

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. І. Сікорського”
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

На правах рукопису

Наливайчук Микола Васильович

УДК 004.04 (53.083)

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

Спеціальність 05.13.05 – “комп'ютерні системи та компоненти”

Дисертація на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають
посилання на відповідне джерело **М. В. Наливайчук**

Науковий керівник
Яценко Віталій Олексійович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Наливайчук М. В. Методи та засоби комп'ютерної обробки інформації в адаптивних супутникових надпровідних гравіметрах. – 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 збурень 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.

АННОТАЦИЯ

Наливайчук М. В. Методы и средства компьютерной обработки информации в адаптивных спутниковых сверхпроводящих гравиметрах. - 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 processing of information 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 solving a scientific and practical problem, which consists in creating promising devices for measuring acceleration using new approaches to the construction of a sensitive element, namely, the use of the phenomenon of magnetic levitation of a ring in a state of superconductivity.

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

Mathematical models of the dynamics and stability of a controlled superconducting suspension have been developed.

Numerical algorithms for estimating the magnitude of the gravitational disturbance, which affects the levitation test body, are constructed.

The technology of creating a satellite gravimeter based on high-temperature superconducting nanofilms has been substantiated. The technique of using a superconductive gravimeter for research and determination of mineral deposits is proposed.

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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.
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.
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)
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.
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. -
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.
8. Наливайчук М. В. Вимірювально 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.
 9. Наливайчук М. В. Вимірювально – 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
 - 11.Nalyvaichuk. N. Modeling and Optimization of Cryogenic – Optical Gravimeters./V. Yatsenko, N. Nalyvaichuk. // International Journal: Information theories & applications, Bulgaria, Sofia. – 2012 –Volume 19 Number 3. – PP. 232–
 - 12.Yatsenko V. O. Gryogenic - optical gravimeter: Principles, Methods, and Applscations /V. A. Yatsenko, M. V. Nalyvaichuk. // Вісник харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. №983 “Радіофізика та електроніка”, Харків. – 2011. – Випуск 19. – С. 107- 113.

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 Applications. /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. Nalyvaichuk, V. O. Yatsenko. // CAOL*2013 International Conference on Advanced Optoelectronics & Lasers, 09-13 September – 2013, Ukraine, Крим, Судак,. – 2013 – P.391-392.
19. Яценко В. А. Апаратно програмное 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 гравіметра. /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 gravimetry 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.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
АННОТАЦІЯ.....	3
ABSTRACT	5
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	6
ЗМІСТ	10
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	12
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРОБЛЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ГРАВІТАЦІЙНИХ ЗБУРЕНЬ	18
1.1. Гравіметричні системи на основі явища надпровідності	21
1.2. Система вимірювання гравітаційних збурень компанії GWR Instrument	21
1.3. Надпровідного чутливий елемент нового типу для вимірювання величини гравітаційних збурень	25
Висновки до розділу 1	27
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КЕРОВАНОГО НАДПРОВІДНОГО ЧУТЛИВОГО ГРАВІМЕТРА.....	28
2.1. Побудова математичної моделі надпровідного сенсора.....	28
2.2. Постановка задачі оцінювання гравітаційних збурень	28
2.3. Математична модель одновимірного чутливого елемента.....	29
2.4. Математична модель динаміки ідеально провідного кільця чутливого елемента.....	35
2.5. Керованість, досяжність і мінімальна реалізованість сенсора.....	41
2.6. Математична модель динаміки, стійкості та стабілізації чутливого елементу	43
2.7. Асимптотична стійкість надпровідного чутливого елемента.....	47
2.8. Ідентифікація динаміки математичної моделі пробного тіла.	50
2.9. Еліпсоїдальне оцінювання вектору стану.	53
Висновки до розділу 2	56

РОЗДІЛ 3	ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ОДЕРЖАНИХ ПРИ ВИМІРЮВАННЮ ПОЛОЖЕННЯ ПРОБНОГО ТІЛА	57
3.1.	Обґрунтування нових методів оптичних вимірювання координат та малих переміщень.....	57
3.2.	Блок схема оптичних вимірювань.....	58
3.3.	Нейромережеве оцінювання слабких впливів на левітуюче пробне тіло	63
	Висновки до розділу 3	67
РОЗДІЛ 4	КОНЦЕПЦІЯ НАДПРОВІДНОГО СУПУТНИКОВОГО ГРАВИМЕТРА, СТРУКТУРА ТА ЗАСТОСУВАННЯ.....	69
4.1.	Концепція криогенно-оптичного датчика.....	70
4.2.	Дослідження динаміки і стійкості чутливого елемента.....	73
4.3.	Функціональна структура вимірювально-обчислювальної системи.....	78
4.4.	Оптичні вимірювання на основі інтерферометра Майкельсона	81
4.5.	Система обробки сигналів	90
4.6.	Чисельний аналіз моделі	93
4.7.	Методика прогнозної оцінки нафтогазоносності території	95
4.8.	Гравіметричні виміру на основі надпровідного датчика нового типу	95
4.9.	Етапи робіт по прогнозній оцінці нафтогазоносності території.....	96
4.10.	Прогнозна оцінка нафтогазоносності території: SVM-метод.....	97
	Висновки до розділу 4	98
	ВИСНОВКИ.....	100
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	102
	ДОДАТКИ.....	114
ДОДАТОК А	- ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ 1	115
ДОДАТОК Б	- ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ 2	116
ДОДАТОК В	- Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	117

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АС	Автоматизована система
ЧЕ	Чутливий елемент
МПЯ	Магнітна потенціальна яма
НП	Надпровідний підвіс
АЦФ	Адаптивна цифрова фільтрація
RBF	Нейронна мережа з радіальними базисними функціями
ПТ	Пробне тіло
БМ	Білінійна модель

ВСТУП

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 діаманітному 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 багатопроцесорних 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 наноплівочок.

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 нейоромережевого оцінювання невідомого вхідного впливу за експериментально вимірними 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 методику 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.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРОБЛЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ГРАВІТАЦІЙНИХ ЗБУРЕНЬ

Гравіметричні прилади, призначені для вимірювання параметрів гравітаційних полів, використовуються для картографування полів Землі та інших планет (дослідження структури планет, пошук корисних копалин і т. Д.), Вирішення завдань навігації, сейсмології, астрофізики, фундаментальних фізичних задач (виявлення гравітаційних хвиль, підтвердження принципу еквівалентності, уточнення значення гравітаційної постійної і т. д.) і багатьох інших. Для вирішення цих завдань висуваються дедалі жорсткіші вимоги до приладів, тому дослідники приділяють величезну увагу вдосконаленню існуючих і створення нових оригінальних приладів.

Найбільш поширені в даний час наземні гравіметри («Шар», «Асканія», «Садінні», «Орден» [6], Ла Косте-Робера [32]) переважно побудовані за одним принципом: пружний елемент - механічна пружина, виготовлена з кварцу, металу або спеціальних сплавів; застосована оптична система індикації з мікрометричною системою реєстрації вимірювань. Залежно від модифікації гравіметри забезпечені пристроями тремо, барокомпенсації, системами вакуумування корпусу, термостатування і т. п.

Всі системи з кварцовим чутливим елементом мають похибки, пов'язані з реологічними явищами при циклічній зміні атмосферного тиску (пружна післядія, пружно-в'язкий гистерезис) [25], впливом температури на роботу безтермостатних гравіметрів [26] та ін., Що і обумовлює вкладати додаткові затрати.

Джерелом зниження точності при визначенні зміни напруженості гравітаційного поля служить і зміщення нуль-пункту гравіметра. Вивченню цього явища і можливості зменшення його негативного впливу на показання гравіметрів з кварцовою пружною системою чутливого елемента присвячений ряд робіт [23 24]. Зокрема, в роботі [8] запропоновано замінити матеріал пружної системи на монокристалічний сапфір з тим, щоб забезпечити стабільність нуль-пункту вище

10 ~ 3 мкГал/рік за рахунок сильного зменшення пружного післядії. Кращі з випускаються на-земних гравіметрів з кварцовою пружною системою досягають порогу чутливості 0.01 мГал.

Гравіметри, що встановлюються на борту супутника, по функціональному призначенню можуть бути віднесені до класу гравіметрії для аерогравіметричних зйомок.

Принципово завдання вимірювання сили тяжіння можна вирішити, знаючи зміна висоти, одержаної інерційним способом (за допомогою альтиметра, мікробарометра, радіофізичних супутникових засобів). Однак точність таких вимірювань нижче в порівнянні з гравіметричними вимірами.

Проведення аерогравіметричних вимірювань вимагає застосування швидкодіючої широкодіапазонної апаратури. Для цих цілей поки найбільш придатним вважається струнний гравіметр, принцип роботи якого заснований на зміні частоти поперечних коливань віброуючої струни, до нижнього кінця якої підвішена пробна маса. Такі гравіметри можуть бути створені із застосуванням спеціальних конструкторських прийомів, що захищають їх від впливу збуруючих прискорень [16].

Аналізуючи наведені в літературі дані, можна зробити висновок, що до теперішнього часу переважна більшість гравіметрії, що випускаються промисловістю, використовують властивості натягнутої струни або пружні властивості кварцових (або виготовлених зі спеціальних сплавів) пружин. Так чи інакше, але в будь-якої моделі гравіметра існує механічна зв'язок чутливого елемента з корпусом приладу, що позначається на чутливості і точності гравіметрів. Моделі таких гравіметрів постійно вдосконалюються, але є принципові фізичні обмеження. Тому реально досягнуті значення параметрів (чутливість наземних гравіметрів порядку 0.01 мГал, чутливість гравіметрів на рухомої підставці 1 мГал, дрейф нуля-пункту 0.1 мГал/доб) близькі до граничних.

Великим кроком стало впровадження в гравіметричне приладобудування явища надпровідності. Використання окремих криогенних ефектів (діамагнітне відштовхування, ідеальна провідність, квантування магнітного потоку) дозволяє:

- створити магнітні підвіси високої надійності і стабільності;
- застосувати високочутливі датчики знімання інформації на основі надпровідних квантових інтерферометричних датчиків (СКВІДів);
- значно підвищити геометричну стабільність елементів конструкції гравіметра;
- істотно знизити рівень теплових шумів;
- забезпечити ефективне отримання і зберігання глибокого вакууму;
- забезпечити високу ступінь екранування чутливого елемента від зовнішніх електромагнітних полів;
- стабілізувати температуру в робочому обсязі до 10^{-4} - 10^{-5} К.

Початок розробок криогенних гравіінерційних приладів з магнітним підвісом інерційної маси відноситься до 1960-х років. Як правило, в цих приладах надпровідний пробне тіло внаслідок ефекту Мейсснера [27] левітує в неоднорідному магнітному полі, створюваному струмом в короткозамкнених надпровідних котушках.

В якості перетворювача переміщень пробного тіла використовуються низькочастотний ємнісний диференційний міст [33] надпровідні магнітометри [4, 31, 34] або надпровідні резонатори [3, 7]. Межа чутливості криогенних гравіметрів лежить в інтервалі 10^{-9-10} g, а дрейф нуля-пункту становить 10^{-9-10} 10 g / сут.

З наведеного переліку надпровідних гравіметрів слід виділити гравіметр, розроблений в Фізико-технічному інституті низьких температур НАН України (м.Харків) [3]. На Україні це єдиний прилад, який можна порівняти за точнісними характеристиками з кращими закордонними аналогами.

Слід зазначити, що згадані криогенні гравіметри відносяться до приладів стаціонарного типу. Вони відрізняються високими масогабаритними показниками і низьким критичним полем надпровідників, з яких виготовляється пробне тіло, т. Е. Не можуть зберігати працездатність при перевантаженнях. Ці причини виключають будь-які спроби розмістити подібні прилади на борту космічного апарату.

1.1. Гравіметричні системи на основі явища надпровідності

Вимірювання величини гравіметричних збурень що діють на пробне тіло, можна ефективно проводити використовуючи явище надпровідності. Чутливий елемент, що базується на цьому явищі представляє надпровідну сферу, яка левітує в магнітному полі надпровідних котушок. Промислово випускаються такі гравіметричні системи, в основному зарубіжні компанії. Вони базуються на сенсорі, в якому в якості чутливого елемента використовують надпровідну сферу. В Україні такого типу гравіметр розроблявся в Фізико-технічному інституті низьких температур НАНУ (м. Харків), але із за браку фінансування роботи були призупинені. Такий же підхід використовує наприклад компанія GWR Instrument в своїх гравіметричних системах OSG.

1.2. Система вимірювання гравітаційних збурень компанії GWR Instrument

Компанія GWR Instrument, що розташована в San Diego, California (США) серійно випускає гравіметричну систему, що працює на явищі діаманітного відштовхування надпровідної сфери, в полі надпровідних короткозамкнених котушок (рис. 1.1.).



Рис. 1.1. Обсерваторний надпровідний гравіметр (OSG), блок керування і холодильна система

Сенсор для вимірювання сили гравітаційних збурень працює за наступним принципом. Зміна сили тяжіння або руху землі діє пробну масу, і цей рух виробляє сигнал похибки, що є вихідним сигналом (швидкість або прискорення). В якості пробного тіла служить надпровідна сфера, яка діамагнітно відштовхується від магнітного поля надпровідних котушок і знаходиться в стані левітації завдяки магнітній підвісці (рис. 2.).

