r \omega_3 \sin \varphi = 2,92 \cdot 10^{-5}$ рад. Воно відповідає $\varphi = 90^\circ$ та швидкості обертання Землі $\omega_3 = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ [1].

Похибка обчислення $K_r \omega_3 \sin \varphi$ при заданому K_r і сталому значенні ω_3 залежить від похибки визначення φ . Похибка визначення широти має бути меншою $0,5^\circ$, якщо похибка обчислення $K_r \omega_3 \sin \varphi$ не більше за $2,92 \cdot 10^{-7}$ рад (це складає $0,01\%$) [1].

Якщо замінити $\int_{t_1}^{t_2} \sin \varphi(t) dt$ середнім значенням $\overline{\sin \varphi}$ для інтервалу усереднення $(t_2 - t_1)$, то похибка визначення широти не перевищить $0,5^\circ$. Середнє значення $\bar{\varphi}$ відповідає середині інтервалу $(t_2 - t_1)$ і $\overline{\sin \varphi}$ несуттєво відрізняється від $\sin \bar{\varphi}$ за умови, що польоти відбуваються зі сталою швидкістю [1]:

$$K_r \int_{t_1}^{t_2} \omega_3 \sin \varphi(t) dt = K_r \omega_3 \sin \bar{\varphi} (t_2 - t_1). \quad (31)$$

Під час руху ЛА у середніх широтах (при $\varphi = 65^\circ$ і $v_y = 234 \text{ м/с}$, $r = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$) чутливість АГС до похибок вимірювання широти максимальна. Отримаємо значення $\dot{\lambda}(t) \sin \varphi$ [1]:

$$\dot{\lambda}(t) \sin \varphi = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}. \quad (32)$$

Для коротких інтервалів часу, які можна вважати сталими, інтеграл від $\dot{\lambda}(t)$ і φ вибирається як середина інтервалу усереднення [1]:

$$K_r \int_{t_1}^{t_2} \dot{\lambda}(t) \sin \varphi(t) dt = K_r [\lambda(t_2) - \lambda(t_1)] \sin \bar{\varphi}. \quad (33)$$

Маршрут польоту під час випробувальної програми необхідно прокладати вздовж паралелі (значення широти є практично постійним і при розрахунках можна використовувати задане φ) або вздовж меридіана (можна застосовувати розкладання у ряд для відносно грубої апроксимації $\sin \bar{\varphi}$). Для обчислення $\bar{\varphi}$ при зведенні польотних даних необхідно вибирати середину інтервалу $(t_2 - t_1)$ [1].

Формула (29) має кінцевий вигляд:

$$\Delta_3 = K_r \left(\frac{k(t_2) - k(t_1)}{t_2 - t_1} + \omega_3 \sin \bar{\varphi} + \frac{\lambda(t_2) - \lambda(t_1)}{t_2 - t_1} \sin \bar{\varphi} \right). \quad (34)$$

Розрахуємо значення $\bar{\Delta}_3$ та $\bar{\delta}_3$, коли $\dot{k} = 0$ для $\varphi = 65^\circ$ і $v_y = 234 \text{ м/с}$, $r = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$:

$$\bar{\Delta}_3 = 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ рад} = 584 \text{ мГал},$$

$$\bar{\delta}_3 = 2,92 \cdot 10^{-2} \%.$$

Можна зробити висновок, що похибка гравіметра $\bar{\Delta}_3 = 584 \text{ мГал}$, спричинена переносною (відносно приладу) кутовою швидкістю обертання Землі ω_z дуже велика у порівнянні з іншими похибками. Для її врахування необхідно введення поправки в рівняння руху (17) АГС.

