

Новий двоканальний МЕМС гравіметр авіаційної гравіметричної системи

(Представлено: д.т.н., доц. Киричук Ю.В.)

Присвячено дослідженню нового двоканального ємнісного МЕМС гравіметра (МЕМС ДЄГ) автоматизованої авіаційної гравіметричної системи (АГС). Обґрунтовано актуальність досліджень, можливість та доцільність використання у якості гравіметра АГС нового МЕМС ДЄГ.

Проведено аналіз сучасних гравіметрів, які застосовуються при проведенні авіаційних гравіметричних робіт, та найбільш перспективних наукових розробок і виявлено їх основні недоліки: низька точність вимірювання; обов'язкова необхідність використання складних процедур фільтрації вихідного сигналу гравіметра АГС; відсутність можливості оперативної обробки інформації; нелінійність вихідної характеристики; висока вартість (сапфір); складність конструкції; наявність інструментальних похибок та похибок від дії вертикального прискорення; невисока швидкість обробки інформації та інші.

Описано конструкцію та принцип роботи пропонованого МЕМС ДЄГ, розроблено структурну схему. Пропонована конструкція ДЄГ забезпечує відсутність похибок: від залишкової неідентичності конструкцій однакових ємнісних елементів, від впливу змін температури, вологості та тиску зовнішнього середовища (інструментальних похибок), усунення впливу вертикального прискорення літака на покази гравіметра одразу двома способами, повністю ліквідувати вплив похибок, викликаних шумами різного походження (від ємнісного зв'язку, акустичних шумів тощо).

Розроблено та описано лабораторну установку для проведення експериментальних досліджень ДЄГ. Експериментально визначено похибку ДЄГ у лабораторних умовах, яка співпадає із результатами цифрового моделювання.

Ключові слова: прискорення сили тяжіння; авіаційна гравіметрична система; ємнісний гравіметр.

Актуальність гравіметричних досліджень та використання МЕМС – технологій у приладобудуванні. Для визначення характеристик гравітаційного поля Землі використовуються авіаційні гравіметричні системи (АГС). Їх чутливим елементом є гравіметр, від точності якого великим чином залежить точність АГС. АГС дозволяє здобути гравіметричну інформацію у важкодоступних районах земної кулі швидше та з меншими витратами, ніж за допомогою наземних, морських або сухопутних гравіметричних засобів. Дані про прискорення сили тяжіння (g) або його аномалію (Δg), введені у пам'ять бортового комп'ютера (БК) АГС, суттєво впливатимуть [15, 2] на підвищення точності визначення навігаційних параметрів та ефективності гравіметричної розвідки.

Сьогодні актуальною є проблема високоточного визначення параметрів g або Δg , особливо у віддалених і важкодоступних районах Землі, акваторіях морів і океанів, їх шельфів. Традиційна авіаційна гравіметрія відрізняється дещо застарілими технологіями і недостатнім рівнем точності [2], при цьому для неї характерні низькі продуктивність, детальність і оперативність, високі матеріальні витрати. Використання малогабаритних ЛА дозволяє істотно знизити експлуатаційні витрати при проведенні гравіметричних зйомок і знизити горизонтальні швидкості польоту.

Нині світ стоїть на порозі чергової технологічної революції, пов'язаної з вибуховим розвитком елементної бази на основі мобільних датчиків нового покоління. Іншим важливим для практичних застосувань наслідком, у тому числі, в царині геофізики, є еволюція дистанційно керованих малих і середніх безпілотних літальних апаратів (ЛА). Зважаючи на це, а також на помітну еволюцію методики високоточних гравіметричних знімачів, невдовзі постане гостра потреба у нових засобах вимірювання фізичних полів, точність та сумісність яких з вищевказаними викликами відповідатиме практичним потребам. І безперечною є актуальність розробки нових технічних засобів і теоретичних принципів керування дистанційними, зокрема, і АГС.

Сьогодні одними із найперспективніших є мікроелектромеханічні системи та технології (МЕМС) [16], що поєднують у собі мікроелектронні і мікромеханічні компоненти. Основні переваги МЕМС-технологій: мініатюрність; висока функціональність; точність; мале енергоспоживання; можливість інтеграції електроніки з механічними, оптичними та іншими вузлами; малий розкид параметрів у межах однієї партії виробів; висока технологічність і повторюваність; можливість досягти

дуже низьку вартість (при великих або дуже великих обсягах виробництва) і нижчу вартість, ніж у подібних дискретних механічних схем. *Недоліки*: технологічний процес є дуже складним і тривалим

Аналіз сучасних гравіметрів та перспективних розробок АГС. На сьогоднішній день існує декілька типів гравіметрів АГС, які мають як переваги, так і недоліки. Розробками нових моделей гравіметрів АГС та підвищенням їх точності займаються провідні технічні університети Росії, США, Японії, Німеччини та інших країн світу [14, 18–22]. Майже всі відомі гравіметри вимірюють впливи похибки вертикального прискорення [24], яка у десятки разів перевищує корисний сигнал. Потребують довгого періодичного калібрування й налаштування [21], що значно ускладнює роботу. Існуючі новітні розробки належать до під-, надводних [18, 14] та наземних [22] методів вимірювання, які не застосовуються у авіаційній гравіметрії.

