

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

НАЛИВАЙЧУК Микола Васильович



УДК 004.04 (53.083)

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ОБРОБКИ  
ІНФОРМАЦІЇ В АДАПТИВНИХ СУПУТНИКОВИХ  
НАДПРОВІДНИХ ГРАВИМЕТРАХ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор  
**Яценко Віталій Олексійович**,  
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",  
професор кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем.

Офіційні опоненти: Заслужений метролог України, доктор технічних наук, професор  
**Квасніков Володимир Павлович**,  
Національний авіаційний університет,  
завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій;

кандидат технічних наук, доцент  
**Чичужко Марина Володимирівна**,  
Черкаський державний технологічний університет,  
доцент кафедри робототехніки та спеціалізованих комп'ютерних систем.

Захист відбудеться 29 квітня 2021 р. о 13-30 годині в ауд. 6.202 (6 корпус) на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.07 Національного авіаційного університету за адресою: 03680, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03680, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий 27 березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Толстікова О. В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На сьогодні дистанційний моніторинг є однією з технологій, що швидко розвиваються. У цю галузь вкладаються мільярди доларів і отримані дистанційним шляхом дані використовуються все ширше.

Розв'язання ряду важливих прикладних проблем значною мірою залежить від застосовуваних засобів вимірювання, обробки інформації та фізичних принципів, на яких вони побудовані. До таких проблем можна віднести ефективний моніторинг природних ресурсів на основі аналізу гравітаційних аномалій, вивчення глобальних геодинамічних процесів, аналіз еволюції гравітаційного поля Землі, аналіз рухів полюсів Землі та ін. Сучасний стан розробок в галузі гравітаційних вимірів не забезпечує повною мірою дослідження ряду важливих аспектів вказаних проблем через відсутність для таких вимірів приладів з необхідними параметрами. За допомогою результатів, які описуються у даному рефераті, автор намагається сприяти вирішенню проблеми створення високоточних систем збору та комп'ютерної обробки гравіметричної інформації.

У практиці гравіметричних вимірювань найбільше розповсюдження ще й досі мають "теплі" пружинні гравіметри, ("Асканія", Ла Косте-Ромберга та ін.), чутливість яких не перевищує  $10^{-6}$  g. Крім них розробляються гравіметричні системи на основі сучасних датчиків (ємнісних, п'єзо та інш.). Дослідження в цьому напрямку проводили такі науковці як Лозинська А.М., Безвесільна О.М., та інші.

Значне підвищення чутливості (до значень порядку  $10^{-10}$  g) пов'язане із створенням надпровідних приладів. Дослідження в напрямку створення систем на основі надпровідних сенсорів для вимірювання гравітаційних збурень проводили такі відомі вчені як Козоріз В. В., Яценко В. О., Goodkind J. M., Chu H.K., Pardalos P., та багато інших.

Такі прилади випускаються одиничними екземплярами і в реальних умовах не досягають своїх найкращих показників. Одна з причин полягає в тому, що більшість сучасних надпровідних гравіметрів використовує ефект діамагнітного відштовхування, при цьому надпровідна сфера розміщується між надпровідними струмовими котушками, а її зміщення реєструється за допомогою резонаторів або магнітометрів.

Виробництво таких приладів потребує високої технології виготовлення, оскільки сфера повинна мати найвищі класи точності та чистоти поверхні. В ході експлуатації відбуваються небажані захоплення магнітних потоків, накопичення статичних зарядів та інші явища, які негативно впливають на чутливість приладу. В цілому надпровідні гравіметри – це складні і громіздкі

конструкції, які розташовані, як правило, на масивній основі і мають складну систему комунікацій, що не дає можливості використовувати їх на рухомих об'єктах.

В Україні гравіметр, який зміг би задовільнити виставленим вимогам, розроблявся в Фізико-технічному інституті низьких температур НАНУ (м. Харків). Принцип його дії базується на діамантному підвісі надпровідної порожнинної сфери в полі надпровідних котушок. За його допомогою спостерігались зміни гравітаційного сигналу, які пов'язані з місячними приливами. Зараз подальший розвиток робіт у цьому напрямі призупинено за недостатністю фінансування.

В США також переважно використовується традиційний підхід, коли основним елементом приладу є надпровідна сфера, підвішена у магнітному полі пари надпровідних кілець з токовими ключами. Основна конструкція гравіметра не змінювалась з часу першого опублікування 30 років тому. Разом з тим, чутливість кращих зразків може досягати  $\sim 10^{-10}$  g.

Враховуючи викладене, *тема досліджень*, яка полягає в обґрунтуванні нового надпровідного чутливого елемента, побудові його математичної моделі, розробці алгоритмів та методів комп'ютерної обробки інформації для визначення величини гравітаційних збурень, що діють на пробне тіло - є *актуальною*.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась відповідно до планів науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України і Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» імені І. Сікорського у рамках держбюджетних тем: № 2908-ф «Теоретичні засади побудови інтелектуальних масштабованих комп'ютерних систем моніторингу критичних об'єктів» (державний реєстраційний номер 0116U004886); № 2907-ф «Методи оцінки та забезпечення необхідного рівня технічної безпеки роботи спеціалізованих багатопроекторних систем управління» (державний реєстраційний номер 0115U000323); № 2202-Ф «Методи організації моніторингових інформаційно-аналітичних систем науково-освітнього призначення на основі високопродуктивних обчислювальних кластерних технологій» (державний реєстраційний номер 0109U000526); № 2415 «Теоретичні основи аналізу верифікації, перевірки та тестування програмно-апаратних компонентів інформаційних технологій спеціального призначення» (державний реєстраційний номер 0100U000937), де автор брав участь як один із виконавців.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є теоретичне обґрунтування і розробка апаратно-програмних засобів обробки інформації для

побудови та реалізації адаптивних супутникових надпровідних гравіметрів з керованим чутливим елементом для систем вимірювання збурень гравітаційного поля.

Поставлена мета обумовила розв'язання наступних задач:

1. Аналітичний огляд відомих систем, оцінювання гравітаційних збурень;
2. Побудова нелінійної математичної моделі динаміки левітуючого надпровідного підвісу;
3. Побудова білінійної математичної моделі динаміки левітуючого надпровідного підвісу;
4. Дослідження стійкості пробного тіла надпровідного підвісу по частині змінних;
5. Створення методу для ідентифікації математичної моделі надпровідного пробного тіла;
6. Побудувати чисельні алгоритми оцінювання величини гравітаційного збурення, що впливає на пробне тіло;
7. Обґрунтувати технологію створення супутникового гравіметра на основі високотемпературних надпровідних наноплівки.

