
doi:<https://doi.org/10.15407/emodel.40.03.087>

УДК 621.317

Т.В. Хильченко, аспірантка
Житомирський державний технологічний університет
(Україна, 10002, Житомир, вул. Чуднівська, 103,
тел. (093) 8973321, e-mail: xvulunka@i.ua)

Моделювання роботи нового двоканального ємнісного мікроелектромеханічного гравіметра авіаційної гравіметричної системи

Дано аналіз сучасних гравіметрів, які застосовуються при проведенні авіаційних гравіметричних робіт та найперспективніших наукових розробок. Запропоновано новий двоканальний ємнісний гравіметр (ДЕГ) з використанням мікроелектромеханічної системи (МЕМС) автоматизованої авіаційної гравіметричної системи (АГС). Обґрунтовано актуальність досліджень, можливість та доцільність використання ДЕГ у якості гравіметра АГС. Проведено аналіз літературних джерел у галузях сучасної авіаційної гравіметрії та МЕМС технологій у приладобудуванні. Описано конструкцію та принцип роботи запропонованого МЕМС ДЕГ, розроблено структурну схему. Поточнено значення коефіцієнта пружності підвісу складної форми. Розглянуто можливість та доцільність використання нейромережевого підходу в задачах розробки алгоритмів функціонування АГС із новим ДЕГ.

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

Сучасні гравіметри авіаційної гравіметричної системи (АГС). Для визначення характеристик гравітаційного поля Землі використовуються АГС. Їх чутливим елементом є гравіметр, від точності якого, залежить точність АГС. Авіаційна гравіметрична система дозволяє здобути гравіметричну інформацію у важкодоступних районах земної кулі (гірські масиви, акваторії океанів, морів, зони екватору та полюсів Землі) швидше та з меншими витратами, ніж за допомогою наземних морських або сухопутних гравіметричних засобів. Дані про прискорення сили тяжіння (g), або гравітаційну аномалію (Δg), введені у пам'ять бортового комп'ютера (БК) АГС, суттєво впливатимуть [1] на підвищення точності визначення навігаційних параметрів та ефективності гравіметричної розвідки.

Гравіметр є багатопрофільним приладом для вимірювання параметрів g або Δg , застосування якого можливо в багатьох областях. Однак на практиці майже 100 % гравіметрів використовується у гравіроздаваль-

© Т.В. Хильченко, 2018

них роботах, а саме у пошуках родовищ корисних копалин. Завдяки гравірозвідці можна безпосередньо з земної поверхні визначити наявність у надрах тих чи інших корисних копалин.

МЕМС-технології у приладобудуванні. Нині світ стоїть на порозі чергової технологічної революції [2], пов'язаної з вибуховим розвитком елементної бази на основі мобільних датчиків нового покоління. Іншим важливим для практичних застосувань наслідком, є еволюція дистанційно керованих малих і середніх безпілотних літальних апаратів (ЛА). Зважаючи на це, а також на суттєву еволюцію методики високоточних гравіметричних знімань, невдовзі постане гостра потреба у нових засобах вимірювання фізичних полів, точність та сумісність яких з вищевказаними викликами відповідатиме практичним потребам. Безперечно актуальність розробки нових технічних засобів і теоретичних принципів дистанційного керування, зокрема АГС, не викликає сумнівів.

На даний час актуальною є проблема високоточного визначення параметрів g або Δg , особливо у віддалених і важкодоступних районах Землі, акваторіях морів і океанів, їх шельфів. Традиційна аероморська гравіметрія має дещо застарілі технології і недостатній рівень точності [1]. Характерними її рисами є низькі продуктивність, детальність і оперативність, а також високі матеріальні витрати (особливо вартість експлуатації середнього класу суден і ЛА з екіпажем). У той же час, вирішення проблеми можливе за допомогою застосування бортового мініатюрного керуючого безплатформеного гравінерціального навігаційного комплексу малорозмірного динамічного носія — безпілотного ЛА [3]. Використання малогабаритних ЛА дозволяє значно знизити експлуатаційні витрати при проведенні гравіметричних зйомок і знизити горизонтальні швидкості польоту. Останнє потрібне для підвищення точності вимірювань [4] (до 1 мГал) при роздільній здатності до 500 м для пошуку корисних копалин у важкодоступних місцях.

В нинішній час одними із найперспективніших [2] є МЕМС та технології, що поєднують у собі мікроелектронні і мікромеханічні компоненти. Основні переваги МЕМС-технологій: мініатюрність; висока функціональність; точність; невелике енергоспоживання; можливість інтеграції електроніки з механічними, оптичними та іншими вузлами; незначний розкид параметрів у межах однієї партії виробів; висока технологічність і повторюваність; можливість отримати дуже низьку вартість (при великих або дуже великих обсягах виробництва) і нижчу вартість, ніж подібних дискретних механічних схем. Недоліки: сумарний технологічний процес є дуже складним і тривалим.

Існуючі типи гравіметрів та перспективні розробки. Відомі декілька типів гравіметрів АГС мають як переваги, так і недоліки. Розробками

нових моделей гравіметрів АГС та підвищенням їх точності займаються провідні технічні університети США, Японії, Німеччини, Росії та інших країн світу [5]. Майже всі відомі гравіметри вимірюють похибку вертикального прискорення [6], яка у десятки разів перевищує корисний сигнал. Вони потребують довгого періодичного калібрування й налаштування [7], що значно ускладнює роботу. Існуючі новітні розробки належать до підводних, надводних [8, 9] та наземних [10] методів вимірювання, які не застосовуються у авіаційній гравіметрії.

Протягом останніх 20 років у якості авіаційних гравіметрів використовували лише кварцові значно демпфовані гравіметри, струнні та гіроскопічні гравіметри [11]. Найперспективнішим із відомих гравіметрів є одноканальний ємнісний гравіметр (ОЄГ). Він є основним чутливим елементом розробленої автоматизованої АГС [12]. Однак в ОЄГ не передбачено ліквідацію похибок, спричинених впливом вертикального прискорення та інструментальних похибок.

