

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**НАЗАРЕНКО Наталія Миколаївна**



УДК 528.563

**ДВОКАНАЛЬНИЙ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГРАВІМЕТР  
АВТОМАТИЗОВАНОЇ АВІАЦІЙНОЇ ГРАВІМЕТРИЧНОЇ  
СИСТЕМИ**

Спеціальність 05.11.01 – Прилади та методи вимірювання  
механічних величин

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі приладобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» 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 імені Ігоря Сікорського», професор кафедри приладобудування.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

**Подчашинський Юрій Олександрович**

Житомирський державний технологічний університет, завідувач кафедри метрології та інформаційно-виміральної техніки, м. Житомир;

Кандидат технічних наук, доцент

**ІГНАТЕНКО Павло Леонідович**,

Національний університет «Чернігівська політехніка», доцент кафедри технологій машинобудування та деревообробки

Захист відбудеться « 27 » вересня 2021 р. о 14<sup>00</sup> год на засіданні спеціалізованої вченої ради К26.062.18 у Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий « 27 » серпня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради К26.062.18



Стахова А.П.

## Загальна характеристика роботи

**Актуальність теми.** Вимірювання значення прискорення сил тяжіння  $g$  з високою точністю необхідне для вирішення широкого спектру наукових задач: визначення форми Землі, побудови моделей руху глибинних мас, оцінки пружних деформацій поверхні планети, передбачення землетрусів, винаходження глибинних щільнісних неоднорідностей, пошуку покладів корисних копалин та ін. Для визначення  $g$  призначені гравіметри. Вивчення параметрів гравітаційного поля Землі (прискорення сили тяжіння  $g$  та його аномалій  $\Delta g$ ) необхідні як в авіаційній і космічній техніці (корекція систем інерціальної навігації ракет, літаків, орбіт космічних літальних апаратів), так і в інших галузях науки і техніки - в геології, геофізиці, геодезії (розвідка корисних копалин, вивчення форми Землі тощо). Тому стає актуальним великомасштабне вивчення аномалій прискорення сили ваги.

Для визначення характеристик гравітаційного поля Землі може бути побудовано авіаційну гравіметричну систему (АГС), чутливим елементом якої є гравіметр. За допомогою АГС можна здобути гравіметричну інформацію у важкодоступних районах земної кулі набагато швидше та меншими витратами, ніж за допомогою наземних морських або сухопутних гравіметричних засобів.

Ефективність роботи АГС значною мірою забезпечується вибором чутливого елемента системи - гравіметра. Сьогодні одними з найперспективніших вважають п'єзоелектричні гравіметри.

Гравіметричні вимірювання можна здійснювати наземними, підводними (на підводному човні) та надводними (морськими), авіаційними (за допомогою літального апарату) гравіметричними засобами.

*Наземні гравіметричні вимірювання* забезпечують найбільш високу точність (0,01 мГал). Але, вони здійснюються дуже повільно. Райони полюсів, екватора, океанів, важкодоступні місця суші, пустелі, гірські масиви для таких вимірювань недоступні.

*Морські гравіметричні вимірювання* мають точність 0,1 – 0,5 мГал У той час, як авіаційні вимірювання мають значно нижчу точність. Крім того морські гравіметричні вимірювання неможливі у гірських, важкодоступних місцях суші та у віддалених районах океанів.

*Авіаційні вимірювання* дозволяють здійснювати вимірювання прискорення сили тяжіння (ПСТ) у важкодоступних районах Землі зі швидкістю значно більшою, ніж наземні. Для цих цілей використовують авіаційні гравіметричні системи, чутливим елементом яких є гравіметр. Дані про гравітаційне поле Землі, введені у пам'ять бортового комп'ютера АГС, суттєво сприятимуть підвищенню як точності визначення навігаційних параметрів, так і ефективності гравіметричної розвідки.

У країнах СНД в авіаційній гравіметрії відомі роботи А.М. Лозинської (струнний гравіметр), Є.І. Попова (кварцовий гравіметр), а за кордоном – L-R-S (гравіметр Ла-Косте-Ромберга), А. Графа (гравіметр Асканія-Граф).

Широковідомі дослідження українських науковців таких, як академіка НАН України В.І. Старостенка в Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, академіка НАН України В.І. Лялько у Науковому Центрі аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, академіка НАН України П.Ф. Гожики в Інституті геологічних наук НАН України, Заслуженого

діяча науки і техніки України, д.т.н., професора О.М. Безвесільної в КПІ ім. Ігоря Сікорського з різними типами гравіметрів.

В існуючих на сьогоднішній день авіаційних гравіметрів точність недостатня (2–10) мГал. Швидкодія вимірювань та обробки вимірювальної інформації існуючих гравіметрів є дуже повільною. Більшість із них є неавтоматизованими та одно канальними. До того ж, ці гравіметри вимірюють разом із прискоренням сили тяжіння  $g$  вертикальне прискорення  $\Delta z$ . Високоточне вимірювання  $\Delta z$  є складною науково-технічною задачею і вимагає застосування інших підходів до методики вимірювань та використання нових схемо- технічних рішень – наприклад, використання методу двоканальності.

Успіхи в авіаційній гравіметрії були б неможливими без досягнень у галузі інерціальних систем навігації (ІНС) та чутливих елементів ІНС, висвітлених у наукових працях школи видатних вчених КПІ ім. Ігоря Сікорського: Павловського М.А., Одинцова А.О., Збруцького О.В., Самотокаїна Б.Б., Карачуна В.В., Мельник В.М. та інших.

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

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

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 нова методика експериментальних досліджень, а також новий алгоритмічний метод зменшення динамічних та інструментальних похибок ДПГ.

#### **Мета та задачі дослідження**

*Метою дослідження* є підвищення точності та швидкодії вимірювань прискорення сили тяжіння шляхом використання нового двоканального п'єзоелектричного гравіметра авіаційної автоматизованої гравіметричної системи.

#### *Основні задачі:*

– провести аналітичний огляд науково-літературних джерел та зробити патентний пошук з теми досліджень у галузі авіаційної гравіметрії, надати порівняльну характеристику існуючих гравіметрів АГС, вказати їх переваги та недоліки;

– надати опис конструкції та викласти принцип дії нового двоканального п'єзогравіметра автоматизованої АГС;

– розробити математичну модель ДПГ;

– вирішити задачу покращення параметрів вихідного сигналу ДПГ АГС;

– дослідити основні зовнішні завади двоканального ПГ та запропонувати способи їх зменшення;

– дослідити шляхи утворення систематичних та випадкових похибок каналу вимірювання та запропонувати способи їх зменшення;

– здійснити за допомогою ЕОМ математичне моделювання роботи нового ДПГ автоматизованої АГС в умовах, максимально наближених до умов ЛА, проаналізувати результати моделювання;

– провести експериментальні дослідження нового двоканального п'єзогравіметра.

*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.

#### **Методи дослідження:**

– вивчення та аналіз науково-літературних джерел з теми досліджень дисертації (розділ 1);

– проведення патентного пошуку існуючих п'єзогравіметрів (ПГ) (розділ 1);

– аналіз принципу дії п'єзоелектричного перетворювача для виведення математичної моделі ДПГ (розділ 2);

– метод усунення впливу завад на вихідний сигнал двоканального ПГ автоматизованої АГС (розділ 2);

– методи теорії випадкових процесів для аналізу точності ДПГ (розділ 3);

– алгоритмічні методи обробки інформації на основі апарату штучних нейронних мереж (розділ 4);

– теоретичні дослідження ДПГ із урахуванням діючих на нього параметрів зовнішніх збурень (розділ 4);

– експериментальні дослідження ДПГ з використанням обчислювальних комп'ютерних програм для підтвердження адекватності висновків теоретичних досліджень (розділ 5).

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- отримала 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 всіх 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'єзоєфекту. 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 швидкодією. 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);

- удосконалено 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»

#### **Особистий внесок здобувача.**

Основні теоретичні положення дисертаційної роботи розроблено разом із науковим керівником д.т.н., проф. Безвесільною О.М. Автором проведено аналіз науково-літературних джерел з теми досліджень дисертації та аналіз сучасних методів вимірювання прискорення сили тяжіння, надано опис їх конструкцій та викладено принцип дії нового двоканального ПГ автоматизованої АГС. Отримано та досліджено математичну модель нового двоканального ПГ. Визначено допустимі значення похибок визначення параметрів льоту літального апарату. Розроблено математичну модель авіаційної гравіметричної системи для вимірювання 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'єзо ефекту. Проведено цифрове моделювання на ЕОМ та лабораторні експериментальні дослідження роботи нового ДПГ.