*Об'єктом дослідження* в дисертаційній роботі є сенсор на основі явища магнітної левітації для вимірювання гравітаційних збурень, що впливають на пробне тіло.

*Предметом дослідження* є нелінійні та білінійні моделі сенсора з керованим чутливим елементом.

*Методи дослідження:*

Аналіз науково-технічної літератури, патентних баз даних щодо принципів побудови обчислювально-вимірювальних систем гравіметричного призначення.

Математичне моделювання сенсора з керованим чутливим елементом та алгебраїчних методів оцінювання і фільтрації одержаної інформації.

**Наукова новизна одержаних результатів** обумовлена тим, що в дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу, яка полягає у створенні системи для оцінювання гравітаційних збурень, на основі надпровідного сенсора, що забезпечує підвищену чутливість.

При цьому отримано такі основні теоретичні та практичні результати:

1. Запропоновано новий підхід до створення керованих надпровідних чутливих елементів (ЧЕ) з використанням явища магнітної левітації, що дозволило створити ЧЕ зі стабілізованою рівновагою вільного левітуючого пробного тіла.
2. *Вперше* побудовано математичну модель ЧЕ, досліджено її системні властивості і отримані умови стійкості пробного тіла по частині змінних. Це

спрощує вирішення задачі визначення величини гравітаційних збурень, що діють на пробне тіло.

3. *Вперше* запропоновано підхід до оцінювання величини гравітаційних збурень, що діють на пробне тіло, на основі білінійного спостереження, що дало змогу вирішити задачу оцінки параметрів вихідного сигналу сенсора.
4. *Вперше* визначено умови, які викликають хаотичність динаміки левітуючого пробного тіла, що підтверджено чисельними обрахунками спектру показників Ляпунова та експериментальними дослідженнями. Це надало можливість окреслити зону стабільності динамічної системи.
5. Набув подальшого розвитку метод вирішення обернених динамічних задач з використанням нейромереж, для визначення величини гравітаційних збурень, що дозволило зменшити час обрахунку.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблені в дисертаційній роботі методи та моделі можуть бути використані при створенні супутникових вимірювально-обчислювальних систем гравіметричного призначення для дослідженні гравітаційних полів планет.

Комплексування матеріалів дистанційних гравітаційних досліджень з даними геолого-геофізичних досліджень підвищує вірогідність і ефективність результатів прогнозу покладів нафти і газу, таким чином скорочуючи фінансові витрати і терміни на виконання пошуково-розвідувальних робіт.

Результаті дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес на кафедрі системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем в КПІ ім. І. Сікорського та використовуються в навчальному курсі «Моделювання», що підтверджено відповідними актами про впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. У роботах зроблених у співавторстві, автору належать такі результати: у праці [1] - запропоновано метод оцінювання вектору стану; [2] – обґрунтовано методи обробки сигналів одержаних від чутливого елемента; [3] – запропоновано структурної схеми системи обробки сигналів одержаних від чутливого елемента; [4] - запропоновано математичну модель динаміки та стійкості керованого надпровідного підвісу; [5] - запропоновано ідею використання гравіметричних вимірів з допомогою надпровідного гравіметра при гіперспектральному дослідженню Землі; [7] - запропоновано метод нейромережевого оцінювання невідомого вхідного впливу за експериментально виміряними положенням та швидкістю пробного тіла; [8] - проведено дослідження рівняння руху і стійкості пробного тіла при наявності не одного, а двох нерухомих ідеально провідних струмових кілець; [10] - запропоновано методіку використання надпровідного гравіметра в складі вимірювально-обчислювальної системи на основі авіаційного

гіперспектрометра; [11] - Дисертантом запропоновано методику використання високотемпературних надпровідних матеріалів для побудови чутливого елемента надпровідного гравіметра.

**Апробація роботи.** Основні положення дисертації та її наукові результати доповідалися, обговорювалися і отримали позитивну оцінку на наступних конференціях: 4 Міжнародна наукової конференція «Нелінійний аналіз та застосування 2018» (04-06 квітня 2018 р., Київ); Одинадцята міжнародна наукової-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (22-23 травня 2018 р., Київ; IEEE CAOL\*2016 International Conference on Advanced Optoelectronics & Lasers. (12-15 September, 2016, Odessa, Ukraine.); 14-а Українська конференція з космічних досліджень. (8-12 вересня 2014 р. м. Ужгород); XIII International Conference on Geoinformatics Theoretical and Applied Aspects (12-15 May 2014 Kiev, Ukraine); Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки. (м. Київ, 2014 р.); IEEE CAOL\*2013 International Conference on Advanced Optoelectronics & Lasers. (09-13 September, 2013, Sudak, Ukraine.); 13-а українська конференція з космічних досліджень. (2-6 вересня 2013р. м. Євпаторія, Крим.); 19 міжнародна конференція з автоматичного управління. Автоматика 2012. (26 - 28 вересня 2012 р.); 2 Міжнародна наукова конференція «Нелінійний аналіз та застосування 2012» (04-06 квітня 2012 р., Київ).

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 12 наукових публікаціях, з яких 8 статей в наукових фахових журналах України; 1 наукова стаття у закордонному виданні, та 1 у виданні, що проіндексоване у базі даних «Scopus», 2 статті в нефахових журналах, 9 в публікаціях матеріалів науково-технічних конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів з висновками до кожного розділу та загальних висновків по роботі в цілому, списку використаних літературних джерел (111 найменувань), 3-ти додатків. Загальний обсяг роботи складає 120 сторінки, з яких основний зміст викладено на 103 сторінках. Робота містить 19 рисунки, 5 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність напряму дослідження в області адаптивних гравіметрів, визначено об'єкт та предмет дослідження, сформульовано мету дослідження та науково-технічні завдання, необхідні для її досягнення, показано зв'язок дослідження з науковими програмами та темами, наведено наукову новизну отриманих результатів, їх практичну цінність та

особистий внесок здобувача, надано інформацію про публікації та апробацію результатів роботи. Наведено відомості про впровадження.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасних методів та засобів побудови обчислювально-вимірювальних систем гравіметричного призначення.

