

## ВІДГУК

### офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Назаренко Наталії Миколаївни**  
*«Двоканальний п'єзоелектричний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи»*,

що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин.

### *Актуальність теми дисертаційної роботи*

У наш час проектування, розробка та виробництво нових аерогравіметричних приладів більшої точності вимірювання та швидкодії обробки отриманих результатів вимірювання, відносно вже існуючих, стала актуальною проблемою для успішного розвитку гравіметрії.

Існуючі, на сьогоднішній день, авіаційні гравіметричні прилади частково досягли своєї технологічної межі стосовно точності вимірювань та швидкодії обробки вимірювань прискорення сили тяжіння (ПСТ)  $g$  та його аномалії  $\Delta g$ . Запропоновані у дисертаційній роботі Назаренко Н.М. нові підходи та рішення при розробці авіаційних гравітаційних систем (АГС), дозволяють розширити діапазон точності вимірювань та швидкодію вимірювань і обробки отриманих показників ПСТ та його аномалії  $\Delta g$ .

Більш точне вивчення гравітаційного поля Землі необхідне для багатьох наукових досліджень, пов'язаних з реалізацією задач інженерної геології, океанології, археології, геодезії, геофізики, аерокосмічній галузі, розвідки корисних копалин, картографії тощо.

Тому актуальною науково-технічною задачею є підвищення точності (до 0,5 мГал) та швидкодії вимірювань прискорення сили тяжіння шляхом створення нового двоканального п'єзоелектричного гравіметра (ДПГ) автоматизованої АГС.

У запропонованій дисертаційній роботі розроблено та досліджено новий двоканальний п'єзоелектричний гравіметр (ДПГ) автоматизованої авіаційної гравіметричної системи (АГС), який має вищу точність вимірювань та швидкодію обробки результатів від відомих гравіметрів АГС.

Дослідження та розробки, узагальнені у дисертаційній роботі, виконувались у рамках відповідної науково-дослідної роботи між кафедрою приладобудування Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (КПІ ім. Ігоря Сікорського) та Міністерством освіти і науки України:

– № 2311п “Новий прецизійний чутливий елемент стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки” (номер держреєстрації 0120U102248): здобувачеві належить розділ 5, в якому розглянуто нові алгоритми функціонування та нові методики експериментальних досліджень, а також новий алгоритмічний метод зменшення динамічних та інструментальних похибок ДПГ.

**Мета дослідження:** підвищення точності та швидкодії вимірювань прискорення сили тяжіння шляхом використання нового двоканального п’єзоелектричного гравіметра авіаційної автоматизованої гравіметричної системи.

**Об’єкт дослідження:** процес вимірювання прискорення сили тяжіння шляхом використання двоканального п’єзоелектричного гравіметра автоматизованої АГС.

**Предмет дослідження:** новий двоканальний п’єзоелектричний гравіметр автоматизованої АГС.

**Наукова новизна дисертаційної роботи підтверджується такими основними науковими результатами:**

- отримали подальший розвиток розробка та дослідження нового двоканального ПГ автоматизованої АГС більшої точністю (0,5 мГал) від відомих гравіметрів (2 – 10 мГал);

- розроблено математичну модель авіаційної гравіметричної системи для вимірювання аномалій ПСТ, яка відрізняється від відомих додатковими поправками, похибка від неврахування яких недопустимо велика (3,67 мГал). Добуто рівняння руху, визначено блок-схеми основних компонентів АГС: системи стабілізації, навігації та визначення аномалій ПСТ;

- описано структурну схему перетворення сигналу ПСТ у п’єзоелементі нового ДПГ та запропоновано спосіб компенсації вхідного напруження

шляхом введення від'ємного зворотного зв'язку на основі зворотного п'єзоефекту. Визначено коефіцієнт передачі п'єзоелектричного елемента (ПЕ), виготовленого із ніобату літію, який складає 1,682;

- для забезпечення потрібної точності вимірювань ПСТ АГС, обчислено допустимі значення похибок визначення параметрів льоту літального апарату (ЛА): швидкість 0,05 м/с, курс 1,43 кут. хв., широта 0,5 кут.хв., висота 3,3 м, вертикальна швидкість  $0,5 \cdot 10^2$  м/с, шлях 1,5 м.