Визначено склад та структуру похібок ДПГ, розглянуто та розраховано основні із них.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів підтверджено збіжністю аналітичних розрахунків, результатів експериментів та моделювання на ЕОМ.

#### **Апробація результатів дисертації.**

Впродовж роботи основні положення та результати дисертаційної роботи були висвітлені на: The decision of the Organizing Committee of the conference "Global science and education in the modern realities "2020" № 1 (USA, Washington, August 27, 2020); Abstracts of XX th International scientific and practical conference «Perspective directions for the development of science and practice» (Greece, Athens, 8 – 9 June, 2020); Міжнародна наукова інтернет-конференція "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 48)" (Україна, Тернопіль, 12 травня 2020 р.); Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2020); XIII міжнародна науково-практична конференція (Україна, Київ 19-20 травня 2020 р.).

#### **Публікації.**

За результатами досліджень опубліковано 7 наукових праць, у тому числі 3 статті у наукових фахових виданнях (з них 2 статті у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у виданнях іноземних держав), 4 матеріали доповідей міжнародних науково-технічних конференцій.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 120 назв та 2 додатків. Роботу викладено на 190 сторінках основного друкованого тексту. У тексті використано 84 рисунки та 19 таблиць.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність досліджень, можливість та доцільність використання в якості гравіметра авіаційної гравіметричної системи нового двоканального ПГ, 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. Показано, що точність відомих гравіметрів недостатня (2-10 мГл), швидкодія їх мала. Обґрунтовано ідеологію 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 до 0,5 мГал. Запропоновано для розробки новий двоканальний п'єзоелектричний гравіметр АГС, особливості якого дозволяють подолати всі основні недоліки існуючих гравіметрів АГС

**У другому розділі** проведено огляд наукових праць по п'єзоелектричним перетворювачам. Аналіз цих праць показав, що в них не досліджено детально

можливість використання двоканальних п'єзоакселерометрів для вимірювань низькочастотних вібраційних прискорень. Не вказано методи зменшення їх власної частоти та підвищення чутливості. Не досліджено детально можливість застосування двоканальних п'єзоакселерометрів в якості гравіметрів.

Із наведеного огляду наукових праць видно, що відсутня будь-яка інформація про використання фізичного явища прямого п'єзоефекту для побудови двоканального гравіметра авіаційної гравіметричної системи, що є абсолютно новим напрямом і областю застосування п'єзоперетворювачів.

Новий двоканальний п'єзогравіметр складається з пристрою обчислення вихідного сигналу п'єзогравіметра та чутливого елемента, що містить пакети п'єзопластин (рис. 1). Чутливий елемент має два канали. У кожному каналі встановлено по одному ідентичному п'єзоелементу, що виготовлені у вигляді п'єзопластин та інерційної маси (ІМ). Ці п'єзоелементи розташовані дзеркально та співвісно (осі  $Z$ ) відносно один одного. Виходи п'єзопластин обох каналів з'єднані з входами суматора. Сигнал суматора подається на вхід пристрою обчислення вихідного сигналу гравіметра. Така конструкція гравіметра дозволяє підвищити точність вимірювань гравітаційного прискорення.

Підвищення точності вимірювання у двоканальному п'єзогравіметрі забезпечується за рахунок того, що введено другий канал вимірювання. Чутливий елемент у цьому випадку виконано з двома каналами. П'єзоелемент одного каналу, з встановленою ІМ на п'єзопластинах, працює на стиснення. Конструктивно ідентичний йому п'єзоелемент іншого каналу, з встановленою ІМ під п'єзопластинами, працює на розтягування. Вихідні електричні сигнали п'єзопластин обох каналів  $u_1$  та  $u_2$  сумуються у суматорі. Отриманий результуючий корисний електричний сигнал буде пропорційним подвоєному сигналу гравітаційного прискорення. Завдяки використанню додатково введеного другого каналу вимірювання, забезпечується відсутність у вихідному корисному сигналі нового ДПГ сигналів похибок від впливу вертикального прискорення та інструментальних похибок (похибки, що виникають від залишкової неідентичності конструкцій однакових п'єзопластин та інерційних мас, від впливу зміни тиску, вологості, температури та зовнішнього середовища, які можуть бути значними.

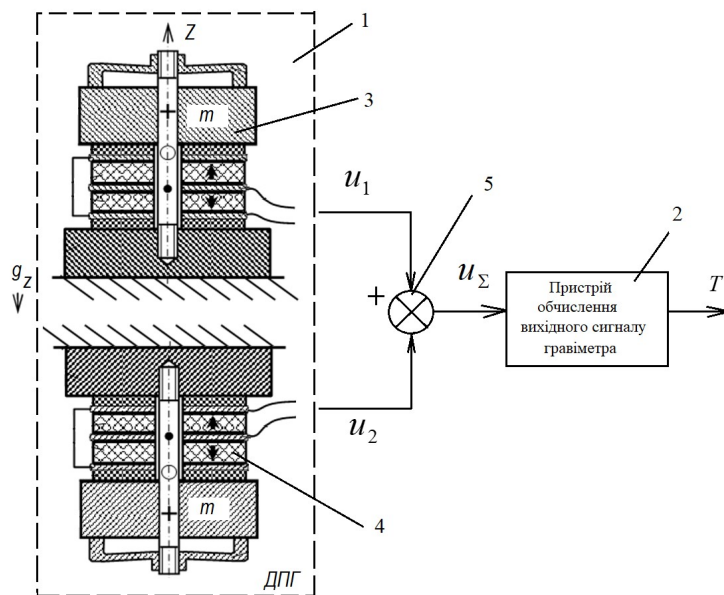


Рис. 1. Двоканальний п'єзоелектричний гравіметр



Отже, запропонований ДПГ забезпечує суттєве підвищення точності вимірювання гравітаційного прискорення.

Робота двоканального п'єзогравіметра полягає у наступному.

На п'єзоелементи обох каналів діє вертикальне прискорення  $\Delta\ddot{z}$  ЛА, гравітаційне прискорення  $g_z$ , та інструментальні похибки  $\Delta i$  (вплив зовнішнього середовища, вплив зміни вологості, температури та тиску, вплив неточності виготовлення пакетів п'єзопластин обох каналів). Врахувавши, що п'єзоелемент 4 другого каналу – на розтягування, а п'єзоелемент 3 одного каналу працює на стиснення і спроектувавши впливи на вимірювальну вісь  $Oz$ , отримаємо:

$$u_1 = k(mg_z + m\Delta\ddot{z} + \Delta i); \quad u_2 = k(mg_z - m\Delta\ddot{z} - \Delta i), \quad (1)$$

де  $u_1$  – вихідний електричний сигнал пакету п'єзопластин одного каналу;

$u_2$  – вихідний електричний сигнал пакету п'єзопластин другого каналу;

$k$  – п'єзоелектрична стала;  $m$  – вага інерційної маси;

Вихідні електричні сигнали  $u_1$  та  $u_2$  пакету п'єзопластин обох каналів сумуються у суматорі 5:

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

де  $u_\Sigma$  – вихідний сигнал суматора 5.

Вихідний сигнал  $u_\Sigma$  з суматора 5 подається на пристрій обчислення вихідного сигналу п'єзогравіметра 2, де він формується за певний інтервал часу. Як результат, отримуємо вихідний сигнал  $T$  пристрою обчислення вихідного сигналу гравіметра 2, що представляє собою подвоєний сигнал гравітаційного прискорення. У цьому сигналі повністю відсутні інструментальні похибки  $\Delta i$  та похибки вимірювань, які спричинені впливом вертикального прискорення  $\Delta\ddot{z}$ . Точність двоканального п'єзогравіметра значно підвищиться.

При дії ПСТ на його чутливу масу коливальної системи ДПГ виникають вимушені коливання.