Проведено порівняльний аналіз методів побудови таких систем, з використанням чутливих елементів на основі класичних підходів. Показано, що найвищу чутливість мають системи, в яких використано чутливий елемент на основі явища надпровідності. Розглянуто метод побудови такої системи з використанням надпровідного чутливого елемента, в якому в якості пробного тіла використано надпровідну сферу, і використовується явище діамагнітного відштовхування.

Описано основні недоліки і обмеження розглянутих систем, і показано складність їх використання в космічній галузі.

Запропоновано новий підхід до створення чутливого елемента, що базується на концепції, заснованій на трьох особливостях та їх поєднанні. По-перше, це новий тип надпровідного підвісу (НП) пробного тіла високочутливого гравіметра у вільному стані. Відомі надпровідні підвіси використовують концепцію левітації на основі ефекту Браунбека-Мейснера, коли стійке магнітне утримання без контакту з іншими тілами виникає завдяки ідеальному діамагнетизму надпровідників, який забезпечує виштовхування зі свого об'єму магнітного поля іншого магніту, наприклад, надпровідної котушки, живиться незатухаючим струмом.

Новий підхід використовує не діамагнетизм надпровідників, а нульовий опір надпровідника у вигляді тонкого замкнутого витка, наприклад, кільця. За певних умов, завдяки прояву феномена магнітної потенціальної ями (МПЯ) таке кільце може стійко зависати у вільному стані незважаючи на те, що його діамагнетизм практично не проявляється. Іншою її особливістю є лазерний метод вимірювання зміщень пробного тіла, тоді як у відомих надпровідних гравіметрів, як правило, з цією метою використовують датчики на основі ефекту Джозефсона (надпровідні квантові інтерферометричні датчики). Третя особливість полягає у використанні сучасних методів обробки сигналів для виділення дуже малого збурення на фоні значних за величиною шумів, що відповідає параметрам вимірюваного збурення. Вибір МПЯ як основи для левітації обумовлений двома чинниками. Перший з них – прагнення підвищити чутливість надпровідного гравіметра, другий – розширити його динамічний діапазон.

Для обробки сигналів кріогенно-оптичного гравіметра запропоновано використовувати декілька етапів обробки. Перший етап полягає в компенсації шумів, що впливають на основу приладу. Другий етап обробки орієнтований на



використання зворотної динамічної моделі датчика. Адаптивна цифрова фільтрація здійснюється на третьому етапі обробки.

В цілому новизна концепції полягає в поєднанні підвіски вільної чутливої маси, оптичної реєстраційної системи та нових засобів обробки сигналу. Такий підхід до побудови датчика на наш погляд здійснюється вперше.

Використання оптичної реєстрації переміщень левітуючої чутливої маси є також новим підходом в області надчутливих гравіметрів. Для вимірювання зміщень пробного тіла пропонується використати в якості системи реєстрації переміщень пробного тіла інтерферометр Майкельсона на основі лазерного діода і одномодового оптичного волокна.

В практичному випадку магнітної левітації ми повинні уявити один магніт зафіксованим, а другий – вільним, тобто таким, у якого шість степенів вільності. Очевидно, що строга постановка проблеми стійкості руху (наприклад, рівноваги як частного випадку руху) повинна розглядатись як динамічна система вільного тіла, коли проявляється ефект МПЯ по відношенню до деякої лінійної координати – степені вільності.

У **другому розділі** запропоновано математична модель керованого чутливого елемента, заснованого на явищі керованої магнітної левітації. Приводяться результати чисельного моделювання та досліджено явище хаотизації динаміки пробного тіла.

Однією з актуальних задач механіки вільного тіла в магнітному полі є завдання побудови та аналізу рівнянь динаміки вільного тіла в полі ідеально провідних струмових контурів. Це обумовлено можливістю застосування ефектів діаманітного відштовхування та мінімуму магнітної потенційної енергії, що дозволяють стабілізувати рівновагу вільного тіла. В [2] обґрунтовано ефект мінімуму магнітної енергії та стійкості рівноваги вільного ідеально провідного струмового кільця, співвісного в положенні рівноваги до нерухомого ідеально провідного струмового кільця.

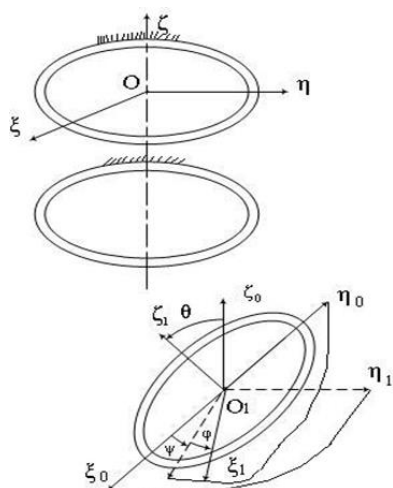


Рис. 1. Орієнтація вільного кільця відносно тригранника  $O\xi\eta\zeta$

Проведено дослідження рівняння руху і стійкості при наявності не одного, а двох нерухомих ідеально провідних струмових кілець, що являють собою консервативну потенційну систему. Ця система не вимагає спеціальних перетворень форми сигналів, що забезпечує її високу надійність. Для складання рівнянь динаміки використовується метод Лагранжа,

який розвинено, стосовно електромеханічних перетворювачів енергії. В якості кінетичної енергії виберемо енергію магнітного поля. Якщо механічними

координатами вільного ідеально провідного кільця є циліндричні координати його центру маси  $\rho, \alpha, \xi$  і кути Ейлера  $\varphi, \psi, \theta$ , які визначають орієнтацію кільця щодо тригранника  $O\xi\eta\zeta$  (рис. 1). Початок тригранника  $O\xi\eta\zeta$  розміщено в центрі верхнього нерухомого ідеально провідного кільця, а вісь  $O\zeta$  співпадає з спільною віссю двох нерухомих ідеально провідних кілець.

З метою вивчення властивостей робочого макету гравіметра були проведені експериментальні дослідження динамічних характеристик магнітного підвісу вільної пробної маси (спільно з групою Інституту фізики НАНУ), а також доопрацьовано чутливий елемент магнітного підвісу.