Огляд ємнісних МЕМС акселерометрів. Мікроелектромеханічні системи дозволяють [2] 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, SiliconDesigns, ST Microelectronics, VTI Technologies, посідають провідні позиції на сучасному ринку [13].

Аналіз наукової літератури [14—19] дозволив побудувати табл. 1, в якій порівнюються найновіші гравіметри, що використовуються на борту ЛА, та перспективні розробки. Як видно з табл. 1, описаним гравіметрам притаманні такі недоліки: нелінійність вихідної характеристики; невисока точність вимірювань (1—8 мГал); необхідність 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, яку виконують на Землі протягом місяців, та ін. Для розглянутих вище ємнісних гравіметрів (ЄГ) характерними є велика вартість (сапфір), складність конструкції, відсутність повної компенсації основної завади — вертикального інерціального прискорення.

Вказані недоліки можна подолати, застосовуючи новий ДЄГ МЕМС-гравіметр як гравіметр АГС. Доцільність дослідження гравіметра такого типу пояснюється тим, що ємнісні МЕМС-акселерометри (різновидом

Таблиця 1. Порівняльна характеристика існуючих гравіметрів АГС та перспек

Тип гравіметра	Зображення	Приклади	Принцип дії
Кварцовий		«Чекан-АМ»	Маятниковий момент діє на кварцову пластину, у результаті чого виникає електричний заряд, пропорційний прискоренню сили тяжіння (ПСТ)
Пружинний		L-R-S «ScintrexCG-5 Autograv»	Компенсація моменту за допомогою вертикальної пружини
Магнітний		МАГ-1А (GT-1А), TAGS-6	Компенсація моменту, створеного ПСТ, за допомогою магнітної або електромагнітної пружини
П'єзоелектричний		Тільки наукові прототипи	ПСТ стискає п'єзоелектричні пластини, на їх гранях виникає електричний заряд, пропорційний діючій силі
Струнний		«Гравітон-М»	Принцип дії оснований на властивості струни змінювати частоту власних коливань при зміні її натягу. Тобто, вимірювання ПСТ зводиться до вимірювання частоти коливання струни
Гіроскопічний		PIGA 16, 25; гірогравіметр (науковий прототип)	Маятниковий момент перетворюється у гіроскопічний момент. Вихідний сигнал пропорційний ПСТ
ОЕГ		Тільки наукові прототипи	Дія ПСТ перетворюється у зміну зазору між пластинами, а потім — у зміну вихідної напруги

яких є ЄГ) мають лінійну вихідну характеристику, є найбільш чутливими і мають найменші масогабаритні параметри. Ці пристрої використовуються в екстремальних умовах (перевантаження до 30g, діапазон температур від -40° до $+75^{\circ}\text{C}$; тиск повітря від 650 до 800 мм рт. ст.). Умови їх використання на літаку є значно простішими [20].

тивних розробок

Переваги	Недоліки
Похибку від впливу горизонтальних прискорень практично виключено	Велика постійна часу, не використовуються для вимірювань постійних та повільно змінних сигналів, недостатня точність (2-3мГал)
Відсутність впливу температури, тиску, магнітного поля, автоматичне шумозаглушення, низький залишковий дрейф, мала вага	Важкопрогнозований дрейф пружних властивостей пружинного елемента; недостатня точність (2-3мГал)
Малі габарити та вага, зручний вихідний сигнал, висока чутливість, мала стала часу	Нестабільність магнітних властивостей постійного магніту; недостатня точність (2-3мГал)
Малі габарити та вага, зручний вихідний сигнал, висока чутливість, мала стала часу	У простому виконанні можна використовувати тільки для реєстрації швидкоплинних процесів; недостатня точність (2-3мГал)
Частотний вихідний сигнал, який можна точно виміряти та проінтегрувати, висока чутливість, мала стала часу, майже необмежений діапазон вимірювання вхідних величин	Нестабільність пружних властивостей струни; нелінійність та можливість резонансів у простому виконанні; недостатня точність (2 мГал), чутливість до змін вібрацій та температури, вплив барометричного ефекту
Вібростійкість, відносно висока чутливість, незалежність від постійної напруги чи низькочастотних параметричних умов електроніки	Недостатня точність (2-3 мГал), висока вартість, складність конструкції, наявні інструментальні похибки, необхідність дуже точної стабілізації осі чутливості; необхідні допоміжні пристрої
Лінійність, стійкість показань, малі габарити та вага, висока чутливість	Наявність залишкових інструментальних похибок, та похибок від вертикального прискорення, необхідно використовувати підсилювач, наявність власних шумів; недостатня точність (1 мГал)

Новий МЕМС ДЄГ автоматизованої АГС. Зважаючи на перспективність ЄГ і, зокрема ДЄГ, наведемо структурну (рис. 1) і принципову (рис. 2) схеми та розглянемо принцип дії ДЄГ автоматизованої АГС [21].

На відміну від ОЄГ внаслідок використання двоканальної схеми вилучено найбільш значні похибки від впливу вертикального прискорення

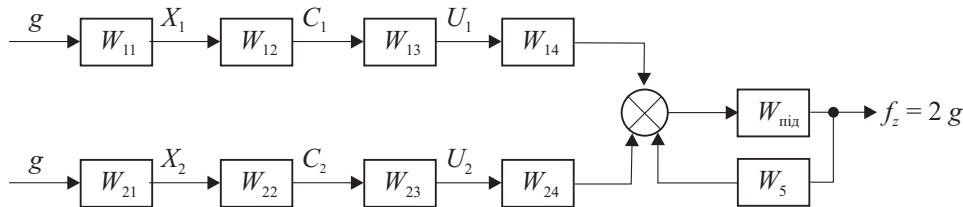


Рис. 1. Структурна схема ДСГ: W_{11}, W_{21} — ланки, які перетворюють гравітаційне прискорення g , що діє на ємнісний елемент, у зміну відстані між обкладинками x ; W_{12}, W_{22} — ланки, які перетворюють зміни відстані x у зміну ємності C на електродах; W_{13}, W_{23} — перетворення зміни ємності у зміну напруги на електродах ЧЕ; W_{14}, W_{24} — описують процес, який протікає при зміні напруги на ємнісному елементі; $W_{під}$ — передатна характеристика операційного підсилювача напруги; W_5 — зворотне кільце