Протягом останніх 20 років у якості авіаційних гравіметрів використовували лише кварцові сильно демпфовані гравіметри, струнні гравіметри, гіроскопічні гравіметри [1, 3–6, 8, 13, 23]. Сьогодні одним із найперспективніших із відомих гравіметрів є ємнісний одноканальний гравіметр. Він є основним чутливим елементом розробленої автоматизованої АГС [7]. Однак, в одноканальному ЄГ не передбачено компенсацію похибок, спричинених впливом вертикального прискорення та інструментальних похибок.

Відомо [11], що ємнісний метод вимірювання зміщення маси забезпечує високу точність тільки при вимірах його компенсаційним методом, при якому величина зазору забезпечується постійною, тобто ємнісний перетворювач виконує функцію нуль-органу у системі силової компенсації гравіметра, а у разі прямого методу вимірювання його динамічний діапазон не перевищує 10^3 , що у перерахунку на приріст ПСТ становить близько 0,2 мГал і не є достатнім для проведення вимірювань з достатньою точністю, що є недоліком.

У винаході [12] пружний елемент і рухома маса виконані у вигляді єдиного елемента з монокристалу, переважно сапфіра. Цей елемент має форму багатогранної призми з двома наскрізними бічними отворами. Чутливість гравіметра визначається в основному процесами старіння і залежністю пружних властивостей пружини у гравіметрі від температури.

Гравіметр [9] складається з демпфованої рідиною кварцової чутливої системи. Винахід дозволяє підвищити точність завдяки зменшенню дрейфу нуля та збільшенню діапазону лінійності. *Недоліками* даного гравіметра є складність конструкції, відсутність повної компенсації основної завади – вертикального інерціального прискорення (наявність фільтра ускладнює конструкцію).

Мікроелектромеханічні системи дозволяють із мінімальними витратами підвищити чутливість і точність перетворювачів (датчиків) на рівні кристалів. Спектр наявних типів сенсорів в арсеналі конструктора значно ширший та різноманітніший, що зумовлено багатоплановим застосуванням МЕМС. Переважно використовуються ємнісні, п'єзоелектричні, тензорезистивні, терморезистивні, фотоелектричні, на ефекті Хола перетворювачі. Ємнісні МЕМС – акселерометри, вироблені компаніями Analog Devices, Bosch, Delphi, Denso, Freescale, Kionix, Silicon Designs, ST Microelectronics, VTI Technologies, займають лідируючі позиції на сучасному ринку [17].

Вивчивши та проаналізувавши літературу про недоліки існуючих рішень [1, 3–14, 17–24] можна зробити наступні висновки: *нелінійність вихідної характеристики; невисока точність вимірювань (1–8 мГал); необхідність використання складних процедур фільтрації з використанням спеціальних фільтрів вихідного сигналу, що надходить з гравіметра АГС; наявність інструментальних похибок та похибок від дії вертикального прискорення; невисока швидкість обробки інформації (обробку результатів гравіметричних вимірювань проводять на Землі протягом декількох місяців) та інші.* Розглянуті вище ємнісні гравіметри мають, велику вартість (сапфір), складність конструкції, відсутність повної компенсації основної завади – вертикального інерціального прискорення.

Вказані *недоліки можна подолати, якщо як гравіметр АГС застосувати новий двоканальний ємнісний МЕМС гравіметр.*

Доцільність дослідження даного типу гравіметра пояснюється тим, що сьогодні ємнісні МЕМС акселерометри (різновидом яких є ємнісний гравіметр) мають такі переваги: лінійну вихідну характеристику, є найбільш чутливими і мають найменші масогабаритні параметри. Ці пристрої конструюються для використання в екстремальних умовах (перевантаження до 30g, діапазон температур від -40^0 до $+75^0\text{C}$; тиск повітря від 650 до 800 мм рт. ст.). Наявна можливість їх використання на літаку [2].

Новий МЕМС ДЄГ автоматизованої АГС. Зважаючи на перспективність ЄГ і, зокрема, двоканальних ЄГ наведемо структурну (рис. 1) та принципову схеми (рис. 2) та розглянемо принцип дії ДЄГ автоматизованої АГС [10].

На відміну від одноканального ємнісного гравіметра, завдяки використанню двоканальної схеми, компенсовано найбільш значні похибки від впливу вертикального прискорення ЛА та інструментальні похибки приладу.