- розраховано допустиму похибку стабілізації осі чутливості ДПГ у положення вертикалі 5 кут.хв. для точності 0,5 мГал та запропоновано шляхи її зменшення за рахунок використання методів високоточного виставлення осі чутливості ДПГ;

- визначено склад та структуру похибок ДПГ, розглянуто та розраховано основні із них. Інструментальна похибка вимірювання не перевищує 0,1 мГал, а такі похибки, що викликані способом кріплення до основи, шумами різного походження та зміщенням нуля-пункту можна сповна ліквідувати за допомогою конструктивних особливостей ДПГ;

- на основі рівняння динаміки ДПГ розраховано його передатну функцію для аналізу на стійкість. Встановлено, що вона має вигляд коливальної ланки;

- за критеріями Гурвіца та Найквіста визначено, що ДПГ є стійким.

### ***Практичне значення одержаних результатів:***

- розкриті у дисертаційній роботі результати теоретичних і експериментальних досліджень є внеском у теорію побудови нових типів гравіметрів авіаційних гравіметричних систем з підвищеною точністю та швидкодії. Рішення, що були запропоновані у дисертаційній роботі, є новими і розширюють та доповнюють основи теорії побудови вимірювальних перетворювачів з цифровою обробкою інформації;

- обґрунтовано доцільність використання нового ДПГ автоматизованої АГС більшої точності (до 0,5 мГал), ніж у відомих на сьогодні гравіметрів (з результатами вимірювань 2-10 мГал);

- створено лабораторну установку для експериментальних досліджень ДПГ;
- розроблено методику і алгоритм досліджень високоточних авіаційних вимірювань прискорення сили тяжіння.

Всі наведені результати дозволяють підвищити точність вимірювань  $g$  у 2 рази (0,5 мГал) та швидкодію - у 10 разів у порівнянні із сьогодні відомими авіаційними гравіметрами з результатами вимірювань 2-10 мГал.

Результати дисертаційної роботи впроваджено, і підтверджено актами впровадження у навчальному процесі на кафедрі приладобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в навчальних дисциплінах «Наукові дослідження в галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій» і «Планування експерименту» та в процесі дипломного та курсового проектування зі спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», а також — у дослідженнях за тематикою Публічного акціонерного товариства «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики».

#### ***Оцінка змісту дисертації:***

У **вступі** обґрунтовано актуальність досліджень, можливість та доцільність використання в якості гравіметра авіаційної гравіметричної системи нового ДПГ, сформульовано мету і задачі досліджень дисертації, наукову новизну, практичне значення отриманих результатів. Наведено основні наукові та практичні результати, які отримано у дисертаційній роботі. Визначено структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз науково-літературних джерел з теми досліджень дисертації та аналіз сучасних методів вимірювання прискорення сили тяжіння. Визначено методи та засоби визначення прискорення сили тяжіння різними гравіметрами. Обґрунтовано необхідність розробки двоканального п'єзоелектричного гравіметра АГС. Визначено сучасні точнісні вимоги до гравіметрів АГС. Для суттєвого покращення характеристик точності АГС наразі критичним є досягнення точності

гравіметра АГС величиною у 0,5 мГал. Запропоновано для розробки новий двоканальний п'єзоелектричний гравіметр АГС, особливості якого дозволяють подолати всі вищезгадані недоліки існуючих гравіметрів АГС.

**У другому розділі** проведений огляд наукових праць по п'єзоелектричним перетворювачам та розроблено функціональну схему нового авіаційного двоканального п'єзоелектричного гравіметра.