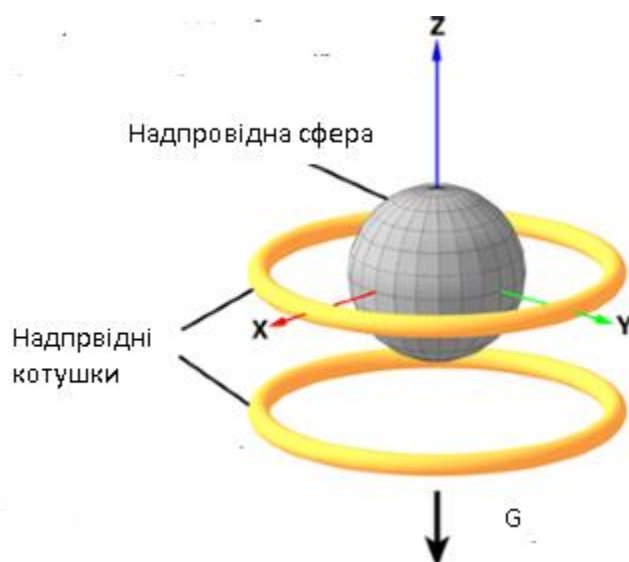


Рис. 1.2. Схематична модель чутливого елемента

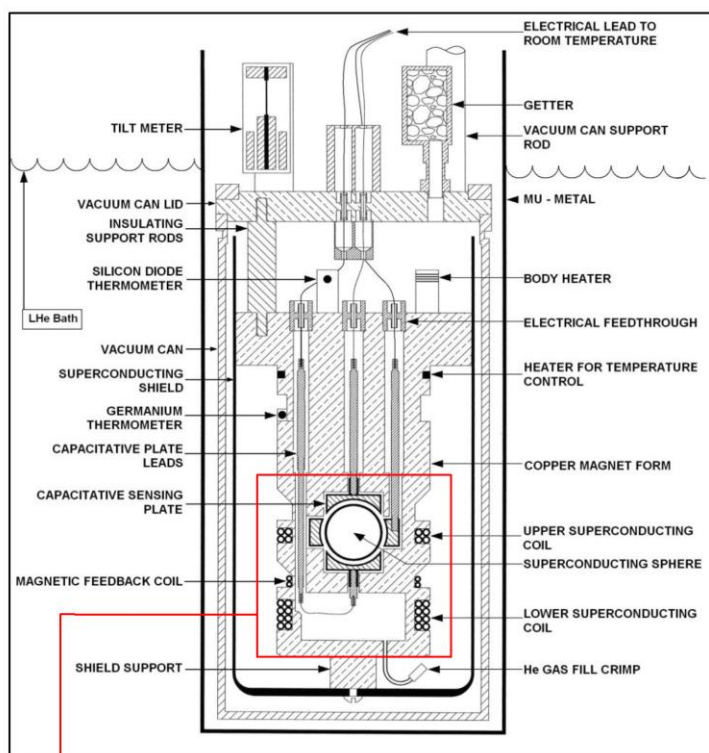


Рис. 1.3. Розріз блоку гравітаційного зондування

На (рис. 1.3.) зображена схема блоку гравітаційного зондування. Три основні надпровідні елементи - це левітуюча маса (сфера), котушки для генерації магнітного поля та магнітний екран. Датчик переміщення утворений величиною ємності, яка оточує сферу, і герметизовано парціальним тиском газу гелію в окремій порожнині всередині котушок.

Поле генерується двома коротко замкнутими котушками з ніобієвого проводу (надпровідністю нижче температури $9,2^{\circ}\text{K}$), які проводять, ідеально стабільні та стійкі надпровідні струми для забезпечення надзвичайно стабільного магнітного поля. Стійкість залежить від властивості надпровідників мати нульовий опір - після того, як струм "потрапляє в котушку", відсутня активна втрата струму на опір провідника. Пробна маса - це невелика сфера діаметром 2,54 см, також виготовлена з ніобію, вага якої становить близько 5 грам. Котушки розташовані по осі; одна трохи нижче центру кулі, а другий розміщена на 2,5 см нижче сфери. Коли струм протікає в котушках, то індукують ся струм і на поверхні кулі. Як і струм в котушках, індуковані струми на поверхні сфери абсолютно стабільні, відсутності будь-яких втрати на опір провідника.

Левітаційна сила створюється взаємодією між магнітним полем від котушок та струмами, індукованими на поверхні надпровідної сфери. Виникає ефект діамагнітного відштовхування, і сфера знаходить положення рівноваги.

На (рис. 1.4.) показано схему сфери, котушок, та ліній магнітного потоку, індукованих на поверхні надпровідної сфери.

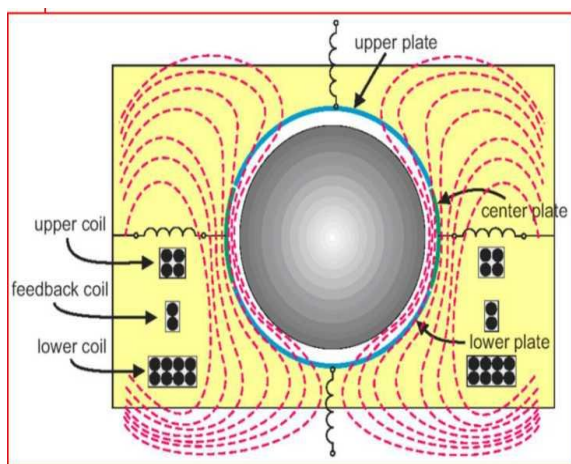


Рис. 1.4. Магнітні лінії, пластин та сфери Nb

Струм в котушках можна точно регулювати, щоб врівноважити силу тяжіння на сферу в центрі датчика. Співвідношення струмів у верхній та нижній котушках регулюється таким чином, щоб градієнт магнітної сили (постійна пружини) був слабким. Як результат - дуже мала зміна сили тяжіння (прискорення) дає велике зміщення пробної маси. Це дозволяє приладу досягти дуже високої чутливості.

Оскільки левітація є магнітна, зміни магнітного поля Землі серйозно погіршують її стійкість.

Надпровідний екран використовується для запобігання дії магнітного поля Землі проникненню в зону, де розміщений датчик.

- Для підтримки надпровідності сенсор SG працює в рідкому гелії при 4 градусах Кельвіна всередині високоефективного вакуумного сосуда Дьюара.

- OSG використовує холодильну систему 4° К, яка використовує лише 1,3 кВт для роботи. Холодник 4 ° К зріджує газ гелію в горловині Дьюара і повертає його в обсяг зберігання Дьюара.

- Dewar-Coldhead працює як "система із замкнутим циклом", яка може працювати необмежено довго без необхідності заправки. Поповнення рідкого гелію не потрібне! Нові досягнення iGrav™ Dewar дозволяють охолодитися від кімнатної температури за лічені дні!

- При криогенній температурі всі матеріали надзвичайно стабільні, і датчик може регулюватися температурою до декількох мікро-Кельвінів. Отже, повзучість матеріалу та чутливість до місцевих змін температури та вологості повністю усуваються.

Такого класу гравіметричні системи мають досить високу чутливість вимірювання, але вони дуже громіздкі, складні в виготовленні і не підходять для використання в космічній галузі. Тому пропонується інша концепція для створення системи гравіметричних вимірів з чутливістю вимірювання до 10^{-10} g.

1.3. Надпровідного чутливий елемент нового типу для вимірювання величини гавітаційних збурень

В даній роботі пропонується іноваційний підхід до розробки чутливого елемента і методу оцінки гравітаційного сигналу з допомогою апаратно-програмного забезпечення, яке здатне реалізувати метод при наявності шумів. Орієнтована точність вимірювання біля 10^{-10} g. Такий чутливий елемент та програмний продукт можуть бути використані для аналізу геодинамічних процесів, та, зокрема, в космічній галузі. Крім того, накопичення експериментальних даних, отриманих для різних умов експерименту, є важливим, для розвитку майбутніх методів.

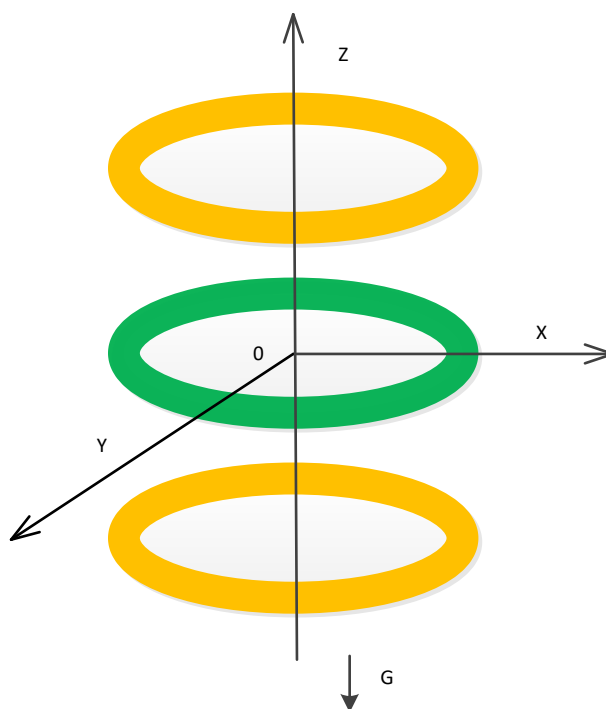


Рис. 1.5. Схематична модель новітнього сенсора

Схематично модель чутливого елемента показано на (рис. 1.5.) Основою супервисокої потенційної точності майбутнього гравіметра є ефект магнітної левітації пробного тіла у вигляді кільця в магнітній потенціальній ямі (МПЯ), [2-4], що має нульовий опір. В такій системі підвісу чутливої маси принципово не має тертя. На основі отриманих попередніх досліджень левітації в МПЯ – розвинені методи отримання математичних моделей динаміки вільного тіла в

магнітному полі короткозамкнутих надпровідних витків та їх аналізу на стійкість на основі теорем типу Ляпунова для різних варіантів геометрії надпровідних струмонесучих елементів. В результаті аналізу на стійкість, отримані області в просторі параметрів, які гарантують стійкість магнітної левітації та оптимізацію магнітних і геометричних параметрів на основі теорії, без використання вартісних та довготривалих експериментів [4]. Ці результати стали базою для розробки конструкції надпровідного гравіметра та обладнання для здійснення гравітаційного експерименту. Були проаналізовані спрощені динамічні моделі вільної маси, вивчені питання взаємного зв'язку коливань в напрямку різних лінійних та кутових координат вільної маси. Досліджені питання варіації режимів підвіски, близьких до критичних, коли можливе руйнування надпровідного стану критичними струмами. Проаналізовані можливості використання магнітолевітаційних ефектів високотемпературної надпровідності для гравіметра.

Найефективніше використання переваг систем з магнітною підвіскою, що мають практично необмежену чутливість, потребує відповідної системи реєстрації вимірів зміщення пробного тіла. У чутливому елементі, положення пробного тіла визначається за допомогою лазерного сенсора. Це дозволяє виключити можливі збурення положення пробного тіла електричними та магнітними полями, на відміну від звичайних сенсорів, що використовувалися у попередніх системах. Сучасні інтерферометричні методи та динамічні ефекти у лазерній генерації, викликані слабкими зовнішніми сигналами, використовуються для детектування надмалих переміщень пробного тіла. Були відібрані та реалізовані експериментальні схеми з лазерними детекторами зміщення, які забезпечують проведення вимірів зміщень пробного тіла та перетворення сигналу у цифрову форму для подальшої математичної обробки.

Основним результатом робіт, спрямованих на розробку оптичної системи вимірювань малих зміщень пробного тіла, є висновок про те, що для оптичного вимірювання координат пробного тіла необхідно застосувати інтерферометричний метод, який потенційно може забезпечити точність

вимірювання координат пробного тіла не гірше від 10 нм., що, за попередніми оцінками, є достатнім для досягнення необхідної чутливості датчика.

Висновки до розділу 1

1. Огляд літератури містить критичний аналіз наукових фахових видань та статей у напрямку створення апаратно-програмного забезпечення перспективного гравіметричного датчика. Проведено ретельне дослідження існуючих гравіметрів та проведено їх класифікацію за багатьма параметрами та ознаками. Також було порівняно різні архітектури гравіметричних датчиків.
2. В результаті проведеного огляду встановлено, що гравіметричний датчик на основі явища магнітної левітації є найбільш перспективним. Запропонований чутливий елемент ґрунтується на:
 - а) явищі магнітної левітації;
 - б) інтерферрометричному методі визначення механічних координат пробного тіла;
 - в) адаптивному визначенні збурення, діючого на левітуюче пробне тіло.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КЕРОВАНОГО НАДПРОВІДНОГО ЧУТЛИВОГО ГРАВИМЕТРА

2.1. Побудова математичної моделі надпровідного сенсора

Проблема оцінювання сигналу, що діє на макроскопічне пробне тіло, була предметом численних досліджень див. [16, 22]). Однак, випадок оцінювання гранично малого шуму сигналу з невідомими параметрами, діючого на пробне тіло у керованій потенційної ямі, досі детально не досліджувався Даний параграф певною мірою заповнює цей пробіл:

Пропонується більш точна математична модель асимптотично стійкого оцінювання гранично малого зашумленого сигналу на основі стохастичною моделі вимірювання, вперше запропонованої в [61].

2.2. Постановка задачі оцінювання гравітаційних збурень

Розглянемо схему вимірювача, представлену на рисунку 2.1. Припустимо, що виконані наступні припущення:

- 1) пробне тіло M непружне;
- 2) зміщення x пробного тіла M щодо положення рівноваги x мало в порівнянні з відстанню між кільцями 6 і 7;
- 3) сила магнітного взаємодії контурів 3 і 4 визначається співвідношення

$$F_M = I_3 I_4 \frac{L_{34}}{X^0}, \quad X_1^0 = X_{10} + X \quad (2.1)$$

- 4) контакт Джозефсона з достатньою точністю описується резистивною моделлю [74,79];
- 5) ефект квантування магнітного потоку в контурах не виявляється;
- 6) взаємні індуктивності L_{13}, L_{24} дорівнюють нулю;

- 7) швидкість переміщення контуру 4 мала в порівнянні зі швидкістю зміни електромагнітних процесів.