Колівальна система ПГ складається з наступних елементів: інерційна маса ( $m$ ), демпфуючий елемент ( $n$ ) та елемент жорсткості ( $\kappa$ ). Повітря виступає в якості демпфуючого елемента, створюючи опір рухові інерційної маси. Елемент жорсткості характеризується пружними властивостями пружного елемента.

Запропонована коливальна система є ефективною за визначених умов:

– рух ІМ в інерціальной системі відліку відбувається вздовж осі  $z-z$ , перпендикулярної площині встановлення ПГ;

– маса пружного елемента є незначною і набагато менша за ІМ;

– маса чутливого елемента, коефіцієнт пружності та демпфування є незмінними у часі;

– у межах можливих коливань, сила пружності пропорційна деформації пружного елемента;

– опора, ІМ та інші складові ПГ є недемпфованими.

Для одного чутливого елемента ДПГ рух інерційної маси із прискоренням  $g_z$  забезпечує сила, що пов'язана з ним згідно другому закону Ньютона:

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

де  $G$  – сила, яка діє на ІМ;  $m$  – величина ІМ.

На ІМ під час руху діють також інерційна сила від дії вертикального прискорення ЛА, сила опору руху та сила пружності ПЕ.

Сила пружності ПЕ, відповідно до закону Гука, дорівнює:

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

де  $F_{np}$  – сила пружності пружного елемента;  $\kappa$  – коефіцієнт пружності, що залежить від властивостей пружного елемента;  $z$  – зміщення інерційної миси ПГ відносно нульового положення.

Сила опору руху інерційної маси:

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

де  $F_{op}$  – сила опору руху інерційної маси;  $n$  – коефіцієнт опору (затухання).

З урахуванням (3), (4) і (5) отримаємо:

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

Кінцеве рівняння руху п'єзогравіметра із врахування інерційної сили  $F_i = m \frac{d^2 z}{dt^2}$  матиме вигляд:

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

Надалі, двома першими складовими, будемо нехтувати через інерційність конструкції ПГ.

Рівняння руху п'єзогравіметра в умовах вимірювання на Землі, буде  $g_z = -\frac{\kappa}{m} z$ . В умовах роботи ПГ на літаку складову  $m \frac{d^2 z}{dt^2}$  необхідно враховувати.

Аналогічно для другого ЧЕ ДППГ кінцеве рівняння руху матиме вигляд:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + n \frac{dz}{dt} + \kappa z = -mg_z. \quad (8)$$

Через інерційність конструкції п'єзогравіметра, двома першими складовими надалі будемо нехтувати, як і у першому випадку.

Рівняння руху для ЧЕ другого каналу ДППГ в умовах установки на Землі, виглядає:  $g_z = -\frac{\kappa}{m} z$ .

Для двоканального п'єзогравіметра в умовах розташування на Землі

$$g_z = -2 \frac{\kappa}{m} z.$$

В умовах розташування ДППГ на літальному апараті складову  $m \frac{d^2 z}{dt^2}$  треба враховувати.

Застосувавши до виразу (8) перетворення Лапласа отримаємо:

$$mp^2 z(p) + npz(p) + \kappa z(p) = -2mg_z(p), \quad (9)$$

де  $z(p)$  – зображення по Лапласу зміщення інерційної маси;  $g_z(p)$  – зображення по Лапласу ПСТ уздовж осі чутливості ДППГ.

Знаходимо передатну функцію  $W(p)$  ДППГ:

$$W(p) = \frac{z(p)}{g_z(p)} = \frac{-2m}{mp^2 + np + k}. \quad (10)$$

Враховуючи, що вихідна напруга ДПГ прямо пропорційна зміщенню ІМ та використовуючи вираз (10), запишемо передатну функцію ДПГ по каналу ПСТ, що є вихідною напругою:

$$W_{\text{ДПГ}}(p) = \frac{2K_{\text{ДПГ}}}{T_1 p^2 + T_2 p + 1}. \quad (11)$$

де  $W_{\text{ДПГ}}(p)$  – передатна функція ДПГ по каналу ПСТ–вихідна напруга;  
 $T_1$  і  $T_2$  – коефіцієнти, що визначають постійні часу об'єкта другого порядку;  
 $K_{\text{ДПГ}}$  – статичний коефіцієнт передачі ДПГ.

Якщо розділити рівняння руху ДПГ (8) на  $m$ , то отримаємо:

$$\ddot{z} + 2 \cdot \xi \omega_0 \dot{z} + \omega_0^2 z = -2g_z, \quad (12)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт демпфування;  $\omega_0$  – власна частота ДПГ.

Коефіцієнт демпфування ДПГ (п'єзоакселерометра) є нелінійною функцією, яка залежить від пружних та п'єзоелектричних властивостей ПЕ.

Перепишемо рівняння (12) у вигляді:

$$m\ddot{z} + \dot{z}[2n - L \sin(\omega t + \varepsilon)] + \omega_0^2 z = N \sin \omega t, \quad (13)$$

де  $L = mw_a$ ,  $N = mw_b$  – параметри вібрації;  $w_a$ ,  $w_b$  – амплітуди вібраційних прискорень.

Вважаємо, що  $M(t) = 2n - L \sin(\omega t + \varepsilon)$ , а  $D(t) = \omega_0^2$ , тоді

$$\ddot{z} + \dot{z}M(t) + D(t)z = 0, \quad (14)$$

де  $M(t)$  та  $D(t)$  – Т-періодичні функції.

Рівняння вигляду (14) без зміни характеристик показників можна звести до аналогічного, де  $M(t) = \text{const}$ .

Нехай

$$\int_0^t M(t_1) dt_1 = \Psi t + M_1(t), \quad (15)$$

$$\text{де } \Psi = 2n; \quad M(t_1) = \int_0^t (M(t_1) - \Psi) dt = \frac{L}{\omega} \cos(\omega t + \varepsilon).$$

Змінюючи

$$z = e^{-\frac{1}{2}M_1(t)} z' = e^{-\frac{1}{2} \frac{L}{\omega} \cos(\omega t + \varepsilon)} z', \quad (16)$$

дістанемо

$$\ddot{z}' + 2nz' + F(t)z' = 0, \quad (17)$$

в якому

$$F(t) = \omega_0^2 + v_0 \sin(\omega t + e + \sigma_8), \quad (18)$$

$$\text{де } \sigma_8 = \arctg \frac{\omega}{2n}; \quad v_0 = \frac{L\sqrt{\omega + 4n^2}}{2}.$$

Вираз (18) із урахуванням (13) і (17) можна записати у вигляді

$$\ddot{z}' + 2nz' + [\omega_0^2 + v_0 \sin(\omega t + e + \sigma_8)]z' = N \sin \omega t, \quad (19)$$

Або? з урахуванням параметрів:  $m = 0,01 \text{ кг}$ ,  $\varepsilon + \sigma_8 = 0$ :

$$\ddot{z}' + 2\xi\omega_0 \dot{z}' + (\omega_0^2 + v_1 w_b \sin \omega t)z' = 0,01 w_a \sin \omega t, \quad (20)$$

де  $v_1 = \frac{v_0}{w_b}$ .

Отже, отримано рівняння (20) типу Матьє-Хілла, яке є зручним для моделювання на ЕОМ.

Складовими прискорення та швидкості будемо у подальшому нехтувати, зважаючи на інерційність ДПГ.

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.

Проведено аналіз основних параметрів п'єзоелектричних матеріалів та обрано найоптимальніший із них для конструкції чутливого (ЧЕ) розробляемого ДПГ, а саме – ніобат літію.

Незважаючи на мале значення п'єзомодуля та відносної діелектричної проникливості у порівнянні із п'єзокерамікою, 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.

Проведено розрахунки основних електричних параметрів п'єзоелектричного гравіметра, для цього використані існуючі методики розрахунків п'єзоперетворювачів.

Результати вимірювань прискорення сили тяжіння, отримані за допомогою будь-якого гравіметра, містять великі похибки вимірювань. Ці похибки вимірювання викликані тим, що ЛПГ вимірює проекцію сукупності сигналів на вісь чутливості: корисного сигналу (ПСТ) та сигналу перешкоди за рахунок вертикального прискорення (воно у  $10^3$  перевищує корисний сигнал).

Тому була вирішена проблема фільтрації вихідного сигналу ЛПГ автоматизованої авіаційної гравіметричної системи.

