

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

КОЗЬКО Костянтин Сергійович

УДК 528.563

**ЄМНІСНИЙ ГРАВІМЕТР АВТОМАТИЗОВАНОЇ
АВІАЦІЙНОЇ ГРАВІМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ**

05.11.01 – Прилади та методи вимірювання механічних величин

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі приладобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

Заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор
БЕЗВЕСІЛЬНА Олена Миколаївна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», професор
кафедри приладобудування

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
КВАСНИКОВ Володимир Павлович,
Національний авіаційний університет, завідувач
кафедри комп'ютеризованих електротехнічних
систем та технологій

кандидат технічних наук, доцент
ІГНАТЕНКО Павло Леонідович,
Чернігівський національний технологічний
університет, доцент кафедри технологій
машинобудування та деревообробки

Захист відбудеться “__” _____ 2016 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.07 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корпус №1, ауд. 317.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий “__” _____ 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ю.В. Киричук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження прискорення сили тяжіння g та його аномалій Δg на поверхні Землі необхідне в аерокосмічній галузі для корекції інерціальних навігаційних систем, у сейсмології для прогнозу землетрусів, у геології та геофізиці для розвідки корисних копалин, у картографії для визначення форми Землі та у інших галузях науки і техніки. Отримана інформація щодо g та Δg сьогодні особливо актуальна у зв'язку з нестачею енергоносіїв (нафта, газ), необхідністю визначення покладів урану, золота, алмазів та інш. Цю інформацію дозволяють отримати авіаційні гравіметричні вимірювання, які здійснюються більш швидко, у віддалених районах полюсів Землі та її екватору і значно з меншою вартістю, ніж наземні або морські вимірювання.

Ефективність авіаційних гравіметричних вимірювань великим чином залежить від гравіметра, який є основним елементом автоматизованої авіаційної гравіметричної системи (АГС). Сьогодні відомі авіаційні гравіметричні дослідження виконуються з точністю 2-10 мГал, що недостатньо. Актуальною є задача вимірювань з точністю 1 мГал. Окрім того, відомі дослідження g або Δg проводяться з недостатньою швидкістю. В основному, обробка результатів вимірювань проводиться на Землі протягом місяців часу. Це неприпустимо. Актуальною є задача підвищення швидкодії вимірювань.

Найбільш значними і відомими у світі є дослідження g або Δg , проведені на борту літального апарату (ЛА) в Інституті Фізики Землі (Росія) з кварцовим гравіметром під керівництвом Попова Є.І., в Інституті Геофізики РАН зі струнним гравіметром під керівництвом Лозинської А.М., в НТУУ «КПІ» з гіроскопічними гравіметрами різних типів під керівництвом Безвесільної О.М., у Масачусетському технологічному інституті (США) з гравіметром типу PIGA. Точність цих вимірювань 2-10 мГал. Відомі й інші типи гравіметрів (Чекан, магнітні та інші), які є, в основному, модифікаціями морських гравіметрів. Вони мають великі габарити і вартість.

Дослідження в області гіроскопічних гравіметрів базуються на наукових працях Збруцького О.В., Павловського М.А., Одинцова А.О., Самотокіна Б.Б., Рижкова Л.М., Карачуна В.В. та інш.

Одним із найбільш перспективних гравіметрів є ємнісний гравіметр (ЄГ), який має високі чутливість і точність, малі габарити та вагу, низьку вартість, простоту виготовлення. Дослідження ємнісних перетворювачів міститься у працях Шарапова В.М., Петренка С.Ф., Кошового М.Д. Однак, невідомі дослідження ємнісного гравіметра.

Для досліджень похибок ЄГ корисними є праці Володарського Є.Т., Кваснікова В.П., Кухарчука В.В., Коломійця Л.В., та інших.

Відомі названі вище гравіметри вимірюють разом із прискоренням

сили тяжіння g вертикальне прискорення $\ddot{h}$, високоточне вимірювання $\dot{h}$ - вимагає застосування додаткових фільтрів, що зменшує надійність вимірювань та ускладнює схему приладу.

Актуальною науково-технічною задачею дисертації є збільшення точності та швидкодії вимірювань величини g та Δg шляхом створення нового ємнісного гравіметра автоматизованої АГС. У дисертації розроблено та досліджено новий ємнісний гравіметр АГС (патент України на винахід № 105122 від 10.04.2014 р.).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Наукова роботи, результати якої узагальнені у дисертації, виконувались у відповідних науково-дослідних роботах між кафедрою приладобудування НТУУ «КПІ» та МОН України:

– № 2638ф “Узагальнення та розвиток теорії та експериментальних основ створення гравіметричних засобів вимірювання з динамічним настроюванням” (номер держреєстрації 0103U000237), де здобувачеві належить розділ 1, в якому наведено аналітичний огляд літератури в галузі авіаційної гравіметрії;

– № 2803ф “Теорія та принципи побудови нового екологічного комп'ютерно-інтегрованого діагностичного комплексу з використанням нанотехнологій, нейронних мереж” (номер держреєстрації 0105U001085). У ній здобувачеві належить розділ 3, в якому розглянуто блок – схеми та рівняння руху основних компонентів – інерціальної навігаційної системи, системи стабілізації, АГС;

– № 2113 “Наукові теоретичні та експериментальні дослідження для одержання нових знань про закономірності розподілу гравітаційних аномалій Землі” (номер держреєстрації 0108U000623): здобувач провів роботи над розділом 2, в якому наведено аналіз та розрахунки похибок гравіметра;

– №2411ф “Науково-теоретичні дослідження нової прецизійної інерціальної навігаційної системи в екстремальних умовах з використанням нейронних мереж” (номер держреєстрації 0111U000714): здобувачеві належить розділ 4, в якому висвітлено експериментальні дослідження.

Мета та задачі дослідження

Мета: збільшити точність та швидкість вимірювань g або Δg використовуючи новий ємнісний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи.

