

UDC 528.563

Bezvesilna O., DThSc., Prof.\*  
Tkachuk A., Ph.D. in Engineering, \*\*  
Khylichenko T. \*\*

\*National Technical University of Ukraine  
«Kyiv Polytechnic Institute»  
\*\*Zhytomyr State Technological University / Ukraine

## AVIATION GRAVIMETRIC COMPLEX FOR MEASURING THE GRAVITY ANOMALITIES WITH DUAL-CHANNEL CAPACITIVE GRAVIMETER

### АВІАЦІЙНИЙ ГРАВІМЕТРИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ АНОМАЛІЙ ПРИСКОРЕННЯ СИЛИ ТЯЖІННЯ З ДВОКАНАЛЬНИМ ЄМНІСНИМ ГРАВІМЕТРОМ

**Abstract:** The examined subject – the dual-channel capacitive gravimeter of an automatic aviation gravimetric complex (AGC) with 1 mGal of accuracy, which speed work (completely automatic) is considered to be the highest one amongst the known gravimeters. The operational principle of the dual-channel capacitive gravimeter is described along with its main advantages over the known gravimeters (absence of discrepancies in an outgoing signal caused by the influence of vertical acceleration and residual nonidentity of the two capacitive elements of construction). A new filtration method of an outgoing signal is suggested and namely filtration with no need for the low frequencies filter to be used in the capacity of an automatic aviation gravimetric complex.

**Keywords:** the dual-channel capacitive gravimeter, an automatic aviation gravimetric complex, acceleration of earth gravity, sensitive unit .

#### INTRODUCTION

The aviation gravimetric complexes, the sensitive unit of which is a gravimeter, are meant for the Earth gravity performances measurement. By means of the aviation gravimetric complex (AGC) it is possible to obtain the gravimetric information in the awkward-to-reach zones of the globe much faster and at lower costs than doing this by means of ground-mounted, sea-going and land-based gravimetric units. The data of Earth's gravitational field are stored in the onboard digital computer of the AGC will sufficiently promote navigation parameters accuracy increase along with efficiency of the gravimetric discovery. Than is the reason, why the realisation of a high-quality calculations is a very topical issue as of today

#### PROBLEM STATEMENT

Operational efficiency of an automatic aviation gravimetric complex is strongly influenced by the choice of a sensitive unit of the system – gravimeter. The accuracy of the existing gravimeters of automatic aviation gravimetric complexes as of today is insufficient, only (2-10) mGal. Speedwork of of the existing gravimeters is insufficient as well. The majority of them is

**Анотація:** Розглянуто новий двоканальний ємнісний гравіметр (ДЄГ) автоматизованого авіаційного гравіметричного комплексу (АГК) точність (1 мГал) і швидкодія (повністю автоматизований) якого вище відомих сьогодні гравіметрів. Описано принцип дії нового ДЄГ, основні його переваги над відомими гравіметрами (відсутність у вихідному сигналі ДЄГ сигналів похибок від впливу вертикального прискорення та від залишкової неідентичності конструкцій двох ємнісних елементів). Запропоновано новий метод фільтрації вихідного сигналу гравіметра без необхідності використання фільтра низьких частот як окремого блоку АГК.

**Ключові слова:** двоканальний ємнісний гравіметр, авіаційний гравіметричний комплекс, прискорення сили тяжіння, чутливий елемент.

#### ВСТУП

Авіаційні гравіметричні комплекси, чутливим елементом яких є гравіметр, призначені для визначення характеристик гравітаційного поля Землі. За допомогою АГК можна здобути гравіметричну інформацію у важкодоступних районах земної кулі набагато швидше та з меншими витратами, ніж за допомогою наземних, морських або сухопутних гравіметричних засобів. Дані про гравітаційне поле Землі, введені у пам'ять бортової цифрової обчислювальної машини (БЦОМ) АГК, суттєво сприятимуть підвищенню як точності визначення навігаційних параметрів, так і ефективності гравіметричної розвідки. Тому проведення високоточних авіаційних вимірювань є актуальним.

#### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Ефективність роботи АГК значною мірою забезпечується вибором чутливого елемента системи – гравіметра. Точність існуючих на сьогоднішній день гравіметрів АГК недостатня, всього (2-10) мГал. Швидкодія існуючих гравіметрів є також недостатньою. Більшість із них є неавтоматизованими. Обробка результатів вимірювань проводиться після льоту літального

manual. The data reduction process of the investigations is usually performed after the aircraft (AC) flight over the Earth throughout the duration of several months. Moreover, these gravimeters measure not only the acceleration of earth gravity, but also the vertical acceleration ЛА  $\ddot{h}$  [1].

The  $\ddot{h}$  high-accuracy measurement is a difficult scientific-and-technological challenge which expects usage of additional filters.

As of today, the most advanced of the known gravimeters is the single-channel capacitive gravimeter [2]. However, the single-channel capacitive gravimeter is in errors. The present article suggests using of the new dual – channel capacitive gravimeter, where all of the abovementioned errors are abolished.

Nowadays, there are no scientific-and-technological and practical works dedicated to the investigations of possibilities and usefulness of the dual – channel gravimeter as a part of an automatic aviation gravimetric complex. The advantages of the abovementioned gravimeter over the known ones are the exact accuracy (due to the abolishing of the influence of the vertical acceleration, instrumental and other errors) and sensitivity along with low weight-and-dimensional characteristics, simplicity of construction etc.

#### MAIN ARTICLE

The present article suggests an automatic aviation gravimetric complex (Fig.1) consisting of the dual-channel capacitive gravimeter 1, system 2 of the current navigator parameters definition and the measuring unit 3 of the current altitude, the outputs of which are connected to the inputs of the onboard digital computer 4, besides, the gravimeter 1 is installed at the horizontal-stabilized platform.

The gravimeter is constructed with the two channels, where the capacitive elements ЄГ1 and ЄГ2 are installed. The capacitive elements ЄГ1 and ЄГ2 of the both channels are identical and designed in the form of two metal (movable and immovable) plates, both having equal masses  $m_1 = m_2$ , each of the two is attached to the lower and upper parts of the movable plates ЄГ1 and ЄГ2 correspondingly. The outputs of the capacitive elements ЄГ1 and ЄГ2 of the two channels are connected to the outputs of the counter, an input of which is connected to the onboard digital computer, where the actuating signal of the gravitational anomaly is calculated in accordance with the set algorithm [3].

The dual-channel capacitive gravimeter works in the following way. The acceleration of earth gravity  $g_z$ , has an effect on the capacitive elements of the both channels along with vertical acceleration  $\ddot{h}$  of the AC, instrumental errors

апарату (ЛА) на Землі протягом місяців часу. До того ж ці гравіметри вимірюють разом із прискоренням сили тяжіння вертикальне прискорення ЛА  $\ddot{h}$  [1].

Високоточне вимірювання  $\ddot{h}$  є складною науково-технічною проблемою і вимагає застосування додаткових фільтрів.

Сьогодні одним із найперспективніших із відомих гравіметрів є ємнісний одноканальний гравіметр (ЄГ) [2]. Однак, одноканальний ЄГ має похибки, обумовлені, в основному, дією вертикального прискорення та інструментальних похибок. У даній статті запропоновано використовувати новий двоканальний ЄГ, у якому скасовано дію вищезгаданих похибок.

Сьогодні відсутні науково-теоретичні та практичні роботи, присвячені дослідженням можливості та доцільності використання у якості гравіметра АГК ДЄГ, перевагами якого перед відомими гравіметрами є високі точність (за рахунок скасування дії вертикального прискорення, інструментальних та інших похибок) та чутливість, малі масогабаритні характеристики, простота конструкції та інші.

#### ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Запропоновано автоматизований АГК (рис. 1), який складається із двоканального ємнісного гравіметра 1, системи 2 визначення поточних навігаційних параметрів і вимірювача 3 поточної висоти, виходи яких підключені до входів БЦОМ 4, причому гравіметр 1 встановлений на горизонтальній стабілізованій платформі (ГСП).

Гравіметр виконано з двома каналами, у кожному із яких встановлено по одному ємнісному елементу ЄГ1 та ЄГ2. Ємнісні елементи ЄГ1 та ЄГ2 обох каналів є ідентичними і виконані у вигляді двох металевих (рухомої і нерухомої) пластин та однакових мас  $m_1 = m_2$ , кожна з яких прикріплена до низу та верху рухомих пластин ЄГ1 та ЄГ2 відповідно. Пластини двох ємнісних елементів кріпляться до корпусу пружними елементами.

Виходи ємнісних елементів ЄГ1 та ЄГ2 обох каналів з'єднані з виходами суматора, вихід якого з'єднаний із входом модуля (М) перетворення аналогового сигналу у цифровий. Вихід модуля з'єднаний із входом підсилювача (П), вихід якого з'єднано із виходом БЦОМ, у якій розраховується вихідний сигнал гравітаційної аномалії згідно із заданим алгоритмом [3].

Двоканальний ємнісний гравіметр працює наступним чином. На ємнісні елементи обох каналів діє прискорення сили тяжіння  $g_z$ , вертикальне прискорення  $\ddot{h}$  літака та

$\Delta i$  from the influence of residual nonidentity of constructions of identical plates and masses, change of temperature, humidity and pressure of the environment.

інструментальні похибки  $\Delta i$  від впливу залишкової неідентичності конструкцій однакових пластин та мас, від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища.