Отримано аналітичні вирази спектральних щільностей корисного сигналу  $G_{\Delta g}(\omega)$  та вертикального прискорення ЛА  $G_z(\omega)$  та побудовано їх графіки (рис. 2).

Із рис. 2 видно, що при частотах понад 0,1 рад/с спектральна густина вертикального прискорення прямує до нескінченності; при частотах, менших за 0,1 рад/с, система літак-автопілот значно зменшує ефекти впливу вертикального прискорення. Тому необхідно забезпечити процес фільтрації вихідного сигналу ПГ із частотою 0,1 рад/с. Найпоширенішим методом конструктивної реалізації даного процесу у відомих гравіметрів є використання низькочастотних фільтрів із частотою зрізу 0,1 рад/с. Однак, у тих умовах, в яких передбачена експлуатація ДПГ, робота електронних компонентів фільтра стає нестабільною, цим змінюючи його частоту зрізу. У кінцевому результаті фільтр починає пропускати завади на вихід ДПГ або не пропускати частину корисного сигналу взагалі. Тому наявність фільтра низьких частот, як окремого блока у складі гравіметра, суттєво зменшує, у першу чергу, надійність приладу та точність.

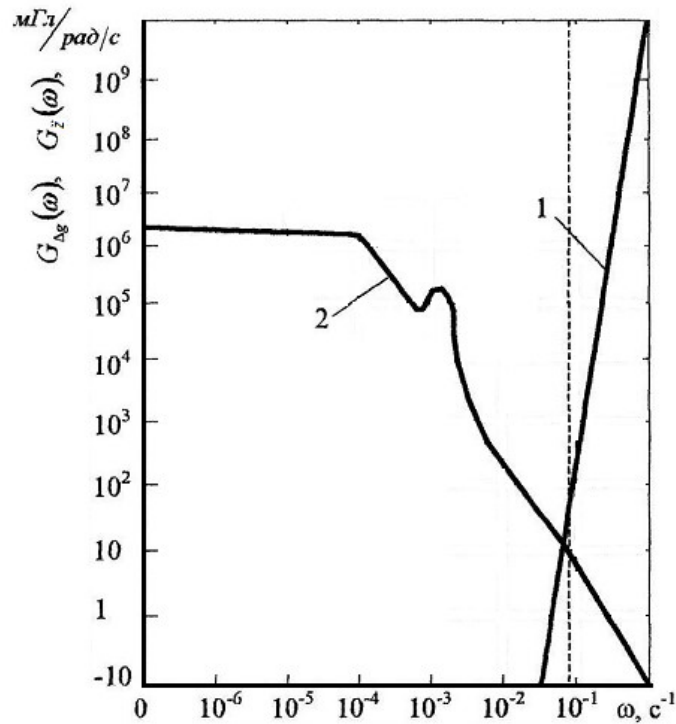


Рис. 2. Графік спектральної щільності корисного сигналу ПСТ (2) і вертикального прискорення ЛА (1)

Запропоновано спосіб фільтрації вихідного сигналу ДПГ за рахунок створення чутливого елемента нового гравіметра АГС у вигляді п'єзопакета, частота власних коливань якого дорівнює найбільшій частоті гравітаційних прискорень, що може бути виміряна на фоні перешкод – 0,1 рад/с.

Низькочастотна фільтрація з частотою зрізу 0,1 рад/с, дозволяє відокремлювати  $g$  від  $\ddot{z}$  забезпечуючи точність вимірювання ПСТ 0,5 мГал. У вихідному сигналі гравіметра при цьому також усуваються усі компоненти збурень, переважна частота яких більша за 0,1 рад/с. До таких збурень належать кутові віброприскорення, переважна частота яких понад 0,1 рад/с; поступальні віброприскорення, переважна частота яких 3 140 рад/с.

Встановлено, що частота власних коливань п'єзопакета буде зменшуватись при його значній товщині.

Іншим способом вирішення проблеми фільтрації впливу вертикального прискорення на вихідні покази ПГ є використання двоканального методу вимірювання.

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** розроблено блок-схему автоматизованої АГС із ДПГ для вимірювання аномалій ПСТ та схему стабілізації осі чутливості ДПГ. Проаналізовано методичні похибки автоматизованої АГС. Було визначено основні похибки нового ЖПГ та запропоновано шляхи їх зменшення.

Будь-який засіб вимірювальної техніки, у тому числі й ДПГ, прийнято розглядати як деякий перетворювач, що служить для перетворення вхідного сигналу у вихідний. У розділі 1 розглянуто конструкцію нового ДПГ, тому на її основі побудуємо структурну схему перетворення вхідного сигналу ПСТ у вихідну напругу ДПГ (рис. 3). Аналіз даної схеми необхідний для визначення коефіцієнта  $K_{ДПГ}$  передачі ДПГ.

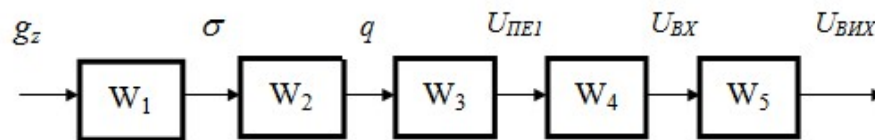


Рис. 3. Структурна схема прямого перетворення сигналу ДПГ

У схемі, зображеній на рис. 3, ланці  $W_1$  відповідає перетворенню ПСТ  $g_z$ , що діє на ПЕ, у механічне напруження  $\sigma$ . Це механічне напруження чисельно рівне силі  $G$ , яка припадає на одиницю площі поперечного перерізу ПЕ. Якщо напруження постійне на всій площі перерізу ПЕ  $S$ , то  $\sigma = G/S$ , а тому:

$$W_1 = \frac{\sigma}{G} = \frac{G}{S} \frac{1}{G} = \frac{1}{S}. \quad (42)$$

Ланка  $W_2$  відповідає перетворенню механічного напруження  $\sigma$  у заряд  $q$  на електродах п'єзоелемента (ПЕ):

$$W_2 = \frac{q}{\sigma} = \frac{d_y \sigma S}{\sigma} = d_y S, \quad (43)$$

де  $d_y$  – п'єзомодуль.

Ланка  $W_3$  відповідає перетворенню заряду  $q$  у напругу  $U_{пе}$  на електродах ПЕ. Передатна функція цієї ланки буде дорівнювати:

$$W_3 = \frac{U_{пе}}{q} = \frac{q}{q \cdot \left(1 + \frac{1}{j\omega R_{пе} C_{пе}}\right) C_{пе}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{j\omega R_{пе} C_{пе}}\right) C_{пе}}. \quad (44)$$

Однак, враховуючи велике значення  $R_{пе}$ , можна прийняти:

$$W_3 = \frac{1}{C_{пе}}. \quad (45)$$

Ланка структурної схеми  $W_4$  описує процес, який проходить при появі напруги на ПЕ (передача  $U_{пе}$  у коло  $U_{вх}$ ). Її передатна функція відповідає передатній функції видозміненої диференціюючої ланки. Тут  $R_{вх}$  – вхідний опір підсилювача напруги. Враховуючи великий опір ПЕ, вхідна частина підсилювача представлена лише опором  $R_{вх}$ .

Передатна функція  $W_4$  буде дорівнювати:

$$W_4(p) = \frac{U_{вх}}{U_{пе}} = \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{1 + \tau p}{1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p}. \quad (46)$$

Ланка  $W_5$  відповідає передатній характеристиці підсилювача напруги, яка поводить себе, як інерційна ланка першого порядку:

$$W_5(p) = \frac{K_{оп}}{1 + p \tau_{оп}}, \quad (47)$$

де  $K_{ПО}$  – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача;  $\tau_{ОП}$  – постійна часу.

Однак, враховуючи роботу перетворювача переважно у вузькому діапазоні частот, передатну характеристику можна прирівняти лише до коефіцієнта підсилення:

$$W_5 = K_{ОП} \cdot \quad (48)$$

Отже, передатна функція  $W_{np}(p)$  сигналу у ПЕ матиме вигляд:

$$W_{np}(p) = W_1 W_2 W_3(p) W_4(p) W_5 = d_y \cdot \frac{1}{C_{ПЕ}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{1 + \tau p}{1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p} \cdot K_{ОП} \cdot \quad (49)$$

Однак, ПЕ має схильність розряджатись, тому до схеми прямого перетворення сигналу необхідно додати контур від'ємного зворотного зв'язку. Структурна схема такого п'єзоперетворювача показана на рис. 4.