ЛА та інструментальні похибки приладу. Загальне передатне відношення має вигляд:

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

Гравіметр виконано із двома каналами, у кожному із яких встановлено по одному ємнісному елементу ЄГ1 та ЄГ2. Канали ідентичні один одному і мають вигляд двох металевих (рухомої і нерухомої) пластин, розділених діелектриком, та дві однакові інерційні маси, m_1 і m_2 , прикріплені 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, яке на пряму з'єднане з виходом підсилювача і утворює низькоомний вхід сигналам від будь-яких паразитних зв'язків, що 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 відбувається послідовно за допомогою екранованих коаксіальних кабелів.

Отже, завдяки використанню додатково введеного другого каналу вимірювання забезпечується відсутність у вихідному сигналі ЄГ 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 ПСТ g_z , вертикальне прискорення \dot{h} літака та інструментальні похибки Δi від впливу залишкової неідентичності конструкцій однакових пластин і мас, від впливу змін температури, вологості та тиску зовнішнього

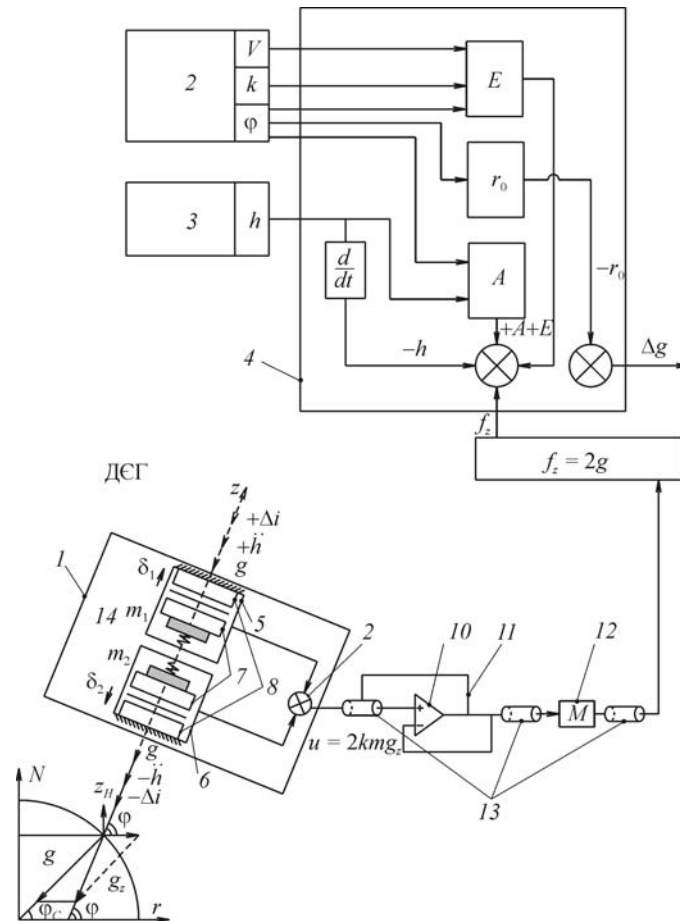


Рис. 2. МЕМС ДЄГ автоматизованої АГС : 1 — ГСП; 2— система визначення поточних навігаційних параметрів; 3 — вимірювач поточної висоти; 4 — БК; 5 і 6 — ємнісні елементи ЄГ1 і ЄГ2; 7 і 8 — рухома і нерухома пластини; 9 — суматор; 10 — підсилювач; 11 — захисне кільце; 12 — цифровий модуль; 13 — екрановані коаксіальні кабелі; 14 — діелектрики

середовища, крайових ефектів. Якщо спроектувати всі ці впливи на вимірювальну вісь Oz (див. 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:

$$u_1 = k(mg_z + m_i \ddot{h} + \Delta i), \quad u_2 = k(mg_z - m_i \ddot{h} - \Delta i),$$

де u_1 і u_2 — вихідні електричні сигнали ємнісних елементів ЄГ1 і ЄГ2 відповідно першого та другого каналів; m_i — інерційна маса у кожному каналі; k — електрична стала. Вихідні електричні сигнали u_1 та u_2 ємнісних

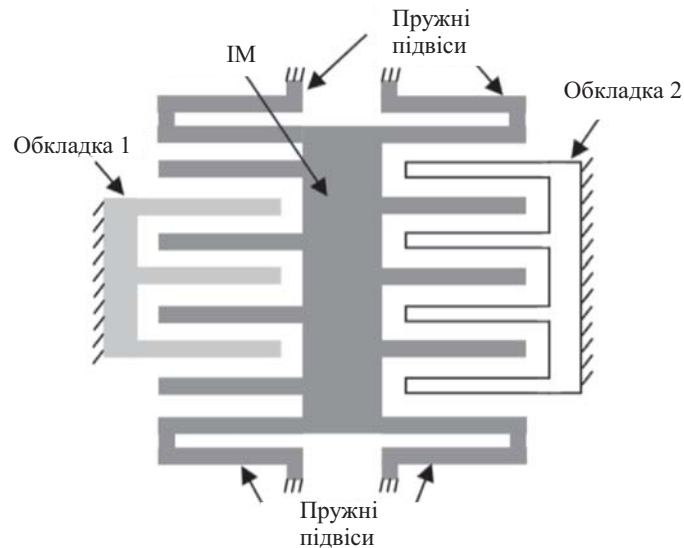


Рис. 3. Конструкція диференціального ємнісного МЕМС-акселерометра [22]

елементів обох каналів додаються у суматорі 9: $u_{\Sigma} = u_1 + u_2 = 2kmg_z$, де u_{Σ} — вихідний сигнал підсилювача 10.