Загальне передатне відношення записується у вигляді:

$$W = (W_{11} \cdot W_{12} \cdot W_{13} \cdot W_{14} + W_{21} \cdot W_{22} \cdot W_{23} \cdot W_{24}) \cdot \frac{W_{\text{нід.}}}{1 + W_{\text{нід.}} \cdot W_5}; \quad (1)$$

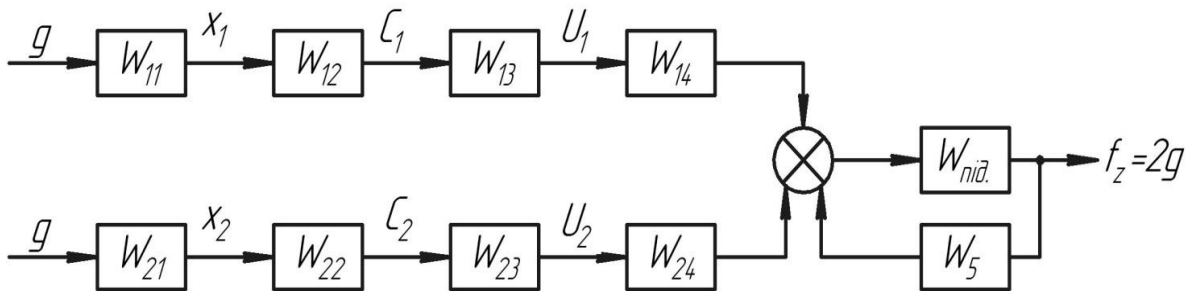


Рис. 1. Структурна схема ДФГ

W_1 – ланка, що перетворює гравітаційне прискорення g , що діє на ємнісний елемент, у зміну відстані між обкладками x ; W_2 – відповідає перетворенням зміни відстані x у зміну ємності C на електродах; W_3 – перетворення зміни ємності у зміну напруги на електродах ЧЕ; W_4 – описує процес, який проходить при зміні напруги на ємнісному елементі; $W_{нид}$ – передатна характеристика операційного підсилювача напруги; W_5 – зворотне кільце.

Гравіметр виконано із двома каналами, у кожному із яких встановлено по одному ємнісному елементу ЄГ1 та ЄГ2. Канали є ідентичними і виконані у вигляді двох металевих рухомої і нерухомої пластин, розділених діелектриком, та двох однакових інерційних мас m_1 та m_2 , прикріплених до двох рухомих пластин ЄГ1 та ЄГ2. Виходи ємнісних елементів ЄГ1 та ЄГ2 обох каналів з'єднані із входом суматора. Вихід останнього з'єднаний з входом підсилювача із додатково введеним захисним кільцем. Захисне кільце з'єднане напряму з виходом підсилювача, утворює низькоомний вхід сигналам від будь-яких паразитних зв'язків, які можуть бути значними та скасовує вплив крайових ефектів Далі сигнал подається на БК, де відбувається обчислення вихідного сигналу гравітаційної аномалії Δg . З'єднання суматора, підсилювача, цифрового модуля та БК послідовно відбувається за допомогою екранованих коаксіальних кабелів.

Отже, завдяки використанню додатково введеного другого каналу вимірювання, забезпечується відсутність у вихідному сигналі гравіметра сигналів похибок від залишкової неідентичності конструкцій однакових ємнісних елементів, від впливу змін температури, вологості та тиску зовнішнього середовища (тобто інструментальних похибок), які можуть бути значними.

Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння працює наступним чином.

На ємнісні елементи обох каналів діє прискорення сили тяжіння g_z , вертикальне прискорення \ddot{h} літака та інструментальні похибки Δi від впливу залишкової неідентичності конструкцій однакових пластин та мас, від впливу змін температури, вологості та тиску зовнішнього середовища, крайових ефектів. Якщо спроектувати всі ці впливи на вимірювальну вісь Oz (рис.2.) гравіметра 1 та врахувати те, що ємність ЄГ1 одного каналу збільшується у той час, коли ємність ЄГ2 на таку ж величину зменшується, то отримаємо:

$$u_1 = k(mg_z + m_i \ddot{h} + \Delta i), \quad (2)$$

$$u_2 = k(mg_z - m_i \ddot{h} - \Delta i), \quad (3)$$

де u_1 – вихідний електричний сигнал ємнісного елементу ЄГ1 одного каналу;

u_2 – вихідний електричний сигнал ємнісного елементу ЄГ2 другого каналу;

m_i – інерційна маса у кожному каналі;

k – електрична стала.

Вихідні електричні сигнали u_1 та u_2 ємнісних елементів обох каналів додаються у суматорі 9:

$$u_\Sigma = u_1 + u_2 = 2kmg_z, \quad (4)$$

де u_Σ – вихідний сигнал підсилювача 10.