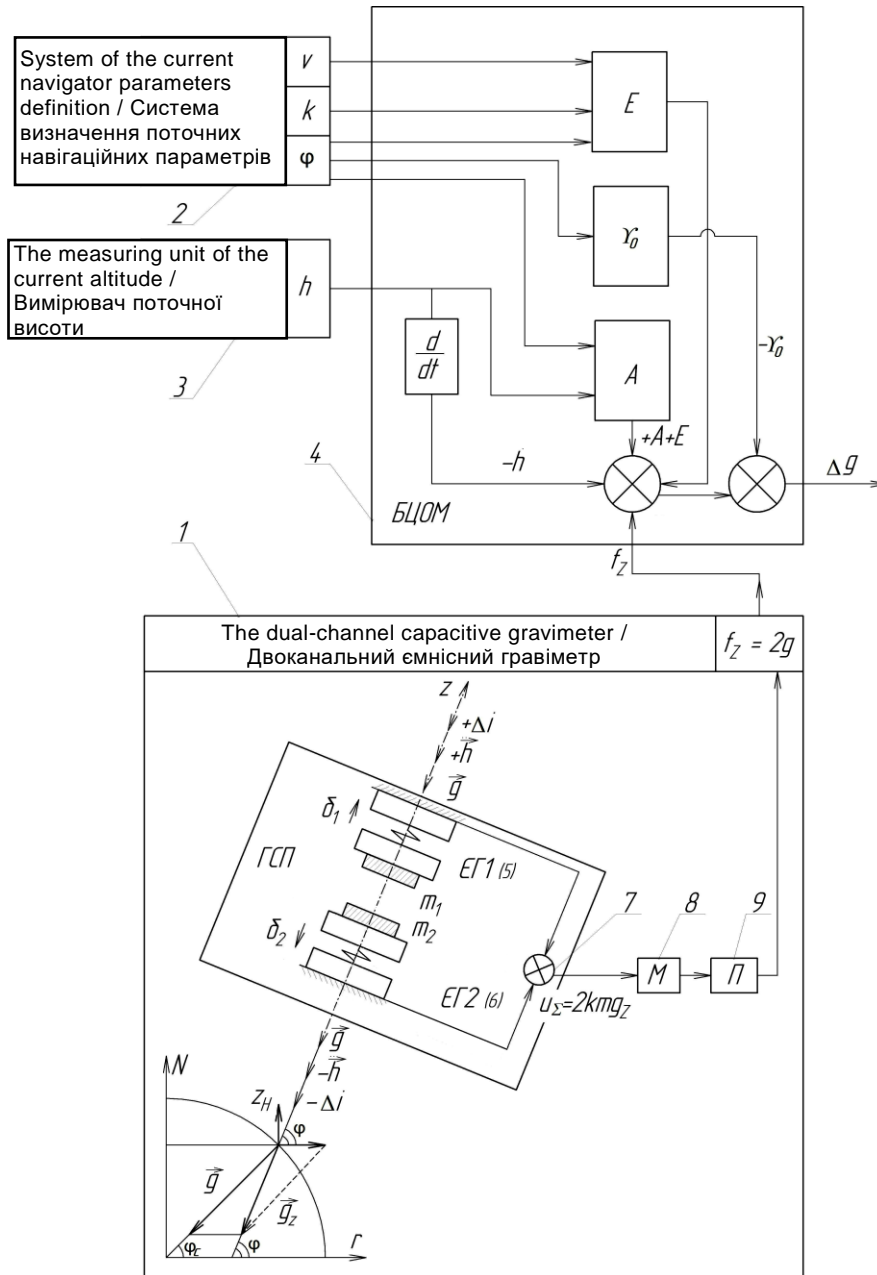


Fig. 1 – A block diagram of AGS: / Структурна схема АГС:

1 – gravimeter / гравіметр; 2 – the current system of determining navigation parameters / система визначення поточних навігаційних параметрів; 3 – current meter height / вимірювач поточної висоти; 4 – onboard digital computer / БЦОМ; 5, 6 – capacitive gravimeter / ємнісний гравіметр; 7 – adder / суматор; 8 – module / модуль; 9 – amplifier / підсилювач.

If we project all these influences to the measurement axis  $Oz$  the dual-channel capacitive gravimeter and consider the fact that the capacity of the EG1 channel increases at the same time when the capacity EG2 reduces by the same level, we will get [2]:

Якщо спроектувати всі ці впливи на вимірвальну вісь  $Oz$  ДЄГ та врахувати те, що ємність EG1 одного каналу збільшується у той час, коли ємність EG2 на таку ж величину зменшується, то отримуємо [2]:

$$u_1 = k(mg_z + m\ddot{h} + \Delta i);$$

$$u_2 = k(mg_z - m\ddot{h} - \Delta i);$$

where  $u_1$  is an electronic output signal of the capacitive element EG1 of the first channel;

$u_2$  – is an electrical output signal of the capacitive element EG2 of the second channel;

$m$  – weight of the inertial mass in each channel;

$k$  - electrical constant

The output electrical signals  $u_1$  and  $u_2$  of the capacitive elements of both channels are summarized in the counter:

$$u_{\Sigma} = u_1 + u_2 = 2km\ddot{g}_z,$$

where  $u_{\Sigma}$  is a counter output signal

The output signal  $u_{\Sigma}$  of a counter 7 is converted from the analogue mode into the digital one in the module 8 and intensifies with the help of an amplifier 9. As a final result we will get the output signal  $f_z$  the dual-channel capacitive gravimeter which has a double signal of the acceleration of earth gravity. There are no errors caused by the influence of vertical acceleration  $\ddot{h}$  and instrumental errors  $\Delta i$  in it.

The output signals from the system 1 of navigation parameters definition and altitude measuring unit are set to the output of the onboard digital computer 4, where the output signal of gravimeter 3 is also set at the same time. Taking into account the received data, the onboard digital computer 4 calculates the anomalies  $\Delta g$  of the acceleration of earth gravity in the following way [2]:

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

where  $v$  is the AC speed;

$r$  – AC location radius;

$e$  – ellipsoid compression;

$\varphi$  – geographical latitude;

$k$  – AC flight track;

$\omega_3$  – Earth angular velocity;

$h$  – AC altitude over the ellipsoid;

$\dot{h}$  – AC vertical speed;

$\gamma_0$  – informative acceleration of gravity.