Таким чином, запропонована АГС для вимірювань аномалій ПСТ забезпечує суттєве підвищення точності вимірювання аномалій ПСТ. У порівнянні з відомими системами вона має такі переваги внаслідок використання ДЄГ:

через застосування двоканальності повністю відсутні похибки вимірювань, спричинені впливом вертикального прискорення h та інструментальних похибок Δi ;

інші похибки частково вилучаються внаслідок використання ГСП;

при частоті 0,1 рад/с відфільтровуються залишкові похибки.

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

Запропонована конструкція МЕМС ДЄГ. Найактуальнішою та найбільш практичною [22] вважається конструкція, що складається з нерухою основи, часто з'єднаної з корпусом, та рамки з чутливим елементом, прикріпленої до верхньої рухою обкладинки. На обох пластинах наплено шар діелектрику. Модифікацією такої конструкції є зустрічно-штиркове розташування електродів обкладинок.

На рис. 3 наведено схему конструкції диференціального ємнісного МЕМС-акселерометра зі зустрічно-штирковим розташуванням електродів. Рухомі електроди розташовуються на інерційній масі (ІМ), яка кріпиться до кристала за допомогою пружних підвісів. Нерухомі електроди розташовуються праворуч і ліворуч від рухомих електродів.

Аналіз напружено-деформованого стану консолі чутливого елемента. Основними параметрами, які необхідно розраховувати при розробці МЕМС-акселерометра, є площа і ємність обкладинок, ІМ, власна частота, коефіцієнт демпфування, напруга притягання, а також необхідно знати коефіцієнт пружності підвісу. Пружні підвіси можуть бути прямими і складчастими. Вибір їх геометрії визначається обмеженнями топології і технологічних процесів. Для отримання високої чутливості і невеликих розмірів підвісу необхідно зменшувати його ширину, проте зменшення ширини призводить до того, що на характеристики підвісу істотний вплив починає чинити відтворюваність технологічного процесу. Збільшення ширини підвісу для зниження чутливості до відхилень технологічного процесу призводить до необхідності збільшення його довжини, що збільшує розмір кристала. Як компроміс можна використовувати складчастий підвіс (foldedbeam, serpentinebeam). Будемо розглядати підвіс складчастого типу, оскільки він дає можливість зменшити розміри кристала МЕМС-акселерометра.

Розрахунок коефіцієнта пружності за допомогою точних аналітичних співвідношень можливий для простих форм підвісу, для складних форм використовуються наближені вирази. Для отримання найточнішого значення коефіцієнта пружності підвісу складної форми, зокрема складчастого підвісу, оптимальним є використання кінцево-елементного моделювання.

Моделювання роботи ємнісного МЕМС-гравіметра під дією зовнішніх збурень. Моделювання підвісу проводилося за допомогою програми SolidWork. Було створено кінцево-елементну модель підвісу (рис. 4), що описує пружний елемент. Розбиття проводилося елементом Solid, призначеним для вирішення завдань пружних деформацій. В області, позначеній штрихами на рис. 4, було задано граничну умову, що забороняє будь-яке переміщення (фіксований кінець), а на іншому кінці підвісу було задано навантаження.

Результати розрахунку деформації і підвісу наведено на рис. 5. Величина впливу дорівнювала 10 мкн, переміщення кінця пружного елемента склало 0,5 мкм. На підставі даних кінцево-елементного моделювання обчислено коефіцієнт пружності підвісу, який дорівнює 16,7 Н/м, що дає сумарний коефіцієнт пружності 66,7 Н/м для всіх чотирьох підвісів. Щодо аналітично розрахованої величини похибка становить 4 %. Коефіцієнт пружності підвісу дозволяє розрахувати такі важливі характеристики МЕМС ЄГ як власна частота, а також абсолютний коефіцієнт демпфування і відносний коефіцієнт демпфування [22].

Використання нейронної мережі у дослідженнях автоматизованої АГС із ДЄГ. Використання нейронних мереж дозволяє значно зменшити

Рис. 4. Сітка кінцевих елементів підвісу з накладеними умовами

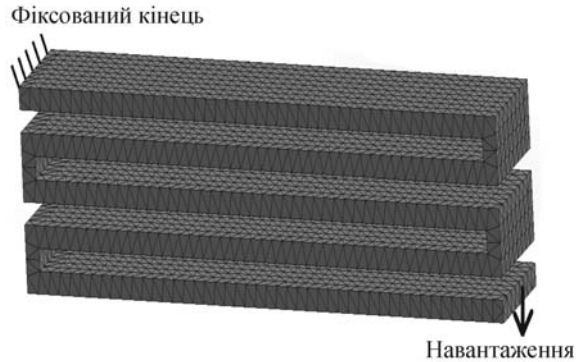
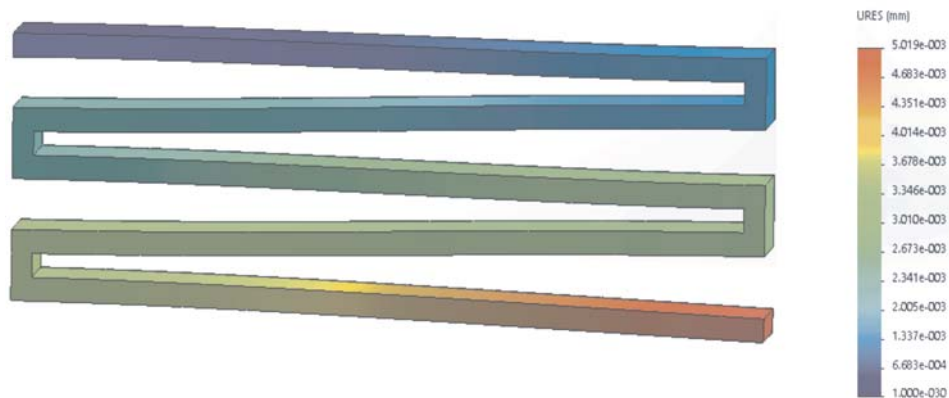


Рис. 5. Результати моделювання складчастого підвісу



залишкові інструментальні похибки для високоточних АГС, оскільки при цьому враховується нелінійність у перетворенні вимірювань [23]. Тому розглянемо можливості використання нейромереж для вирішення задачі апроксимації нелінійних рівнянь визначення навігаційних координат інерціальної навігаційної системи (ІНС) та значення ПСТ за допомогою ДЄГ.