Рівняння руху АГС із гравіметром будь-якого типу необхідно записувати з врахуванням похибки від впливу ω_z [1]:

$$\begin{aligned} \bar{\Delta g} = & \frac{1}{S} \left\{ \frac{\alpha(t_2) - \alpha(t_1)}{t_2 - t_1} + \frac{K_r}{k_2} \left[\frac{k(t_2) - k(t_1)}{t_2 - t_1} + \frac{\lambda(t_2) - \lambda(t_1)}{t_2 - t_1} \sin \bar{\varphi} + \omega_3 \sin \bar{\varphi} \right] \right\} + \\ & + \frac{\bar{V}^2}{r} \left\{ 1 - 2e \left[1 - 2 \cos^2 \varphi \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\bar{V} \omega_3 \sin \bar{k} \cos \bar{\varphi} - \\ & - 2\frac{\bar{e}}{r} \bar{V} \cos \bar{k} \sin 2\bar{\varphi} + 2\frac{\bar{\gamma}_0 \bar{h}}{r} + \omega_3^2 \cos^2 \bar{\varphi} \bar{h} - \bar{h} - \bar{\gamma}_0. \end{aligned} \quad (35)$$

Вплив похибки від ω_z , надзвичайно великий (584 мГал), тому поправку від впливу кутової швидкості обертання Землі треба обов'язково враховувати при аналізі роботи гравіметра. У відомих гравіметрах вплив цієї похибки не враховується. Тому можна вважати їх точність недостатньою.

Обговорення результатів використання в якості чутливого елемента АГС нового трансформаторного гравіметра

З аналізу роботи сучасних гравіметрів, що застосовуються в АГС, можна зробити висновок, що всі вони мають свої недоліки та особливості застосування.

Основним недоліком п'єзоелектричного гравіметра є його висока інерційність. Струнні гравіметри схильні до резонансів та часто мають нелінійну вихідну характеристику. Малопотужний вихідний сигнал є недоліком ємнісних гравіметрів, а його підсилення зменшує надійність системи.

Точність таких гравіметрів складає близько 2-8 мГал, що є недостатнім в сучасних АГС. Саме тому є необхідність у розробці нових гравіметрів для АГС, що засновані на нових принципах роботи та мають принципово іншу будову [1-4].

Враховуючи недоліки існуючих гравіметрів, необхідно запропонувати та дослідити нову конструкцію гравіметра, що буде позбавлений вище зазначених недоліків відомих гравіметрів і матиме вищу точність у порівнянні з існуючими гравіметрами.

Запропоновано [28] новий трансформаторний гравіметр (ТрГ), який має значні переваги перед відомими гравіметрами: він має лінійну характеристику у широкому діапазоні роботи і має потужний вихідний сигнал порівняно з ємнісним гравіметром, у нього не така велика інерційність як у п'єзоелектричного гравіметра, він не схильний до резонансів як струнний гравіметр, дає змогу отримати уніфікований електричний сигнал, пропорційний до результатів вимірювань в аналоговій або цифровій формі та ін.

В основу нового ТрГ покладено трансформаторний перетворювач (ТрП), схему якого зображено на рис. 4.

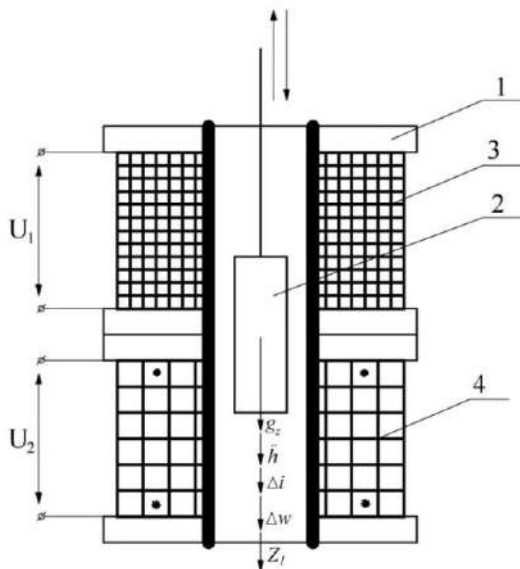


Рисунок 4 – Трансформаторний перетворювач, де 1 – магнітопровід, 2 – якір, 3 – обмотка збудження W_1 , 4 – вторинна обмотка W_2

Трансформаторний перетворювач

Трансформаторний перетворювач містить чутливий елемент, який складається із магнітопроводу, рухомого якоря, первинної обмотки збудження та вторинної вихідної обмотки, яка має дві однакові секції.