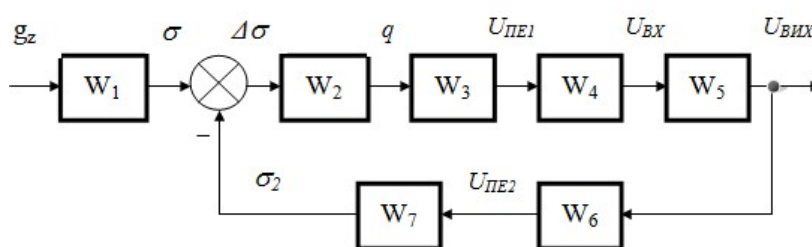


Рис. 4. Структурна схема ДПГ з електромеханічним зворотним зв'язком

Використавши рівняння для визначення допустимих похибок вимірювання параметрів руху літака компонентами АГС з ДПГ у якості гравіметра і проаналізувавши ці похибки, було зроблено наступні висновки:

1) чутливість АГС з ДПГ до похибки вимірювання швидкості максимальна для східного і західного курсів (відповідно  $22,6 \frac{\text{мГал}}{\text{м/с}}$  і  $-6,5 \frac{\text{мГал}}{\text{м/с}}$ ) при широті  $\varphi = 0^\circ$ , тобто на екваторі;

2) чутливість АГС з ДПГ до похибки вимірювання швидкості мінімальна при русі ЛА за північним і південним курсом і при  $\varphi = 90^\circ$  незалежно від курсу ( $8,05 \frac{\text{мГал}}{\text{м/с}}$ ).

Отже, для зменшення чутливості АГС з ДПГ до похибок вимірювання швидкості перевагу слід віддавати меридіональному розташуванню маршрутів вимірювання ПСТ.

Також було обчислено допустимі значення похибок визначення параметрів льоту 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 1 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 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 збуджуючих 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).

Проведено порівняння отриманих результатів цифрового моделювання із результатами аналітичних розрахунків (рис. 5).



Рис. 5. Порівняння отриманих результатів вихідного сигналу (зміщення ІМ) при поступальних збуреннях із частотою  $\omega = \omega_0$  цифрового моделювання із результатами аналітичних розрахунків

Аналіз графіків на рис. 5 показав, що середньоквадратичне відхилення розв’язків не перевищує 0,009 мм та підтвердив адекватність математичної моделі ДПГ, тобто, отримана математична модель ДПГ відповідає реальному приладу і її можна застосовувати для проведення подальших досліджень параметрів руху ДПГ.

Розглянуто можливості використання нейромережевого підходу у задачах розробки алгоритмів функціонування АГС із новим ДПГ. Встановлено, що функціонування комплексної системи авіаційної гравіметричної системи (АГС) з нейромережами, 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 удосконалено експериментальну установку для дослідження основних характеристик ДПГ та обґрунтовано можливість його застосування у складі АГС. Зроблено конструктивний та аналітичний опис кожної складової експериментальної установки.

Принципову схему якої наведена на рис. 6.



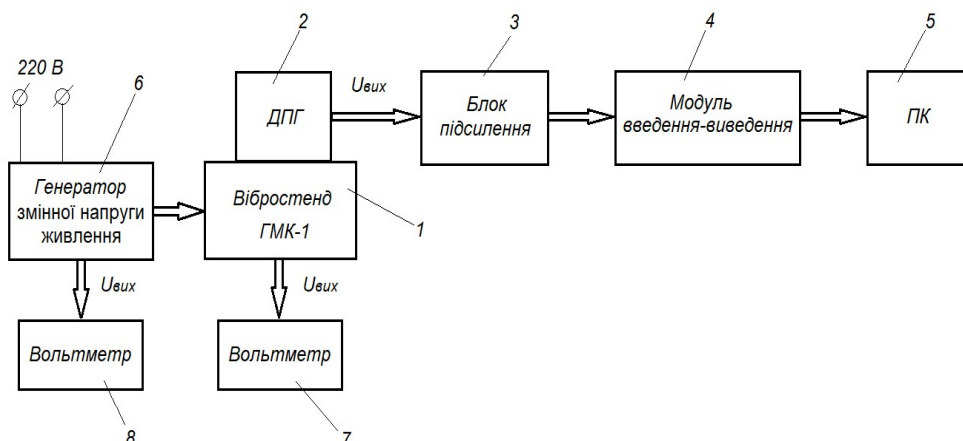


Рис. 6. Принципова схема установки для експериментальних досліджень ДПГ: 1 – ГМК-1; 2 – ДПГ; 3 – блок підсилення вихідного сигналу ДПГ; 4 – мікросистема збирання даних (модуль введення-виведення); 5 – ПК; 6 – генератор змінної напруги живлення; 7 – вольтметр для реєстрації напруги генератора; 8 – вольтметр для реєстрації напруги індукційного перетворювача

До складу цієї установки входять наступні прилади: генератор механічних коливань ГМК-1 (вібростенд) із вбудованими в нього двома індукційними перетворювачами електричного сигналу у механічний; мікросистема збирання даних (модуль введення-виведення); ДПГ, який розміщений безпосередньо на вібростенді; ПК; блок підсилення (БП) вихідного сигналу ДПГ; генератор змінної напруги та вольтметри для реєстрації напруги генератора та напруги індукційного перетворювача відповідно.

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.

Для експериментальних досліджень обрано двоканалний п'єзоакселерометр АНС 114-08, який має власну частоту  $\omega_0=0,1$  рад/с, яку забезпечено шляхом збільшення сумарного опору ( $\tau = 1/C_\Sigma R_\Sigma$ ).

1. Проведено дослідження залежності амплітуди вихідної напруги, яку знімаємо з ДПГ  $U_{ДПГ}$  від частоти  $\omega$  коливань вібростенда для амплітуди напруги з генератора  $U_{ген}=5, 7, 8$  В. По отриманим даним побудовано графіки залежностей  $U_{ДПГ}=\psi(\omega)$  та для  $U_{ген}=5, 7, 8$  В (рис. 8).

Із графіків на рис. 8 видно, що максимальна амплітуда вихідної напруги досліджуваного ДПГ має місце при значеннях частоти коливань вібростенда  $\omega = 0,1$  рад/с для  $U_{ген}=5$  В;  $U_{ген}=7$  В;  $U_{ген}=8$  В, що дорівнює частоті власних коливань досліджуваного ДПГ ( $\omega=\omega_0=0.1$  рад/с). Це випадок так званого “головного резонансу”. Цей висновок співпадає із висновками аналітичного дослідження та дослідження на ЕОМ.

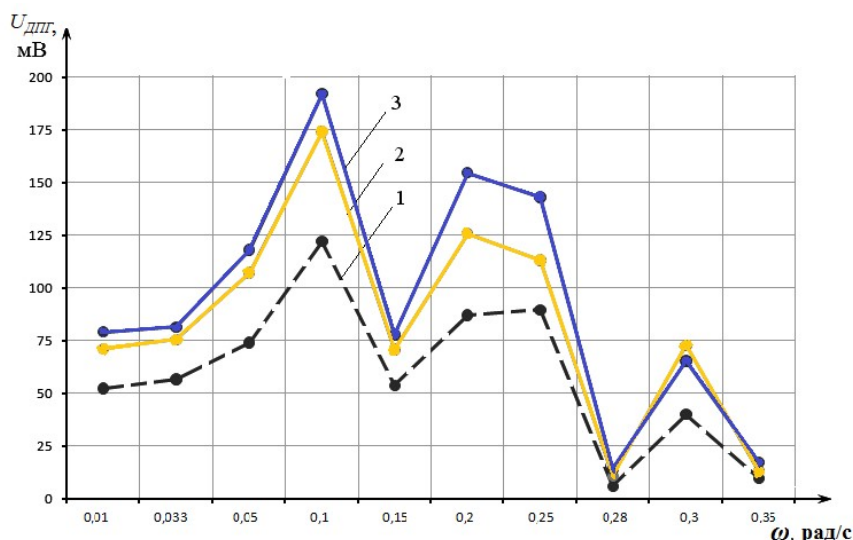


Рис. 8. Залежність вихідної напруги ДПГ від частоти коливань вібростенда при різних напругах збудження: 1 -  $U_{ДПГ} = \psi(\omega)$  при  $U_{ген} = 5$  В; 2 -  $U_{ДПГ} = \psi(\omega)$  при  $U_{ген} = 7$  В; 3 -  $U_{ДПГ} = \psi(\omega)$  при  $U_{ген} = 8$  В

2. Проведено дослідження залежності амплітуди вихідної напруги індукційного перетворювача (ІП)  $U_{ІП}$  від частоти  $\omega$  коливань вібростенда для амплітуди напруги з генератора  $U_{ген} = 5, 7, 8$  В. По отриманим експериментальним даним побудовано графіки залежностей  $U_{ІП} = \psi(\omega)$  для  $U_{ген} = 5, 7, 8$  В (рис. 9).