Для цього вирішено наступні *основні задачі:*

- провести аналіз відомої літератури у галузі авіаційної гравіметрії, порівняти існуючі гравіметри АГС (вказати їх переваги та недоліки);
- описати конструкцію та надати принцип дії нового ЄГ АГС;
- отримати рівняння руху нового ЄГ АГС;
- надати рішення щодо фільтрації вихідного сигналу ЄГ АГС;

- розглянути основні похибки ЄГ та надати пропозиції по їх зменшенню;

- за допомогою ЕОМ здійснити математичне моделювання (та аналіз результатів) основних вібраційних режимів роботи нового ЄГ АГС в умовах, наближених до умов льоту ЛА;

- використати апарат нейронних мереж для зменшення залишкових похибок від впливів вертикального прискорення та інструментальних похибок ЄГ;

- дослідити експериментально новий ЄГ.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання g або Δg використанням нового ємнісного гравіметра автоматизованої авіаційної гравіметричної системи.

Предметом дослідження є новий ємнісний гравіметр АГС.

Методи дослідження:

- аналіз патентів, науково-технічної літератури, даних Internet (розділ 1);

- аналіз фізики роботи ємнісного перетворювача (розділ 2);

- проведення скасування впливу на ЄГ залишкових похибок від вертикального прискорення та інструментальних похибок шляхом використання фільтрації похибок (розділ 2);

- розрахунки та аналіз похибок ЄГ із урахуванням діючих на нього параметрів зовнішніх збурень (розділи 3, 4);

- метод алгоритмічної обробки вихідного сигналу ЄГ на основі апарату нейронних мереж (розділ 4);

- лабораторні дослідження нового ЄГ з використанням розроблених нових алгоритмів та комп'ютерних програм (розділ 5).

Наукова новизна одержаних результатів:

- розроблено і досліджено новий ЄГ АГС більшої точності (1 мГал) порівняно з відомими (2 – 10 мГал);

- вирішено задачу фільтрації вихідного сигналу ЄГ АГС заданням частоти власних коливань ЄГ, яка дорівнює тій, в якій перетинаються спектральні щільності корисного сигналу g та сигналу основної завади $\ddot{h}$;

- встановлено шляхом моделювання на ЕОМ режимів роботи, які можуть бути резонансними, а тому є найбільш небезпечними ($\omega=\omega_0$, $\omega=2\omega_0$, $\omega=3\omega_0$, $\omega=\omega_0/2$, $\omega=\omega_0/3$), що резонанс виникає тільки при $\omega=\omega_0=0,1$ рад/с, при збільшенні коефіцієнта демпфірування до 0,705 резонанс зникає;

- використано апарат нейронних мереж для зменшення залишкових похибок від $\ddot{h}$ та інструментальних похибок нового ЄГ;

- проведено лабораторні дослідження нового ЄГ. Результати експериментальних досліджень збіглися з аналітичними та результатами цифрового моделювання.

Новизну отриманих результатів дисертації підтверджено патентом України № 105122 від 10.04.2014 р.

Практичне значення одержаних результатів:

- підтверджено доцільність використання нового ЄГ АГС більшої точності (1 мГал) порівняно з відомими (2 – 10 мГал);
- створено лабораторний стенд для експериментальних досліджень ЄГ;
- розроблено методику та алгоритм досліджень g та Δg ЄГ АГС.

Вказані результати дозволили підвищити точність вимірювань g у 2 рази (1 мГал), швидкодію у 10 разів на відміну од відомих авіаційних гравіметрів, які забезпечують результати з точністю не більше 2 – 10 мГал.

За результатами дисертації розроблено матеріали, які впроваджено у навчальний процес кафедри приладобудування НТУУ «КПІ» при проведенні лабораторних та практичних занять із навчальних дисциплін “Перетворюючі пристрої приладів”, «Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин», а також – у наукові праці за тематикою ПАТ “НВО “Київський завод автоматики ім. Г.І. Петровського”.

Особистий внесок здобувача

Дисертаційна робота є узагальненням досліджень, проведених разом із науковим керівником д.т.н., проф. Безвесільною О.М. Здобувачем проведено аналітичний огляд літератури в області існуючих авіаційних гравіметрів, описано конструкцію та викладено фізичні основи роботи нового ЄГ АГС. Виведено рівняння руху нового ЄГ. Запропоновано засоби та методи по усуненню можливих похибок вимірювання ЄГ. Запропоновано вирішення задачі фільтрації вихідного сигналу ЄГ АГС. Здійснено цифрове моделювання, експериментальні дослідження роботи ЄГ. Використано апарат нейронних мереж для зменшення залишкових похибок від $\ddot{h}$ та інструментальних похибок нового ЄГ

Достовірність та обґрунтованість результатів дисертаційної роботи підтверджено збіжністю аналітичних розрахунків, експериментально та моделюванням на ЕОМ.

Апробація результатів роботи. Основні положення, викладені у дисертаційній роботі, розглядалися на наступних науково-технічних семінарах та конференціях: VI міжнародна науково-технічна конференція “Інформаційно-комп’ютерні технології 2012” (Житомир, 2012р.); міжнародна науково-технічна конференція “Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення” (Севастополь, 2013 р.); I науково-технічна конференція “Сучасні тенденції розвитку приладобудування” (Луганськ, 2012р.); міжвузівська науково-практична конференція, присвячена Дню науки (Житомир, 2013-2015pp.); XV International PhD Workshop OWD 2013 (Польща, 2013р.); X International scientific and practical conference, «Conduct of modern science» (Об’єднане Королівство, 2014), I всеукраїнська НТК «Комп’ютерні технології: інновації, проблеми, рішення

2015» (Житомир, 2015), 14-та Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», (Київ, НТУУ «КПІ», 2015), 8 Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні роботи технічні комплекси (ІРТК-2015) (Київ, 2015), V МНТК Сучасні інформаційні технології – 2015 (Одеса, 2015), VIII НПК студентів та аспірантів "Погляд у майбутнє Приладобудування" (Київ, 2015), Міжнародна наукова школа-семінар «Питання оптимізації обчислень (ПОО-ХЛІІ)» (Україна, 2015).