Таким чином, запропонована авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння забезпечує суттєве підвищення точності вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння. Запропонована АГС має такі основні переваги, за рахунок використання ДФГ, перед відомими системами:

- через застосування двоканальності, повністю відсутні такі похибки вимірювань, які спричинені впливом вертикального прискорення h та інструментальних похибок Δi ;
- інші похибки частково гасяться за рахунок використання гіростабілізованої платформи (ГСП);
- при використанні власної частоти гравіметра в 0,1 рад/с будуть відфільтровані залишкові похибки.

Таким чином, точність АГС з ДФГ перевищує всі відомі аналоги.

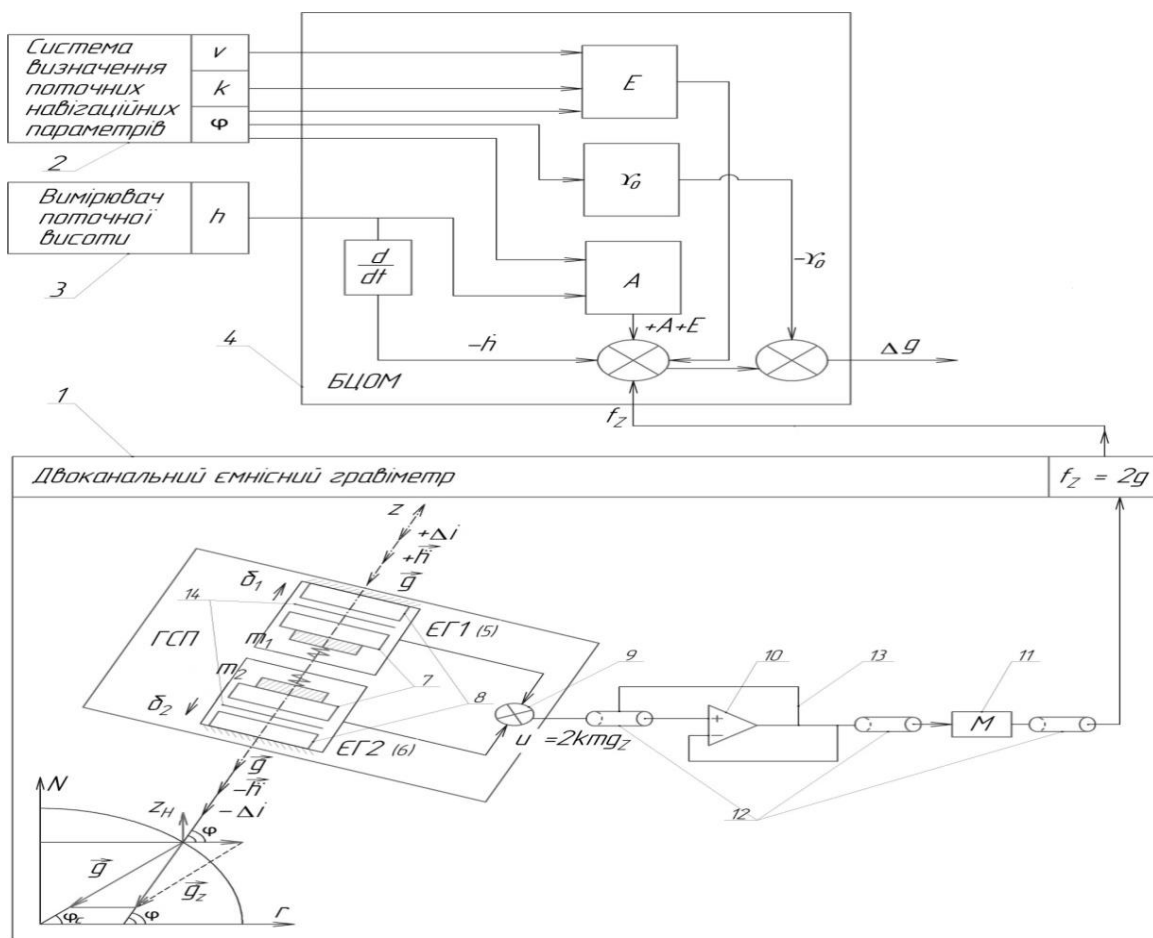


Рис. 2. МЕМС ДСГ автоматизованої АГС

1 – гравіметр, 2 – система визначення поточних навігаційних параметрів, 3 – вимірювач поточної висоти, 4 – БК (бортовий комп'ютер), 5, 6 – смісні елементи ЄГ1 та ЄГ2 відповідно, 7 – рухомі і 8 – нерухомі пластини, 9 – суматор, 10 – підсилювач, 11 – цифровий модуль, 12 – екрановані коаксіальні кабелі, 13 – захисне кільце, 14 – діелектрики

Опис експериментальної установки для досліджень МЕМС ДСГ. Для проведення експериментальних досліджень ДСГ була створена експериментальна установка, принципова схема та фото якої зображені на рисунку 3 та рисунку 4. До її складу входять наступні прилади: генератор механічних коливань ВУ-15М (вібростенд) із вбудованими в нього двома індукційними перетворювачами електричного сигналу у механічний; ДСГ, який розташований безпосередньо на вібростенді; мікросистема збирання даних (модуль введення-виведення); блок підсилення вихідного сигналу ДСГ; ЕОМ; генератор змінної напруги та вольтметри для реєстрації напруги генератора та напруги індукційного перетворювача відповідно.