Інструментальні похибки ІНС та ДЄГ можна інтерпретувати як настроювальні параметри нейромережі. В даному випадку нейромережа апроксимує не алгоритм обчислення координат та значення ПСТ автоматизованої АГС, а нелінійні рівняння їх похибок. Тобто на виході нейромережі отримаємо похибки визначення координат, швидкості та ПСТ з врахуванням дрейфа нуля.

Лінійна модель інструментальних похибок ДЄГ має вигляд

$$\Delta n = \begin{vmatrix} A_{x0} \\ A_{y0} \\ A_{z0} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xz} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{yz} \\ A_{zx} & A_{zy} & A_{zz} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{vmatrix},$$

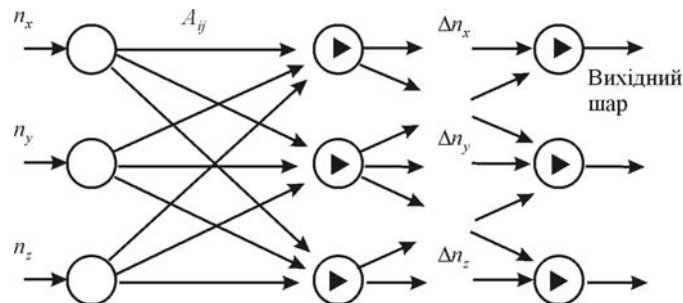


Рис. 6. Модель інструментальних похибок ДЄГ у вигляді нейромережі прямого розповсюдження

де A_{i0} — систематичні похибки дрейфу; A_{ii} — похибки масштабних коефіцієнтів; A_{ji} — похибки осі чутливості; n_i — проекції ПСТ на осі; $i = x, y, z$. Таку модель інструментальних похибок ДЄГ подано у вигляді нейромережі прямого розповсюдження (структура мережі повністю відповідає структурі моделі) на рис. 6. Функціями збудження нейронів цієї мережі є лінійні залежності вхід-вихід. Зміщеннями нейронів у цьому випадку будуть систематичні компоненти дрейфів нульового сигналу ДЄГ. Для того щоб підвищити точність моделі, можна врахувати у ній нелінійні компоненти введенням у мережу нейронів з тангенціальними і сигмоїдними функціями активації замість нейронів з лінійними функціями. Можливо уточнення моделі похибок через збільшення числа внутрішніх шарів.

У загальному випадку структура моделі інструментальних похибок ускладнюється через нестабільність окремих її складових. Особливо небезпечним є наявність у структурі похибок складових, період кореляції яких є близьким до періоду зникнення сигналу приймача (СП) (від 10 до 300 с). У цих умовах ефективність використання параметричної моделі похибок надзвичайно знижується. У зв'язку з цим доцільно використовувати у якості моделі АГС настроювану нейромережу, яка постійно відслідковує зміну структури моделей похибок. У цьому випадку використовують адаптивні властивості нейромережі, а саме її властивість апроксимувати, а потім екстраполювати вхідні сигнали досить складної форми. При цьому, задаючи структуру нейромережі, можна варіювати складність моделі похибок.

Структура мережі може включати кількість вхідних нейронів, що перевищує число вимірюваних параметрів. Нейромережа постійно налаштовує свої параметри таким чином, щоб мінімізувати різницю між своїм вихідним сигналом і сигналом з похибками. При зникненні СП нейромережа виробляє координати на основі вимірюваних ПСТ і абсолютних