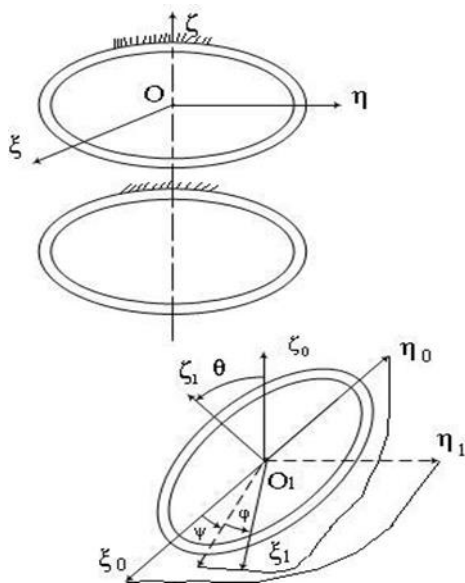


Рис. 2.1. Схематична модель вимірювача

Розглядається задача про побудову інваріантної до збурення математичної моделі асимптотична стійкого адаптивного оцінювання гравітаційного сигналу $r(t)$ за квантово-інтерферометричному спостереженню z_1 .

Рішення задачі складається з наступних етапів:

- 1) синтезу алгоритму керування u_1 , що забезпечує асимптотичну стійкість незбуреного руху $y_1 = 0, y_2 = 0$;
- 2) синтезу алгоритму адаптивної фільтрації;
- 3) чисельного аналізу математичної моделі оцінювання.

2.3. Математична модель одновимірного чутливого елемента

При допущеннях 1-7 побудова математичної моделі вимірювача зводиться до побудови рівняння динаміки одновимірного руху пробного тіла M і системи рівнянь, що описують електричну схему, приведену на Рис. 2.3.

Рівняння динаміки пробного тіла одержуємо з другого закону Ньютона

$$M_{x_1} + F_0 + F_M + F_C + F_{II} + G \quad (2.2)$$

Тут x_1 - відстань між кільцем 6 і центром мас M ; F_0 - магнітна сила в напрямку координати X_0 , діюча на вільне кільце 7; F_C - адитивна суміш гравітаційного сигналу, викликаного взаємодією тіла масою m з пробним тілом M , і нестационарного гравітаційного шуму; F_{Π} - сила, що викликає випадкові коливання платформи і, що носить імпульсний характер; G - вага пробного тіла.

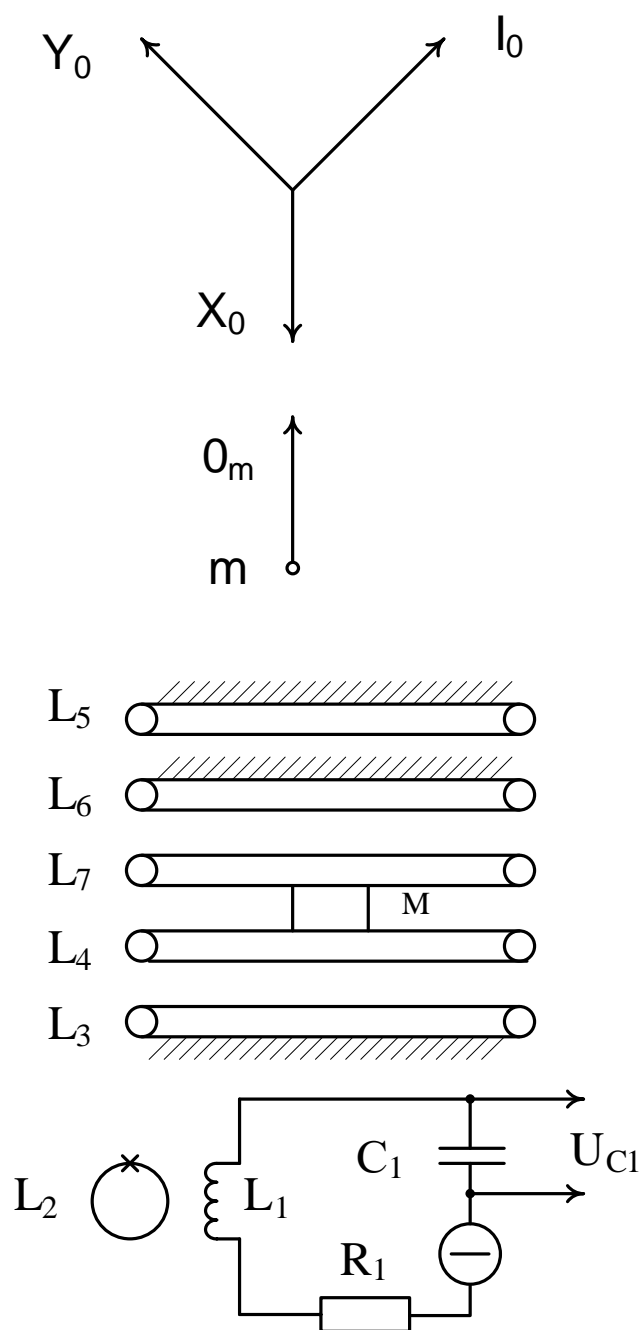


Рис. 2.2.

Вибираючи в якості незалежних змінних електричні струми I_5, I_6, I_7 , і механічну координату x , визначаємо силу F_0 з виразу

$$F_G = -\frac{\partial W}{\partial x_1} + \sum_{i=5}^7 I_i \frac{\partial \Psi}{\partial x_1} \quad (2.3)$$

де W - енергія магнітного поля; Ψ_i - магнітне потокозчеплення i -го контуру. Виражаючи W, I_6, I_7 через потокозчеплення Ψ_6 і Ψ_7 і нехтуючи величинами $L_{67}^2, L_{57}^2, L_{56} L_{57}, L_{56} L_{67}, L_{67} L_{57}$, одержуємо

$$F_0 = a_0 + a_1 x + a_2 I_5 + a_3 I_5 x + a_4 I_5^2 x + a_5 I_5^2 \quad (2.4)$$

Підставляючи в (2.1) вирази для L_{34} і струмів I_3, I_4 одержувані з системи рівнянь

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= L_{11} I_1 + L_{12} I_2 \\ \Psi_2 &= L_{12} I_1 + L_{11} I_2 + L_{23} I_3 \\ \Psi_3 &= L_{23} I_2 + L_{34} I_4 + L_{33} I_3 \\ \Psi_4 &= L_{34} I_3 + L_{11} I_4 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Отримуємо

$$F_M = p_1 x + p_2 I_2 + p_3 x I_2 + p_4 I_2^2 x + p_5 I_2^2, \quad (2.6)$$

Підставляючи вираз для сил

$$F_0, F_M,$$

$$M_{x_1} + F_0 + F_M + F_C + F_{\Pi} + G \quad (2.7)$$

отримуємо

$$\dot{x} = a_1 x + a_2 I_5 + a_3 I_5^2 x + a_5 I_5^2 + p_1 x + p_2 I_2 + p_3 x I_2 + p_4 I_2^2 * \\ * x + p_5 I_2^2 + F_C + F_{\Pi} \quad (2.8)$$

Використовуючи еквівалентну електричну схему, представлену на Рис. 2.3, і резистивну модель Стюарта-Маккамбера [79], отримуємо ще два рівняння другого порядку:

$$L_1 \frac{d^2 I_1}{dt^2} + L_{12} \frac{d^2 I_2}{dt^2} + \frac{1}{C} I_1 + \frac{dI_1}{dt} R_1 - E_0 \sin \omega t = 0 \\ L_1 \frac{d^2 I_2}{dt^2} B + \frac{1}{R_2 C_2} \left(L_{12} \frac{dI_1}{dt} + B \frac{dI_2}{dt} \right) + \\ + \frac{I_c}{C_2} \left[\sin \left(\frac{2\pi}{\Phi_0} x (A + L_{12} + B I_2) \right) \right] - \frac{I_f}{C_2} = - \frac{I_2}{C_2}, \quad (2.9)$$

де $A = L_{23} \frac{(\Psi_3 L_4 - L_{34} \Psi_4)}{L_3 L_4 - L_{34}^2}$; $B = L_2 - \frac{L_4 L_{23}^2}{L_3 L_4 - L_{34}^2}$; амплітудні значення надпрровідної компоненти струму через контакт Джозефсона; I_c - флуктуаційний струм; C і R ємність і активний опір контуру; ω - частота генератора накачування контуру 1.

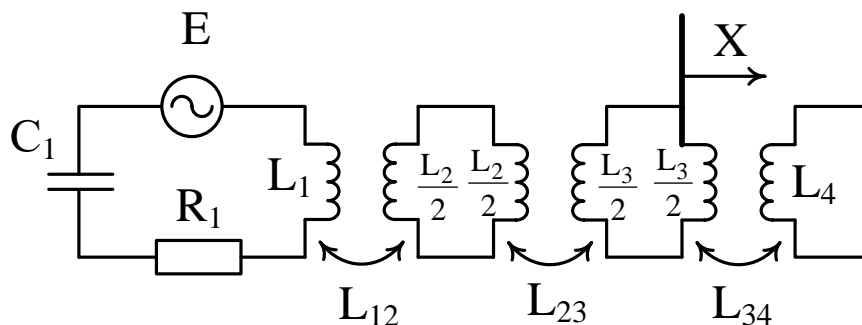


Рис. 2.3. Еквівалентна схема чутливого елемента

Позначаючи $y_1 = x$, $y_2 = \dot{x}$, $y_3 = I_2$, $y_4 = \dot{I}_2$, $y_5 = I_1$, $y_6 = \dot{I}_1$, $u_1 = I_5$,
отримуємо систему рівнянь

$$\dot{y} = f(y, u, a) = f_0(y, a) + \sum_{i=1}^6 f_i(y, a)u_i,$$

$$z_1 = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{C} \left(\int_0^t y_5(\tau) d\tau \right) dt \quad (2.10)$$

де f_1, f_2, \dots, f_6 - гладкі векторні поля класу; C^∞ ; $y \in Y$; $y = (y_1, \dots, y_6)$; вектор стану; Y -гладке різноманіття класу C^∞ , $y(0) = 0$; $u_1(t)$ - скалярне управління; $u_2(t) = u_1^2$; $u_3(t) = r(t) + s(t)$ - адитивна суміш сигналу і шуму гравітаційного характеру, що діють на пробне тіло; $u_4(t)$ - збурення, що представляє собою стаціонарний випадковий процес; $u_5(t)$ - δ корельований шум; $u_6(t) = A \sin \omega t$ - детермінована функція; $\{a_{ij}, i = 1, \dots, 3, j = 1, \dots, 11\}$ - матриця параметр системи; z_1 - одновимірний вихід моделі;

$$f_0(y) =$$

$$= \begin{bmatrix} y_2 \\ a_{11}y_1 + a_{12}y_5 + a_{13}y_5^2 + a_{14}y_5y_1 + a_{15}y_5^2y_1 \\ y_4 \\ a_{21}y_3 + a_{22}y_4 + a_{23}y_5 + a_{24}y_6 + a_{26} \sin(k_1 + k_2y_3 + k_3y_5) \\ y_6 \\ a_{31}y_5 + a_{32}y_6 + a_{33}y_3 + a_{34}y_4 + a_{36} \sin(k_1 + k_2y_3 + k_3y_5) \end{bmatrix}; \quad (2.11)$$

$$f_1(y) = \begin{bmatrix} 0 \\ a_{17} + a_{18}y_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad f_2(y) = \begin{bmatrix} 0 \\ a_{19} + a_{110}y_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (2.12)$$

$$f_3(y) = \begin{bmatrix} 0 \\ a_{16} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; z_1 = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{C} \left(\int_0^t y_5(\tau) d\tau \right) dt$$

$$f_4(y) = \begin{bmatrix} 0 \\ a_{11} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; f_5(y) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_{25} \\ 0 \\ a_{35} \end{bmatrix}; f_6(y) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ a_{26} \\ 0 \\ a_{37} \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

тут k_1, k_2, k_3, c, T - постійні параметри.

Рівняння $\left(\int_0^t y_5(\tau) d\tau \right) dt$ описує високочутливий керований вимірювач на основі деяких нелінійних ефектів: Джозефсона [79] та магнітної потенційної ями (МПЯ) [61-63]. Тому вивчення властивостей системи $z_1 = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{C} \left(\int_0^t y_5(\tau) d\tau \right) dt$ важливо як для побудови ефективних алгоритмів оцінювання, так і для вирішення завдань управління.

Система рівнянь для змінних стану y_1, \dots, y_6 функціонал z_1 описують відображення y_1, z_1 інтерферометра, що допускає лінійне представлення. Ввівши функцію $z = \alpha y_1 + \beta y_2$, де β - константа, і вважаючи $a_{1j} = 0, j = 2, \dots, 5$, отримуємо білінійну систему

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} &= \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a_2 + a_3 y_1 \end{bmatrix} u_1 + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ a_5 + a_4 y_1 \end{bmatrix} u_1^2 + \begin{bmatrix} 0 \\ a_6 \end{bmatrix} u_3 + \begin{bmatrix} 0 \\ a_7 \end{bmatrix} u_4, \\ z &= \alpha y_1 + \beta y_2. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Тут $a_1 = a_{11}$, $a_2 = a_{17}$, $a_3 = a_{18}$, $a_4 = a_{10}$, $a_5 = a_{19}$, $a_6 = a_{16}$, $a_7 = a_{111}$,

Нехай $u_3(t) = 0$, $u_4(t) = 0$.