Система рівнянь для змінних стану  $y_1, K, y_6$ , функціонал  $z_1$  описують відображення  $y_1 \rightarrow z_1$  інтерферометра, що допускає лінійне представлення згідно [50]. Шляхом введення функції  $z = \alpha y_1 + \beta y_2$ , де  $\beta$  – константа, і прирівнюючи  $a_{1j} = 0, j = 2, \dots, 5$ , одержуємо білінійну систему:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a_2 + a_3 y_1 \end{bmatrix} u_1(t) + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ a_5 + a_4 y_1 \end{bmatrix} u_1^2(t) \begin{bmatrix} 0 \\ a_6 \end{bmatrix} u_3(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ a_7 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$z = \alpha y_1 + \beta y_2,$$

де  $a_1 = a_{11}, a_2 = a_{17}, a_3 = a_{18}, a_4 = a_{110}, a_5 = a_{19}, a_6 = a_{16}, a_7 = a_{111}$ . Нехай  $u_3(t) = 0, u_4(t) = 0$ . Отримаємо умови асимптотичної стійкості білінійної системи із лінійної системи вимірювання, умови існування якої приведені в [12, 103]. Шляхом лінеаризації системи (1) в околі точки  $y_1 = 0, y_2 = 0$  стійкої рівноваги пробного тіла при  $u_1(t) = 0$ , одержимо (3) і (4):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a_2 \end{bmatrix} u_1(t), \\ z &= [\alpha \beta] \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^T, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $z$  – вихідний сигнал лазерного інтерферометра,  $\alpha, \beta$  – коефіцієнти підсилення,  $x_1$  – стан системи,  $x_2$  – прискорення пробного тіла,  $t \in [0, T], u_1 = t$  – зворотній зв'язок.

Систему (2) запишемо в більш загальному вигляді:

$$\dot{x} = Ax + Bu_1(t), z = Cx \quad (3)$$

Визначимо керування відповідно до співвідношень:

$$u_1(t) = K(z), K(0) = 0, \quad (4)$$

яке забезпечує асимптотичну стійкість незбуреного руху  $x = 0$ .

Із керованості лінійної системи

$$\dot{x} = Ax + Bu_1(t), \quad (5)$$

впливає стабілізованість білінійної системи (1) лінійним керуванням  $u_1(t) = F$ .

Якщо  $\Theta(\lambda) = a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3$  – будь який ненормований многочлен, всі корені якого мають від’ємні дійсні частини. Знайдемо таку матрицю  $K$ , щоб корені характеристичного полінома матриці  $A + BKC$  співпадали з коренями полінома  $\Theta(\lambda)$ . В силу керованості системи (5) існує матриця

$F = \|f_j\|, (j = 1, 2)$  така, що  $A + BKC$  має заданий спектр. Отже, існування шуканої матриці  $K$  еквівалентне існуванню розв’язку рівняння

$$KC = F. \quad (6)$$

Введемо наступні позначення:  $C_1 = \alpha, C_2 = \beta, E_1 = [1 \ 0]^T, E_2 = [0 \ 1]$ .

Для існування матриці  $K$ , яка задовольняє рівнянню (6), необхідно і достатньо виконання умови

$$FQ = 0, Q = E_2 - E_1C_1^{-1}C_2 \quad (7)$$

в якій враховується (2),

$$Q = \begin{bmatrix} -\alpha^{-1}\beta \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Якщо елементи матриці (8) розглядати як координати вектора  $q$  в двомірному просторі, то умова (7) означає, що вектор  $s = \{f_j\}, j = 1, 2$ , повинен бути колінеарним вектору  $q = \{1, \alpha^{-1}\beta\}$ . Отже, при фіксованій орієнтації осі чутливості квантового інтерферометра рівняння (7) задовольняє одно параметричній множині матриць  $F$  вигляду

$$F = [f_1\alpha^{-1} \ \beta f]. \quad (9)$$

Щоб характеристичний поліном матриці  $A + BF$  співпадав з заданим поліномом  $\Theta(\lambda)$ , необхідно, щоб виконувалися умови  $f_1 = -(a_3 + a_1)a_2^{-1}, a_1 = 1, a_2 = -a_2\alpha^{-1}\beta f_1$ . Таким чином, при  $a_1 = 1, a_2 \neq 0, \alpha \neq 0$ , матриця  $K = FE_1C_1^{-1}$  зворотного зв’язку по виходу визначається виразом

$$K = [f_1\alpha^{-1}] \quad (10)$$

і керування  $u_1(t) = Kz = f_1\alpha^{-1}z$  забезпечує асимптотичну стійкість положення рівноваги (1) в деякій області  $H$  зміни  $x$ .

Показано, що ідеї та методи теорії керування можуть бути використані для стабілізації левітуючого пробного тіла.

**Третій розділ** присвячено розробці структури комп’ютерної системи обробки сигналів одержаних при вимірюванні положення левітуючого пробного тіла.

Структуру вимірювально-обчислювальної системи зручно представити схемою (рис. 2). Основні складові частини цієї системи: надпровідний підвіс, оптична система реєстрації інформації та процесорний обчислювальний блок. Детальний склад системи: 1 – криостат з вставкою, на якому змонтована оптична головка; 2 – оптичний кабель; 3 – фокусуючий об’єктив; 4 – головка з

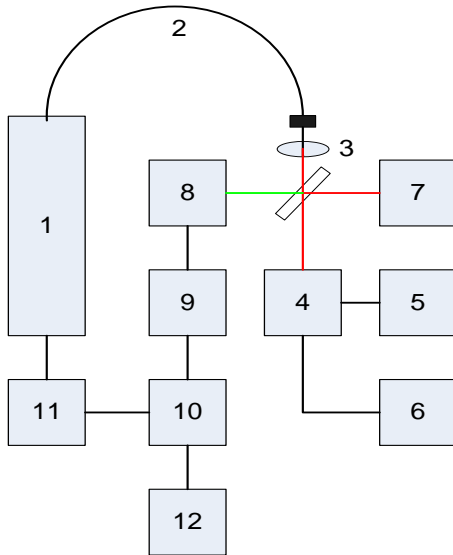


Рис. 2. Функціональна схема системи

лазерним діодом; 5 – блок живлення лазерного діода; 6 – блок стабілізації температури; 7 – інтерферометр Майкельсона; 8 – фотоприймач; 9 – синхронний детектор; 10 – мікроконтролер з вбудованим ЦАП і АЦП; 11 – модулятор; 12 – блок клавіатури та індикації.