Let's re-write the motion equation of the AGC with the dual-channel capacitive gravimeter in the following way:

$$\Delta g = f_z + E + A - \gamma_0,$$

where  $f_z$  – output signal of the dual-channel capacitive gravimeter ACG;

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

$$+ 2\omega_3 v \sin k \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi$$

Eotvos correction;

де  $u_1$  – вихідний електричний сигнал ємнісного елементу EG1 одного каналу;

$u_2$  – вихідний електричний сигнал ємнісного елементу EG2 другого каналу;

$m$  – вага інерційної маси у кожному каналі;

$k$  – електрична стала.

Вихідні електричні сигнали  $u_1$  та  $u_2$  ємнісних елементів обох каналів сумуються у суматорі:

де  $u_{\Sigma}$  – вихідний сигнал суматора.

Вихідний сигнал  $u_{\Sigma}$  суматора 7 перетворюється з аналогової у цифрову форму в модулі 8 та підсилюється за допомогою підсилювача 9. У кінцевому результаті отримуємо вихідний сигнал  $f_z$  ДЄГ, який містить подвоєний сигнал прискорення сили тяжіння. У ньому повністю відсутні такі похибки вимірювань, які спричинені впливом вертикального прискорення  $\ddot{h}$  та інструментальних похибок  $\Delta i$ .

На вхід БЦОМ 4, куди подається вихідний сигнал гравіметра 3, також подаються вихідні сигнали від системи 1 визначення навігаційних параметрів та вимірювача 2 висоти. БЦОМ 4 на основі отриманих даних обчислює аномалії  $\Delta g$  прискорення сили тяжіння за формулою [2]:

де  $v$  – швидкість ЛА;

$r$  – радіус місцезнаходження ЛА;

$e$  – стиск еліпсоїда;

$\varphi$  – географічна широта;

$k$  – курс ЛА;

$\omega_3$  – кутова швидкість обертання Землі;

$h$  – висота ЛА над еліпсоїдом;

$\dot{h}$  – вертикальна швидкість ЛА;

$\gamma_0$  – довідкове прискорення сили тяжіння.

Перепишемо рівняння руху АГК із ДЄГ у вигляді:

де  $f_z$  – вихідний сигнал ДЄГ АГК;

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

$$+ 2\omega_3 v \sin k \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi$$

поправка Етвеша;

$$A = 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \text{adjustment for altitude};$$

$$\gamma_0 = \gamma_{0e} (1 + 0,0052884 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi)$$

- informative acceleration of gravity;

$$\gamma_{0e} = 9,78049 \text{ м/с}^2 - \text{informative equatorial acceleration magnitude of gravity.}$$

The analytic expressions of the useful signal spectrum densities ( $\omega$ ) [5] and vertical acceleration of the AC ( $\omega$ ) are received in the present work and the graphical charts are built (Fig. 2).

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

$$\gamma_0 = \gamma_{0e} (1 + 0,0052884 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi)$$

- довідкове значення прискорення сили тяжіння;

$$\gamma_{0e} = 9,78049 \text{ м/с}^2 - \text{довідкове екваторіальне значення прискорення сили тяжіння.}$$

У роботі [5] отримано аналітичні вирази спектральних щільностей корисного сигналу ( $\omega$ ) та вертикального прискорення ЛА ( $\omega$ ) та побудовано їх графіки (рис. 2).