Лінеаризуя БМ вимірювання в околиці точки $y_1 = 0$, $y_2 = 0$, стійкої рівноваги пробного тіла при $u_1(t) = 0$, отримуємо

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a_2 \end{bmatrix} u_1 \\ z &= [\alpha \quad \beta] [y_1 \quad y_2]^T \end{aligned} \quad (2.15)$$

Систему

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a_2 \end{bmatrix} u_1$$

запишемо у більш загальному вигляді:

$$\dot{x} = Ax + Bu_1, \quad z = Cx \quad (2.16)$$

2.4. Математична модель динаміки ідеально провідного кільця чутливого елемента

Однією з актуальних завдань створення чутливого елемента сенсора є завдання складання та аналізу рівнянь динаміки вільного тіла в полі ідеально проводять струмових контурів. Це обумовлено можливістю використання ефектів діамагнітного відштовхування [61,62] і мінімуму магнітної потенційної енергії [63], дозволяють стабілізувати рівновагу вільного левітуюче тіла. В [64] обґрунтовується ефект мінімуму магнітної енергії і стійкості рівноваги вільного ідеально провідного токового кільця в полі іншого. У цьому параграфі досліджується більш складний випадок: стійкість рівноваги вільного кільця в магнітному полі двох нерухомих (рис. 5.3). Для дослідження стійкості використовуємо метод побудови моделі, який розвинений в [144] стосовно до

електромеханічним системам. Припустимо, що тригранник $O\xi\eta\zeta$ поміщений в центрі верхнього нерухомого ідеально провідного кільця, а вісь $O\zeta$ збігається із загальною віссю двох нерухомих ідеально проводять кілець.

З урахуванням [144] складемо табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Координати	Швидкості	Сили	Зовнішні сили
Узагальнені			
q_i	\dot{q}_i	$-f_i$	Q_i
Механічні			
$\rho, \alpha, \zeta, \theta, \psi, \varphi$	$\dot{\rho}, \dot{\alpha}, \dot{\zeta}, \dot{\theta}, \dot{\psi}, \dot{\varphi}$	$p_i = -\frac{\partial W}{\partial q_i} + \sum_{v=1}^3 I_v \frac{\partial \Psi}{\partial q_i}$	G
Електричні			
\hat{x}_1	I_1	u_1	l_1
\hat{x}_2	I_2	u_2	l_2
\hat{x}_3	I_3	u_3	l_3

тут \hat{x}_v, I_v, u_v, l_v - відповідно електричний заряд, струм, напруга і величина, що наводиться ЕРС в v - му кільці: W - енергія магнітного поля: ψ_v - магнітне потокозчеплення v - кільці. Запишемо енергетичні функції в змінних табл.5.1.

Кінетична енергія

$$T = T_1 + T_2, \quad (2.17)$$

де T_1 - механічна і T_2 - магнітна частини кінетичної енергії. Кінетична енергія T_1 вільного тіла дорівнює сумі кінетичної енергії поступального руху будь якої точки тіла і кінетичної енергії обертального руху відносно цієї ж точки тіла, з урахуванням відомих формул [75] отримаємо

$$T_1 = \frac{1}{2}m(\dot{\rho}^2 + \rho^2\dot{\alpha}^2 + \dot{\zeta}^2) + \frac{1}{2}A(\dot{\psi}^2 \sin^2 \theta + \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}C(\dot{\varphi} + \dot{\psi} \cos \theta)^2 \quad (2.18)$$

де m - маса вільного тіла; $A = B$ и C - його головні центральні моменти інерції (C - щодо осі кільця).

Для магнітної частини кінетичної енергії [144] маємо

$$T_2 = \frac{1}{2}(L_1 I_1^2 + L_2 I_2^2 + L_3 I_3^2) + I_1 I_2 L_{12} + I_1 I_3 L_{13}(q_k) + I_2 I_3 L_{23}(q_k). \quad (2.19)$$

де L_1, L_2, L_3 - власні індуктивності кільця; L_{12}, L_{13}, L_{23} - взаємні індуктивності. Потенційна енергія при обраному координатному описі системи дорівнює нулю. Функцією Лагранжа для даної задачі буде

$$L = T. \quad (2.20)$$

Нехай G , де G - сила тяжіння. З рівняння Лагранжа

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right) \frac{\partial L}{\partial q_i} &= Q_1, \\ q_1 &= 1, \dots, 9, Q_i = 0, i \neq 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right) \frac{\partial L}{\partial q_i} &= Q_1, q_1 = 1, \dots, 9, \end{aligned} \quad (2.21)$$

визначимо вхідні в нього доданки для кожної з узагальнених координат.

Спочатку знайдемо член $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right)$:

$$\begin{aligned}
i = 1, q_1 &= \rho, \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\rho}} \right) &= \frac{d}{dt} (m\dot{\rho}) = m\ddot{\rho}, \\
i = 2, q_2 &= \alpha, \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) &= m \frac{d}{dt} (\rho^2 \alpha) = m(2\rho\dot{\rho}\dot{\alpha} + \rho^2 \ddot{\alpha}), \\
i = 3, q_3 &= \zeta, \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\zeta}} \right) &= m\ddot{\zeta}, \\
i = 4, q_4 &= \theta, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = A\ddot{\theta}, \\
i = 5, q_5 &= \psi, \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}} \right) &= + \frac{d}{dt} [A\dot{\psi} \sin^2 \theta + C(\dot{\phi} + \dot{\psi} \cos \theta) \cos \theta], \\
i = 6, q_6 &= \varphi, \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) &= \frac{d}{dt} [C(\dot{\phi} + \dot{\psi} \cos \theta)], \\
i = 7, q_7 &= x_1, \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{I}_1} \right) &= \frac{d}{dt} (I_1 L_1 + I_2 L_{12} + I_3 L_{13}) = \\
&= L_1 \frac{dI_1}{dt} + L_{12} \frac{dI_2}{dt} + L_{13} \frac{dI_3}{dt} + I_3 \frac{dL_{13}}{dt} = \frac{d\psi}{dt}, \\
i = 8, q_8 &= \hat{x}_2, \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{I}_2} \right) &= \frac{d}{dt} (I_2 L_2 + I_1 L_{12} + I_3 L_{23}) = \\
&L_2 \frac{dI_1}{dt} + L_{12} \frac{dI_1}{dt} + L_{23} \frac{dI_3}{dt} + \\
&I_3 \frac{dL_{23}}{dt} = \frac{d\psi_2}{dt}, \\
i = 9, q_9 &= \hat{x}_3, \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{I}_3} \right) &= \frac{d}{dt} (I_3 L_3 + I_1 L_{13} + I_2 L_{23}) = L_3 \frac{dI_3}{dt} + \\
&+ L_{13} \frac{dI_1}{dt} + L_{23} \frac{dI_2}{dt} + I_1 \frac{dL_{13}}{dt} + I_2 \frac{dL_{23}}{dt} = \frac{d\psi_3}{dt}.
\end{aligned} \tag{2.22}$$

Обчислимо похідну $\frac{\partial L}{\partial q_1}$:

$$\begin{aligned}
 q_1 &= \rho, \\
 \frac{\partial L}{\partial \rho} &= m\rho\dot{\alpha}^2 + I_1 I_3 \frac{\partial L_{13}}{\partial \rho} + I_2 I_3 \frac{\partial L_{23}}{\partial \rho}, \\
 q_2 &= \alpha, \\
 \frac{\partial L}{\partial \alpha} &= I_1 I_3 \frac{\partial L_{13}}{\partial \alpha} + I_2 I_3 \frac{\partial L_{23}}{\partial \alpha}, \\
 q_3 &= \zeta, \\
 \frac{\partial L}{\partial \zeta} &= I_1 I_3 \frac{\partial L_{13}}{\partial \zeta} + I_2 I_3 \frac{\partial L_{23}}{\partial \zeta}, \\
 q_4 &= \theta, \\
 \frac{\partial L}{\partial \theta} &= -C(\dot{\varphi} + \dot{\psi} \cos \theta)\dot{\psi} \sin \theta + \frac{\psi^2}{2} A \sin 2\theta, \\
 q_5 &= \psi, \\
 \frac{\partial L}{\partial \psi} &= I_1 I_3 \frac{\partial L_{13}}{\partial \psi} + I_2 I_3 \frac{\partial L_{23}}{\partial \psi}, \\
 q_6 &= \varphi, \\
 \frac{\partial L}{\partial \varphi} &= 0, \\
 q_7 &= \hat{x}_1, \\
 \frac{\partial L}{\partial \hat{x}_1} &= 0, \\
 q_8 &= \hat{x}_2, \\
 \frac{\partial L}{\partial \hat{x}_2} &= 0, \\
 q_9 &= \hat{x}_3, \\
 \frac{\partial L}{\partial \hat{x}_3} &= 0,
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

Підставивши дані вирази в рівняння Лагранжа

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right) \frac{\partial L}{\partial q_i} &= Q_1, \\ q_1 &= 1, \dots, 9, \\ Q_i &= 0, \\ i &\neq 0 \end{aligned} \tag{2.24}$$

отримуємо наступні рівняння руху:

$$\begin{aligned} m\ddot{\rho} - (m\rho\dot{\alpha}^2 + P_\rho) &= 0, \\ m(2m\rho\dot{\rho}\dot{\alpha} + \rho^2\ddot{\alpha}) - P_\alpha &= 0, \\ m\ddot{\zeta} &= \ddot{P}_{\zeta-G} - G, \\ A\ddot{\theta} &= -C(\dot{\varphi} + \dot{\psi} \cos \theta)\dot{\psi} \sin \theta + \frac{\dot{\psi}^2}{2} A \sin 2\theta + P_\theta, \\ \frac{d}{dt} [A\dot{\psi} \sin^2 \theta + C(\dot{\varphi} + \dot{\psi} \cos \theta) \cos \theta] - P_\psi &= \frac{\partial U}{\partial \psi}, \end{aligned} \tag{2.25}$$

Тут A, C - головні центральні моменти інерції, i - потенційна енергія магнітного поля, як функція механічних координат.

Отримані формули у вигляді рівнянь (2.22), співвідношення (2.21) і похідні взаємної індуктивності l_{13} є математичною моделлю вільного кільця в магнітному полі двох нерухомих кілець поблизу положення співвісності.

Таблиця 2.2

Координати	Швидкості	Сили	Зовнішні сили
Узагальнені			
q_k	\dot{q}_k	$-f_k$	Q_k
Механічні			
$\rho, \alpha, \zeta, \theta, \psi, \varphi$	$\dot{\rho}, \dot{\alpha}, \dot{\zeta}, \dot{\theta}, \dot{\psi}, \dot{\varphi}$	$P_i = \frac{\partial U}{\partial q_i}$ $i = 1, 2, 3$	0
Електричні			
ψ_1	u_1	I_1	0
ψ_2	u_2	I_2	
ψ_3	u_3	I_3	

2.5. Керованість, досяжність і мінімальна реалізованість сенсора.

Показується можливість побудови спрощеної моделі виміру на основі використання деяких диференціально-геометричних конструкцій.

Розглянемо задачу вимірювання механічної координати x_1

$$\ddot{y}_6 = a_{32} \dot{y}_6 + a_{31} y_6 + a_{36} \sin(k_4 + k_5 y_4 + k_6 y_6) \quad (2.26)$$

допускає представлення

$$\ddot{x}_1 + \partial F(x_1) \dot{x}_1 + x_1 = 0, \quad x_2 + F(x_2) = 0. \quad (2.27)$$

Рівняння (2.26) з гамільтоніаном

$$H = p_1(a_{32}x_1 - x_2) - p_2(a_{31}x_1 + a_{36} \sin(k_4 + k_5 y_4 + k_6 x_1)) \quad (2.28)$$

детально вивчено у фізиці.

Відповідне поданням (2.24) рівняння Гамільтона

$$\begin{aligned} \hat{H}\left(q, \frac{\partial V}{\partial q}\right) &= 0, \\ q &= (q_1, \dots, q_6), v = (q) \end{aligned} \quad (2.29)$$

описує безліч досяжності сенсора. Математична модель сенсора достатньо складна для дослідження, тому, важливо отримати необхідні і достатні умови локальної еквівалентності системи типу (2.9) з виходом $z = g(y)$ лінійної системи

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ x(0) &= 0, \\ z &= Cx. \end{aligned} \quad (2.30)$$

де A, B и C - постійні матриці відповідних розмірностей.

Справедлива наступна теорема.

Теорема 1.1. Математична модель сенсора одновимірного механічного переміщення тіла локально еквівалентна мінімально лінійній системі (2.29) з лінійним виходом, якщо виконуються наступні умови:

$$\begin{aligned} \text{Dim span}\{\text{ad}_f^k f_i(0), k \geq 0, i=1, \dots, 6\} &= 6, \\ \text{rank } 0^5(y) &= \left((g(y), L_{f_0} g(y)), \dots, L_{f_0} g(y) \right) = 6 \end{aligned} \quad (2.31)$$

в 0; кожна функція $L_{f_j} \dots L_{f_{i_k}} g(y)$ в просторі спостереження дорівнює нулю, принаймні, значення двох індексів j_μ і j_ν належать множини індексів $\{1, \dots, 6\}$.

2.6. Математична модель динаміки, стійкості та стабілізації чутливого елемента

Розглянемо частну задачу про стійкість рівноваги вільного кільця по відношенню до частини змінних. Щоб визначити умови стійкості рівноваги вільного кільця, необхідно знайти вирази для перших і других похідних енергії і, обчислених в положенні співосності кілець 1-3.

Рівняння (2.20) мають інтеграли: $\psi = \text{const}$, $\psi = \text{const}$, $\psi = \text{const}$, які відображають відомий факт замороженості магнітних потоцелень короткозамкнутих контурів, що ідеально проводять струм.

Інтеграл повної енергії системи визначається виразом:

$$E = \frac{1}{2} m(\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\alpha}^2 + \xi^2) + \frac{A}{2} (\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2 \sin \theta) + U \quad (2.32)$$

Можна показати, що рівнянням динаміки вільного тіла задовольняє частне рішення

$$\begin{aligned} \theta &= 0, \\ \dot{\theta} &= 0, \\ \psi &= \omega_2 t, \\ \dot{\psi} &= \omega_2, \\ \varphi &= \omega_3. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Причому

$$\begin{aligned}
P_\rho &= 0, \\
P_\alpha &= G, \\
P_\xi &= 0, \\
P_\theta &= 0, \\
P_\psi &= 0, \\
P_\varphi &= 0..
\end{aligned}
\tag{2.34}$$

Фізичний зміст частного рішення (2.33) - "рівновага" вільного кільця, співвісного двом нерухомим і віддаленого від початку інерціальної системи $0\xi\eta\zeta$ на відстані ζ_{10} у відносному русі навколо центру мас вільне кільце обертається навколо осі, співосно кільцю 3, зі швидкістю ω_3 . Можливість обертання вільного кільця ($\omega_3 \neq 0$) - відмінна ознака досліджувані "рівноваги" в порівнянні з рівновагою в [64], де обертання кільця відсутній.