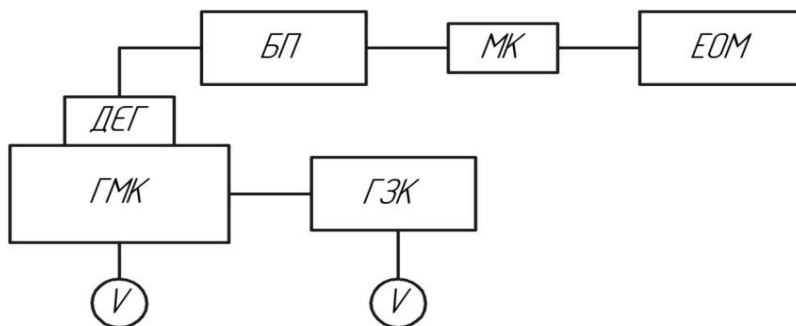


Рис. 3. Принципова схема експериментальної установки ДСГ:

ГМК – генератор механічних коливань; ДСГ – двоканальний смісний гравіметр; БП – блок підсилення вихідного сигналу ДСГ; МК – мікросистема збирання даних (модуль введення-виведення); ЕОМ; ГЗК – генератор змінної напруги живлення; V – вольтметр для реєстрації напруги

На рисунку 4 показано фото тестування ДЄГ підключеного до ЕОМ. Досліджуваний ДЄГ прикріплений до мікросхеми збирання даних MMA845X, яка підключена до мікроконтролера Uno R3, що обробляється через програмне середовище Arduino. Візуалізація результатів дослідження проводиться програмою SFMonitor.

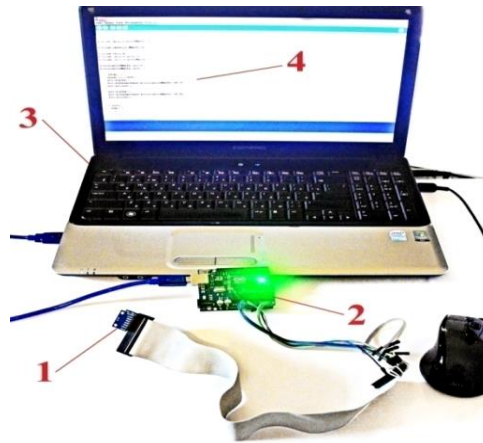


Рис. 4. Тестування ДЄГ: 1 - ДЄГ (мікросхема з встановленим на ній ЄГ); 2 – мікроконтролер; 3 – ПК; 4 – код програми.

Результати досліджень МЕМС ДЄГ. Встановлено, що результати експериментальних досліджень співпадають із результатами цифрового моделювання (рис. 5).

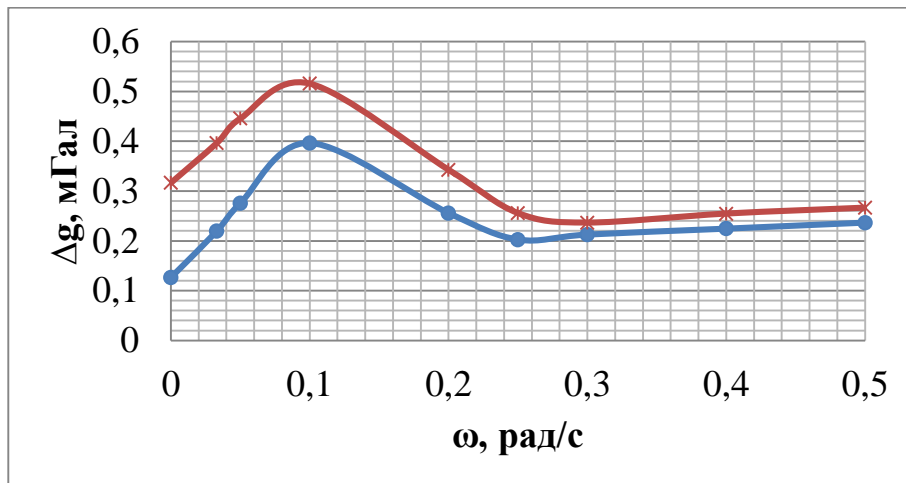


Рис. 5. Результати порівняння цифрового моделювання та експерименту:
● – цифрове моделювання; * – експеримент

Експериментально визначено похибку ДЄГ у лабораторних умовах, яка становить 0,06 мГал, що співпадає із результатами цифрового моделювання.