Публікації.

Основний зміст дисертації відображено у 25 наукових працях: 8 статей у фахових наукових виданнях (із них 3 у виданнях України, які включено до наукометричних баз даних, а також 2 статті в іноземних виданнях), 15 публікацій у матеріалах конференцій, 2 патенти України на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 119 назв та 5 додатків. Роботу викладено на 178 сторінках основного друкованого тексту. У тексті використано 92 рисунки та 22 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, доцільність використання нового ЄГ АГС, визначено мету і задачі дисертації, наукову новизну, практичне значення отриманих результатів..

У **першому розділі** проаналізовано сучасний стан авіаційної гравіметрії. Виконано порівняння технічних характеристик та властивостей відомих гравіметрів АГС. Наведено обґрунтування доцільності дослідження нового ЄГ у якості ЧЕ автоматизованої АГС. Визначено вимоги до точності основних компонентів, які входять до АГС із ЄГ.

Описано принцип, за яким працює новий ЄГ та розроблено принципову схему автоматизованої АГС на його основі (рис. 1).

До складу наведеної автоматизованої АГС входять ємнісний гравіметр 1, вимірювачі швидкості та координат розташування ЛА 2, а також вимірювач поточної висоти 3. Наведені компоненти АГС своїми виходами підключені до входів бортової цифрової обчислювальної машини (БЦОМ) 4.

Ємнісний гравіметр 1 розташовано на гіростабілізованій платформі 9 (ГСП), за допомогою якої забезпечується стабілізація осі чутливості перетворювача у вертикальному положенні. ЄГ автоматизованої АГС містить чутливий елемент, який складається із ємнісного елемента (ЄЕ) 5 (що працює на принципі зміни відстані між рухомою пластиною та двома нерухомими пластинами, що призводить до відповідної зміни вихідної напруги), ізоляторів 6 на торцях ЄЕ та інерційної маси (ІМ) 1. Задля того, щоб конструкція мала підвищені характеристики міцності та надійності, а ЄГ не змінював свого положення відносно ГСП, корпус чутливого

елемента з'єднаний с основою 9 за допомогою гвинтів. Також задля підсилення вихідного сигналу ЄГ, від з'єднаний з операційним підсилювачем за допомогою кабелю.

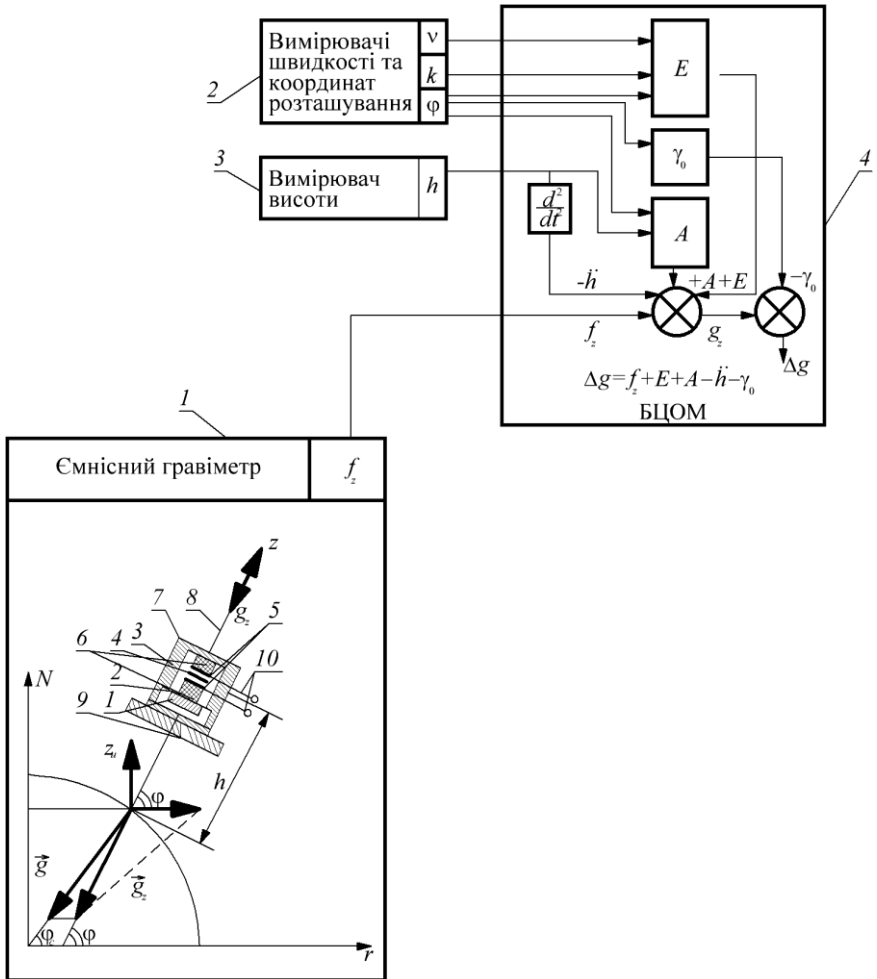


Рис. 1. Автоматизована АГС із ЄГ

Ємнісний елемент 5 виконаний у вигляді двох нерухомих пластин та однієї рухомої. Матеріалом, що обрано для виготовлення пластин, є кристалічний ніобат літію.

Прискорення сили тяжіння g_z діє на ІМ, внаслідок чого виникає сила тяжіння. Це спричиняє переміщення рухомої пластини, жорстко скріпленої з ІМ, на величину x відносно нерухомих пластин:

$$x \equiv f(g_z). \quad (1)$$

Такий рух ІМ спричиняє зміну ємності C , яка прямо пропорційна g_z і знімається з нерухомих пластин.