Із графіків на рис. 9 зроблено висновок, що  $U_{ІП}$  не залежить від частоти коливань вібростенда та прямо пропорційне  $U_{ген}$ . Також встановлено, що у зоні  $\omega \leq 0,033$  рад/с є невелике відхилення від лінійності характеристики, обумовлене технологічними похибками виготовлення вимірювального перетворювача.

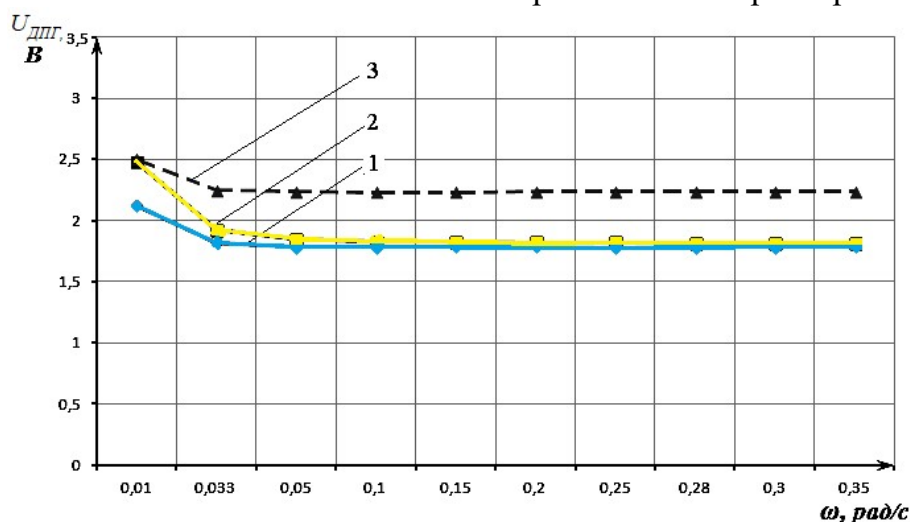


Рис. 9. Залежність амплітуди вихідної напруги ІП від частоти коливань вібростенда при різних напругах збудження: 1 -  $U_{ІП} = \psi(\omega)$  при  $U_{ген} = 5$  В; 2 -  $U_{ІП} = \psi(\omega)$  при  $U_{ген} = 7$  В; 3 -  $U_{ІП} = \psi(\omega)$  при  $U_{ген} = 8$  В

Побудовано градувальну характеристику ДПГ АГС та встановлено, що кут повороту вимірювальної осі ДПГ АГС відносно довідкової вертикалі впливає прямо пропорційно на його вихідні покази та величину його похибки.

Експериментально визначено похибку ДПГ у лабораторних умовах, яка становить 0,00006 мГал, що співпадає із результатами цифрового моделювання (розділ 4).

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Викладені у дисертації дослідження дозволили вирішити актуальну і складну науково-технічну задачу, що має важливе значення, – підвищити точність і швидкодію вимірювань прискорення сили тяжіння шляхом створення двоканального п'єзоелектричного гравіметра автоматизованої авіаційної гравіметричної системи. Здобуто такі нові результати:

1. Уперше розроблено та досліджено новий двоканальний п'єзоелектричний гравіметр автоматизованої АГС більшої точності (0,5 мГал) від відомих гравіметрів (2 – 10 мГал);

2. Розроблено схему нового двоканального п'єзоелектричного гравіметра АГС, що забезпечує підвищення точності вимірювання  $g$  у 2 рази та розроблено його математичну модель;

3. Обґрунтовано, що запропонована нова автоматизована АГС із двоканальним п'єзоелектричним гравіметром забезпечує вищу точність (у 2 рази) та швидкодію вимірювання  $\Delta g$ , аніж відомі системи та відрізняється від них тим, що у її корисному сигналі відсутнє значення основної завади – вертикального прискорення, залишкових інструментальних похибок та похибок від неідентичності каналів;

4. Ідентифіковано та досліджено основні похибки двоканального п'єзоелектричного гравіметра, для кожного виду похибок запропоновано заходи по їх зменшенню;

5. Уперше вирішено задачу фільтрації вихідного сигналу двоканального п'єзоелектричного гравіметра автоматизованої АГС шляхом встановлення частоти власних коливань гравіметра, рівної частоті перетину спектральних щільностей корисного сигналу прискорення сили тяжіння та сигналу основної завади вертикального прискорення ЛА;

6. Проведено цифрове моделювання на ЕОМ найбільш небезпечних резонансних режимів нового двоканального п'єзоелектричного гравіметра:  $\omega = \omega_0$ ,  $\omega = 2\omega_0$ ,  $\omega = 3\omega_0$ ,  $\omega = \omega_0/2$ ,  $\omega = \omega_0/3$ . Показано, що найбільш небезпечним є тільки випадок головного резонансу  $\omega = \omega_0$ . Однак, резонанс зникає зі збільшенням коефіцієнту демпфування;

7. Обґрунтовано доцільність використання нейронних мереж для зменшення інструментальних похибок нового ДПГ та інших складових автоматизованої АГС;

8. Розроблено нові алгоритм та методику досліджень  $g$  та  $\Delta g$  двоканальним п'єзоелектричним гравіметром автоматизованої АГС;

9. Удосконалено лабораторну установку та уперше проведено на ній експериментальні дослідження нового двоканального п'єзоелектричного гравіметра;

10. Підтверджено точність вимірювань двоканального п'єзоелектричного гравіметра 0,5 мГал збіжністю результатів аналітичних розрахунків, експериментальних досліджень та результатів моделювання на ЕОМ (у найбільш небезпечних, з точки зору можливості виникнення резонансу).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз*

1. Назаренко Н.М. Двоканальний п'єзоелектричний гравіметр / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Н.М. Назаренко // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, – 2020. – №3. – С. 124-127. (Фахове видання) DOI 10.31891/2307-5732.

*Здобувачем отримано математичну модель роботи нового двоканального п'єзоелектричного гравіметра та виведено основне робоче рівняння руху автоматизованої аерогравіметричної системи із двоканальним п'єзоелектричним гравіметром. Отримане рівняння руху двоканального п'єзоелектричного гравіметра перетворене у вигляд, зручний для подальшого моделювання на ЕОМ.*

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, включено до Google Scholar та ін.

2. Назаренко Н.М. Структурна схема перетворення сигналу прискорення сили тяжіння у п'єзоелементі / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Н.М. Назаренко // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, . – 2020. – №5. – С. 112-129. (Фахове видання). DOI 10.31891/2307-5732.

*Робота присвячена дослідженню ефективності роботи авіаційної гравіметричної системи, що значною мірою забезпечується вибором чутливого елемента системи - п'єзогравіметра, а саме перетворення та обробки сигналу прискорення сили тяжіння, що знімається з чутливого елемента п'єзогравіметра. Розроблено структурну схему прямого перетворення сигналу п'єзогравіметром для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння.*

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, включено до Google Scholar та ін.