Основним недоліком трансформаторного перетворювача є послідовно-узгоджене (початок-кінець однієї секції, початок-кінець іншої секції) підключення двох секцій вторинної обмотки $4 W_2$. Вихідна обмотка $4 W_2$ є суцільною. У результаті такого підключення дія горизонтальних прискорень буде викликати значні похибки вимірювання, при встановленні ТП на літальний апарат.

Під дією прискорення сили тяжіння g_z , яке діє вздовж осі чутливості трансформаторного перетворювача Oz , виникає сила тяжіння $G = mg_z$. Обмотка збудження $3 W_1$ під'єднана до напруги U_1 і утворює електромагнітний потік збудження Φ_1 . Згідно закону електромагнітної індукції, цей потік наводить ЕРС E_2 в обмотці $4 W_2$. Під дією прискорення сили тяжіння якір 2 рухається у середині магнітопроводу 1 вниз і викликає зміну електромагнітного потоку Φ_1 . Тоді електрорушійна сила E_2 в обмотці $4 W_2$ буде змінюватись пропорційно прискоренню сили тяжіння g_z : $E_2 = mg_z$. Вихідний електричний сигнал U_2 буде пропорційний g_z : $U_2 = mg_z$.

При дії зовнішнього електромагнітного потоку перешкоди (на рухомих об'єктах: літальних апаратах, надводних та підводних човнах виникають значні сторонні електромагнітні потоки), наводиться ЕРС E_n перешкоди у вихідній обмотці $4 W_2$: $E_2 = mg_z + E_n$. Відповідно, вихідний сигнал буде $U_2 = mg_z + U_n$.

Вертикальне прискорення $\ddot{h}$, при встановленні ТП на літаках, буде діяти вздовж осі чутливості ТрП, тоді: $E_2 = mg_z + m\ddot{h}$. Величина вертикального прискорення $\ddot{h}$ у 10^3 разів перевищує значення g_z , тобто значення похибки значною мірою перевищує корисний сигнал.

Трансформаторний гравіметр

Підвищення точності вимірювання ПСТ у новому трансформаторному гравіметрі (ТрГ) забезпечується шляхом вмикання двох секцій вторинної обмотки послідовно-зустрічно. Рухомий якір з'єднується з двигуном для щосекундного послідовного опускання та піднімання якоря по магнітопроводу. Двигуном керує пристрій

перемикання, який підключено до джерела напруги управління, а вихідний сигнал з вторинної вихідної обмотки подається на вхід пристрою обчислення вихідного сигналу. В результаті отримується сигнал, що пропорційний подвоєному значенню прискорення сили тяжіння. Цей сигнал не має у своєму складі похибок від впливу вертикального прискорення ЛА, залишкових інструментальних похибок, залишкових похибок від проекцій горизонтальних перехресних прискорень та похибок, спричинених впливом зовнішніх електромагнітних потоків. Це, в свою чергу, забезпечує підвищення точності вимірювань прискорення сили тяжіння.

При дії зовнішнього електромагнітного потоку перешкоди, цей потік буде наводити дві ЕРС перешкоди у двох секціях W_2 , які включено послідовно-зустрічно $E_{2П}$ та $-E'_{2П}$. Сумарно ці похибки компенсуються [6].

На рис. 5. представлено конструкцію трансформаторного гравіметра та суть його роботи.