Фізичний зміст умов (2.34) полягає в рівності сили магнітного тяжіння вільного кільця силі тяжкості в положенні співвісності кілець. Умови (2.34) є необхідними і достатніми для існування рівноваги (2.33).

Отримаємо умову стійкості рівноваги вільного кільця в постановці завдань про стійкість по відношенню до частини змінних [110]. Згідно даній постановці завдання, необхідно виділити змінні першої групи. Інші змінні об'єднаємо в другу групу. В завданнях стійкості рівноваги вільного тіла в магнітному полі в кількості змінних першої групи повинні бути взяті координати, які забезпечують відсутність контакту вільного і нерухомого тіла. Так, зокрема, Декартові координати центру мас і кут між магнітними осями нерухомих і вільних кілець. Якщо використовуються циліндричні координати центру мас ρ, α, ζ (ρ - радіус, - кут, ζ - аппликата), то з числа змінних першої групи можна виключити кут α . Будемо вважати змінними першої групи координати ρ, α, ζ , а також швидкості $\dot{\rho}, \dot{\alpha}, \dot{\zeta}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$.

Розділивши змінні на дві групи, введемо збурення $x_1=q_i-q_{i0}$ (x_i - малі для змінних першої групи і довільні за величиною для змінних другої групи):

$$\begin{aligned}x_1 &= \rho - 0, \\x_2 &= \alpha - \omega_1 t, \\x_3 &= \xi, \\x_4 &= \theta, \\x_5 &= \psi - \omega_2 t,\end{aligned}\tag{2.35}$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \dot{\rho}, \\ \dot{x}_2 &= \dot{\alpha} - \omega_1, \\ \dot{x}_3 &= \dot{\xi}, \\ \dot{x}_4 &= \dot{\theta}, \\ \dot{x}_5 &= \dot{\psi} - \omega_2\end{aligned}\tag{2.36}$$

$$\begin{aligned}|x_1| &\ll 1, \\ |x_3| &\ll 1, \\ |x_4| &\ll 1,\end{aligned}\tag{2.37}$$

$$\begin{aligned}|\dot{x}_1| &\ll 1, \\ |\dot{x}_2| &\ll 1, \\ |\dot{x}_3| &\ll 1, \\ |\dot{x}_4| &\ll 1, \\ |\dot{x}_5| &\ll 1.\end{aligned}\tag{2.38}$$

Відзначимо, що x_2, x_5 - довільні за величиною.

Наступний крок у встановленні часткової стійкості - доказ позитивності функції Ляпунова при малих збуреннях змінних першої групи і при будь-яких за величиною збурюваннях змінних другої групи [83]. В якості функції Ляпунова

візьмемо інтеграл повної енергії збуреної системи V . З урахуванням відомих правил знаходження інтеграла збуреної системи [110], отримаємо

$$V = \hat{E}_1 = \frac{1}{2}m\{\dot{x}_1^2 + x_1^2[\omega_1 + \dot{x}_2]^2 + \dot{x}_3^2\} + \frac{A}{2}(\dot{x}_5 + \omega_2)^2 \sin^2 x_4 + \frac{1}{2}A\dot{x}_4^2 + U_1(x_i) \quad (2.39)$$

де $U(x_i)$ - потенційна енергія, в якій координати виражені через збурення x_i і значення координат в положенні рівноваги.

Інтеграл повної енергії спрощується розкладанням його в ряд Тейлора по малим величинам. Обмежившись членами до другого порядку включно, отримаємо наступний вираз для функції Ляпунова

$$V = \hat{E}_1 = \frac{1}{2}m[\dot{x}_1^2 + x_1^2\omega_1^2 + \dot{x}_3^2] + \frac{1}{2}A\omega_2^2x_4^2 + \frac{A}{2}\dot{x}_4^2 + \frac{1}{2}U_{\rho\rho}x_1^2 + U_{\xi\xi}x_3^2 + U_{\theta\theta}x_4^2 + U_{\rho\theta} \sin[x_2 + (\omega_1 - \omega_2)t] x_1x_4. \quad (2.40)$$

Необхідна на підставі теореми Румянцева [110] позитивність функції Ляпунова забезпечується при малих $x_1, x_3, x_4, x_2, x_1, x_3, x_4$ при виконанні нерівності [83].

$$\begin{aligned} V_{\rho\rho} &> 0, \\ V_{\theta\theta} &> 0, \end{aligned} \quad (2.41)$$

$$V_{\rho\rho}V_{\theta\theta} > 2[V_{\rho\theta}^\circ]^2 \sin^2[x_2 + (\omega_1 - \omega_2)t].$$

Останню нерівність можна замінити на більш сильну:

$$V_{\rho\rho}V_{\theta\theta} > 2V_{\rho\theta}^{\circ 2}. \quad (2.42)$$

Одержимо систему трансцендентних нерівностей

$$\begin{aligned} V_{\rho\rho} &> 0, \\ V_{\theta\theta} &> 0, \\ V_{\rho\rho}V_{\theta\theta} &> 2[V_{\rho\theta}^\circ]^2 \end{aligned} \quad (2.43)$$

і визначимо достатні умови стійкості рівноваги (2.35,2.36). Нерівності (2.41) містять повні еліптичні інтеграли першого і другого роду, відношення заморожених потоків кілець P_2 і P_3 , безрозмірна відстань між нерухомими кільцями \hat{q}_1 , безрозмірна відстань вільного кільця в положенні рівноваги від 2-го нерухомого кільця \hat{q}_2 , безрозмірні товщини струмових кілець $d_1 d_2 d_3$, кінематичні параметри $\omega_1, \omega_2, \omega_3$.

Чисельне рішення нерівностей (2.42) отримано при наступних припущеннях:

$$\begin{aligned} \omega_1 = \omega_2 = \omega_3 &= 0, \\ P_2 &= -10, \\ P_3 &= -10 \div 10, \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$\begin{aligned} d_1 = d_2 = d_3, \\ a_1 = a_2 = a_3, \\ \hat{q}_1 &= 0 \div 1, \\ \hat{q}_2 &= 0 \div \infty. \end{aligned} \quad (2.45)$$

2.7. Асимптотична стійкість надпровідного чутливого елемента

Система рівнянь для змінних стану y_1, \dots, y_6 і функціонал z_1 описують відображення $y_1 \rightarrow z_1$ інтерферометра, допускаючий лінійне представлення (див.

[5]). Вводячи функцію $z = \alpha y_1 + \beta y_2$, де β – константа, і прирівнюючи $a_{1j} = 0$, $j = 2, \dots, 5$, одержуємо білінійну систему

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a_2 + a_3 y_1 \end{bmatrix} u_1 + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ a_5 + a_4 y_1 \end{bmatrix} u_1^2 + \begin{bmatrix} 0 \\ a_6 \end{bmatrix} u_3 + \begin{bmatrix} 0 \\ a_7 \end{bmatrix} \\ z &= \alpha y_1 + \beta y_2 \end{aligned} \quad (2.46)$$

Тут $a_1 = a_{11}$, $a_2 = a_{17}$, $a_3 = a_{18}$, $a_4 = a_{110}$, $a_5 = a_{19}$, $a_6 = a_{16}$, $a_7 = a_{111}$. Нехай $u_3(t) = 0$, $u_4(t) = 0$. Отримаємо умови асимптотичної стійкості білінійної системи із лінійної системи вимірювання. Лінеаризуючи (2.2) навколо точки $y_1 = 0$, $y_2 = 0$ стійкої рівноваги пробного тіла при $u_1(t) = 0$, отримуємо

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a_2 \end{bmatrix} u_1, \\ z &= [\alpha \quad \beta] [y_1 \quad y_2]^T \end{aligned} \quad (2.47)$$

Систему (2.3) запишемо в більш загальному вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu_1, \\ z &= Cx \end{aligned} \quad (2.48)$$

Визначимо керування

$$\begin{aligned} u_1 &= K(z), \\ K(0) &= 0. \end{aligned} \quad (2.49)$$

забезпечуючи асимптотичну стійкість незбуреного руху $x = 0$.

Із керування лінеаризованої системи

$$\dot{x} = Ax + Bu_1 \quad (2.50)$$

визначає стабільність білінійної системи (2.2) лінійним рівнянням $u_1 = Fx$ [10].

Нехай $\Theta(\lambda) = a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3$ – будь-який ненормований багаточлен, всі корені якого мають від’ємні реальні частини. Знайдемо таку матрицю K , щоб корені характеристичного полінома матриці $A + BKC$ співпадали з коренями полінома $\Theta(\lambda)$.

В силу керуваності системи (2.6) існує матриця $F = \|f_j\|$, ($j = 1,2$) така, що $A + BF$ мають заданий спектр. Отже, існування шуканої матриці K еквівалентно існуванню розв’язку рівняння

$$KC = F. \quad (2.51)$$

Введемо наступні визначення :

$$\begin{aligned} C_1 &= \alpha, \\ C_2 &= \beta, \\ E_1 &= [1 \ 0]^T, \\ E_2 &= [0 \ 1]. \end{aligned} \quad (2.52)$$

Для існування матриці K , яка задовольняє рівняння (2.7), необхідно і достатньо виконання умови (2.9)

$$\begin{aligned} FQ &= 0, \\ Q &= E_2 - E_1 C_1^{-1} C_2 \end{aligned} \quad (2.53)$$

в якій враховується (2.3).

$$Q = \begin{bmatrix} -\alpha^{-1}\beta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

Якщо елементи матриці (2.54) розглядати як координати вектора q в двовимірному просторі, то умова (2.53) 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 (2.53) задовольняє одну параметричну множину матриць F вигляду

$$F = [f_1\alpha^{-1} \quad \beta f_1] \quad (2.55)$$

Щоб характеристичний поліном матриці $A + BF$ співпадав з заданим поліномом $\Theta(\lambda)$, необхідно щоб виконувалися умови $f_1 = -(a_3 + a_1)a_2^{-1}$, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = -\alpha_2\alpha^{-1}\beta f_1$, $\alpha_2 = -a_2\alpha^{-1}\beta f_1$. Таким чином, при $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 \neq 0$, $\alpha \neq 0$ матриця $K = FE_1C_1^{-1}$ зворотного зв'язку по виходу визначається виразом

$$FK = [f_1\alpha^{-1}] \quad (2.56)$$

і керування $u_1 = Kz = f_1\alpha^{-1}z$ забезпечує асимптотичну стійкість положення рівноваги (2.2) в деякій області H зміни x .

2.8. Ідентифікація динаміки математичної моделі пробного тіла.

Запишемо систему (1), де $y_1 = y_2$, $u_2 = u_1^2$, $a_6 = 0, a_7 = 0, u_3 = 0$, у наступному вигляді:

$$\ddot{y}_1 = (a_1 + a_3u_1 + a_4u_2)y_1 + a_2u_1 + a_5u_2, \quad (2.57)$$

Уведемо заміну: $a_1 + a_3u_1 + a_4u_2 = g$, $a_2u_1 + a_5u_2 = h$, тоді рівняння (2.57) матиме наступний вигляд:

$$\ddot{y}_1 = gy_1 + h. \quad (2.58)$$

Для знаходження загального розв'язку рівняння (2.58), уведемо нову функцію $Pf(y)$, за умови $Pf(y) = \dot{y}_1$.

Тоді запишемо

$$\ddot{y}_1 = \frac{d}{dt} \dot{y}_1 = \frac{dPf}{dt} = \frac{dPf}{dy_1} \frac{dy_1}{dt} = \frac{dPf}{dy_1} Pf$$

$$\frac{dPf}{dy_1} Pf = gy_1 + h,$$

$$\int Pf * dPf = \int (gy_1 + h) * dy_1.$$

Розв'язок останнього рівняння наведений формулою (2.59).

$$Pf = y_2 = \pm \sqrt{\frac{1}{g} (gy_1 + h)^2 + C_1}. \quad (2.59)$$

Підставивши $\dot{y}_1 = y_2$ в (16), отримаємо нове диференціальне рівняння, загальний розв'язок якого представлений формулами (2.60) і (2.61).

$$y_1^1 = \frac{e^{\sqrt{g}(C_2 \pm t)}}{2g} - \frac{C_1}{2e^{\sqrt{g}(C_2 \pm t)}} - \frac{h}{g}, \quad (2.60)$$

$$y_1^2 = \frac{C_1}{2e^{\sqrt{g}(C_2 \pm t)}} - \frac{e^{\sqrt{g}(C_2 \pm t)}}{2g} - \frac{h}{g}, \quad (2.61)$$

де C_1, C_2 — константи інтегрування.

Стан системи у початковий момент часу невідомий. Відомими є множини z, u_1, u_2 у кожний момент часу t , $Card(z) = Card(u_1) = Card(u_2) = N$. Для параметричної ідентифікації (2.60) і (2.61) пропонується наступний алгоритм.

Нехай кількість станів системи $p = L$, де L — максимальна ступінь виразу, який зобразимо у наступному вигляді:

$$\hat{y}_q = u_1^q + u_2^q, \quad (2.62)$$

де $q = \overline{1..p}$.