Тобто, запропонований ДЄГ є перспективною і доцільною розробкою серед авіаційних гравіметрів.

Висновки. У даній статті було проведено аналіз сучасних гравіметрів, які застосовуються сьогодні при проведенні авіаційних гравіметричних робіт, та найбільш перспективних наукових розробок і виявлено їх основні недоліки: низька точність вимірювання (1–8 мГал); обов'язкова необхідність використання складних процедур фільтрації вихідного сигналу гравіметра АГС; відсутність можливості оперативної обробки інформації; нелінійність вихідної характеристики; наявність інструментальних похибок та похибок від дії вертикального прискорення; невисока швидкість обробки інформації (обробку результатів гравіметричних вимірювань проводять на Землі протягом декількох місяців) та інші. Проведено патентний пошук в області ємнісних гравіметрів, який показав, що запатентовані розробки на ємнісних гравіметри мають: недостатню точність (5–8 мГал), велику вартість (сапфір), складність конструкції, відсутність повної компенсації основної завади – вертикального інерціального прискорення та залишкові інструментальні похибки. Проаналізовано МЕМС технології у приладобудуванні та отримані підтвердження доцільності їх використання при розробці ЄГ, серед яких слід відмітити такі переваги, як: мініатюрність; висока функціональність; точність; мале енергоспоживання; можливість інтеграції електроніки з іншими вузлами; малий розкид параметрів у межах однієї партії виробів; висока технологічність і повторюваність; можливість досягти дуже низьку вартість.

Розроблено принципову і структурну схеми та описано принцип дії нового ДЄГ. Пропонована конструкція ДЄГ забезпечує компенсацію похибок: від залишкової неідентичності конструкцій однакових ємнісних елементів, від впливу змін температури, вологості та тиску зовнішнього середовища (інструментальних похибок), усунення впливу вертикального прискорення літака на покази гравіметра одразу двома способами, повністю ліквідувати вплив похибок, викликаних шумами різного походження (від ємнісного зв'язку, акустичних шумів тощо).

Таким чином, запропонована авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння забезпечує суттєве підвищення точності вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння.

Список використаної літератури:

1. Аэрогравиметр GT-2A / АО «ГНПП Аэрогеофизика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=ru.
2. *Безвесільна О.М.* Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: монографія / *О.М. Безвесільна*. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.
3. Гравиметр CG-5 AutoGrav / Геоцентр-Москва [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://geocentr-msk.ru/content/view/441/137>.
4. Заявка на винахід № а2012 11163 Україна, МПК G01V 7/06 : Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння / *О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук* ; заяв. 26.09.2012.
5. Инерциально-гравиметрический комплекс МАГ-1А / Федеральное государственное унитарное научно-производственное предприятие «ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА». – 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://geolraz.com/page/GSA-2010/>.
6. Мобильный гравиметр «Чекан-АМ» / ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www/ URL: http://www.elektropribor.spb.ru/ru/rprod6-1.html](http://www.elektropribor.spb.ru/ru/rprod6-1.html).
7. Пат. 105122 Україна, МПК G01V 7/00. Авіаційна гравіметрична система для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння / *О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук, К.С. Козько* ; заяв. 01.04.13 ; опубл. 25.12.13, Бюл. № 24. – 5 с.
8. Пат. 109746 Україна. Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння / *О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук, Л.О. Чепюк* ; опубл. 25.09.2015, Бюл. № 18.
9. Пат. 1121639 РФ, МПК G 01 V 7/12. Гравиметр / *Е.И. Попов, В.П. Матюнин, А.Б. Манукин, В.Н. Конешов, Л.К. Железняк, Г.А. Гусев* ; заяв. 22.06.82 ; опубл. 30.10.84.
10. Пат. 113038 Україна, МПК G01V 7/06 (2006.01). Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння / *Безвесільна О.М., Ткачук А.Г., Хильченко Т.В.* – № а 2015 12205 ; заяв. 10.05.2016 ; опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22.
11. Пат. 2253882 Россия, МПК G 01 V 7/02. Гравиметр / *А.П. Быков, О.Е. Енина, В.П. Кулеши, Л.М. Москалик*
12. Пат. 548820 Россия, МПК G 01 V 7/02. Гравиметр / *Б.В. Брагинский, В.П. Матюнин* ; заяв. 10.11.74 ; опубл. 28.02.77, Бюл. № 8.
13. Струнный аэрогравиметр «Гравитон-М» / АО «ГНПП Аэрогеофизика». – 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=ru
14. The new IMGC-02 transportable absolute gravimeter: measurement apparatus and applications in geophysics and volcanology / *G.D. Agostino, S.Desogus, A.Germak, C.Origlia, D.Quagliotti, G.Berrino, G.Corrado, V.Derrico, G.Ricciardi* // *Annals of geophysics*. – 2008. – № 51 (1). – P. 39–40.
15. Introducing the principle of constructing an aviation gravimetric system with any type of gravimeter / *O.Bezvesilna, A.Tkachuk, S.Nechai, L.Chepyuk, T.Khylchenko* // *Eastern-European journal of enterprise technologies*. – 2017. – № 1/7 (85). – P. 45–56.
16. Simulation of influence of perturbation parameters on the new dual-channel capacitive MEMS gravimeter performance / *O.Bezvesilna, A.Tkachuk, S.Nechai, T.Khylchenko* // *Eastern-European journal of enterprise technologies*. – 2016. – № 6/7 (84). – P. 50–57.
17. Two-channel MEMS gravimeter for the automated aircraft gravimetric system / *I.Korobiichuk, O.Bezvesilna, A.Tkachuk, A.Praczkowska, T.Khylchenko* // *Systems, Control and Information Technology Warsaw*. – 2016. – № 20. – P. 481–488.
18. Time stability of spring and superconducting gravimeters through the analysis of very long gravity records / *M.Calvoa, J.Hinderera, S.Rosata, H.Legrosa, Jean-Paul Boya, B.Ducarmec, W.Zürnd* // *Journal of Geodynamics* – 2014. – № 80. – P. 20–33.
19. *Gramert W.R.* Third generation aero gravity system : International Association of Geodesy Symposium G4, IUGG XXI General Assembly / *W.R. Gramert*. – Boulder, Colorado, 1995.
20. The LST Airborne Gravity System / *J.C. Harrison, J.D. MacQueen, A.C. Rauhut, J.Y. Cruz* // International Association of Geodesy Symposium G4, IUGG XXI General Assembly. – Boulder, Colorado, 1995.
21. Huang Y. SGA-WZ: A New Strapdown Airborne Gravimeter / *Y.Huang, A.Vestergaard Olesen, M.Wu, K.Zhang* // *Sensors*. – 2012. – № 12 (7).
22. Integration of a strapdown gravimeter system in an autonomous underwater vehicle / *C.Roussela, J.Verduna, J.Calia, M.Maiab, J.F. d'EUB* // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2015. – № XL-5/W5. – P. 199–206.
23. TAGS-6. – 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.microglacoste.com/tags-6.php>.
24. *Wei M.* Analysis of GPS-derived acceleration from airbornetests: International Association of Geodesy Symposium G4, IUGG XXI General Assembly / *M.Wei, K.Schwarz*. – Boulder, Colorado, 1995.

References:

1. AO «GNPP Aerogeofizika» (2016), *Aerogravimetr GT-2A*, Available at: http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=ru
2. Bezvesil'na, O.M. (2007), *Aviacijni gravimetrychni systemy ta gravimetry*, monografija, ZhDTU, Zhytomyr, 604 p.
3. Geotsentr-Moskva (2016), «Gravimetr CG-5 AutoGrav», Available at: <http://geocentr-msk.ru/content/view/441/137>
4. Bezvesil'na, O.M. and Tkachuk, A.G. (2012), *Aviacijna gravimetrychna sistema dlja vymirjuvan' anomalij pryskorennja sily tjazhinnja* [Aviation gravimetric system for measuring anomalies of acceleration of gravity] MPK G01V 7/06, Zajavka na vynahid, Ukrai'na, zajav. vid 26 veresnja, No. a2012 11163.
5. Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe nauchno-proizvodstvennoe predpriatie «GEOLOGORAZVEDKA» (2016), «Inertial'no-gravimetrycheskij kompleks MAG-1A», available at: <http://geolraz.com/page/GSA-2010>
6. OAO «Kontsern «TsNII «Elektropribor»(2017), «Mobil'nyy gravimetr «Chekan-AM»», available at: <http://www.elektropribor.spb.ru/ru/rprod6-1.html>
7. Bezvesil'na, O.M., Tkachuk A.G. and Koz'ko, K.S. (2013), *Aviacijna gravimetrychna sistema dlja vymirjuvannja anomalij pryskorennja sily tjazhinnja* [Aviation gravimetric system for measuring the acceleration of gravity anomalies] MPK G01V 7/00, Ukrai'na, zajav. vid 01 kvitnja, opubl. vid 25 grudnja, Bjul. № 24, Pat. № 105122.
8. Bezvesil'na, O.M., Tkachuk, A.G. and Chepjuk, L.O. (2015), *Aviacijna gravimetrychna sistema dlja vymirjuvan' anomalij pryskorennja sily tjazhinnja* [Aviation gravimetric system for measuring anomalies of acceleration of gravity], Ukrai'na, Opubl. vid 25 veresnja, Bjul. № 18, Pat. 109746.
9. Popov, E.I., Matyunin, V.P., Manukin, A.B., Koneshov, V.N., Zheleznyak, L.K. and Gusev, G.A. (1982), *Gravimetr* [Gravimeter] MPK G 01 V 7/12, zayav. vid 22 chervnja, opubl. vid 30 zhovtnja, Pat. № 1121639 RF.
10. Bezvesil'na O.M., Tkachuk A.G. and Hyl'chenko, T.V. (2016), *Aviacijna gravimetrychna sistema dlja vymirjuvan' anomalij pryskorennja sily tjazhinnja* [Aviation gravimetric system for measuring anomalies of acceleration of gravity] MPK G01V 7/06 (2006.01), Patent na vynahid, Ukrai'na, zajav. vid 10 travnja, opubl. vid 25 lystopada, Bjul. № 22, Pat. 113038, № a 2015 12205.
11. Bykov, A.P., Enina, O.E., Kulesh, V.P. and Moskalik, L.M., *Gravimetr* [Gravimeter] MPK G 01 V 7/02, Rossija, Pat. № 2253882.
12. Braginskij, V.B. and Matyunin, V.P. (1974), *Gravimetr* [Gravimeter] MPK G 01 V 7/02, Rossija, zayav. vid 10 nojabrja, opubl. vid 28 fevralja, Byul. No. 8, Pat. № 548820.
13. AO «GNPP Aerogeofizika» (2016), Strunnyy aerogravimetr «Graviton-M», available at: http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=ru
14. Agostino, G.D., Agostino, G.D., Desogus, S., Germak, A., Origlia, C., Quagliotti, D., Berrino, G., Corrado, G., Derrico, V. and Ricciardi, G. (2008), «The new IMGC-02 transportable absolute gravimeter: measurement apparatus and applications in geophysics and volcanology», *Annals of geophysics*, No. 51 (1), pp. 39–40.
15. Bezvesil'na, O., Tkachuk, A., Nechai, S., Chepyuk, L. and Khylychenko, T. (2017), «Introducing the principle of constructing an aviation gravimetric system with any type of gravimeter», *Eastern-European journal of enterprise technologies*, No. 1/7 (85), pp. 45–56.
16. Bezvesil'na, O., Tkachuk, A., Nechai, S. and Khylychenko, T. (2016), «Simulation of influence of perturbation parameters on the new dual-channel capacitive MEMS gravimeter performance», *Eastern-European journal of enterprise technologies*, No. 6/7 (84), pp. 50–57.
17. Korobiichuk, I., Bezvesil'na, O., Tkachuk, A. and Khylychenko, T. (2016), «Two-channel MEMS gravimeter for the automated aircraft gravimetric system», *Systems, Control and Information Technology Warsaw*, No. 20, pp. 481–488.
18. Calvo, M., Hinderera, J., Rosata, S., Legrosa, H., Boya, Jean-Paul, Ducarmec, B. and Zürrnd, W. (2014), «Time stability of spring and superconducting gravimeters through the analysis of very long gravity records», *Journal of Geodynamics*, No. 80, pp. 20–33.
19. Gramert, W.R. (1995), «Third generation aero gravity system», International Association of Geodesy Symposium G4, IUGG XXI General Assembly, Boulder, Colorado.
20. Harrison, J.C., MacQueen, J.D., Rauhut, A.C. and Cruz, J.Y. (1995), «The LST Airborne Gravity System», *International Association of Geodesy Symposium G4, IUGG XXI General Assembly*, Boulder, Colorado.
21. Huang, Y., Vestergaard, A., Meiping Wu, O. and Zhang, K. (2012), «SGA-WZ: A New Strapdown Airborne Gravimeter», *Sensors*, No. 12 (7).
22. Roussela, C., Verduna, J., Calia, J., Maiab, M. and D'EUb, J.F. (2015), «Integration of a strapdown gravimeter system in an autonomous underwater vehicle», *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, No. XL-5/W5, pp. 199–206.
23. «Microglacoste» (2017), *TAGS-6*, available at: <http://www.microglacoste.com/tags-6.php>
24. Wei, M. and Schwarz, K. (1995), «Analysis of GPS-derived acceleration from airborne tests», *International Association of Geodesy Symposium G4, IUGG XXI General Assembly*, Boulder, Colorado.

Хильченко Тетяна Валентинівна – аспірантка кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ім. проф. Б.Б. Самотокіна Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- Гравіметрія;
- прилади та методи вимірювання механічних величин.

Тел.: (093) 897–33–21.

E-mail: xvulunka@i.ua.

Стаття надійшла до редакції 02.04.2018.