Сформульовано основне рівняння, за допомогою якого можливо визначити аномалію прискорення сили тяжіння при використанні автоматизованої АГС із ЄГ. На відміну від рівнянь, які використовуються у відомій літературі. У ньому відсутнє значення основної завади, яка впливає на вихідне значення ПСТ – вертикального прискорення, викликаного рухом ЛА:

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

де f_z – вихідний сигнал, що надходить з ЄГ; v – лінійна швидкість, з якою рухається ЛА; r – радіус, що характеризує місцезнаходження ЛА у геоцентричній системі координат; e – стиск референц-еліпсоїда; φ – географічна широта ЛА в даній точці; k – поточний курс ЛА; ω_3 – кутова швидкість, з якою обертається Земля; h – висота, на якій знаходиться ЛА відносно поверхні еліпсоїда; $\dot{h}$ – вертикальна швидкість, з якою рухається ЛА; γ_0 – розрахункове значення, якому має дорівнювати прискорення сили тяжіння у даній точці.

У **другому розділі** отримано математичну модель, що описує новий ЄГ у складі автоматизованої АГС.

Описано коливальну систему ЄГ, до складу якої входять: інерційна маса (m), пружний елемент (κ) та елемент, який забезпечує демпфування (n). Елементом, за допомогою якого забезпечується демпфування, виступає повітря, сила опору якого протидіє руху інерційної маси і рухомої обкладки.

Під дією прискорення сили тяжіння на інерційну масу діє сила тяжіння G , яка дорівнює:

$$G = mg_z, \quad (3)$$

де g_z – значення прискорення сили тяжіння, що діє вздовж осі чутливості z гравіметра; m – маса об'єкта, що виступає у ролі ІМ.

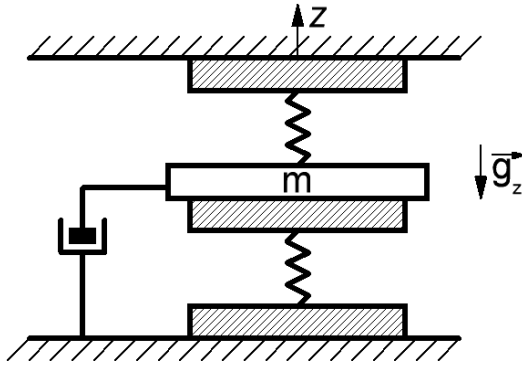


Рис. 2. Коливальна система ЄГ

У процесі руху на інерційну масу також діють сила, спричинена пружними властивостями смісного елемента (СЕ) сила опору повітря, що протидіє руху та сила інерції, спричинена дією вертикального прискорення, з яким рухається ЛА.

Сила пружності СЕ F_{np} дорівнює:

$$F_{np} = -\kappa x, \quad (4)$$

де κ – коефіцієнт пружності, що залежить від властивостей СЕ.

Сила опору руху ІМ F_{op} є рівною:

$$F_{op} = -n \frac{dx}{dt}, \quad (5)$$

де n – коефіцієнт опору повітря (в якості демпфуючого елемента характеризує затухання).

З рівнянь (3), (4) і (5) отримаємо:

$$mg_z = -n \frac{dx}{dt} - \kappa x. \quad (6)$$

З урахуванням інерційної сили $F_i = m \frac{d^2 x}{dt^2}$ результуюче рівняння руху ЄГ виглядатиме наступним чином:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + n \frac{dx}{dt} + \kappa x = -mg_z. \quad (7)$$

Враховуючи інерційні властивості конструкції ЄГ, можливо знехтувати двома першими складовими рівняння (7). Тоді можливо записати рівняння руху ЄГ за умови його встановлення на Землі у вигляді:

$$g_z = -\frac{\kappa}{m}x. \quad (8)$$

При встановленні ємнісного гравіметра на борту літального апарата необхідно також враховувати складову $m \frac{d^2x}{dt^2}$.

Також у даному розділі проведено аналіз спектральних щільностей основних складових, що впливають на вихідний сигнал ЄГ. Такими складовими є корисний сигнал – прискорення сили тяжіння, а також сигнал основної завади, яким є вертикальне прискорення, викликане рухом ЛА. За результатами аналізу зроблено висновок, що використавши фільтр, частота зрізу якого дорівнює 0,1 рад/с, можливо відокремити корисний сигнал, яким є прискорення сили тяжіння, від сигналу основної завади, створюваного вертикальним прискоренням. При цьому похибка матиме значення менше, ніж 1 мГал. Одночасно з цим з вихідного сигналу гравіметра відфільтровуються також інші компоненти збурень, які мають переважну частоту більшу, ніж 0,1 рад/с, наприклад, кутові пабо поступальні віброприскорення.

Проблема фільтрації вихідного сигналу нового ЄГ автоматизованої АГС вирішується наступним чином.

Частота власних коливань ємнісного елемента ω_0 може змінюватися при зміні геометричних розмірів та підборі матеріалу, з якого виготовлено пластини:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2\kappa}{m}}, \quad (9)$$

Проаналізовано основні характеристики матеріалів, які можуть бути використаними для виготовлення обкладок чутливого елементу нового ЄГ. Найкращі властивості з розглянутих має кристалічний ніобат літію, який і було обрано.

У **третьому розділі** запропоновано структурну схему перетворювача, вихідний сигнал якого пропорційний прискоренню сили тяжіння у ємнісному елементі нового ЄГ а його коефіцієнт передачі $K_{\text{ЄГ}}$ рівний:

$$K_{\text{ЄГ}} = \frac{U_{\text{вх}}}{2\kappa}, \quad (10)$$

де $U_{\text{вх}}$ – вхідна напруга, що подається на ЄГ, κ – коефіцієнт жорсткості пружного елемента.