Тепер нехай $\hat{z} = a\hat{y}_1 + b\hat{y}_2$, а задача (2.63) на знаходження параметрів a, b не є перепараметризованою:

$$\sum_{i=1}^N (z_i - \hat{z}_i)^2 \rightarrow \min. \quad (2.63)$$

Для знаходження параметрів (14), запишемо задачу оптимізації (2.64):

$$S_j = \sum_{i=1}^N (y_{1i}^j - \hat{y}_{1i})^2 \rightarrow \min, \quad (2.64)$$

$$j = \overline{1..2}$$

Програмна реалізація та апробація алгоритму виконані в середовищі MatLab (рис. 2.4).

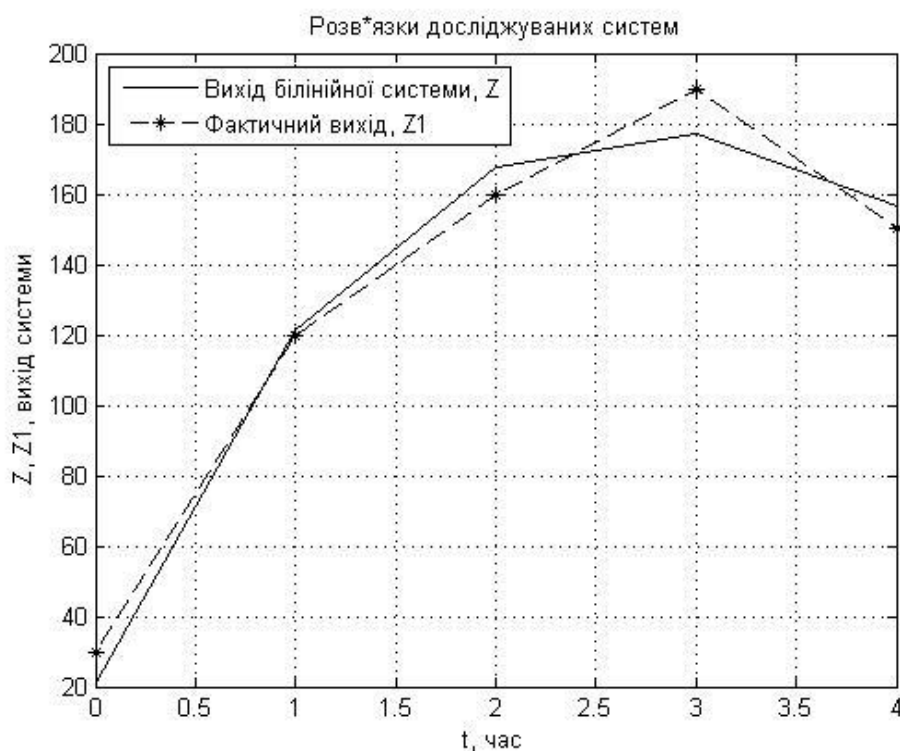


Рис. 2.4.. Динаміка фактичного та теоретичного виходів системи

Запропонований алгоритм дозволяє подолати проблему перепараметризованості, яка є актуальною при ідентифікації білінійних систем (за умови, що відомий загальний розв'язок) і є перешкодою при застосуванні класичного підходу ідентифікації [30].

2.9. Еліпсоїдальне оцінювання вектору стану.

Для розв'язування задачі оцінювання вектору стану системи (2.47) пропонується алгоритм еліпсоїдального оцінювання, який полягає у наступному (2.65):

$$\dot{x} = Ax + B(u_1 + \xi) \quad (2.65)$$

Припустимо, що процес стаціонарний. Для зручності перепишемо (4) у компактному вигляді з урахуванням невизначеності (2.66):

$$z = Cx + v \quad (2.66)$$

$|\xi| \leq d$ и $|v| \leq c$ – обмежені за абсолютною величиною збурювання й шум, відповідно.

Таким чином, оцінка векторної величини x у момент часу t являє собою деяку обмежену множину, яку зручно апроксимувати множиною канонічної форми, наприклад, еліпсом E [23]. Оскільки оброблення спостережень і побудова множинної оцінки стану (17) здійснюється дискретно, зручно перейти до дискретного подання процесу (17), використавши фіксатор нульового порядку [24, 25]. Зазначене перетворення зручно виконати засобами MatLab [26] і далі використовувати в комп'ютерному моделюванні. У цьому випадку (2.65), (2.66) перепишемо в нових позначеннях (2.67) і (2.68):

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k (u_{1,k} + \xi_k), \quad (2.67)$$

$$z_k = C x_k + v_k, \quad (2.68)$$

де нижній індекс $k \in N$ – номер спостереження за процесом у дискретному поданні; матриці A_k, B_k отримані в результаті перетворення безперервного процесу (17) у його дискретне подання. Використавши роботу [27], будемо еліпсоїдальну множину досяжності [23], а потім, скориставшись алгоритмом [28], одержуємо еліпсоїдальну оцінку вектора можливих станів процесу (17). На напівінтервалі $[k, k + 1]$ вважаємо керування $u_{1,k}$, збурювання ξ_k й шум v_k постійними.

$$\tilde{x}_{k+1} = A_k \tilde{x}_k + B_k u_{1,k} | \tilde{x}_1 = \bar{x}, \quad (2.69)$$

$$\tilde{H}_{k+1} = (1 + \delta_k) A_k \tilde{H}_k A_k^T + (1 + \delta_k^{-1}) B_k B_k^T d^2 | \tilde{H}_1 = \bar{H}, \quad (2.70)$$

$$\tilde{E}_{k+1} = \{x_{k+1} : (x_{k+1} - \tilde{x}_{k+1})^T \tilde{H}_{k+1}^{-1} (x_{k+1} - \tilde{x}_{k+1}) \leq 1\} \quad (2.71)$$

Тут \tilde{x}_{k+1} – прогнозне значення вектора станів процесу; \tilde{H}_{k+1} – матриця еліпса \tilde{E}_{k+1} множини досяжності процесу (2.67). Значення \bar{x} й \bar{H} задаються приблизно. δ_k – єдиний позитивний корінь рівняння [27]

$$\begin{aligned} n\delta_k^2 + k_k^2(n-1)\delta_k - k_k^2 &= 0, \\ k_k^2 &= B_k^T \tilde{H}_k^{-1} B_k d^2 \end{aligned} \quad (2.72)$$

У рівнянні (2.72) параметр $n = 2$ – розмірність вектора x_k .

Обробивши виміри (2.68), одержимо оцінку множини можливих станів процесу (5):

$$\hat{x}_{k+1} = \tilde{x}_{k+1} \tau_{k+1} \frac{\tilde{H}_{k+1} C^T}{e_{k+1}} \sigma_{k+1}, \quad (2.73)$$

$$\hat{H}_{k+1} = \left(\tilde{H}_{k+1} - \tau_{k+1} \frac{\tilde{H}_{k+1} C^T C \tilde{H}_{k+1}}{e_{k+1}^2} \right) \gamma_{k+1}^2, \quad (2.74)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{k+1}^2 &= 1 + \tau_{k+1} \left(\frac{1}{1-\tau_{k+1}} \chi_{k+1}^2 - \sigma_{k+1}^2 \right), \\ \tau_{k+1} &\leq \frac{1+n(\sigma_{k+1}^1 - \chi_{k+1}^2)}{1+n\sigma_{k+1}^2}, \quad 0 \leq \tau_{k+1} < 1. \end{aligned} \quad (2.75)$$

де $n = 2$ – розмірність вектора x_k , $e_{k+1}^2 = C \tilde{H}_{k+1} C^T$, $\sigma_{k+1} = \frac{\Delta_{k+1}}{e_{k+1}}$, $\Delta_{k+1} = z_{k+1} -$

$C \tilde{x}_{k+1}$, $\chi_{k+1}^2 = \frac{c^2}{e_{k+1}^2}$, c – найбільше абсолютне значення шуму v_k .

У (21), (22) на $k + 2$ кроці перевизначаємо: $\tilde{x}_{k+1} = \hat{x}_{k+1}$, $\tilde{H}_{k+1} = \hat{H}_{k+1}$.

Керування $u_{1,k}$ задається законом (14) і визначається обраним критерієм:

$$\begin{aligned} \det \hat{H}_{k+1} / \det \hat{H}_k &\leq 1, \\ \text{tr} \hat{H}_{k+1} / \text{tr} \hat{H}_k &\leq 1 \end{aligned}$$

або відношенням інших матричних норм.

Висновки до розділу 2

В данному розділі побудовані математична модель динаміки та стійкості керованого надпровідного підвісу. Побудовані чисельні алгоритми оцінювання величини гравітаційних збурень, що впливають на левітуюче пробне тіло.

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

РОЗДІЛ 3

ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ОДЕРЖАНИХ ПРИ
ВИМІРЮВАННЮ ПОЛОЖЕННЯ ПРОБНОГО ТІЛА

3.1. Обґрунтування нових методів оптичних вимірювання координат та малих переміщень.

Основна увага при дослідженні надавалася оцінці впливу основних факторів, що обмежують чутливість та точність різних лазерних методів дистанційних вимірів.

Детально вивчено вплив шорсткості поверхні пробного тіла та неоднорідності поверхневих оптичних властивостей на фазу відбитого променя. Було оцінено вплив флуктуацій щільності рідкого гелію на точність виміру координат зонду. Показано, що при типових експериментальних умовах можна досягнути точність вимірювання довжини не гірше, ніж кілька сотих довжини хвилі. Ці оцінки дозволяють вибрати найбільш перспективні методи, які, при відповідній модифікації та адаптації, дадуть можливість отримати необхідну чутливість та точність виміру положення зонда: а саме лазерна гетеродинна інтерферометрія та лазерна триагуляція. Оцінки показали важливість обох методів для реальних умов низькотемпературного оточення рідкого гелію.

Зроблено оцінки спектрів флуктуації сигналу. Фундаментальним джерелом флуктуацій для надвисокочутливих вимірювань є світловий тиск лазерного променя на пробне тіло. Сила цього тиску пропорційна потужності лазерного випромінювання. Оцінка величини флуктуацій прискорення, пов'язаного з цією силою, дає близько $(10^{-8}-10^{-12})g$. Спектр таких флуктуацій визначається спектром флуктуацій потужності лазера з частотами від 0 до 104 Гц для типового напівпровідникового лазера. Іншим важливим джерелом флуктуацій сигналу є передача флуктуацій потужності лазера в корисний сигнал у процесі детектування сигналу інтерференції. Оскільки в інтерферометричному методі відносна флуктуація потужності $\Delta P/P$ приводить флуктуації сигналу, який (при відності інтерференційної картини $=1$) еквівалентний зміні сигналу при зміщенні $\Delta z=(\lambda/2\pi)$

$\Delta P/P$ (λ — довжина хвилі випромінювання лазера), для типового нестабілізованого лазера з флуктуаціями $\Delta P/P=10^{-3}$ точність вимірювання відстаней може бути кращою, ніж 1 нм, тобто такими флуктуаціями можна знехтувати. Спектр цих адитивних флуктуацій співпадає зі спектром флуктуацій потужності лазера.

Проведена оцінка флуктуацій оптичної довжини та їх спектру при поширенні лазерного променя в рідкому гелії — системі, яка має динамічні зміни оптичних властивостей, зокрема, показника заломлення. Показано, що при цьому виникають значні технічні флуктуації і при розробці конструкції датчика треба, при можливості, уникнути проходження оптичного випромінювання інтерферометричних схем через кріорідини.

3.2. Блок схема оптичних вимірювань.

Надпровідний підвіс змінює сигнал інтерферометра залежно від динаміки чутливого елемента (рис. 3.1). Оптична система вимірювання посилає оптичний сигнал, який залежить від положення левітаційного пробного тіла (ПТ). Система оброблення отримує сигнал щодо положення ПТ і знаходить механічні координати з точністю 0,1 нм та гравітаційні збурення з точністю 10^{-10} g.

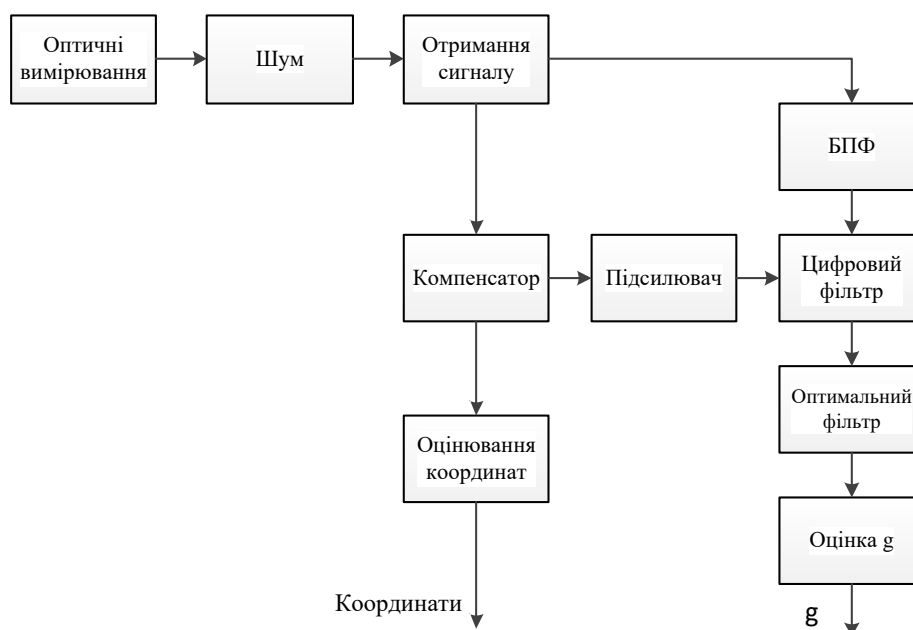


Рис. 3.1.. Блок схема оптичних вимірювань

Загальна схема обробки сигналів гравітаційного датчика включає в себе послідовне вирішення наступних завдань: фільтрація (виділення корисного сигналу); класифікація (розпізнавання типу досліджуваних об'єктів); прогнозування сигналів; оцінка параметрів об'єктів.