Розроблено математичну модель двоканального п'єзоелектричного гравіметра та розраховано його основні конструктивні та електричні параметри. Розглянуто способи розміщення ПЕ у конструкції ДПГ та зроблено їх порівняльну характеристику, визначено їх переваги та недоліки. Обрано наступний спосіб розміщення ПЕ – нецентрований та затиснений за допомогою гвинта. Проведено аналіз основних видів п'єзоматеріалів (кварц, ніобат літію, турмалін, сегнетова сіль, сульфат літію, дигідрофосфат амонію, кераміка) для ЧЕ нового ДПГ. Матеріалом для ЧЕ нового ДПГ обрано ніобат літію. Ніобат літію має високу стійкість до зміни зовнішніх температур та тисків, високий коефіцієнт електромеханічного зв'язку та стабільні п'єзоелектричні властивості, що є важливим безпосередньо для конструкції ДПГ.

Вирішено проблему фільтрації вихідного сигналу ДПГ від високочастотних завад за рахунок використання п'єзоелемента нового ДПГ як у якості ЧЕ, так і фільтра низьких частот. Запропоновано способи конструкційного досягнення власної частоти ПГ 0.1 рад/с. Обрано найоптимальніший із них – за рахунок збільшення вхідного опору операційного підсилювача.

Визначено основні характеристики ДПГ, такі як: робочий діапазон ПСТ, робочий частотний діапазон, температурну залежність п'єзоелектричних параметрів ПЕ та інші.

Розраховано частоту власних коливань ДПГ 0.1 рад/с, яка забезпечує відсутність необхідності використання додаткової фільтрації вихідного сигналу ДПГ від вертикального прискорення ЛА, яке є основним збуренням.

**У третьому розділі** розроблені блок-схема автоматизованої АГС із ПГ для вимірювання аномалій ПСТ та схема стабілізації осі чутливості ПГ. Проаналізовано методичні похибки автоматизованої АГС. Було визначено основні похибки нового ПГ та запропоновано шляхи їх зменшення.

Розроблено математичну модель авіаційної гравіметричної системи для вимірювання аномалій ПСТ, яка відрізняється від відомих додатковими поправками, похибка від неврахування яких недопустимо велика (3,67 мГал). Добуто рівняння руху, визначено блок-схеми основних компонентів АГС: системи стабілізації, навігації та визначення аномалій ПСТ.

Розглянуто та описано структурну схему перетворення сигналу ПСТ у п'єзоелементі нового ДПГ та запропоновано спосіб компенсації вхідного напруження шляхом введення від'ємного зворотного зв'язку на основі зворотного п'єзо ефекту. Визначено коефіцієнт передачі ПЕ, виготовленого із ніобату літію, який складає 1,682.

Обчислено допустимі значення похибок визначення параметрів польоту ЛА: швидкість 0,05 м/с, курс 1,43 кут. хв., широта 0,5 кут.хв., висота 3,3 м, вертикальна швидкість  $0,5 \cdot 10^2$  м/с, шлях 1,5 м.

Розраховано допустиму похибку стабілізації осі чутливості ДПГ у положення вертикалі 5 кут.хв. для точності 0,5 мГал та запропоновано шляхи її зменшення за рахунок використання методів високоточного виставлення осі чутливості ДПГ.

Визначено склад та структуру похибок ДПГ, розглянуто та розраховано основні із них. Інструментальна похибка вимірювання не перевищує 0,1 мГал. Похибки, що викликані шумами різного походження, способом кріплення до основи та зміщенням нуля-пункту можна сповна ліквідувати за допомогою конструктивних особливостей ДПГ.

**У четвертому розділі** перетворено диференціальні рівняння руху ДПГ зі змінними коефіцієнтами на рівняння "машинного" вигляду. Розроблено алгоритм розв'язання диференціального рівняння руху ДПГ за допомогою ЕОМ. Досліджено за допомогою ЕОМ вплив частот  $\omega$  і амплітуд  $w_a, w_b$ , збуджуючих вібраційних прискорень для найнесприятливіших резонансних

випадків:  $\omega = \omega_0$ ,  $\omega = 2\omega_0$ ,  $\omega = 3\omega_0$ ,  $2\omega = \omega_0$ ,  $3\omega = \omega_0$ , де  $\omega_0$  – частота власних коливань ДПГ,  $\omega$  - частота збурень. Досліджено функціональні алгоритми АГС із новим ДПГ в екстремальних умовах із використанням нейронних мереж.