3. Назаренко Н.М. Моделювання впливу параметрів збурень на роботу двоканального п'єзоелектричного гравіметра / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Н.М. Назаренко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2021. – No 1 (154). – С. 21-28. (Фахове видання) (Google Scholar, Index Copernicus, <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-154-1-21-28>)

*Досліджено вплив параметрів збурюючих прискорень та власних параметрів двоканального п'єзо-гравіметра на його роботу за допомогою ЕОМ. Отримано та подано результати моделювання на ЕОМ. Моделювався вплив параметрів зовнішніх збурень на роботу нового двоканального п'єзогравіметра.*

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, включено до Google Scholar та ін.

4. Назаренко Н.М. Спосіб визначення якості обробки поверхні каменю / Безвесільна О. М., Черепанська І.Ю., Сазонов А.Ю., Котляр С.С., Киричук Ю.В.// Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2021. – №1. – С. 83-85. (Фахове видання) (Google Scholar, Index Copernicus, РИНЦ, Polish Scholarly Bibliography).

*Запропоновано новий спосіб визначення якості обробки поверхні каменю з використанням шинної нейронної мережі та нового алгоритму обробки вимірвальних сигналів.*

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, включено до Google Scholar та ін.

5. Назаренко Н.М. Автоматизований двоканалний п'єзоелектричний гравіметр АГС / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Н.М. Назаренко, А.Г. Ткачук // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2021. – №2. – С. 17-22. (Фахове видання). DOI 10.31891/2307-5732.

*Стаття посвячена отриманню основного робочого рівняння руху двоканалного п'єзоелектричного гравіметра авіаційної гравіметричної системи. Описано принцип дії нового двоканалного п'єзогравіметра, зображено його структурну схему. Показано, що реальним є досягнення більшої точності п'єзогравіметра АГС (0,5 мГал) шляхом компенсації похибок від впливу вертикального прискорення (у  $10^3$  раз перевищує корисний сигнал) та інструментальних похибок та похибок від залишкової неідентичності двох каналів.*

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, включено до Google Scholar та ін.

*У періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та/або розвитку Європейського Союзу*

6. Назаренко Н.М. Способи закріплення п'єзоелемента у конструкції п'єзогравіметра / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Н.М. Назаренко // International periodic scientific journal «Modern engineering and innovative technologies» Heutiges Ingenieurwesen und innovative Technologien (ICV: 84.35) Germany. – 2020. – №13 Part 1. – P: 131-137. <http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit13-01-040>. DOI: 10.30890/2567-5273.2020-13-01-040

*Здобувачем розглянуто способи розміщення п'єзоелементів у конструкції п'єзогравіметра та зроблено їх порівняльну характеристику, визначено їх переваги та недоліки. Обрано спосіб розміщення п'єзоелементів – нецентрований та затиснений за допомогою гвинта.*

7. Назаренко Н.М. Градувальна характеристика двоканалного п'єзоелектричного гравіметра / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Н.М. Назаренко // International periodic scientific journal "Scientific World Journal", 1 May 2021, Svishtov, Bulgaria. – 2021 – № 8, Part 1. – P: 55-60. (У періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та/або розвитку Європейського Союзу). DOI: 10.30888/2410-6617.

*Побудовано градувальну характеристику двоканалного п'єзоелектричного гравіметра авіаційної гравіметричної системи та встановлено залежність куту повороту вимірювальної осі гравіметра відносно довідкової вертикалі.*

8. Назаренко Н.М. Вибір матеріалу автоматизованого двоканалного п'єзоелектричного гравіметра АГС/ О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Н.М. Назаренко // Slovak international scientific journal. Bratislava, Slovakia. –2021. – № 53, Vol. 1. – P:39-42. (У періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та/або розвитку Європейського Союзу). (Google Scholar, Index Copernicus, Global Impact Factor, Scientific Indexing Services, International Scientific Indexing, Open Academic Journals Index).

*Проведено аналіз основних видів п'єзоматеріалів (кварц, ніобат літію, турмалін, сегнетова сіль, сульфат літію, дигідрофосфат амонію, кераміка) для чутливого елемента нового п'єзогравіметра. Проведено аналіз існуючих вимірювальних пристроїв, принцип дії яких оснований на фізичному явищі прямого*

та зворотного п'єзо ефектів. Встановлено, що п'єзоакселерометри є одними із найпоширеніших датчиків для вимірювань вібрацій та прискорень.

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

9. Назаренко Н.М. Огляд наукових праць, присвячених п'єзоелектричним перетворювачам / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Н.М. Назаренко // The decision of the Organizing Committee of the conference "Global science and education in the modern realities '2020" № 1 Секція: Інноваційна техніка, технології і промисловість. (USA, Washington, August 27, 2020) – USA, 2020. – № 1. – С.41-45. <https://sworld.education/index.php/secciius3-1/32419-us03-101>.

*Здобувачем наведено інформацію про п'єзоелектричні перетворювачі для вимірювання різних фізичних величин. Особливу увагу приділено п'єзоелектричним акселерометрам. Проведено аналіз існуючих на сьогодні видів п'єзокерамічних матеріалів та описано їх фізичні властивості.*

10. Назаренко Н.М. Нейронні мережі у дослідженнях системи керування навігаційного комплексу / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Н.М. Назаренко // Abstracts of XX th International scientific and practical conference «PERSPECTIVE DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF SCIENCE AND PRACTICE» 8 – 9 June, 2020. Афіни. – Греція, 2020. – Р: 134-138. Available at: DOI:10.46299/ISG.2020.XX: URL: <http://isg-konf.com>.

*Здобувачем використано апарат нейронних мереж для підвищення точності систем керування та чутливих елементів.*

11. Датчик руху на ефекті Доплера / Н.М. Назаренко // Міжнародна наукова інтернет-конференція "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення". Збірник тез доповідей: випуск 48 (м. Тернопіль, 12 травня 2020 р.). – Тернопіль, 2020. – С. 139-142.

*Здобувачем розглядаються датчики руху на ефекті Доплера, оцінені їх похибки та сфери застосування.*

12. Назаренко Н.М. Кварцові герметизовані термоперетворювачі / Ю.В. Киричук, Н.М. Назаренко // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2020). Тринадцята міжнародна науково-практична конференція 19-20 травня 2020 р., Київ, Україна. – К.: НАУ, 2020. – С.122-125.

*Здобувачем для покращення точнісних характеристик ДПГ шляхом температурної компенсації розглядаються п'єзокварцові перетворювачі температури.*

13. Назаренко Н.М. Організація авіаційних гравіметричних вимірювань // II Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Інтеграція освіти, науки та бізнесу в сучасному середовищі: зимові диспути: тези доп. II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 4-5 лютого 2021р. – Дніпро, 2021. Т.2. – С. 153-154.

*Результатом дослідження є опис організації авіаційних гравіметричних вимірювань за допомогою АГС із новим двоканальним п'єзоелектричним гравіметром.*

14. Назаренко Н.М. Експериментальні дослідження характеристик // II Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Інтеграція освіти, науки та бізнесу в сучасному середовищі: зимові диспути: тези доп. II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 4-5 лютого 2021р. – Дніпро, 2021. Т.2. – С. 155-157.

*У результаті проведених експериментальних досліджень отримано залежності амплітуди вихідної напруги ДПГ та індукційного перетворювача від*



*частоти коливань вібростенда. Встановлено, що максимальна амплітуда вихідної напруги ДПГ має місце при значеннях частоти коливань вібростенду, що дорівнює частоті власних коливань ДПГ.*

15. Назаренко Н.М. Визначення допустимих похибок вимірювання швидкості авіаційної гравіметричної системи / Н.М. Назаренко, Ю.В. Киричук, О.М. Безвесільна // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2020). Чотирнадцята міжнародна науково-практична конференція 19-21 травня 2021 р., Київ, Україна. – К.: НАУ, 2021. – С. 92-94.

*В роботі обчислено допустимі значення похибок визначення швидкості польоту літального апарату для вимірювання прискорення сили тяжіння.*

16. Назаренко Н.М. Оцінка моделювання роботи стабілізатора із введенням датчика кутової швидкості у вертикальний канал / Н.М. Назаренко, Ю.В. Киричук, О.М. Безвесільна // Науково-практична міжнародна Конференція «Promising scientific researches of Eurasian scholars '2021» (17-18 травня), – Болгарія, 2021. – С. 137-140.