Як елементи класифікації або прогнозу можуть бути обрані істотні незалежні ознаки гравітаційного сигналу, достовірно характеризують зондуємі об'єкти. Ці ознаки можуть нести інформацію про можливі місця покладів корисних копалин, становлять інтерес для відпрацювання геофізичних методик пошуку вуглеводневих ресурсів, геодинамічних досліджень і виявлення геологічних небезпек.

Проблема виділення корисних сигналів, що діють на макроскопічне пробне тіло була предметом багатьох досліджень [1, 5, 19]. Однак завдання оцінювання слабких гравітаційних збурень в умовах дії різних шумів, що діють на пробне тіло в магнітної потенційної ямі до теперішнього часу достатньо не досліджувалися. На левітуюче пробне тіло криогенного датчика діють різні види шумових впливів (вібрації, прискорення, зворотний вплив вимірювача зсувів, пружні властивості чутливого елемента, переміщення сторонніх масивних тіл і т. д.) [29]. Додаткове вплив шуму викликає система, що вимірює зміщення пробного тіла. Цей вид шумових впливів детально описаний в роботі [17]. При вимірі сили тяжіння на борту літака на показання гравіметра впливають збурення у вигляді нахилів і прискорень гіроплатформи. Завдання виділення гравіметричного сигналу передбачає введення поправок, що враховують нахили і прискорення основи гравіметра (ефект Етвеша, крос-Каплінга і ін.) І фільтрацію Δg з залишкових флуктуацій інерційних прискорень.

У аерогравіметрії метод фільтрації не переймається тим відділення корисного сигналу від перешкоди, так як висока швидкість літака в порівнянні з морськими судами робить гравітаційні аномалії більш високочастотними, а низькочастотний характер зміни висоти польоту обумовлює інерційний шум, який практично невіддільний по частоті від змін сили тяжіння [21].

Ми припускаємо, що вихідний сигнал вимірювальної системи положення пробного тіла після аналого-цифрового перетворення надходить на процесор для подальшої обробки. Внаслідок неточності аналого-цифрового перетворення результуючий сигнал в сигнальному процесорі додатково піддається шумів квантування. Тому проблема цифрової обробки вихідного сигналу датчика є досить складною і вимагає залучення сучасних методів фільтрації. В даний час розроблено велику кількість таких методів для сигналів з апріорі не відомими параметрами [9-11]. Детальний аналіз проблеми цифрової обробки показав, що висока точність оцінювання параметрів сигналу може бути забезпечена комплексним застосуванням просторово-часових компенсаторів шумів [30] і цифрових адаптивних фільтрів. В даному розділі основна увага приділена останньої із зазначених завдань: адаптивному оцінювання перешкоди сигналу, що дозволяє отримати оцінку мінімально визначеного сигналу понад раніше досягнутої межі.

Нехай на виході гравітаційного датчика є адитивна суміш корисного сигналу і перешкоди з спектральної щільністю

$$S(w) = S_r(w) + S_s(w), \quad (3.1)$$

Де

$$S_r(w) = \frac{Q^2 \prod_{i=1}^{m_1} (\omega^2 + a_i^2)}{\prod_{i=1}^{m_2} (\omega^2 + p_i^2)}, \quad (3.2)$$

$$S_s = R^2 \frac{\prod_{i=1}^{m_3} (\omega^2 + b_i^2)}{\prod_{i=1}^{m_4} (\omega^2 + c_i^2)}, \quad (3.3)$$

$m_1 \leq m_2 - 2$, $N = m_2 + m_3 - m_1 - m_4 > 0$; Q і R - обмежені параметри, що підлягають оцінці; a_i , p_i , b_i , c_i - комплексні числа, що забезпечують обмеженість дисперсії $r(t)$ і $s(t)$.

Нехай $\hat{y}(t)$ - сигнал на виході адаптивного фільтра. Тоді передавальна функція W адаптивного фільтра, яка забезпечує мінімум середньої квадратичної помилки

$$I = \min M[r(t) - \hat{y}(t)]^2 \quad (3.4)$$

і задовольняє умовам: збігається з функцією передачі оптимального фільтра при великих значеннях відносини Q/R ; незначно відрізняється від передавальної функції оптимального фільтра при інших в порівнянні з одиницею значеннях відносини Q/R .

Передавальна функція фільтра визначається відповідно до загальної теорії фільтрації Колмогорова-Вінера [9, 10] виразом

$$W(j\omega) = \frac{\frac{Q}{R}}{\prod_{i=1}^{\frac{N}{2}-1} \left[(j\omega)^2 + 2\sqrt{\frac{Q}{R}} \cos\left(\frac{\pi}{2N} + \frac{\pi}{N}i\right) j\omega + \sqrt{\frac{Q^2}{R^2}} \right]} \quad (3.5)$$

Оцінювання рівня корисного сигналу $r(t)$ полягає у формуванні функції

$$\varphi = \begin{cases} V(t^*) + k_0(t - t^*), \text{ при } q_1 > 0, \\ \max|V(t)|, \text{ при } q_1 < 0, q_2 > 0, \\ t \in (t^* - \Delta t, t^*) \\ |V(t^*)| - k_1(t - \Delta t - t^*), \text{ при } q_1 > 0, \end{cases} \quad (3.6)$$

де t^* - момент часу, в який виконуються співвідношення

$$\varphi = \begin{cases} V(t^*) + k_0(t - t^*), \text{ при } q_1 > 0, \\ \max|V(t)|, \text{ при } q_1 < 0, q_2 > 0, \\ t \in (t^* - \Delta t, t^*) \\ |V(t^*)| - k_1(t - \Delta t - t^*), \text{ при } q_1 > 0, \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned}
 V(t^*) &= \max |V(t)| \\
 t &\in (t^* - \Delta t, t^*)', \\
 V(t) &= r(t) + s(t), \\
 k_0, k_1 &\geq \max |\dot{r}(t)|,
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

$$\Delta t = \frac{2\pi \int_{-\infty}^{\infty} f_r(w) dw}{\int_0^{\infty} w f_r(w) dw},
 \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned}
 q_1(t) &= |V(t)| - |V(t^*) + k_0(t - t^*)|, \\
 &t > t^*, \\
 q_2(t) &= |V(t) - \Delta t| - |V(t) - k_1(t - t^* - \Delta t)|, \\
 &t > t^* + \Delta t,
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

і обчислення різниці

$$Q = \varphi(t) - \psi.
 \tag{3.11}$$

Тут ψ визначається виразом

$$\begin{aligned}
 k_1 \left[1 - \frac{\Delta t}{2\pi} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_0} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(\frac{\psi^2}{2\lambda_0} \right) \right] &= k_0 \left[1 - \Phi \left(\frac{\psi}{\lambda_0} \right) \right], \\
 \lambda_{2i} &= \int_0^{\infty} w^{2i} S_S(w) dw, \quad i = 0, 1,
 \end{aligned}$$

$\Phi \left(\psi / \lambda_0 \right)$ - стандартна нормальна функція розподілу.

Оцінювання рівня перешкод здійснюється одним з відомих методів.

Додаткові можливості в оцінюванні сигналів з'являються при введенні в датчик керуючої підсистеми [29, 30]. Модельний варіант керованого гравіметричного датчика розглянутий фахівцями Інституту кібернетики в серії доповідей [11, 14, 29]. З 1990 р дослідження були спрямовані на вирішення завдань адаптивного оцінювання впливів на пробне тіло і розробку алгоритмів обробки сигналів. Це дозволяє використовувати дуальний підхід і відомий принцип інваріантності в автоматичі [15] для забезпечення більш високої точності і завадостійкості датчика. Оцінювання параметрів невідомого гравітаційного збурення здійснюється на основі алгоритму моделювання зворотного моделі динаміки левітуюче пробного тіла датчика з по-наступним використанням методів адаптивного оцінювання. Один з варіантів такого підходу реалізований в роботі [11].

Чисельне моделювання підтвердило інваріантність математичної моделі оцінювання до шуму з обмеженим зверху спектром і стаціонарного шуму з невідомими параметрами спектральної щільності. Встановлено інваріантність до збурень імпульсного характеру, досліджувати не-лінійна динаміка процесів вимірювання та виявлено стохастичність вимірювача зміщення пробного тіла, обумовлена процесом перезарядки джоозефсоновскі контакту через нормальне опір в Гістерезисні режимі. Проведена цифрова фільтрація модельних реалізацій гравітаційного сигналу. Отримано оцінки мінімально визначеного сигналу, що дозволяють сподіватися на можливість проведення деяких експериментів фундаментального характеру за умови реалізації адаптивної системи оцінювання: перевірка принципу еквівалентності в теорії відносності, виявлення гравітаційних хвиль і т. п. Подальше підвищення чутливості можна реалізувати оптимізацією процесу вимірювання на основі методів [2] і реалізацією механізму стохастичності в динаміці левітуючого пробного тіла.

3.3. Нейромережеве оцінювання слабких впливів на левітуюче пробне тіло

Для визначення величини гравітаційних збурень пропонується метод вирішення оберненої задачі з використанням нейронної мережі з радіальними базисними функціями (RBF).

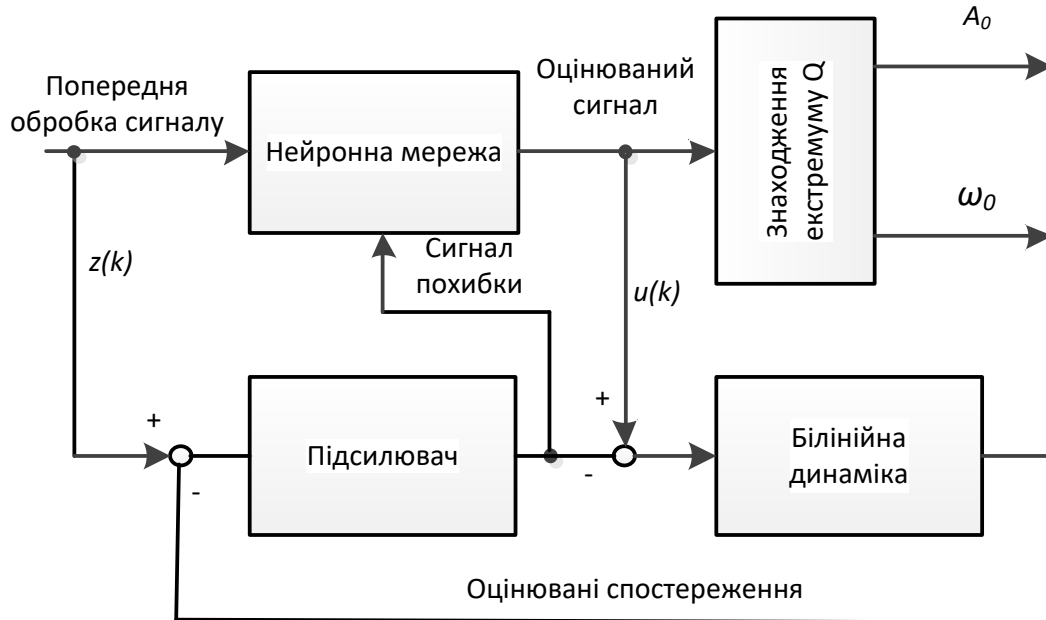


Рис. 3.2. Нейромережеве оцінювання гравітаційних збурень

Нейромережі (RBF) - двошарова мережу без зворотних зв'язків, яка містить прихований шар радіально-симетричних прихованих нейронів (шаблонний шар). Мережа RBF моделює довільну нелінійну функцію за допомогою всього одного проміжного шару. Параметри лінійної комбінації в вихідному шарі можна повністю оптимізувати за допомогою добре відомих методів лінійної оптимізації, які працюють швидко і не мають труднощів при роботі з локальними мінімумами.

Нехай динаміка пробного тіла описується рівнянням

$$\dot{x}(t) = f_0(x, t) + \sum_{i=1}^m f_i(x, t) u_i(t) = f_0(x, t) + F(x, t)u(t) \quad (3.12)$$

де $x(t) - l$ – мірний вектор стану; $f_0(x, t) - l$ – мірний вектор, 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.

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

Припустимо, що вимірювач (СКВІД або лазерна система) вектора стану системи (3.1) описується співвідношенням

$$y(t) = h(x, t) + \omega(t) \quad (3.13)$$

де $y(t)$ – двовимірний вектор спостереження, що складається з компонент положення і швидкості пробного тіла; $h(x, t)$ – двовимірний вектор, нелінійна залежний від x ; $\omega(t)$ – двовимірний вектор шумів спостереження. 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.

$$\hat{x}_i(t) = \sum_{j=0}^n c_{ji} t^j, \quad (3.14)$$

$$i = 1, \dots, l$$

Коефіцієнти полінома визначаються одним з існуючих методів. Оцінку похідної стану $x_i(t)$ отримуємо за допомогою виразу:

$$\frac{d\hat{x}_j(t)}{dt} = \sum_{j=0}^n c_{ji} t^{j-1}, \quad (3.15)$$

$$i = 1, \dots, l$$

Підставляючи $\hat{x}(t)$ і $\frac{d\hat{x}_j(t)}{dt}$ в рівняння (3.1) отримуємо

$$\left[\frac{d\hat{x}_j(t)}{dt} - f_0(x, t) = F(\hat{x}, t)u(t) + v(t) \right], \quad (3.16)$$

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

$$z(t) = [d\hat{x}(t) - f_0(\hat{x}, t)] = F(\hat{x}, t)u(t) + v(t). \quad (3.17)$$

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

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

$$\begin{aligned} n^T(k) &= [y_1(k) \dots y_i(k), y_1(k-1) \dots y_i(k-1), y_1(k-l) \dots y_i(k-l)] = \\ &= [n_1(k)n_2(k) \dots n_i(k)]. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Вихід i -го нейрона другої прошарку в момент часу k визначається виразом

$$\begin{aligned} \gamma_i(k) &= q \left[\sum_{j=1}^l a_{ij} n_j(k) \right], \\ i &= \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (3.19)$$

де α_{ij} – невідомі вагові коефіцієнти; N – число нейронів; q – нелінійність, обумовлена виразом

$$q(x) = \frac{1}{[1 + \exp(-x)]} \quad (3.20)$$

Вихід i -го нейрона останнього шару дає наступну оцінку невідомого вектора $\hat{u}(k)$:

$$u_i(k) = \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \sigma_j(k), \quad (3.21)$$

$$i = 1, \dots, m$$

де β_{ij} – невідомі ваги. Отримана оцінка використовується для наступної фільтрації сигналу.