Проаналізовано похибки, що можуть бути викликані неточностями методу вимірювання у автоматизованій АГС із ємнісним гравіметром та розраховано максимальні значення, яких вони можуть набувати, якщо точності з якою визначається Δg , становить 1 мГал (табл. 1).

Таблиця 1

Максимальні значення, яких можуть набувати похибки вимірювання при використанні автоматизованої АГС із новим ЄГ

№ п/п	Назва похибки	Максимальне значення похибки
1	Лінійна швидкість v , м/с	0,05
2	Поточний курс k , кут. хв.	1,43
3	Географічна широта ЛА φ , кут. хв.	0,5
4	Висота ЛА над поверхнею h , м	3.3
5	Вертикальна швидкість ЛА Δh , м/с	$0,5 \cdot 10^2$
6	Шлях s , м	1,5
7	Виставка осі чутливості ЄГ, кут. хв.	5

Розглянуто основні похибки нового ЄГ, який входить до складу автоматизованої АГС. Похибка, викликана інструментальними особливостями ЄГ, становить не більше 0,1 мГал, а інші похибки можливо прибрати за рахунок конструктивних особливостей ЄГ. Одна з найбільших похибок, викликана впливом кутової швидкості землі (584 мГал), враховується введенням у рівняння руху ЄГ АГС додаткової поправки.

Похибка виставки осі чутливості ЄГ розрахована, і її значення складає не більше 5 кут.хв. для точності визначення $\Delta g = 1$ мГал. Запропоновано зменшення цієї похибки за рахунок високоточної виставки осі чутливості ЄГ з використанням сучасних методів.

У **четвертому розділі** проведено цифрове моделювання роботи ЄГ автоматизованої АГС на розробленому програмному забезпеченні.

Результатом моделювання є графіки, що характеризують зміну вихідного сигналу ЄГ при різних значеннях параметрів, а саме коефіцієнту демпфування ξ , частоти збурень ω , а також при зміні амплітуди збурюючих віброприскорень (шумів). У результаті зроблено наступні висновки:

- частота збурень $\omega = \omega_0 = 0,1$ рад/с є резонансною частотою, яка є найбільш небезпечною для ЄГ, але резонанс зникає при встановленні значення коефіцієнта демпфування рівним $\xi = 0,705$;

- при значеннях частот, які є меншими за частоту основного резонансу, але кратними йому, а саме $\omega = \omega_0/2 = 0,05$ рад/с та $\omega = \omega_0/3 = 0,033$ рад/с, значення і форма вихідного сигналу не спотворюється;

- при значеннях частот, які є більшими за частоту основного резонансу, і кратними йому, а саме $\omega = 2\omega_0 = 0,2$ рад/с та $\omega = 3\omega_0 = 0,3$ рад/с, а також коефіцієнті демпфування $\xi \leq 0,45$ значення і форма вихідного сигналу спотворюються (встановлюється биття). Для запобігання цьому необхідно збільшувати ξ ;

- збільшення або зменшення амплітуд прискорень, що діють по горизонтальних осях, не змінює значення амплітуди вимушених коливань ЄГ.

За допомогою цифрового моделювання підтверджено точність ЄГ рівною 1 мГал.

Запропоновано використання апарату нейронних мереж для розробки алгоритмів обробки даних у автоматизованій АГС зі ЄГ. Проведено аналіз роботи АГС у режимі підготовки ЛА до польоту та в процесі польоту. Показано, що використаний апарат нейронних мереж забезпечує зменшення залишкових похибок від $\ddot{h}$ та інструментальних похибок нового ЄГ на вихідний сигнал автоматизованої АГС.

У **п'ятому розділі** описано установку для проведення лабораторних досліджень при встановленні ЄГ на вібростенді (рис. 3) та запропоновано нові алгоритм та методику досліджень g та Δg ємнісним гравіметром АГС.

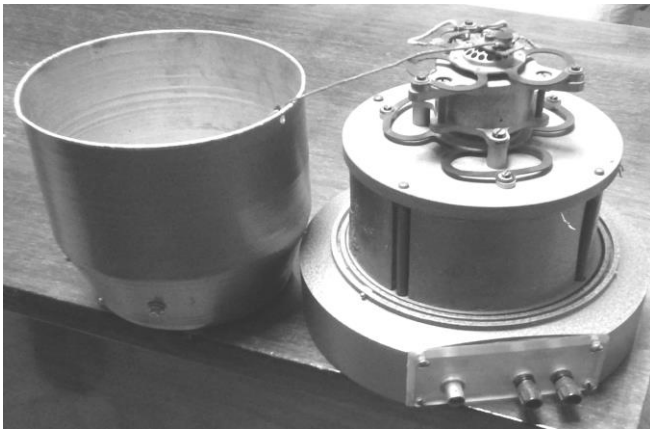


Рис. 3. Вібростенд з встановленим на ньому ЄГ

Розглянуто принципову схему, за якою можна побудувати пристрій для реєстрації сигналу, що надходить з ЄГ. Проведено аналіз існуючих пристроїв для реєстрації сигналу та обрано DAQPad у якості такого пристрою.

Результатом проведення лабораторних досліджень є дані, що характеризують залежність амплітуди значення вихідної напруги нового ЄГ від частоти коливань, яка задається вібростендом. Визначено, що при частоті коливань стола вібростенду, яка рівна частоті власних коливань ємнісного гравіметра, амплітуда вихідної напруги є максимальною, а при збільшенні частоти коливань значення вихідної напруги зменшується..

Отримано калібрувальну характеристику нового ЄГ, з якої видно, що при зміні кута відхилення осі чутливості нового ЄГ порівняно з вертикальним положенням, його покази та величина похибки змінюються прямо пропорційно.