*Виконано моделювання роботи стабілізатора із введенням датчика кутової швидкості у вертикальний канал стабілізатора. Моделювання проводилося для випадку при русі по пересіченій місцевості, за аналогією з нормалізованою трасою, і відпрацьовування послідовності імпульсних впливів.*

## АНОТАЦІЯ

**Назаренко Н.М. Двоканальний п'єзоелектричний 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 авіаційний університет, Київ, 2021.

У дисертації досліджено новий двоканальний п'єзоелектричний гравіметр (ДПГ) автоматизованої авіаційної гравіметричної системи (АГС). Автором проведено аналіз літературних джерел у галузі сучасної авіаційної гравіметрії, визначено методи та засоби визначення прискорення сили тяжіння різними гравіметрами. Розроблено конструктивну схему нового ДПГ, розглянуто основні джерела похибок та запропоновано шляхи їх зменшення, 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 п'єзоелемента у конструкції ДПГ та зроблено їх порівняльну характеристику, визначено їх переваги та недоліки. 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.

Розроблено блок-схему автоматизованої АГС із ДПГ для вимірювання аномалій ПСТ та схему стабілізації осі чутливості ДПГ. Проаналізовано методичні похибки автоматизованої АГС. Було визначено основні похибки нового ДПГ та запропоновано шляхи їх зменшення. Визначено склад та структуру похибок ДПГ, розглянуто та розраховано основні із них.

Розглянуто можливості використання нейромережевого підходу у задачах розробки алгоритмів функціонування АГС із новим ДПГ. Проведено

експериментальні дослідження АГС із ДПГ за допомогою нейронних мереж. Було удосконалено експериментальну установку для дослідження основних характеристик ДПГ та обґрунтовано доцільність його застосування у складі АГС.

**Ключові слова:** гравіметр, п'єзоелемент, точність, авіаційна гравіметрична система, прискорення сили тяжіння.

### АННОТАЦИЯ

**Назаренко Н.Н. Двухканальный пьезоэлектрический гравиметр автоматизированной авиационной гравиметрической системы. - На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.01 - Приборы и методы измерений механических величин. - Национальный авиационный университет, Киев, 2021.

В диссертации исследован новый двоканальный пьезоэлектрический гравиметр автоматизированной авиационной гравиметрической системы (АГС). Автором проведен анализ литературных источников в области современной авиационной гравиметрии, определены методы и средства определения ускорения силы тяжести различными гравиметрами, разработана его конструктивная схема, рассмотрены основные источники погрешностей и предложены пути их уменьшения, разработана функциональная схема нового двоканального авиационного двухканального пьезоэлектрического гравиметра. Разработана математическая модель двухканального пьезоэлектрического гравиметра (ДПГ) и рассчитаны его основные конструктивные и электрические параметры. Рассмотрены способы размещения ПЭ в конструкции ДПГ и сравнительная характеристика, определены их преимущества и недостатки. Решена проблема фильтрации выходного сигнала ДПГ от высокочастотных помех за счет использования пьезоэлемента нового ДПГ как в качестве ЧЕ, так и фильтра низких частот.

Разработана блок-схема автоматизированной АГС с ДПГ для измерения аномалий ПСТ и схема стабилизации оси чувствительности ПГ. Проанализированы методические погрешности автоматизированной АГС с ДПГ. Были определены основные погрешности нового ДПГ и предложены пути их уменьшения. Определен состав и структура погрешностей ДПГ и рассчитаны основные из них.

Рассмотрены возможности использования нейросетевого подхода в задачах разработки алгоритмов функционирования АГС с новым ДПГ. Проведены экспериментальные исследования АГС с ДПГ с помощью нейронных сетей. Была усовершенствована экспериментальная установка для исследования основных характеристик ДПГ и обоснована возможность его применения в составе АГС.

**Ключевые слова:** гравиметр, пьезоэлемент, точность, авиационная гравиметрическая система, ускорение силы тяжести.

### ANNOTATION

**Nazarenko N.M. Dual-channel piezoelectric gravimeter of the automated aviation gravimetric system. – On the rights of a manuscript.**

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences by speciality 05.11.01 – Instruments and methods for measuring mechanical quantities. – National Aviation University, Kyiv, 2021.



In the thesis, a new piezoelectric gravimeter of the automated aviation gravimetric system (AGS) is explored. The author analysed literary sources in the field of modern aviation gravimetry, determined the methods and means for determining the gravity acceleration by various gravimeters, developed a constructive scheme.

The ideology of the development of a dual-channel piezoelectric gravimeter of the AGS is substantiated. The modern precision requirements for AGS gravimeters are determined. A new dual-channel piezoelectric gravimeter of the AGS, the features of which make it possible to overcome all the abovementioned disadvantages of the existing AGS gravimeters, are proposed.

An overview of scientific works on piezoelectric transducers is given and a functional diagram of a new dual-channel aviation piezoelectric gravimeter is developed. The mathematical model of a dual-channel piezoelectric gravimeter has been developed and its basic design and electrical parameters are calculated. Methods for placing PE in the structure of the dual-channel PG have been considered and their comparative characteristics are completed, their advantages and disadvantages are determined. The following way of placing the PE has been chosen – off-centre and attached by a screw. The analysis of the main types of piezoelectric materials (quartz, lithium niobate, tourmaline, Rochelle salt, lithium sulfate, ammonium dihydrogen phosphate, ceramics) for the SE of a new dual-channel PG has been carried out. Lithium niobate was chosen as the material for the SE of a new dual-channel PG. Lithium niobate has a high resistance to changes in external temperatures and pressures, a high coefficient of electromechanical coupling and stable piezoelectric properties, which is important directly for the dual-channel PG design.

The problem of filtering the output signal of a dual-channel PG from high-frequency interference was solved by using the piezoelectric element of a new dual-channel PG both as a SE and a low-frequency filter. Methods of the structural achievement of PG natural frequency of 0.1 rad/s were proposed. The optimal one has been chosen by increasing the input resistance of the operational amplifier.

The main characteristics of the dual-channel PG were determined. They are: the operating range of the GE, the operating frequency range, the temperature dependence of the piezoelectric parameters of the PE, and others.

Methodological errors of automated AGS were analysed. The main errors of a new PG have been identified and the ways to reduce them are proposed.

A mathematical model of an aviation gravimetric system for measuring GE anomalies has been developed, which differs from the known ones by additional corrections, the error from neglect of which is unacceptably large (3.67 mGal). The equations of motion were obtained, the block diagrams of all the main components of the AGS were determined: the systems of stabilization, navigation and determination of GE anomalies.

The block diagram of the GE signal transformation in the piezoelectric element of the new dual-channel PG was studied and described, and a method for input voltage compensation by introducing negative feedback based on the inverse piezoelectric effect was proposed. The transmission coefficient of PE made of lithium niobate was determined, and it is 1.682.

The permissible error of the dual-channel PG sensitivity axis stabilization to the vertical position of 1 arcmins for an accuracy of 0,5 mGal was calculated and ways of its reduction by using the methods of the high-precision setting of the dual-channel PG sensitivity axis are proposed.

The composition and structure of dual-channel PG errors were identified, and the main ones were studied and calculated. Instrumental measurement error did not exceed 0.1 mGal. Errors caused by noise of various origins, the method of attachment to the base and the offset of the zero point can be completely eliminated with the help of design features of a dual-channel PG.

With the help of a computer the influence of frequencies and amplitudes of perturbing vibrational accelerations for the most unfavourable resonant cases was studied:  $\omega = \omega_0$ ,  $\omega = 2\omega_0$ ,  $\omega = 3\omega_0$ ,  $2\omega = \omega_0$ ,  $3\omega = \omega_0$ , where  $\omega_0$  is the frequency of dual-channel PG natural oscillations,  $\omega$  is the perturbation frequency.

Digital simulation of the influence on the dual-channel PG perturbation parameters, as well as on its own parameters confirms the main advantage of dual-channel PG over known gravimeters – its higher accuracy (1 mGal).

Possibilities of using the neural network approach in problems of algorithms development of AGS functioning with a new dual-channel PG were considered. Experimental studies of AGS with dual-channel PG using neural networks are performed. An experimental facility to study the main characteristics of dual-channel PG is created and the expediency of its application as a part of AGS is substantiated.

**Key words:** gravimeter, piezoelectric element, accuracy, aviation gravimetric system, gravity acceleration.