Обробка інформації одержаної від надпровідного чутливого елемента виконується комп'ютерною системою, яка вирішує обернену задачу для оцінювання величини гравітаційних збурень, та керує стабілізацією положення чутливого елемента формуючи сигнал керування, на основі обчисленої величини похибки, що є результатом шумових збурень. Структура

процесу обробки сигналів приведена на (рис. 3).

Для вирішення задачі оцінювання величини гравітаційних збурень запропонований метод вирішення оберненої задачі відносно моделі чутливого елемента з використанням неймережі

Нехай динаміка пробного тіла описується рівнянням:

$$\dot{x}(t) = f_0(x, t) + \sum_{i=1}^m f_i(x, t) u_i(t) = f_0(x, t) + F(x, t)u(t), \quad (11)$$

де  $x(t) - l$  – мірний вектор стану;  $f_0(x, t) - l$  – мірний вектор, що нелінійно залежить від  $x$ ;  $u(t) = m$  – мірний вектор вхідних змінних;  $u_1(t)$  – керуючий вплив;  $u_5(t) = r(t) + s(t)$  – адитивна суміш корисного сигналу з шумом.

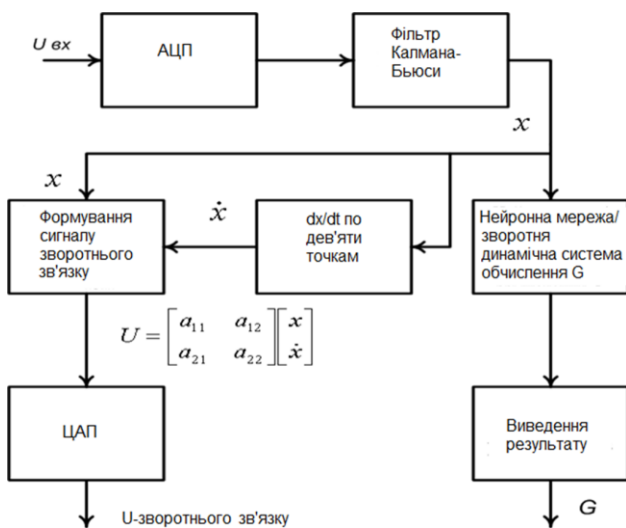


Рис. 3. Процес обробки інформації від чутливого елемента

В даній роботі потрібно визначити невідомий вектор вхідних впливів  $u(t)$ , дозволяючий виділити корисний сигнал  $r(t)$  за допомогою адаптивного фільтра.

Припустимо, що вимірювач вектора стану системи (1) описується співвідношенням

$$y(t) = h(x, t) + \omega(t) \quad (12)$$

де  $y(t)$  – двовимірний вектор спостереження, що включає компоненти положення і швидкості пробного тіла;  $h(x, t)$  – двовимірний

вектор, нелінійно залежний від  $x$ ;  $\omega(t)$  – двовимірний вектор шумів спостереження. Показано, що для оцінки невідомого вектора  $u(t)$  нам необхідно знайти оцінку похідних вектора стану  $\frac{d\hat{x}(t)}{dt}$ . Припустимо, що ця оцінка визначається чисельна, за допомогою полінома  $n$ -го ступеня.

$$\hat{x}_i(t) = \sum_{j=0}^n c_{ji} t^j, \quad i = 1, \dots, l. \quad (13)$$

Коефіцієнти полінома визначаються одним з існуючих методів. Оцінку похідної стану  $\hat{x}_i(t)$  отримуємо за допомогою виразу:

$$\frac{d\hat{x}_j(t)}{dt} = \sum_{j=0}^n c_{ji} t^{j-1}, \quad i = 1, \dots, l. \quad (14)$$

Підставляючи  $\hat{x}(t)$  і  $\frac{d\hat{x}_j(t)}{dt}$  в рівняння (12) отримуємо

$$\left[ \frac{d\hat{x}_j(t)}{dt} - f_0(\hat{x}, t) = F(\hat{x}, t)u(t) + v(t) \right]. \quad (15)$$

де  $v(t)$  – вектор шуму розмірності  $l$ , пов'язаний з невизначеністю точності оцінювання та адекватності моделі. Визначимо нову змінну  $z(t)$  за допомогою співвідношення:

$$z(t) = [d\hat{x}(t) - f_0(\hat{x}, t)] = F(\hat{x}, t)u(t) + v(t). \quad (16)$$

Введено припущення, що на вхід тришарової нейромережі подається сигнал  $z(t)$ . Встановлено, що в процесі тренування встановлюються вагові коефіцієнти, які мінімізують помилку між вхідними впливами і тими, що генеруються за допомогою моделі.

У кожному експерименті формується множина впливів  $u(k)$ , за якими обчислюється вектор  $y(k)$ . На перший шар нейронної мережі подається навчальна послідовність

$$\begin{aligned} n^T(k) &= [y_1(k) \dots y_l(k), y_1(k-1) \dots y_l(k-1), y_1(k-l) \dots y_l(k-l)] = \\ &= [n_1(k) n_2(k) \dots n_l(k)]. \end{aligned} \quad (17)$$

Встановлено, що вихід  $i$ -го нейрона другого прошарку в момент часу  $k$  визначається виразом

$$\gamma_i(k) = q \left[ \sum_{j=1}^l \alpha_{ij} n_j(k) \right], \quad i = \overline{1, N}. \quad (18)$$

де  $\alpha_{ij}$  – невідомі вагові коефіцієнти;  $N$  – число нейронів;  $q$  – нелінійність, обумовлена виразом  $q(x) = \frac{1}{[1 + \exp(-x)]}$ . Вихід  $i$ -го нейрона останнього шару дає наступну оцінку невідомого вектора  $\hat{u}(k)$ :

$$u_i(k) = \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \sigma_j(k), \quad i = 1, \dots, m. \quad (19)$$

де  $\beta_{ij}$  – невідомі ваги. Отримана оцінка використовується для наступної фільтрації сигналу.

Запропонована функціональна схема нейромережевого оцінювання величини гравітаційних збурень приведена на (рис. 4).