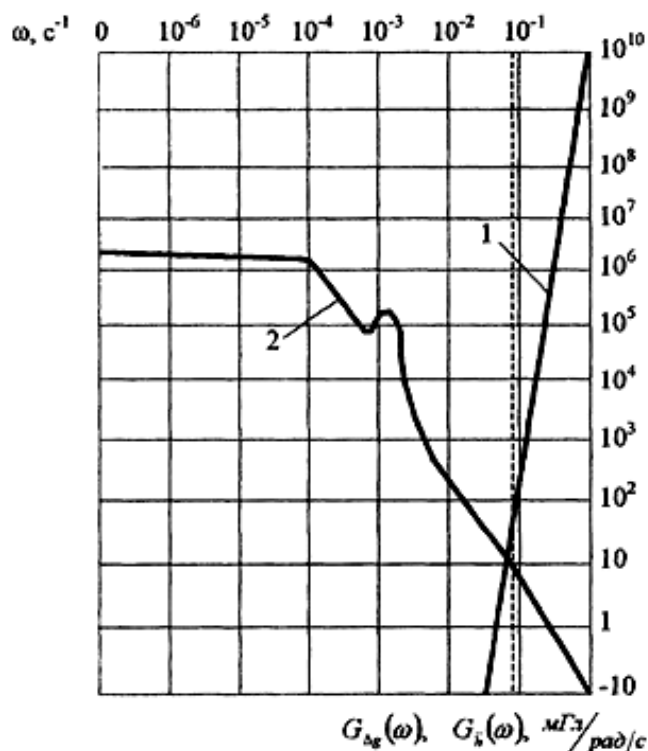


Fig. 2 – Schedule spectral density signal AOG (2) and vertical acceleration of the aircraft (1) / *Графік спектральної щільності корисного сигналу ПСТ (2) і вертикального прискорення ЛА (1)*

As it can be seen from the Fig.2, at frequencies lower than 0.1 rad/s, the auto-pilot system makes a dent in influence of vertical acceleration, at frequencies higher than 0.1 rad/s, the spectral density approaches infinity. That is why it is important to secure the filtration process of the output signal of the dual-channel capacitive gravimeter with the frequency equal to 0.1 rad/s. The most popular method of the constructive implementation of this process in the known gravimeters is the usage of the low-frequencies filters with the cutoff frequency equal to 0.1 rad/s [6].

However, in the conditions of the dual-channel capacitive gravimeter operation, the work of filter electronic components become inconsistent, changing the cutoff frequency.

As a final result, the filter starts to pass the errors to the output of the the dual-channel capacitive gravimeter or will black the useful signal out at all. That is why the availability of the low-frequencies

Із рис. 2. видно, що при частотах, менших за 0.1 рад/с, система літак-автопілот суттєво зменшує ефекти впливу вертикального прискорення; при частотах понад 0.1 рад/с спектральна густина вертикального прискорення прямує до нескінченності. Тому необхідно забезпечити процес фільтрації вихідного сигналу ДЄГ із частотою 0.1 рад/с. Найпоширенішим методом конструктивної реалізації даного процесу у відомих гравіметрів є використання низько-частотних фільтрів із частотою зрізу 0.1 рад/с [6].

Однак, у тих умовах, у яких передбачена експлуатація ДЄГ, робота електронних компонентів фільтра стає нестабільною, цим змінюючи його частоту зрізу.

У кінцевому результаті фільтр починає пропускати завади на вихід ДЄГ або не пропускати частину корисного сигналу взагалі. Тому наявність фільтра низьких частот, як окремого блока у складі гравіметра, суттєво

filter, as a separate unit within the gravimeter, first of all sufficiently reduces instrument accuracy and its reliability

The method of the dual-channel capacitive gravimeter output signal filtration is suggested: by means of creation of the AGC new gravimeter sensitive unit, the natural vibration frequency of which is equal to the highest frequency of the gravity acceleration, which can be measured against the background of culprits – 0.1 rad/s.

### CONCLUSIONS

The new dual-channel capacitive gravimeter of an automatic AGC suggested. It has the better of accuracy of 1 mGal, and speed work (completely automatic) if compared with the known ones. The principle of the new dual-channel capacitive gravimeter is described.

Due to the use of an additional second channel, the absence of errors in the gravimeter output signal caused by the influence of vertical acceleration and the residual nonidentity of construction of the two capacitive elements, which can be substantial, is secured.