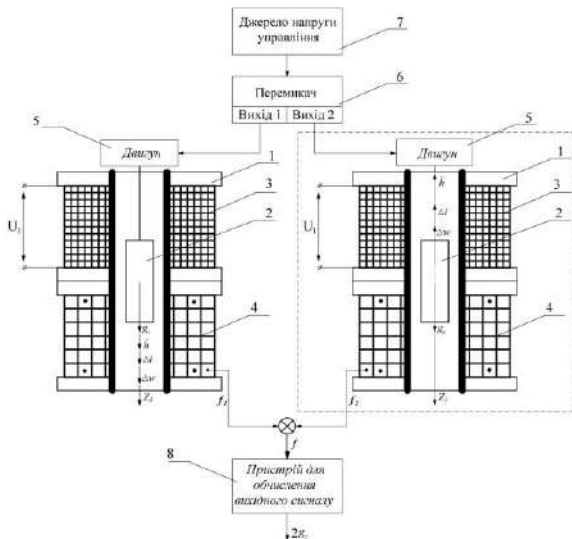


Рисунок 5 – Трансформаторний гравіметр:

- 1 – магнітопровід, 2 – рухомий якорь, 3 – обмотка збудження W_1 , 4 – вторинна обмотка W_2 ,
- 5 – двигун, 6 – перемикаючий пристрій,
- 7 – джерело напруги управління, 8 – пристрій обчислення вихідного сигналу

Чутливий елемент ТрГ, як і у трансформаторного перетворювача, складається із магнітопроводу 1, рухомого якоря 2, первинної обмотки 3 збудження та вторинної вихідної обмотки 4, яка має дві однакові секції. Рухомий якорь 2 з'єднано з двигуном 5, який щосекунди послідовно опускає якорь 2 вниз та вгору по магнітопроводу 1. Двигуном 5 керує пристрій перемикачів 6, який підключено до джерела 7 напруги управління. Вихідний сигнал з вторинної вихідної обмотки 4

подається на вхід пристрою 8 обчислення вихідного сигналу.

Принцип роботи ТрГ аналогічний до ТрП і полягає у зміні електромагнітного потоку збудження Φ_1 в обмотці збудження W_1 та відповідно двох ЕРС E_2 та $-E'_2$ у двох секціях обмотки W_2 під дією прискорення сили тяжіння g_z . Під дією сили тяжіння якорь 2 рухається в середині магнітопроводу 1 вниз і викликає зміну електромагнітного потоку Φ_1 та відповідно E_2 та $-E'_2$. У точці електромагнітної симетрії ТрГ отримаємо $E_2 = |-E'_2|$ і вихідний сигнал $U_2 = 0$.

При зміщенні якоря 2 відносно точки симетрії вниз (рис. 5) або вгору (рис. 5, обведено пунктиром) $E_2 \neq |-E'_2|$, вихідний сигнал гравіметра буде пропорційний:

$$U_2 \equiv |E_2 - E'_2| \equiv mg_z \quad (36)$$

У ТрГ пристрій-перемикач (ПП) 6, який живиться від джерела напруги управління 7, через рівні інтервали часу в 1 с перемикає подачу вертикального руху якоря 2 вниз (рис. 5) та вгору (рис. 5, обведено пунктиром) через двигун 5.

При подачі від ПП 6 імпульсу руху вниз якорю 2, вихідний сигнал f_1 чутливого елемента подається у пристрій обчислення вихідного сигналу 8. Через 1 с подається імпульс руху вгору якорю 2 і до пристрою обчислення вихідного сигналу 8 надходить сигнал f_2 .

У пристрої обчислення вихідного сигналу 7 формується кінцевий вихідний сигнал:

$$f = f_1 + f_2 = g_z + \ddot{h} + \Delta i + \Delta w + g_z - \ddot{h} - \Delta i - \Delta w = 2g_z \quad (37)$$

де

$f_1 = g_z + \ddot{h} + \Delta i + \Delta w$ – вихідний сигнал при русі якоря 2 вниз;

$f_2 = g_z - \ddot{h} - \Delta i - \Delta w$ – вихідний сигнал при русі якоря 2 вгору;

$\ddot{h}$ – вертикальне прискорення літака;

Δi – залишкові інструментальні похибки;

Δw – залишкові похибки від впливу проекцій горизонтальних перехресних прискорень на вісь чутливості винаходу.