В результаті лабораторних досліджень зроблено наступні висновки:

- при відсутності коливань вібростенду значення вихідного сигналу, що надходить з нового ЄГ, співпадає з довідковим значенням гравітаційного прискорення для даної точки, а систематична похибка Δ_g не перевищує 0,00006 мГал;

- точність вимірювань 1 мГал зберігається при значеннях поступальних вібрацій стола вібростенду до 10 рад/с;

- точність вимірювань 1 мГал зберігається при найбільш небезпечних режимар роботи, при яких частота коливань дорівнює власній частоті $\omega = \omega_0 = 0,1$ рад/с, а також частотах, кратних $\omega = 2\omega_0$, $\omega = 3\omega_0$ та дробних $\omega = \omega_0/2$, $\omega = \omega_0/3$ відносно власної частоти ЄГ;

- точність вимірювань ємнісного гравіметра 1 мГал підтверджується збіжністю аналітичних розрахунків, результатів експериментальних досліджень та цифрового моделювання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В роботі вирішено задачу збільшення точності та швидкодії вимірювань гравітаційного прискорення та гравітаційної аномалії використанням нового ємнісного гравіметра автоматизованої авіаційної гравіметричної системи. Отримано наступні нові результати:

1. Розроблено та досліджено новий ємнісний гравіметр АГС більшої точності (1 мГал) порівняно з відомими (2 – 10 мГал);

2. Запропоновано принципову схему нового ємнісного гравіметра АГС, за рахунок якої забезпечується підвищення точності вимірювання g у 2 рази;

3. Отримано математичну модель нового ЄГ АГС;

4. Запропоновано АГС із ємнісним гравіметром, яка забезпечує підвищення точності у 2 рази та швидкодії у 10 разів вимірювання g або Δg , порівняно із відомими системами, та також відсутність у її корисному сигналі значення основної завади $\ddot{h}$;

5. Визначено та досліджено основні похибки ємнісного гравіметра, запропоновано заходи по їх зменшенню;

6. Вирішено задачу фільтрації вихідного сигналу ЄГ АГС заданням частоти власних коливань ЄГ, рівною частоті у точці перетину графіків спектральних щільностей корисного сигналу g та сигналу основної завади $\ddot{h}$;

7. Встановлено шляхом моделювання на ЕОМ режимів роботи, які можуть бути резонансними, а тому є найбільш небезпечними ($\omega = \omega_0$, $\omega = 2\omega_0$, $\omega = 3\omega_0$, $\omega = \omega_0/2$, $\omega = \omega_0/3$), що резонанс виникає тільки при $\omega = \omega_0 = 0,1$ рад/с, при збільшенні коефіцієнта демпфірування до 0,705 резонанс зникає;

8. Показано, що використаний апарат нейронних мереж забезпечує зменшення залишкових похибок від $\ddot{h}$ та інструментальних похибок нового ЄГ;

9. Запропоновано нові алгоритм та методику досліджень g та Δg ємнісним гравіметром АГС;

10. Створено новий лабораторний стенд. Проведено експериментальні дослідження нового ємнісного гравіметра;

11. Підтверджено точність вимірювань ємнісного гравіметра 1 мГал збіжністю аналітичних розрахунків, результатів експериментальних досліджень та цифрового моделювання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Безвесільна О. М. Бездротова система моніторингу сейсмічної активності [Текст] / О. М. Безвесільна, К. С. Козько // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2012. – № 1 (60). – С. 37–41.

Здобувачем розглянуто конструкції ємнісного сенсора, базової станції та сенсорного вузла системи моніторингу сейсмічної активності.

2. Безвесильная Е. М. Расчет кольцевого резонатора пьезоэлектрического двигателя и моделирование его в программном продукте ANSYS [Текст] / Е. М. Безвесильная, К. С. Козько, С. Ф. Петренко // Журнал «Электронное моделирование». – 2012. – №3. – С. 105–113 (Cambridge Scientific Abstracts, Computer and Information Systems Abstracts, INIS Collection, Inspec, BINITI РАН).

Здобувачем проведено моделювання кільцевого п'єзореzonатора в програмному продукті ANSYS.

3. Безвесільна О. М. Апаратно-програмний комплекс для експериментального дослідження ємнісного гравіметра [Текст] / О. М. Безвесільна, К. С. Козько // Вісник інженерної академії України. – 2013. – №2. – с.15-17 (Google Scholar).

Здобувачем розглянуто конструктивну схему апаратно-програмного комплексу для експериментального дослідження ємнісного гравіметра.

4. Bezvesilnaya, E.N. Gravimeter of aviation gravimetric system [Text] / E.N. Bezvesilnaya, A.G. Tkachuk, K.S. Kozko // The advanced science journal (USA). – 2013. – №4. – P. 41–46.

Здобувачем надана опис нового гравіметра авіаційної гравіметричної системи, за допомогою якого можливо забезпечити точність вимірювання гравітаційного прискорення в 1 мГал.

5. Bezvesilnaya, E.N. System for airborne gravimetry [Text] / E.N. Bezvesilnaya, A.G. Tkachuk, K.S. Kozko // European Applied Sciences (Germany). – 2013. – №5(2). – P. 37–40.

Здобувачем проведено аналіз принципової схеми авіаційної гравіметричної системи та наведено розгляд її чутливого елемента.

6. Безвесільна, О.М. Аналіз конструктивних особливостей ємнісного акселерометра [Текст] / О. М. Безвесільна, Р. О. Демчук, К. С. Козько // Вісник інженерної академії України. – 2013. – №3-4. – с.8-10. (Google Scholar)

Здобувачем запропоновано конструкцію нового ємнісного гравіметра.

7. Безвесільна, О.М. Моделювання впливу параметрів збурень на роботу гравіметра АГС [Текст] / О. М. Безвесільна, А. А. Горбачов, К. С. Козько, Л. О. Чепюк // Вісник інженерної академії України. – 2014. – №4. – с.16-22. (Google Scholar)

Здобувачем проаналізовано вплив параметрів збурень на роботу гравіметра АГС.