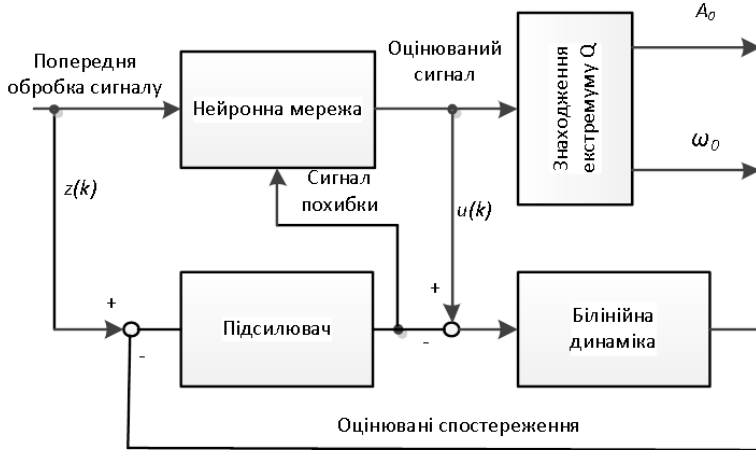


Рис. 4. Функціональна схема нейромережевого оцінювання величини гравітаційних збурень.

Показано можливість використання нейронної мережі для визначення невідомого вхідного впливу за експериментально вимірним положенням та швидкістю левітуючого пробного тіла. Побудовано нейромережний алгоритм оцінювання слабких

гравітаційних збурень. Запропоновані алгоритми

забезпечать більш стабільну роботу приладів на основі ефекту магнітної левітації.

У четвертому розділі приведені результати експериментальних досліджень та практичному використанню системи вимірювання гравітаційних збурень для проведення досліджень в космічній галузі та геології.

Приведено аналіз існуючих розробок перспективних гравіметрів та мікроелектромеханічних систем як перспективного напрямку розвитку супутникового приладобудування. Показано перспективність розробки наступних гравіметрів:

- (а) гравіметрів на основі явища надпровідності;
- (б) гравіметрів на основі масиву нанотрубок.

Сформульовано принципи створення перспективного супутникового гравіметра та розроблено пропозиції щодо їх реалізації.

Показано, що для реалізації конкурентоспроможного супутникового гравіметра необхідно розробити керований магнітний підвіс пробного тіла на основі високотемпературних наноплівки з використанням оберненого зв'язку та мікропроцесорного мікромодуля. При цьому необхідно врахувати вплив різних чинників на жорсткість підвісу, серед яких, зокрема – наявність додаткової феромагнітної маси на вільній пробній масі, вплив активного та пасивного фільтрів на точність вимірювань. Розроблено математичні моделі динаміки та стійкості керованого надпровідного підвісу. Побудовано чисельні алгоритми оцінювання величини прискорення левітуючого пробного тіла.

Важливими задачами в реалізації перспективних гравіметрів є обґрунтування та створення технології отримання високотемпературних надпровідних наноплівки. Отримані результати можуть бути використані при створенні малогабаритного макету адаптивного опто-кріогенного гравіметра на

основі високотемпературних надпровідних наноплівки та мікропроцесорного модуля.

В додатках наведено документи про впровадження результатів досліджень.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну задачу, яка полягає у покращенні стабілізації положення надпровідного пробного тіла шляхом використання кола зворотнього зв'язку. Це дає можливість суттєво підвищити чутливість вимірювання.

При цьому отримано такі основні теоретичні та практичні результати та запропоновано новий підхід до створення керованих ЧЕ гравіметра з використанням явища високотемпературної надпровідності, що дозволило створити моделі ЧЕ зі стабілізованою рівновагою вільного левітуючого пробного тіла.

1. Досліджено системні властивості ЧЕ і отримані умови стійкості пробного тіла по частині змінних в магнітному полі двох нерухомих кілець, що дає змогу спростити вирішення задачі оцінювання величини гравітаційних збурень, що діють на пробне тіло.

2. Розроблено математичну модель динаміки магнітно-взаємодіючих систем з керуванням. Вивчена магнітна взаємодія кілець, що ідеально проводять струм і показано, що дана сила призводить до появи білінійної динаміки макроскопічного тіла в керованій потенційній ямі.

3. Вирішено задачу оцінювання гранично малого зашумленого сигналу з невідомими параметрами спектральної щільності, діючого на макроскопічне пробне тіло у керованій потенціальній ямі. Розв'язана також задача ідентифікації білінійної динаміки математичної моделі чутливого елемента.

4. Розв'язана задача оцінювання параметрів вхідного сигналу сенсора на основі білінійного спостереження. Введено поняття правильності математичної моделі керованого спостереження на групі Лі та запропоновані умови їх перевірки. Отримані оцінки безпосередньо застосовні для оцінювання величини гравітаційного сигналу в керованих криогенних вимірювачах. Запропоновано методи вимірювання положення левітуючого пробного тіла.

5. Чисельне моделювання підтвердило інваріантність математичної моделі оцінювання до шуму з обмеженим зверху спектром і до стаціонарного шуму з невідомим параметром спектральної щільності, та до збурень імпульсного характеру і досліджена динаміка білінійної моделі вимірювання зі

зворотним зв'язком по виходу. Подальше підвищення чутливості може бути отримано оптимізацією моделі вимірювання.

6. Показано можливість використання нейронної мережі для визначення невідомого вхідного впливу за експериментально виміряними положенням та швидкістю левітуючого пробного тіла. Показано, що ідеї та методи теорії керування можуть бути використані для стабілізації левітуючого пробного тіла. Побудовано алгоритм нейромережевого оцінювання слабких гравітаційних збурень. Запропоновані алгоритми забезпечать більш стабільну роботу приладів на основі ефекту магнітної левітації.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у фахових виданнях:*

1. Наливайчук М. Моделювання та алгоритми обробки інформації супутникового адаптивного надпровідного гравіметра. /М. В. Наливайчук, О. В. Шолохов// Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. Науковий журнал Луцького Національного технічного Університету, Луцьк. – 2021.– №41.– С.5-10. - *Дисертантом запропоновано метод оцінювання вектору стану.*

2. Nalyvaychuk. M. V. Comparative analysis of optical gravimeters./M. V. Nalyvaychuk V. O. Yatsenko //CAOL\*2016 International Conference on Advanced Optoelectronics & Lasers, 12-15 September, 2016, Odessa, Ukraine. – P.145–149. – *Дисертантом запропоновано обґрунтування методів обробки сигналів одержаних від чутливого елемента.*

Видання включене до міжнародної науково-метричної бази: Scopus.