Тобто, у пристрої 8 обчислення вихідного сигналу ТрГ формується вихідний сигнал, який рівний подвоєному значенню $2g_z$. На відміну від трансформаторного перетворювача, у вихідному сигналі ТрГ відсутні такі похибки вимірювань, які спричинені впливом вертикаль-

ного прискорення $\ddot{h}$, залишкові інструментальні похибки Δi та залишкові похибки від впливу горизонтальних перехресних прискорень Δw . Таким чином, показано, що ТрГ має більшу точність порівняно з відомими гравіметрами. Вплив зовнішніх електромагнітних потоків перешкоди, яких є значним на ЛА, в ТрГ також скасовується завдяки зустрічному з'єднанню вторинних обмоток (на відміну від трансформаторного перетворювача, де цей вплив значний і не знешкоджується). Подвоєний сигнал ТрГ входить до складу вихідного сигналу АГС.

Висновки з представленого дослідження та перспективи подальших досліджень в даному напрямку

1) Наведено рівняння руху та перелік основних компонентів АГС: гравіметр, система стабілізації, система визначення навігаційних параметрів, вимірювач висоти, бортова цифрова обчислювальна машина;

2) Обґрунтовано, що вибір власної частоти гравіметра рівною $0,1 \text{ с}^{-1}$ забезпечує відсутність впливу найбільших збурень (вертикального прискорення та інших прискорень, частота яких більша $0,1 \text{ рад/с}$) на роботу гравіметра АГС і відсутність необхідності використання додаткових електронних фільтрів;

3) Показано доцільність використання методу двоканальності для побудови гравіметра АГС, адже цей метод дозволяє компенсувати залишкові інструментальні похибки;

4) Проведено аналіз методичних похибок АГС, з якого сформульовано точнісні вимоги до компонентів АГС за умови, що точність вимірювань ПСТ 1–2 мГал.

5) Обґрунтовано важливість врахування поправки від впливу кутової швидкості обертання Землі (вона неприпустимо велика $\bar{\Delta}_3 = 584 \text{ мГал}$ у порівнянні з іншими похибками). Для її врахування необхідно обов'язкове введення відповідної поправки

$$\Delta_3 = K_{cr} \left(\frac{k(t_2) - k(t_1)}{t_2 - t_1} + \omega_3 \sin \bar{\varphi} + \frac{\lambda(t_2) - \lambda(t_1)}{t_2 - t_1} \sin \bar{\varphi} \right)$$

у рівняння руху АГС.

Отримано кінцеве рівняння АГС з даною поправкою

$$\begin{aligned} \bar{\Delta g} = & \frac{1}{S} \left\{ \frac{\alpha(t_2) - \alpha(t_1)}{t_2 - t_1} + \frac{K_r}{k_2} \left[\frac{k(t_2) - k(t_1)}{t_2 - t_1} + \frac{\lambda(t_2) - \lambda(t_1)}{t_2 - t_1} \sin \bar{\varphi} + \omega_3 \sin \bar{\varphi} \right] \right\} + \\ & + \frac{\bar{V}^2}{r} \left\{ 1 - 2e \left[1 - 2 \cos^2 \bar{\varphi} \left(1 - \frac{\sin^2 \bar{k}}{2} \right) \right] \right\} + 2\bar{V} \omega_3 \sin \bar{k} \cos \bar{\varphi} - \\ & - 2\bar{h} \frac{e}{r} \bar{V} \cos \bar{k} \sin 2\bar{\varphi} + 2 \frac{\bar{V}_0 \bar{h}}{r} + \omega_3^2 \cos^2 \bar{\varphi} \bar{h} - \bar{h} - \bar{V}_0. \end{aligned}$$

6) Обґрунтовано, що використання нового двоканального трансформаторного гравіметра

забезпечує необхідне підвищення точності АГС.

Перспективи подальших досліджень в даному напрямку, зважаючи на перспективність авіаційних гравіметричних досліджень для геології, геофізики, гравіметрії, систем інерціальної навігації аерокосмічних об'єктів, у подальшому доцільно дослідити вплив неідентичності каналів на точність вимірювань; дослідити можливість використання в якості гравіметра нових типів прецизійних гравіметрів, побудованих на нових фізичних явищах.