8. Безвесільна, О.М. Сучасні гравіметри авіаційної гравіметричної системи [Текст] / О. М. Безвесільна, К. С. Козько, А.Г. Ткачук, Л. О. Чепюк // Геофизический журнал (UK). – 2015. – №2. – т. 37. – с.86-94.

Здобувачем проведено аналіз сучасних гравіметрів авіаційних гравіметричних систем.

9. Патент на винахід 102352, Україна, МПК G01V 1/22 (2006.01). Бездротова система моніторингу сейсмічної активності / Безвесільна О.М., Козько К. С. – № а 2012 09284; заяв. 30.07.2012; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12.

Здобувачем запропоновано систему спостереження за сейсмічною активністю, яка використовує бездротовий зв'язок між базовою станцією та сейсмодулями.

10. Патент на винахід 105122, Україна, МПК G01V 7/16 (2006.01). Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння / Безвесільна О.М., Ткачук А. Г., Козько К. С. – № а 2013 04061; заяв. 01.04.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7.

Здобувачем запропоновано ємнісний гравіметр авіаційної гравіметричної системи.

11. Безвесільна, О.М. Експериментальні дослідження градування акселерометра [Текст] / О. М. Безвесільна, К. С. Козько, Л. О. Чепюк // X International scientific and practical conference “Conduct of modern science” (UK). – 2014. – v. 24. – p. 18-22.

Здобувачем проведено градування вібраційного акселерометра.

12. Kozko, K. S. Gravimeter Output Filtering [Text] / K. S. Kozko, E. N. Bezvesilnaya, A. G. Tkachuk // XV International PhD Workshop OWD 2013 (Poland). – 2013. – №33. – P. 306–309.

Здобувачем розглянуто спосіб, за допомогою якого можливо прибрати вплив високочастотних завад на вихідний сигнал ємнісного гравіметра.

13. Безвесільна, О.М. Вплив зміни температури на стохастичні характеристики похибки інерційного датчика на основі MEMS [Текст] / О.М. Безвесільна, К. С. Козько // Перша наук.-практ. конференція студентів, аспірантів та молодих вчених “Сучасні тенденції розвитку приладобудування”: тези допов. – Луганськ, 2012. – С. 136-137.

Здобувачем проаналізовано вплив зміни температури навколишнього середовища на стохастичну складову похибки інерційного датчика на основі MEMS.

14. Безвесільна, О.М. Статичні похибки гіроскопічного гравіметра [Текст] / О.М. Безвесільна, К. С. Козько // VI Міжнародна наук.-техн. конференція “Інформаційно-комп’ютерні технології 2012” : тези допов. – Житомир, 2012. – С. 22-23.

Здобувачем проаналізовано статичні похибки гіроскопічного гравіметра.

15. Безвесільна, О.М. Знешумлення вихідного сигналу ємнісного гравіметра [Текст] / О.М. Безвесільна, К. С. Козько // Міжнародна наук.-техн. конференція “Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення”: тези допов.– Севастополь, 2013. – С. 134-135.

Здобувачем розглянуто спосіб виділення сигналу гравітаційної аномалії лінійної системи з суміші сигналу та шуму.

16. Безвесільна, О.М. Вплив зміни температури на стохастичні характеристики похибки ємнісного гравіметра [Текст] // О.М. Безвесільна, К. С. Козько // НПК on-line конференція присвячена Дню науки: тези допов.– Житомир, 2013. – С. 68-69.

Здобувачем розглянуто вплив зміни температури на похибку ємнісного гравіметра.

17. Безвесільна, О.М. Гравіметр авіаційної гравіметричної системи нового типу [Текст] // О.М. Безвесільна, К. С. Козько // НПК on-line конференція присвячена Дню науки: тези допов.– Житомир, 2014. – С. 224-225.

Здобувачем запропоновано ємнісний гравіметр у якості гравіметра авіаційної гравіметричної системи нового типу.

18. Безвесільна, О.М. Ємнісний гравіметр спеціалізованої комп'ютеризованої системи [Текст] // О.М. Безвесільна, К. С. Козько // П'ята міжнародна конференція студентів та молодих науковців «Сучасні інформаційні технології 2015».– Одеса, 2015. – С. 107-108.

Здобувачем надано функціональну схему і принцип дії нового високоточного ємнісного гравіметра спеціалізованої комп'ютеризованої системи.

19. Безвесільна, О.М. Двоканальний ємнісний гравіметр [Текст] // О.М. Безвесільна, К. С. Козько // І всеукраїнська НТК «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення 2015».– Житомир, 2015. – С. 47-48.

Здобувачем запропоновано двоканальний ємнісний гравіметр.

20. Безвесільна, О.М. Ємнісний гравіметр авіаційної гравіметричної системи [Текст] // О.М. Безвесільна, К. С. Козько // Всеукраїнська науково-практична on-line конференція “Технічні науки на сучасному етапі” (присвячена Дню науки).– Житомир, 2015. – С. 52-53.

Здобувачем запропоновано ємнісний гравіметр у якості гравіметра авіаційної гравіметричної системи.

21. Безвесільна, О.М. Апаратно-програмний комплекс для експериментального дослідження ємнісного гравіметра [Текст] // О.М. Безвесільна, К. С. Козько // 14-та Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”.– Київ, 2015. – С. 98.

Здобувачем запропоновано апаратно-програмний комплекс для експериментального дослідження ємнісного гравіметра.

22. Безвесільна, О.М. Спосіб компенсації похибок вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння авіаційної гравіметричної системи [Текст] // О.М. Безвесільна, К. С. Козько, Л. О. Чепюк // 8 Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робото технічні комплекси (ІРТК-2015).– Київ, 2015. – С. 143-145.