The problem of the dual-channel capacitive gravimeter output signal filtration from the high-frequencies interference is solved due to the setting up of the natural vibration frequency which is equal to - 0.1 rad/s, which in its turn allows to avoid the need of using the additional low-frequency filters as a part of the AGC.

### REFERENCES

- [1]. Bezvesilna, O.M Aviation gravimetric systems and gravimeters [Text]: monograph / O.M Bezvesilna. - Zhytomyr: ZSTU, 2007. - 604 p.
- [2]. Patent for invention of Ukraine 105122, MPK G01V 7/00. Aviation gravimetric system for measuring the gravity anomalies. / O.M Bezvesilna, A.H. Tkachuk, K.S Kozko – № a201304061; Appl. 01.04.13; Publish. 12.25.13, Bul. № 24.
- [3]. Bezvesilna, O.M Measuring the gravity [Text]: monograph / O.M Bezvesilna. – Zhytomyr: ZSTU, 2002. - 264 p.
- [4]. Bezvesilna, O.M Measuring the acceleration [Text]: monograph / O.M Bezvesilna. – Kyiv: Lybid, 2001. - 261 p.
- [5]. Bezvesilna, O.M Piezoelectric gravimeter of aviation gravimetric systems [Text]: monograph / O.M Bezvesilna, A.H. Tkachuk. – Zhytomyr: ZSTU, 2013. – 240 p.
- [6]. Bezvesilna, O.M The high-precision piezoelectric gravimeter of aviation gravimetric system for measuring the gravity anomalies [Text] / O.M Bezvesilna, A.H. Tkachuk, M.A Voytsytsky // Geophysical journal. – № 4, T. 37, 2015

зменшує, у першу чергу, надійність приладу та точність.

Пропонується спосіб фільтрації вихідного сигналу ДЄГ за рахунок створення чутливого елемента нового гравіметра АГС, частота власних коливань якого дорівнює найбільшій частоті гравітаційних прискорень, що може бути виміряна на фоні перешкод – 0.1 рад/с.

### ВИСНОВКИ

Запропоновано новий двоканальний ємнісний гравіметр автоматизованого АГК, який має більшу точність (1 мГал) та швидкодію (повністю автоматизований), ніж відомі сьогодні. Описано принцип дії нового двоканального ємнісного гравіметра. Завдяки використанню додатково введеного другого каналу забезпечується відсутність у вихідному сигналі гравіметра сигналів похибок від впливу вертикального прискорення, від залишкової неідентичності конструкцій двох ємнісних елементів, які можуть бути значними.

Вирішено проблему фільтрації вихідного сигналу ДЄГ від високочастотних завад за рахунок встановлення частоти його власних коливань 0.1 рад/с, що дозволяє уникнути необхідності використання додаткових фільтрів низьких частот у складі АГК.

### БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

- [1]. Безвесільна, О.М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри [Текст]: монографія / О.М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.
- [2]. Патент України на винахід 105122, МПК G01V 7/00. Авіаційна гравіметрична система для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук, К.С. Козько – № a2013 04061; Заявл. 01.04.13; Опубл. 25.12.13, Бюл. № 24.
- [3]. Безвесільна, О.М. Вимірювання гравітаційних прискорень [Текст] / О.М. Безвесільна. – Житомир: ЖІТІ, 2002. – 264 с.
- [4]. Безвесільна, О. М. Вимірювання прискорень [Текст] / О. М. Безвесільна. – К.: Либідь, 2001. – 261 с.
- [5]. Безвесільна, О. М. П'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи [Текст]: монографія / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук. – Житомир: ЖДТУ, 2013. – 240 с.
- [6]. Безвесільна, О. М. Високоточний п'єзоелектричний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння [Текст] / О.М. Безвесільна, А. Г. Ткачук, М. А. Войцицький / Геофизический журнал № 4, Т. 37, 2015