Список використаних джерел

1. Безвесільна О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри. Житомир: ЖДТУ, 2007. 604 с.
2. Гравіметр CG-5 AutoGrav [Электронный ресурс] / Геоцентр-Москва. URL: <http://geocentr-msk.ru/content/view/441/137>. 18.10.2016. Загл. с экрана.
3. Струнный аэрогравиметр «Гравитон-М». АО «ГНПП Аэрогеофизика». URL: http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=ru. 18.10.2016. Загл. с экрана.
4. Аэрогравиметр GT-2A. АО «ГНПП Аэрогеофизика». URL: http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=ru. 18.10. 2016. Загл. с экрана.
5. Инерциально-гравиметрический комплекс МАГ-1А. Федеральное государственное унитарное научно-производственное предприятие «ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА». URL: <http://geolraz.com/page/GSA-2010/>. 18.10.2016. Загл. с экрана.
6. Мобильный гравиметр “Чекан-АМ”. ОАО “КОНЦЕРН “ЦНИИ “ЭЛЕКТРОПРИБОР”. URL: <http://www.elektroprigor.spb.ru/ru/rprod6-1.html>. 26.10.2016. Загл. с экрана.
7. TAGS-6. URL: <http://www.microglacoste.com/tags-6.php>. 26.10.2016. Загл. с экрана.
8. Быковский А. В., Полинков А. В. К вопросу о разработке малогабаритного аэрогравиметра. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана*. 2013. № 2(14). С. 32-41.
9. Osborne I. S. An on-chip cold-atom gravimeter [Text]. *Science*. 2016. 354 (6317). P. 1247.
10. Афонин А. А., Сулаков А. С., Ямашев Г. Г., Михайлин Д. А., Мирзоян Л. А., Курмаков Д. В. О возможности построения платформенного управляющего навигационно-гравиметрического комплекса беспилотного летательного аппарата. *Труды МАИ*. 2013. № 66. С. 47-53.