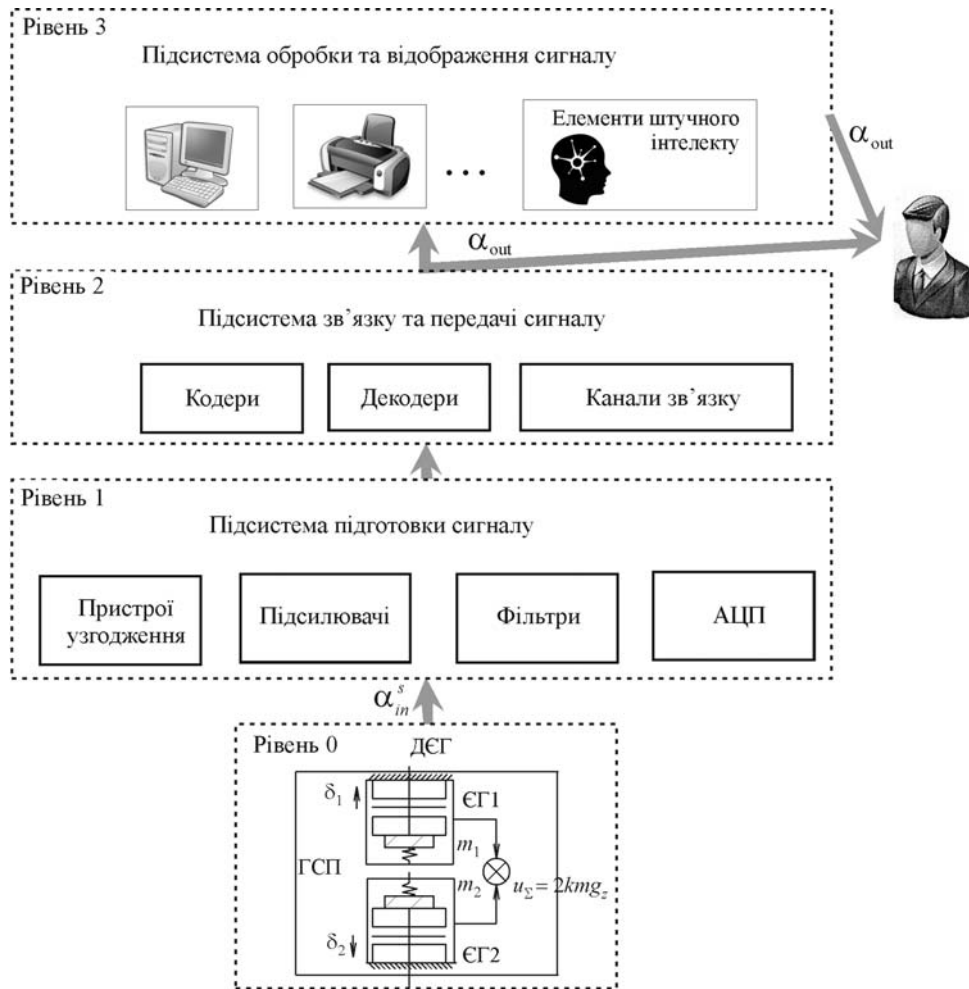


Рис. 7. Схема технологічного комплексу для високоточного вимірювання ПСТ з автоматизованою обробкою даних в режимі реального часу на основі МЕМС ДЄГ

кутових швидкостей, надаючи як алгоритм визначення (обчислення) координат, так і алгоритм компенсації похибок ДЄГ та ІНС.

Перспективним, з огляду на вказане, є застосування інтелектуальних засобів технологічних вимірювань, значний розвиток яких спостерігається останнім часом, наприклад технологічного комплексу для вимірювання ПСТ з автоматизованою обробкою даних в режимі реального часу. Структура запропонованого технологічного комплексу для вимірювання ПСТ з можливістю автоматизованої обробки даних в режимі реального часу може бути попередньо визначена та представлена як деяка багаторівнева структура

(рис. 7) [24], нижній рівень якої (рівень 0) організований ДЄГ, що формуватиме деякий вхідний сигнал α_{in} .

Верхні рівні можуть бути представлені наступними підсистемами:

рівень 1 — підсистемою підготовки сигналу, яка призначена для попередньої обробки аналогового вхідного сигналу α_{in}^S від ДЄГ, тобто узгодження, підсилення та смугова фільтрація (обмеження смуги частот сигналів для їх коректного перетворення у цифрову форму), а також аналогово-цифрове перетворення (АЦП);

рівень 2 — підсистемою зв'язку та передачі сигналу, яка призначена для завадостійкого кодування та декодування вимірювальної інформації з метою її додаткового захисту від завад в каналі зв'язку;

рівень 3 — підсистемою обробки та відображення сигналу, яка призначена для обробки вимірювальної інформації в цифровій формі з метою подання її у формі, зручній для подальшої візуалізації та сприйняття спостерігачем та (або) подальшої автоматизованої обробки, наприклад на електронно-обчислювальній машині в режимі реального часу з застосуванням штучного інтелекту, зокрема штучної нейронної мережі (ШНМ).

Передбачається, що технологічний комплекс (див. рис. 7) дозволить проводити безконтактне вимірювання ПСТ з високою точністю в автоматизованому режимі та обробляти дані в режимі реального часу. Очевидно, базовим елементом для забезпечення високої точності вимірювання ПСТ в запропонованому технологічному комплексі повинен бути деякий прецизійний гравіметр. В якості такого гравіметра, пропонується використовувати новий МЕМС ДЄГ [21], оскільки він забезпечує найбільшу точність вимірювання серед відомих авіаційних гравіметрів.

Висновки

Аналіз сучасних гравіметрів дозволив виявити їх основні недоліки, якими є: 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 місяців) та ін.

На основі аналізу МЕМС-технологій у приладобудуванні та отриманих даних про доцільність їх використання при розробці ЄГ зроблено висновки про такі їхні переваги: мініатюрність; висока функціональність; точність; невелике енергоспоживання; можливість інтеграції електроніки з іншими вузлами; незначний розкид параметрів у межах однієї партії ви-

робів; висока технологічність і повторюваність; можливість досягти дуже низької вартості.

Запропонована конструкція ДЄГ забезпечує відсутність похибок: від залишкової неідентичності конструкцій однакових ємнісних елементів, від змін температури, вологості та тиску зовнішнього середовища (інструментальних похибок). Усунення впливу вертикального прискорення літака на покази гравіметра одразу двома способами дозволяє повністю ліквідувати вплив похибок, викликаних шумами різного походження (від ємнісного зв'язку, акустичних шумів тощо).

Таким чином, запропонована АГС для вимірювань аномалій ПСТ забезпечує суттєве підвищення точності вимірювання аномалій ПСТ. Функціонування комплексної системи АГС з нейронними мережами можливе у трьох режимах: під час підготовчого етапу, під час руху та під час зникнення сигналу СНС.

Науково-практичне значення даної розробки полягає у забезпеченні можливості високоточного вимірювання ПСТ автоматизованої обробки вимірювальної інформації в режимі реального часу за допомогою використання ДЄГ та ШНМ. Вказане є суттєвою відмінністю від відомих апаратних рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Безвесільна О.М.* Вимірювання прискорень. Київ: Либідь, 2001, 261 с.
2. *Современные МЭМС-гироскопы и акселерометры.* [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.sovtest.ru/news/publications/sovremennye-mems_giroskopy-i-akselometry. 26.01.2017 г. Загл. с экрана.
3. *Афонин А.А., Сулаков А.С., Ямашев Г.Г. и др.* О возможности построения бесплатформенного управляющего навигационно-гравиметрического комплекса беспилотного летательного аппарата // Тр. МАИ, 2013, № 66.
4. *Быковский А.В., Польшков А.В.* К вопросу о разработке малогабаритного аэрогравиметра // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, № 2 (14).
5. *Bezvesilna O., Tkachuk A., Nechai S. et al.* Introducing the principle of constructing an aviation gravimetric system with any type of gravimeter // Eastern-European journal of enterprise technologies, 2017, 1/7 (85), p. 45—56.
6. *Huang Y., Olesen A.V., Wu M., Zhang K.* SGA-WZ: A New Strapdown Airborne Gravimeter / Sensors, 2012, № 12(7).
7. *Calvoa M., Hinderera J., Rosata S. et al.* Time stability of spring and superconducting gravimeters through the analysis of very long gravity records // Journal of Geodynamics, 2014, № 80, p. 20—33.
8. *Agostino G.D., Desogus S., Germak A. et al.* The new IMG-C-02 transportable absolute gravimeter: measurement apparatus and applications in geophysics and volcanology // Annals of geophysics, 2008, № 51(1), p. 39—40.
9. *Roussela C., Verduna J., Calia J. et al.* Integration of a strapdown gravimeter system in an autonomous underwater vehicle // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, №XL-5/W5, p. 199—206.