У результаті виконаного моделювання було отримано графіки зміни вихідного сигналу  $x(t)$  для різних значень частоти збурень  $\omega$  вібраційних прискорень, коефіцієнта демпфування  $\xi$  та різних значень амплітуд збурюючих віброприскорень  $w_a$ ,  $w_b$ .

Цифрове моделювання впливу на ДПГ параметрів збурень, а також власних параметрів підтвердило основну перевагу ДПГ над відомими гравіметрами – його вищу точність (0,5 мГал).

Розглянуто можливості використання нейромережевого підходу у задачах розробки алгоритмів функціонування і АГС із новим ДПГ. Встановлено, що функціонування комплексної системи авіаційної гравіметричної системи (АГС) з неймережами, можливе у трьох режимах: під час підготовчого етапу, під час руху та під час руху при наявності сигналу з приймача СНС.

Проведено експериментальні дослідження АГС із ДПГ за допомогою нейронних мереж.

**У п'ятому розділі** було створено експериментальну установку для дослідження основних характеристик ДПГ та обґрунтовано можливість його застосування у складі АГС. Зроблено конструктивний та аналітичний опис кожної складової експериментальної установки. Проаналізоване програмне забезпечення для відображення результатів досліджень на ЕОМ. Проведено експериментальні дослідження та побудовано графіки основних необхідних залежностей. Виведено рівняння руху ДПГ, в якому враховано основні фактори, що впливають на проведення авіаційних гравіметричних вимірювань. Викладено методику і рекомендації з проведення випробувань ДПГ у складі АГС.

**У висновках** сформульовано основні результати теоретичних та експериментальних досліджень, що представлені у дисертаційній роботі.

**У додатках** наведено акти впровадження результатів у навчальний процес та промисловість, текст програми моделювання на комп'ютері.

**Повнота викладу основних результатів дисертації:** за результатами досліджень опубліковано 16 наукових праць, у тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях (з них 5 статей у наукових фахових виданнях України, 3 статті у виданнях іноземних держав), 8 - матеріали доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

Робота добре структурована. Текст підіймає інтерес до теми, що висвітлюється, його легко читати, хоча існують деякі недоліки, такі як використання автором речень складної структури.

***Зауваження щодо змісту та оформленню дисертаційної роботи:***

1. Не зрозуміло, що має на увазі автор, коли каже про вибір «оптимальної математичної моделі чутливих елементів»? Яким критерієм зумовлюється така оптимальність?
2. Стан задачі, що досліджується, викладено у загальній характеристиці роботи, тоді як у розділах відсутні порівняння з результатами інших авторів.
3. З приведених у дисертації даних не зрозуміло, яку швидкодію мають відомі авіаційні гравіметричні системи.
4. Деякі з пунктів розділів "Наукова новизна отриманих результатів" та "Висновки" було б доцільним більше розкрити їх суть та більше конкретизувати. Для цього є достатньо матеріалу у розділах "Основного змісту роботи".
5. Відсутні деякі посилання на літературні джерела а також самі посилання по тексту дисертаційної роботи не відповідають нумерації у списку використаних джерел.

Вищезазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку виконаних досліджень: їх актуальності, наукової новизни, практичної цінності, обґрунтованості та достовірності.

***Висновок***

Дисертаційна робота «Двоканальний п'єзоелектричний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи» є завершеною науковою працею, в якій вирішено важливу науково-технічну задачу – підвищення точності та швидкодії вимірювань прискорення сили тяжіння шляхом



використання нового п'єзоелектричного гравіметра автоматизованої авіаційної гравіметричної системи.

Вищезазначене дає підстави для визначення: дисертація відповідає вимогам п. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор – Назаренко Наталія Миколаївна заслуговує присудження наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – Прилади та методи вимірювання механічних величин.

Доцент кафедри технологій  
машинобудування та деревообробки  
національного університету  
«Чернігівська політехніка», к.т.н., доцент



П.Л. Ігнатенко

Підпис П.Л. Ігнатенка засвідчую:  
проректор з науково-педагогічної роботи  
національного університету  
“Чернігівська політехніка”,  
доктор технічних наук, професор,  
заслужений діяч  
науки і техніки України



В.В. Кальченко