11. Huang Y., Olesen A. V., Wu M., Zhang K. SGA-WZ: A New Strapdown Airborne Gravimeter. *Sensors*. 2012. No. 12(7). P. 9336 - 9348.
12. Calvoa M., Hinderera J., Rosata S., Legrosa H., Boya J.-P., Ducarmec B., Zürnd W. Time stability of spring and superconducting gravimeters through the analysis of very long gravity records. *Journal of Geodynamics*. 2014. No. 80. P. 20-33.
13. Agostino G. D., Desogus S., Germak A., Origlia C., Quagliotti D., Berrino G., Corrado G., Derrico V., Ricciardi G. The new IMGC-02 transportable absolute gravimeter: measurement apparatus and applications in geophysics and volcanology. *Annals of geophysics*. 2008. No. 51(1). P. 39-40.
14. Roussela C., Verduna J., Calia J., Maiab M. Integration of a strapdown gravimeter system in an autonomous underwater vehicle. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. No. XL-5/W5. P. 199-206.
15. Kazamaa T., Hayakawab H., Higashic T., Ohsonod Sh., Iwanamie Sh., Hanyub T., Ohtaf H., Doib K., Aoyamab Y., Fukudaa Y., Nishijimag J., Shibuyab K. Gravity measurements with a portable absolute gravimeter A10 in Syowa Station and Langhovde East Antarctica. *Polar Science*. 2013. Volume 7. P. 260-277.
16. Безвесільна О. М., Ткачук А. Г., Козько К. С. Сучасні гравіметри авіаційної гравіметричної системи. *Геофизический журнал*. 2015. № 2 (Т37). С. 86-94.
17. Bezvesilna O. M., Korobiichuk I., Tkachuk A., Nowicki M., Szewczyk R. Design of Piezoelectric Gravimeter for Automated Aviation Gravimetric System. *International Journal of Automation, Mobile Robotics & Entelligent Systems* (10), 2016. P. 43-47.
18. Bezvesilna O. M., Korobiichuk I., Tkachuk A., Nowicki M., Szewczyk R. Piezoelectric gravimeter of aviation gravimetric system. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. No. 1. P. 753-761.
19. Безвесільна О. М., Чепюк Л. О. Струнний гравіметр авіаційної гравіметричної системи. Житомир: ЖДТУ, 2015. 208 с.
20. Bezvesilna O. M., Tkachuk A. H., Khylichenko T. V., Chepyuk L. O. Aviation Gravimetric system with low-frequency vibration gravimeter. *International Journal "Technological complexes"* (1/2), 2015. P. 46-51.
21. Korobiichuk I., Bezvesilna O., Kachniarz M., Tkachuk A., Chilchenko T. Two-channel MEMS gravimeter of the automated aircraft gravimetric system. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. No. 1. P. 481-487.
22. Безвесільна О. М., Ткачук А. Г., Хильченко Т. В. Розробка нового двоканального гравіметра для вимірювань прискорення сили тяжіння. *Міжнародний науковий журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва»*. 2016. №1/2 (27). С. 41-44.
23. Быковский А. В., Полинков А. В., Арсеньев В. Д. Аэрогравиметрический метод измерения гравитационных аномалий. *Авиакосмическое приборостроение*. 2013. № 12. С. 11-19.
24. Кауфман А. А. Принципы метода гравиметрии. Тверь, 2011. 360 с.
25. Resolution of the 3rd CGPM. URL: <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/3/2/>. 15.10.2016. Загл. с экрана.
26. Худзинский Л. Л., Барташевич Л. М., Сорокин В. Л. Исследование абсолютного баллистического гравиметра и пути повышения точности измерений. Материалы Всерос. науч. конф. «Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков», 2002. Т. 3. Геофизика.
27. Матвеев В. В. Инженерный анализ погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2014. Выпуск № 9-2. С. 251-267.
28. Ткачук А. Г., Безвесільна О. М. Трансформаторний гравіметр. Патент на корисну модель №142824 від 25.06.20. Бюл. № 12 по заявці № u202000884. 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. (2007) Aviatsiyni hravimetrychni systemy ta hravimetry. Zytomyr: ZSTU. 604 p.
2. Gravimeter CG-5 AutoGrav. Geocenter Moscow. URL: <http://geocentr-msk.ru/content/view/441/137>. 18.10.2016. Zahl. s screen.
3. String GRAVIMETRY "Graviton-M". JSC "SSPE Aerogeophysics". URL: http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=ru. 18.10.2016. Caps. screen.
4. GRAVIMETRY GT-2A. JSC "SSPE Aerogeophysics". URL: http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=ru. 18.10.2016. Caps. screen.
5. Inertial-hravymetrycheskyy complex MAG-1A. The Federal Gosudarstvennoye unytarnoe scientific proizvodstvennoe predpriyatie "HEOLOHORAZVEDKA". URL:

- http://geolraz.com/page/-GSA-2010/. 18.10.2016. Zahl. s screen.
6. Mobile gravimeter "Gavel-AM". JSC "Concern" CRI "APPLIANCE". URL: <http://www.elektropribor.spb.ru/ru/rprod6-1.html>. 26.10.2016. Caps. screen.
7. TAGS-6 URL: <http://www.microglacoste.com/tags-6.php>. 26.10.2016. Zahl. s screen.
8. Bykovskii A., Wormwood A. To a question on the development of small-sized gravimetry. *Vestnik MSTU. Bauman*. 2013. № 2 (14). S. 32-41.
9. Osborne I. S. An on-chip cold-atom gravimeter. *Science*. 2016. 354 (6317). P. 1247.
10. Afonyn A., Sulakov A., Yamashev, Mykhailyna D., Mirzoyan L. A., Kurmakov D. (2013) Opportunities building a besplatformennoho upravlyayusheho navyhatsyonno-hravymetrycheskoho complex bespylotnoho letatelnoho apparatus. *Trudy MAI*. № 66. S. 47-53.
11. Huang Y., Olesen A. V., Wu M., Zhang K. SGA-WZ: A New Strapdown Airborne Gravimeter. *Sensors*. 2012. № 12(7). S. 9336 - 9348.
12. Calvoa M., Hinderera J., Rosata S., Legrosa H., Boya J.-P., Ducarmec B., Zürend W. Time stability of spring and superconducting gravimeters through the analysis of very long gravity records. *Journal of Geodynamics*. 2014. No. 80. P. 20-33.
13. Agostino G. D., Desogus S., Germak A., Origlia C., Quagliotti D., Berrino G., Corrado G., Derrico V., Ricciardi G. The new IMGC-02 transportable absolute gravimeter: measurement apparatus and applications in geophysics and volcanology. *Annals of geophysics*. 2008. No. 51(1). P. 39-40.
14. Roussela C., Verduna J., Calia J., Maiab M. Integration of a strapdown gravimeter system in an autonomous underwater vehicle. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. No. XL-5/W5. P. 199-206.
15. Kazamaa T., Hayakawab H., Higashic T., Ohsonod Sh., Iwanamie Sh., Hanyub T., Ohtaf H., Doib K., Aoyamab Y., Fukudaa Y., Nishijimag J., Shibuyab K. Gravity measurements with a portable absolute gravimeter A10 in Syowa Station and Langhovde East Antarctica. *Polar Science*. 2013. Volume 7. P. 260-277.
16. Bezvesilna O., Tkachuk A., Kozko K. Modern Gravity gravimetric aviation system. *Geophysical log*. 2015. № 2 (T37). S. 86-94.
17. Bezvesilna O. M., Korobiichuk I., Tkachuk A., Nowicki M., Szewczyk R. Design of Piezoelectric Gravimeter for Automated Aviation Gravimetric System. *International Journal of Automation, Mobile Robotics & Entelligent Systems* (10). 2016. P. 43-47.
18. Bezvesilna O. M., Korobiichuk I., Tkachuk A., Nowicki M., Szewczyk R. Piezoelectric gravimeter of aviation gravimetric system. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. No. 1. P. 753-761.
19. Bezvesilna O. M., Chepyuk L.A. (2015) String gravimeter gravimetric aviation system. Zhitomir: ZSTU, 208 p.
20. Bezvesilna O. M., Tkachuk A. H., Khylichenko T. V., Chepyuk L. O. Aviation Gravimetric system with low-frequency vibration gravimeter. *International Journal "Technological complexes"* (1/2), 2015. P. 46-51.
21. Korobiichuk I., Bezvesilna O., Kachniarz M., Tkachuk A., Chilchenko T. Two-channel MEMS gravimeter of the automated aircraft gravimetric system. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. No. 1. P. 481-487.
22. Bezvesilna A. N., Tkachuk A. G., Hylchenko T. V. Development of a new two-channel gravimeter to measure the acceleration of gravity. *International Journal "Technology Audit and production reserves."* 2016. № 1/2 (27). S. 41-44.
23. Bykovskij A. V., Polynkov A. V., Arsen'ev V. D. Ajerogravimetricheskij metod izmerenija gravitacionnyh anomalij. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. 2013. № 12. S. 11-19.
24. Kaufman A. A. Principles hravymetryy method. Tver, 2011. 360 s.
25. Resolution of the 3rd CGPM. URL: <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/3/2/>. 15.10.2016. Zahl. s screen.
26. Khudzinsky L. L., Bartashevich L. M., Sorokin V. L. Investigation absolute ballistic gravimeter and ways to improve the accuracy of measurements. Proc. scientific. Conf. "Geology, geochemistry and geophysics at the turn of the century", 2002. T. 3. Geophysics.
27. Matveev V. V. Engineering analysis errors strapdown inertial navigation system. *Izvestiya of the Tula State University. Engineering science*. 2014. Issue number 9-2. P. 251-267.
28. Tkachuk A. H., Bezvesilna O. M. 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>.

Надійшла до редакції 01.11.2022