3. Яценко В.О. Апаратне, математичне та алгоритмічне забезпечення супутникового адаптивного надпровідного гравіметра // В.О. Яценко, Ф.Г. Гаращенко, В.М. Петрович, Н.М. Требіна, М.В. Наливайчук./ Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: Кібернетика, Київ. – 2016. – №1(16). – С.55–58. (ISSN 1728-3817) – *Дисертантом запропоновано обґрунтування структурної схеми системи обробки сигналів одержаних від чутливого елемента.*

4. Наливайчук М. В. Алгоритмічне та програмне забезпечення адаптивного надпровідного гравіметра. /М. В. Наливайчук, В. П. Тарасенко, С. М. Іванов, В. О. Яценко.// Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. Науковий журнал Луцького Національного технічного Університету, Луцьк. – 2015.– №19.– С.121-129. – *Дисертантом запропоновано математичну модель динаміки та стійкості керованого надпровідного підвісу.*



5. Применение гиперспектральных методов в геологии: состояние и перспективы / В.А. Яценко, Н.Д. Воронов, В.В. Гниденко, Н.В. Наливайчук // *Геоінформатика*. – 2014. – № 4. – С. 30-36. – Бібліогр.: 19 назв. – рос. – *Дисертантом запропоновано використання гравіметричних вимірів з допомогою надпровідного гравіметра при гіперспектральному дослідженню Землі.*

Журнал «Геоінформатика» зареєстровано у наступних провідних міжнародних базах даних: WorldCat, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, Research Bible, GeoRef database, РІНЦ, Index Copernicus.

6. Measuring Computing Hiperspectral Lydar system for detecting chemical and biological agents. /В. О. Яценко, В. В. Гніденко., М. В. Наливайчук., Н. І. Адамчук-Чала.// Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. Науковий журнал Луцького Національного технічного Університету, Луцьк. – 2013.– №12.– С.159–166.

7. Наливайчук М. В. Нейромережеве оцінювання слабких впливів на кероване левітуюче пробне тіло /Гніденко В. В., Наливайчук М. В., Яценко В. О.//Наукові праці Національного Університету харчових технологій, НУХТ, Київ. – 2013. – № 48.– С.44-48. – *Дисертантом запропоновано метод нейромережевого оцінювання невідомого входного впливу за експериментально вимірними положенням та швидкістю пробного тіла.*

8. Наливайчук М. В. Вимірювальна обчислювальна система для отримання оперативної інформації щодо гравітаційного поля. /М. В. Наливайчук, В. О. Яценко В. В. Гніденко.// Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. Науковий журнал Луцького Національного технічного Університету, Луцьк. – 2013.– №12.– С.167–173. – *Дисертантом проведено дослідження рівняння руху і стійкості пробного тіла при наявності не одного, а двох нерухомих ідеально провідних струмових кілець.*

9. Наливайчук М. В. Вимірювальна – обчислювальна система на базі авіаційного гіперспектрометра. /В. В. Гніденко, М. В. Наливайчук, В. О. Яценко.//Наукові праці Національного Університету харчових технологій, НУХТ, Київ. – 2013. – № 48. – С.17–22.

10. Nalyvaichuk. N. Measurement – Computers System based on Airborne Hiperspectrometer. /V. Yatsenko, M. Nalyvaichuk, V. Gnidenko. // Наукові записки НаУКМА. Комп'ютерні науки. Національний Університет “Києво - Могилянська академія”, Київ. – Том 138 – 2012 р.– С. 105–108. – *Дисертантом запропоновано методуку використання надпровідного гравіметра в складі вимірювальної-обчислювальної системи на основі авіаційного гіперспектрометра.*

11. Nalyvaychuk. N. Modeling and Optimization of Cryogenic – Optical Gravimeters./V. Yatsenko, N. Nalyvaychuk. // International Journal: Information theories & applications, Bulgaria, Sofia. – 2012 –Volume 19 Number 3. – PP. 232–240. – *Дисертантом запропоновано методуку використання високотемпературних надпровідних матеріалів для побудови чутливого елемента надпровідного гравіметра.*

Видання включене до міжнародних науково-метричних баз: Worldcat, ROAD Directory of Open Access scholarly Resources, Google Scholar, CiteseerX, і ITHEA.

12. Yatsenko V. O. Gryogenic - optical gravimeter: Principles, Methods, and Applscations /V. A. Yatsenko, M. V. Nalyvaychuk.//Вісник харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. №983 “Радіофізика та електроніка”, Харків. – 2011. – Випуск 19. – С. 107- 113. – *Дисертантом запропоновано конструктивну модель чутливого елемента надпровідного гравіметр.*

*Матеріали та тези конференцій:*

13. Yatsenko V. O. Hardware-software for the gravitational field measurement modeling, optimization and decision making./ M. V. Nalyvaichuk, M. S. Dehtiarov, V. O. Yatsenko// XXXIV International conferece Promlem of decision making under uncertainties (PDMU-2019), September 23-27, Ukraine, Lviv. – 2019. – P-75

14. Yatsenko V. Modeling and Optimization of Cryogenic – Optical Gravimeters: Principles, Methods, and Applscations. /V. Yatsenko, M. Nalyvaichuk, V. Gnidenko, O. Kochkodan. // Нелінійний аналіз та застосування 2018: Матеріали 4-ї Міжнародної наукової конференції (04-06 квітня 2018 р., Київ).– Київ: НТУУ «КПІ», 2018. – 114р. – Мова: англ. – С.80.

15. Наливайчук М. В. Апаратно програмний комплекс на основі лазерно-криогенного гравіметра для геофізичних досліджень. 16-а українська конференція з космічних досліджень. Матеріали конференції. 22-27 серпня 2016 р. м. Одеса, Україна. – С. 118

16. Яценко В. О. Адаптивный опто – криогенный гравиметр для поиска полезных ископаемых. / В.А. Яценко, А.В. Шолохов, Н.В. Наливайчук. //XIII th International Conference on Geoinformatics Theoretical and Applied Aspects – 12-15 May 2014, Україна, Київ – 2014 – С.28

17. Наливайчук Н. В. Апаратно-програмная реализация сверхпроводящего гравиметра для космических исследований. /Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки: Матеріали доповідей: (м. Київ, 2014 р.). – К. : Наукова думка, 2014. – 216 с. – С.168-169.