Здобувачем запропоновано спосіб компенсації похибок вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння авіаційної гравіметричної системи.

23. Безвесільна, О.М. Обробка даних вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння авіаційної гравіметричної системи [Текст] // О.М. Безвесільна, К. С. Козько, Л. О. Чепюк // 8 Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні роботи технічні комплекси (ІРТК-2015).» – Київ, 2015. – С. 141-142.

Здобувачем запропоновано спосіб обробки даних вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння авіаційної гравіметричної системи.

24. Безвесільна, О.М. Конструкція та математична модель ємнісного гравіметра [Текст] // О.М. Безвесільна, К. С. Козько // VIII НПК студентів та аспірантів "Погляд у майбутнє Приладобудування". – Київ, 2015. – С. 76.

Здобувачем розглянуто конструкцію та математична модель ємнісного гравіметра.

25. Безвесильная, Е.Н. Определение координат мобильного робота на основе показаний акселерометра, выраженных в кватернионной форме [Текст] // Е.Н. Безвесильная, В.С. Кожух, К. С. Козько // 42 Міжнародна наукова школа-семинар «Питання оптимізації обчислень (ПОО-ХЛІІ)» – Київ, 2015. – С. 167.

Здобувачем розглянуто використання акселерометра або гравіметра для навігації мобільного робота.

АНОТАЦІЇ

Козько К.С. Ємнісний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – прилади та методи вимірювань механічних величин. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут” МОН України, Київ, 2016.

Дисертація присвячена дослідженню нового ємнісного гравіметра автоматизованої авіаційної гравіметричної системи (АГС). В роботі проведений аналіз існуючих типів гравіметрів АГС та запропоновано новий, яким є ємнісний гравіметр. Автором описано принципову схему даного вимірювального перетворювача, отримано математичну модель ЄГ, проаналізовано основні похибки та джерела їх виникнення, а також запропоновано заходи для їх зменшення. За результатами проведених досліджень отримано патент України на винахід.

Задачу фільтрації вихідного сигналу ЄГ АГС вирішено за рахунок задання частоти власних коливань ЄГ рівною частоті у точці перетину графіків спектральних щільностей корисного сигналу та сигналу основної завади.

Шляхом моделювання на ЕОМ встановлено режими роботи, які можуть бути резонансними, а тому є найбільш небезпечними, і

запропоновано спосіб, який дозволяє уникнути резонансу. Показано, що використання апарату нейронних мереж забезпечує зменшення залишкових похибок від вертикального прискорення та інструментальних похибок нового ЄГ.

Створено експериментальний стенд для лабораторних досліджень ємнісного гравіметра.

Новий ємнісний гравіметр забезпечує точність вимірювання прискорення сили тяжіння на рівні 1 мГал, що є 2-кратним покращенням відносно відомих авіаційних гравіметрів з точністю 2-10 мГал, а за рахунок автоматизації вимірювань швидкість обробки даних збільшується у 10 разів.

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

Козько К.С. Ёмкостной гравиметр автоматизированной авиационной гравиметрической системы. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.01 – приборы и методы измерения механических величин. – Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт” МОН Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена исследованию нового ёмкостного гравиметра автоматизированной авиационной гравиметрической системы (АГС). В работе проведен анализ существующих типов гравиметров АГС и предложен новый, которым является ёмкостной гравиметр. Автором описана принципиальная схема данного измерительного преобразователя, получена математическая модель ЕГ, проанализированы основные ошибки и источники их возникновения, и предложены пути их уменьшения. По результатам проведенных исследований получен патент на изобретение.

Задача фильтрации выходного сигнала ЕГ АГС решена за счет задания частоты собственных колебаний равной частоте в точке пересечения графиков спектральных плотностей полезного сигнала и сигнала основной помехи.

Путем моделирования на ЭВМ установлены режимы работы, которые могут быть резонансными, а поэтому являются наиболее опасными, и предложен способ, позволяющий избежать резонанса. Показано, что использование аппарата нейронных сетей обеспечивает уменьшение остаточных погрешностей от вертикального ускорения и инструментальных погрешностей нового ЕГ.

Создан экспериментальный стенд для лабораторных исследований нового ёмкостного гравиметра.

Новый ёмкостной гравиметр обеспечивает точность измерения ускорения силы тяжести на уровне 1 мГал, что является 2-кратным

улучшением относительно известных авиационных гравиметров с точностью 2-10 мГал, а за счет автоматизации исследований скорость обработки данных увеличивается в 10 раз.

Ключевые слова: емкостной гравиметр, авиационная гравиметрическая система, ускорение силы тяжести.

Kozko K.S. Capacitive gravimeter of automated airborne gravimetric system. – Manuscript.

PhD thesis in the speciality 05.11.01 – devices and techniques for measurement of mechanical quantities. – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” MES of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to the research of new capacitive gravimeter of automated airborne gravimetric system (AGS). Existing types of AGS gravimeters are analyzed and capacitive gravimeter as new type of gravimeters is proposed. Author describes schematic diagram of transducer, calculates mathematical model, performs analysis of main errors and their sources as well as ways of their decrease or elimination. Results of research were covered by patent.

AGS capacitive gravimeter output signal filtration task is solved by setting the eigenfrequency equal to frequency in the intersection point of signal and main noise spectral density diagrams.

Computer simulation determines work modes that could cause resonance and therefore are most dangerous. An approach that can eliminate resonance is proposed. Neural network is shown to be useful in the residual errors elimination task. Reasons of such errors could be vertical acceleration as well as instrumental errors.

Test bench for lab research of new capacitive gravimeter has been made.

New capacitive gravimeter has guaranteed measurement precision of 1 mGal. That is twice more precise than well-known airborne gravimeters that cannot perform better as of 2 to 10 mGals. Data processing speed is 10 times more than usual due to airborne measurement automation.

Keywords: capacitive gravimeter, aviation gravimetric system, gravity.