10. Быковский А.В., Польшков А.В., Арсеньев В.Д. Аэрогравиметрический метод измерения гравитационных аномалий // Авиакосмическое приборостроение, 2013, № 12, с. 11—19.
11. Безвесільна О.М., Четюк Л.О., Ткачук А.Г. та ін. Аналіз сучасних гравіметрів авіаційної гравіметричної системи // Технологічний аудит та резерви виробництва, 2017, № 3/1(35), с. 53—60.
12. Авіаційна гравіметрична система для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння: Пат. 105122. Україна: МПК G01V 7/00 / Безвесільна О.М., Ткачук А.Г., Козько К.С. Опубл. 25.12.13. Бюл. № 24, 5 с.
13. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Ч. 5. Перспективная элементная база поверхностных кремниевых емкостных МЭМС-акселерометров [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2006_4_28.php], 26.01.2017 г. Загл. с экрана.
14. Гравіметр CG-5 AutoGrav. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://geocentr-msk.ru/content/view/441/137>. 18.07.2016. Загл. с экрана.
15. Струнный аэрогравиметр «Гравитон-М». [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=ru. 18.07.2016. Загл. с экрана.
16. Аэрогравиметр GT-2A. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=ru - 18.07.2016 — Загл. с экрана.
17. Инерциально-гравиметрический комплекс МАГ-1А [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://geolraz.com/page/GSA-2010/>. 18.07.2016. Загл. с экрана.
18. Мобильный гравиметр «Чекан-АМ» ОАО. Концерн ЦНИИ “Электроприбор”. [Электронный ресурс] Режим доступа: [www/ URL: http://www.elektroprigor.spb.ru/ru/grrod6-1.html](http://www.elektroprigor.spb.ru/ru/grrod6-1.html) . 26.01.2017 г. Загл. с экрана.
19. TAGS-6 [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.microglacoste.com/tags-6.php>. 26.01.2017 г. Загл. с экрана.
20. Безвесільна О.М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри. Житомир : ЖДТУ, 2007, 604 с.
21. Патент на винахід 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.
22. Годовицын И.В., Сайкин Д.А., Федоров Р.А., Амеличев В.В. Расчет и моделирование основных параметров дифференциального емкостного МЭМС-акселерометра // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем. Сб. тр. / Под общ. ред. акад. А.Л. Стемпковского. М. : ИППМ ОАГ, 2010, с. 642—647.
23. Безвесільна О.М. Використання нейронної мережі у комплексі орієнтації і навігації авіаційної гравіметричної системи // Вісн. інженерної академії України, 2012, № 2, с. 46—53.
24. Черепанська І.Ю., Безвесільна О.М., Сазонов А.Ю., Хильченко Т.В. Штучні нейронні мережі при вирішенні задач у технологічних вимірюваннях, приладобудуванні та проектуванні гнучких виробничих систем. Монографія, 2017, 242 с.

Отримано 02.05.18

REFERENCES

1. Bezvesilna, O.M. (2001), *Vymiryuvannya pryskoren* [Measurement of accelerations], Lybid, Kyiv, Ukraine.
2. "Modern MEMS gyroscopes and accelerometers" (2017), available at: http://www.sovtest.ru/news/publications/sovremennye-mems_giroskopiy-i-akselerometri/ - Jan 26, 2017 – Zagl. from the screen.
3. Afonin, A.A., Sulakov, A.S., Yamashev, G.G., Mikhailin, D.A., Mirzoyan, L.A. and Kormakov, D.V. (2013), "About the possibility of construction of a free-form control of the navigation-gravimetric complex of an unmanned aerial vehicle", *Trudy MAI*, no. 66.
4. Bykovskii, A.V. and Polynkov, A.V. (2013), "On the issue of developing a small-sized air-gravity", *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2013, no. 2 (14).
5. Bezvesilna, O., Tkachuk, A., Nechai, S., Chepyuk, L. and Khylichenko, T. (2017), Introducing the principle of constructing an aviation gravimetric system with any type of gravimeter, *East-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7 (85), pp. 45-56.
6. Huang, Y., Olesen A.V., Wu, M. and Zhang, K. (2012), SGA-WZ: A new strapdown airborne gravimeter, *Sensors*, no. 12 (7).
7. Calvoa, M., Hinderera, J., Rosata, S., Legroza, H., Boya, J.-P., Ducarnes, 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.
8. Agostino, G.D., Desogus, S., Germak, A., Origlia, C., Quagliotti, D., Berrino, G., Corrado, G., Derrico, V. and Ricciardi, G. (2008), The new IMG-C-02 transportable absolute gravimeter: measurement apparatus and applications in geophysics and volcanology, *Annals of Geophysics*, no. 51 (1), pp. 39-40.
9. Roussela, C., Verduna, J., Calia, J., Maiab, M. and d'Eub, J.F. (2015), Integration of a strap-down 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.
10. Bykovskii, A.V., Polynkov, A.V. and Arsenyev, V.D. (2017), "Aerogravimetric method for measuring gravitational anomalies", *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, no. 12, pp. 11-19.
11. Bezvesilna, O.M., Chepyuk, L.O., Tkachuk, A.G., Nechai, S.O. and Khylichenko, T.V. (2017), "Analysis of modern gravimeters of aviation gravimetric system", *Technologichnyy audit ta reseruy vyrobnystva*, no. 3/1 (35), pp. 53-60.
12. Bezvesilna, O.M., Tkachuk, A.G. and Kozko, K.S. (2013), "Aviation gravimetric system for measuring anomalies of acceleration of gravity", Patent 105122 Ukraine: IPC G01V 7/00", published December 25, 2013, Bul. no. 24, 5 p.
13. Sysoev, S. (2006), "Automobile accelerometers. Part 5. Promising elemental base of surface silicon capacitive MEMS accelerometers", available at: http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2006_4_28.php] - Jan 26, 2017 - Zagl. from the screen.
14. "Gravimeter CG-5 AutoGrav", available at: <http://geocentr-msk.ru/content/view/441/137-07/18/2016> - Zagl. from the screen.
15. "Streaming airgravity Graviton-M", available at: http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=en - 07/18/2016 - Zagl. from the screen.
16. "GT-2A air gravimeter", available at: http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=25&Itemid=17&lang=en - 07/18/2016 - Zagl. from the screen.
17. "Inertia-gravimetric complex MAG-1A", available at: <http://geolraz.com/page/GSA-2010-07/18/2016> - Zagl. from the screen.
18. "Mobile gravimeter Chekan-AM", JSC, Concern Central Scientific-Research Institute "Elektropribor", available at: [www/URL: http://www.elektropribor.spb.ru/en/rprod6-1.html](http://www.elektropribor.spb.ru/en/rprod6-1.html) - Jan 26, 2017 - Zagl. from the screen.