18. Yatsenko V. O. Opto-cryogenic sensitive element with ultrasensitive laser interferometer and microprocessor controller. /M. V. Nalyvaychuk, V. O. Yatsenko. // CAOL\*2013 International Conference on Advanced Optoelectronics & Lasers, 09-13 September – 2013, Ukraine, Krym, Sudak,. – 2013 – P.391-392.

19. Яценко В. А. Аппаратно программное обеспечение адаптивного опто - криогенного гравиметра на основе наноструктур. /Н. В. Наливайчук, В. А. Яценко. /13-а українська конференція з космічних досліджень. Матеріали конференції. 2-6 вересня 2013 р. Україна, Крим, Євпаторія. – 2013 – С. 139

20. Яценко В. О. Моделювання та Оптимізація Адаптивного супутникового гравиметра. /В. О. Яценко, М. В. Наливайчук. // Автоматика - 2012. 19 міжнародна конференція з автоматичного управління. 26-28 вересня 2012 року: матеріали конференції.К.– НУХТ, – 2012. – 487 с. – С.344.

21. Yatsenko V. Modeling of superconducting gravimetr for future space mission: control., and estimation. /V. Yatsenko, M. Nalyvaichuk, V. Gnidenko, O. Kochkodan.//Нелінійний аналіз та застосування 2012: Матеріали 2-ї Міжнародної наукової конференції (04-06 квітня 2012 р., Київ).– Київ: НТУУ «КПІ», 2012. – 114р. – Мова: англ. – С.110.

## АНОТАЦІЯ

**Наливайчук М. В. Методи та засоби комп'ютерної обробки інформації в адаптивних супутникових надпровідних гравиметрах. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Національний авіаційний університет, МОН України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню науково-практичної задачі, що полягає в створенні перспективних приладів для вимірювання гравітаційних збурень використовуючи нові підходи до побудови чутливого елемента, а саме використання явища магнітної левітації кільця, що перебуває в стані надпровідності.

В роботі обґрунтовані методи побудови таких приладів з перспективою використання на малих супутниках, придатних отримувати оперативну інформації щодо гравітаційного поля.

Розроблено математичні моделі динаміки та стійкості керованого надпровідного підвісу.

Побудовано чисельні алгоритми оцінювання величини гравітаційного збурення, що впливає на левітаційне пробне тіло.

Обґрунтовано технологію створення супутникового гравіметра на основі високотемпературних надпровідних наноплівки.

Запропоновано методику використання надпровідного гравіметра для дослідження та визначення покладів корисних копалин.

*Ключові слова:* гравіметр, кріогенно-оптичний сенсор, керування, моделювання, чутливий елемент, адаптивна фільтрація, нейронна мережа.

## АННОТАЦІЯ

**Наливайчук М. В. Методы и средства компьютерной обработки информации в адаптивных спутниковых сверхпроводящих гравиметры. - На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - компьютерные системы и компоненты. - Национальный авиационный университет, МОН Украины, Киев, 2021.

Диссертация посвящена решению научно-практической задачи, которая заключается в создании перспективных приборов, для измерения силы гравитационного возмущения используя новые подходы к построению чувствительного элемента, а именно использование явления магнитной левитации кольца, находящегося в состоянии сверхпроводимости.

В работе обоснованы методы построения таких приборов с перспективой использования на малых спутниках, пригодных получать оперативную информации о гравитационном поле.

Исследованы системные свойства чувствительного элемента и полученные условия устойчивости пробного тела по части переменных в магнитном поле двух неподвижных колец, что позволяет упростить решение задачу оценивания величины гравитационных возмущений, действующих на пробное тело.

Разработана математическая модель динамики магнитно-взаимодействующих систем с управлением. Построены численные алгоритмы оценки величины гравитационного возмущения, которое влияет на левитационное пробное тело. Изучена магнитное взаимодействие колец, идеально проводят ток и показано, что данная сила приводит к появлению билинейной динамики макроскопического тела в управляемой потенциальной яме.

Решена задача оценивания предельно малого зашумленного сигнала с неизвестными параметрами спектральной плотности, действующего на макроскопическое пробное тело в управляемой потенциальной яме. Решена также задача идентификации билинейной динамики математической модели чувствительного элемента.

Решена задача оценивания параметров входного сигнала сенсора на основе билинейной наблюдения. Полученные оценки непосредственно применимы для оценки величины гравитационного сигнала в управляемых криогенных гравиметрах. Предложены методы измерения положения левитирующего пробного тела.

Обоснована технология создания спутникового гравиметра на основе высокотемпературных сверхпроводящих нанопленок.

Предложена методика использования сверхпроводного гравиметра для исследования и определения залежей полезных ископаемых.

*Ключевые слова:* гравиметер, криогенные-оптический сенсор, управление, моделирование, чувствительный элемент, адаптивная фильтрация, нейронная сеть.

## ABSTRACT

**Nalyvaichuk M.V. Methods and means of computer information processing in adaptive satellite superconducting gravimeters.** – *On the rights of the manuscript.*

Thesis for a Candidate of Science Degree in Specialty 05.13.05 - Computer Systems and Components. - National Aviation University, MES of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of scientific and practical problem, which consists in creation of perspective devices for measurement of gravitational perturbations using new approaches to construction of a sensitive element, namely use of the phenomenon of magnetic levitation of a ring which is in a state of superconductivity.

The paper substantiates the methods of construction of such devices with the prospect of use on small satellites, suitable for obtaining operational information on the gravitational field.

Mathematical models of dynamics and stability of the controlled superconducting suspension are developed.

Numerical algorithms for estimating the magnitude of gravitational perturbation affecting the levitation test body are constructed.

The technology of creating a satellite gravimeter based on high-temperature superconducting nanofilms is substantiated.

A method of using a supernatural gravimeter for research and determination of mineral deposits is proposed.

*Key words:* gravimeter, cryogenic-optical sensor, control, simulation, sensing element, adaptive filtering, neural network.