19. TAGS-6, available at: <http://www.microglacoste.com/tags-6.php>, Jan. 26, 2014 - Zagl. from the screen.
20. Bezvesilna, O.M. (2007), *Aviatsiyni gravimetrychni systemy ta gravimetry: monografiya* [Aviation gravimetric systems and gravimeters: monograph], ZhDTU, Zhytomyr, Ukraine.
21. Bezvesilna, O.M., Tkachuk, A.G. and Khylichenko, T.V. (2016), "Aviation gravimetric system for measuring anomalies of acceleration of gravity", Patent for invention 113038, Ukraine, IPC G01V 7/06 (2006.01), no. a 2015 12205; statements May 10, 2016; published Nov 25, 2016, Bul. no. 22.
22. Godovitsyn, I.V., Saykin, D.A., Fedorov, R.A. and Amelichev, V.V. (2010), "Calculation and modeling of the basic parameters of the differential capacitive MEMS accelerometer", *Problemy razrobotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh system-2010. Sbornik trudov*, Ed by Academician A.L. Stepkovsky, IPPM RAN, Moscow, Russia.
23. Bezvesilna, O.M. (2012), "Use of the neural network in the complex of orientation and navigation of the aviation gravimetric system", *Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy*, no. 2, pp. 46-53.
24. Cherepanska, I.Y., Bezvesilna, O.M., Sazonov, A.Y. and Khylichenko, T.V. (2017), *Shtuchni neironni merezhi pry vyrishenni zadach u tekhnologichnykh vymiryuvannyakh, pryladobuduvanni ta proektuvanni gnuchkykh vyrobnychykh system: Monografiya* [Artificial neural networks in solving problems in technological measurements, instrumentation and designing of flexible production systems: Monograph], Ukraine.

Received 02.05.18

T.B. Хильченко

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДВУХКАНАЛЬНОГО ЕМКОСТНОГО МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГРАВИМЕТРА АВИАЦИОННОЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Проанализированы современные гравиметры, используемые при проведении авиационных гравиметрических работ и перспективных научных разработок. Предложен новый двухканальный емкостной гравиметр (ДЕГ) с использованием микроэлектромеханической системы (МЭМС) автоматизированной авиационной гравиметрической системы (АГС). Обоснована актуальность исследований, возможность и целесообразность использования нового ДЕГ в качестве гравиметра АГС. Дан анализ литературных источников в области современной авиационной гравиметрии и МЭМС-технологий в приборостроении. Описаны конструкция и принцип работы предлагаемого МЭМС ДЕГ, разработана структурная схема. Уточнено значение коэффициента упругости подвеса сложной формы. Рассмотрена возможность и целесообразность использования нейросетевого подхода в задачах разработки алгоритмов функционирования АГС с новым ДЕГ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ускорение силы тяжести, авиационная гравиметрическая система, емкостной гравиметр.

T.V. Khylichenko

MODELING OF THE WORK OF A NEW DUAL-CHANNEL CAPACITIVE MEMS GRAVIMETER OF AVIATION GRAVIMETRIC SYSTEM

Modern gravimeters used in conducting aviation gravimetric works and promising scientific developments have been analyzed. The article is devoted to the study of a new dual-channel capaci-

tive gravimeter (DCG) using the microelectromechanic system (MEMS) of the automated aviation gravimetric system (AGS). The paper substantiates the relevance of the research, the feasibility of the use of the new MEMS DCG as an DGS gravimeter. The analysis of literary sources in the field of modern aviation gravimetry and MEMS technologies in instrument making is carried out. The design and principle of the proposed MEMS DCG are described, a structural scheme is developed. The value of the coefficient of elasticity of the suspension of a complex form is specified. The possibility and expediency of the use of the neural network approach in the problems of developing algorithms for the functioning of the AGS with the new DCG is considered.

Key words: acceleration of gravity, aviation gravimetric system, capacitive gravimeter.

ХИЛЬЧЕНКО Тетяна Валентинівна, аспірантка Житомирського державного технологічного університету. В 2015 р. закінчила магістратуру Національного технічного університету України «Київський політехнічний ін-т». Область наукових досліджень — гравіметрія, прилади та методи вимірювання механічних величин.