Висновки до розділу 3

Побудовано функціональну схеми системи вимірювання величини гравітаційних збурень, що діють на пробне тіло. Обґрунтовано алгоритми адаптивної цифрової фільтрації для виділення корисного сигналу на фоні шумових перешкод.

Побудовано нейромережний алгоритм оцінювання слабких гравітаційних збурень. Запропоновані алгоритми забезпечать більш стабільну роботу приладів на основі ефекту магнітної левітації.

Запропоновано нову ідею щодо можливості 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 нейромережний алгоритм оцінювання слабких гравітаційних збурень. Запропоновані алгоритми забезпечать більш стабільну роботу приладів на основі ефекту магнітної левітації.

РОЗДІЛ 4

КОНЦЕПЦІЯ НАДПРОВІДНОГО СУПУТНИКОВОГО ГРАВИМЕТРА, СТРУКТУРА ТА ЗАСТОСУВАННЯ

На основі проведених досліджень пропонується конструктивна модель надпровідного дачика вимірювання гравітаційних збурень, що дасть можливість створювати системи орієнтовані для використання на малих супутниках. При використанні окремих криогенних ефектів (діамагнітне відштовхування, ідеальна провідність, квантування магнітного потоку) дозволяє:

- створити магнітні підвіси високої надійності і стабільності;
- застосувати високочутливі датчики знімання інформації на основі надпровідних квантових інтерферометричних датчиків (СКВІДів);
- значно підвищити геометричну стабільність елементів конструкції гравіметра;
- істотно знизити рівень теплових шумів;
- забезпечити ефективне отримання і зберігання глибокого вакууму;
- забезпечити високу ступінь екранування чутливого елемента від зовнішніх електромагнітних полів;
- стабілізувати температуру в робочому обсязі до 10^{-4} - 10^{-5} К.

Було розроблено принцип побудови гравіметричних приладів, заснований на взаємодії надпровідних коротко замкнутих струмових контурів. Така взаємодія, завдяки властивості короткозамкнених надпровідних контурів «заморожувати» пов'язані з ними магнітні потоки, володіє не властивою звичайним магнітів можливістю змінювати знак. Потенційна енергія цієї взаємодії може мати мінімум, і її залежність від координати має вигляд «потенційної ями» [12].

Сила притягання таких незмінно орієнтованих контурів при їх зближенні спочатку збільшується, досягає максимального значення, потім зменшується і, пройшовши нульове значення, перетворюється в відштовхуючу силу.

На основі описаного ефекту був розроблений стійкий магнітний підвіс вільного тіла. Якщо один з контурів жорстко пов'язати з основою і завести в нього незатухаючий постійний струм, він буде служити джерелом стабільного магнітного поля. Положення вільного контуру (і пов'язаного з ним тіла) буде стійким за всіма лінійних і кутових координатах за умови, що рівновага досягається на ділянці зменшення сили тяжіння між максимальним її значенням і нульовою точкою [13].

Такий магнітний підвіс може служити основою гравіметричного датчика. Дійсно, при зміні прискорення сили тяжіння чутливий елемент, в ролі якого виступає вільне тіло, зміщується від положення рівноваги, у вільному і нерухомому контурах наводяться додаткові струми, магнітна ситуація поблизу контурів змінюється.

Вимірюючи струм в одному з контурів або взагалі оцінюючи магнітну ситуацію в робочому обсязі, можна судити про величину гравітаційного збурення.

Пропонується для підвищення чутливості гравіметричного датчика використовувати магнітний підвіс з чотирма взаємодіючими контурами, два з яких жорстко пов'язані з корпусом і два - з чутливим елементом.

4.1. Концепція кріогенно-оптичного датчика

Датчик заснований на новому типі вільної підвіски зонда надпровідного гравіметра. Її функціонування засноване на явищі магнітної левітації зонда і на вимірюванні його переміщення з наступною обробкою даних. Концепція ґрунтується на використанні явища надпровідності замкнутої котушки, наприклад, кільце, яке, завдяки левітації, може мати положення рівноваги. Як наслідок явища надпровідності, кільце має нульовий електричний опір. У той же час, сучасні методи обробки сигналів використовуються для оцінки малого збурення (на фоні значного шуму), що відповідає параметрам вимірюваного гравітаційного поля.

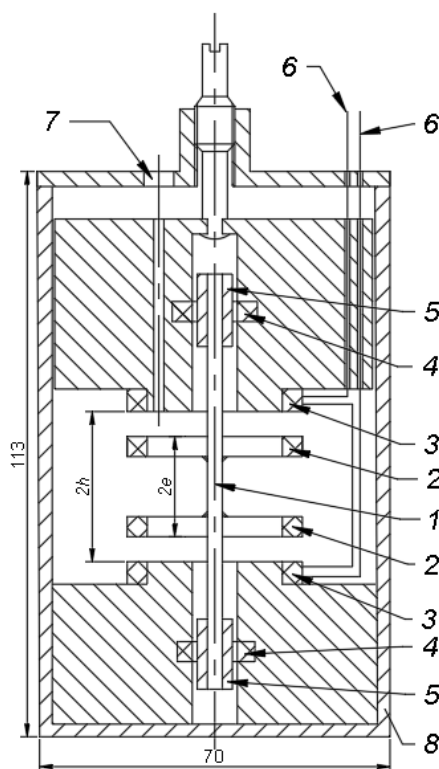


Рис. 4.1. Конструкція датчика гравітаційних прискорень

Гравіметр базується на наступному принципі. У рівновазі зонд левітує в положенні, коли сила тяжіння компенсується магнітною силою, яка діє в протилежному напрямку. При зміні гравітації зонда він рухається з нульового положення, а оптичний датчик вимірює сигнал помилки. Через зміну струму в кільці управління система самонастройки створює додаткове магнітне поле, пропорційне сигналу, який утримує зонд в положенні рівноваги. Оскільки повертаюча сила є лінійною функцією струму, її вимірювання в керуючому кільці забезпечує лінійну оцінку змін сили гравітації.

Ця підвіска потребує високоточної оптичної системи реєстрації для переміщення зонда. Пропонується оцінити положення зонда за допомогою лазерного датчика, що дозволяє виключити електричне та магнітне поля, що впливали на зонд. Для виявлення надмалих переміщень пропонується використовувати сучасний метод інтерферометрії та динамічні ефекти обмеженого лазерного сигналу, який корелює з механічним зміщенням зонда. Інтерферометричний метод може забезпечити точність вимірювання координат зонда не більше 0,1 нанометра.

Вибрано та реалізовано експериментальну схему з лазерним датчиком переміщення. Цей датчик забезпечує перетворення сигналу в цифрову форму для обробки сигналу. Нещодавно було показано, що оптичний датчик на основі лазерного діода із зовнішнім резонатором як джерелом монохроматичного випромінювання та одномодовим оптичним волокном як каналом для транспортування світла до зонда, що зберігає когерентність оптичного випромінювання) задовольняє всім необхідні вимоги.

Фізично датчик являє собою вільне тіло або чутливий елемент (ЧЕ), виконаний у вигляді жорсткої зв'язки двох співвісних коротко-замкнених надпровідних котушок і зважений в магнітному полі двох нерухомих надпровідних струмових котушок, осі яких в не-збуреному стані збігаються з віссю ЧЕ. Він розташований між нерухомими котушками, причому відстань між кожною нерухомою котушкою і найближчою до неї котушкою ЧЕ значно менше відстані між котушками ЧЕ. Нерухомі котушки живляться струмами одного напрямку й однакової величини, потім закорочуються, а в котушки ЧЕ індуктивно від нерухомих котушок заводяться такі магнітні потоки, що кожна котушка ЧЕ притягається до найближчої нерухомою котушці, таким чином ЧЕ розтягується магнітними силами. Реєструється складова прискорення, напрямком якої збігається із загальною віссю котушок.

Конструкція датчика наведена на рисунку 4.1, на якому показаний ЧЕ 1, що складається з тонкостінної трубки діаметром 3,5 мм (нержавіюча сталь), з якої жорстко з'єднані каркаси надпровідних котушок 2. Мінімальний діаметр котушок - 40 мм, товщина - 5 мм, відстань між площинами котушок - 40 мм . Вони намотувалися надпровідним проводом NbTi діаметром 0,33 мм і закорочувались.

Левітація ЧЕ здійснюється шляхом взаємодії котушок ЧЕ 2 з нерухомими надпровідними котушками 3, одна з яких (нижня) жорстко пов'язана з корпусом датчика, а інша (верхня) може переміщатися уздовж загальної осі котушок і фіксуватися в заданому положенні. Переміщення проводиться за допомогою мікрометричного гвинта 10. Розміри і намотування нерухомих котушок ідентичні

розмірам і намотування котушок ЧЕ з тією лише різницею, що нерухомі котушки мають виводи для подавання на них початкового струму.

При створенні гравіметричних приладів зазвичай виділяють вісь чутливості, уздовж якої жорсткість підвісу робиться мінімальною, а за іншими ступенями свободи - максимальною. При розробці математичної моделі було встановлено, що обрана схема датчика гравіметра інваріантна до збурень, що діють в радіальному напрямку і по куту нахилу чутливість осі ЧЕ. Проте в конструкції передбачені додаткові засоби, збільшуючи жорсткість підвісу по всіх координатах, крім осі чутливості датчика (що збігається з віссю ЧЕ) і кута власного обертання ЧЕ (від цього кута потенційна енергія ЧЕ не залежить, і отже, магнітних сил при його зміні не виникає). Досягається це тим, що співвісно нерухомим котушок 3 на корпусі розташовуються короткозамкнені надпровідні котушки 4 ($NbTi$, близько 20 витків), а на кінцях тонкостінної трубки ЧЕ жорстко закріплюються надпровідні циліндри 5 (Nb). Зазор між ніобієвими циліндрами і котушками 4 - 0.5 мм. При заведенні струму в котушки циліндри виявляють властивості ідеального діаманетиком, відштовхуючись від джерела магнітного поля, і за рахунок цього відбувається стабілізація співвісного розташування ЧЕ і нерухомих котушок.

Найважливішу роль при створенні гравіметричних приладів підвищеної чутливості грає захист датчика від механічних і електромагнітних збурень. Вплив зовнішніх електромагнітних полів на магнітну ситуацію в робочому обсязі датчика може бути в значній мірі ослаблено, якщо взаємодіючі елементи ретельно екранувати. У даній конструкції для цієї мети використовується ніобієві стакан 8, отвір 8 необхідний для заведення отоволоконного каналу передачі лазерного сигналу інтерферометра (СКВІДа) для визначення положення пробного тіла

4.2. Дослідження динаміки і стійкості чутливого елемента

Так як в якості чутливого елемента використовується осесиметричне тіло, зважене в осесиметричному магнітному полі, динаміка ЧЕ описується системою п'яти нелінійних диференціальних рівнянь 2-го порядку, в якій внаслідок

нецентрального магнітного взаємодії рівняння, що описують рух центру мас ЧЕ, взаємопов'язані з рівняннями обертального руху.

Рівняння динаміки чутливого елемента виявляються досить складними. Це викликано громіздкою формулою залежно потенційної енергії від узагальнених координат, взаємозв'язком рівнянь поступального і обертального рухів і їх нелінійністю. Отримати загальне рішення нелінійної системи рівнянь (12) при довільних початкових умовах не представляється можливим, тому досліджувалася динаміка ЧЕ поблизу точки рівноваги чисельними методами.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки. Оскільки розглядається бездисипативна електромеханічна система, під дією імпульсу прискорення виникають незгасаючі власні коливання ЧЕ, причому на коливання по осі датчика (координата x_1) не впливають на збурення по іншим координатам. Механічно осьові коливання розв'язані з іншими модами коливань, тому, якщо система знімання інформації побудована таким чином, що фіксує тільки зміщення ЧЕ уздовж осі, завдання виділення корисного сигналу значно спрощується.

Розрізняються коливання і по частоті. Однак відмінності не настільки великі, щоб на цій основі розробляти частотні фільтри, що дозволяють виділяти корисний сигнал. За величиною частота осьових коливань ЧЕ, рівновагу якого здійснено при $x_1 = 1.34$, приблизно дорівнює $\omega_1 \approx 120 \text{ c}^{-1}$ ($\nu = 20$ Гц). Для того щоб власні коливання ЧЕ не накладалися на сигнал, що підлягає ідентифікації, корисний сигнал ω_c з повинен задовольняти умові $\omega_c < \omega_1$. Така умова цілком прийнятно для гравіметричних приладів, що працюють як на стаціонарному, так і на рухомій основі.

Характер коливань дозволяє також зробити висновок про те, що положення рівноваги не є нестійким.

Дослідження стійкості динамічних систем розглянутого типу зручно проводити за допомогою другого (або прямого) методу Ляпунова, який дозволяє не тільки встановити факт стійкості деякого рішення нелінійної системи, а й оцінити область стійкості, якість перехідних процесів та інші характеристики системи. Суть його полягає в тому, що висновок про стійкість або нестійкість

рішень робиться на основі дослідження поведінки допоміжної функції (функції Ляпунова) уздовж рішення системи. Для стійкості положення рівноваги функція Ляпунова повинна бути позитивно певної і спадати або бути рівною нулю уздовж рішення системи [18].

Як відзначають багато авторів, побудова функції Ляпунова для конкретної нелінійної системи є надзвичайно тонкою справою і залежить як від виду системи, так і від дослідника. В даному випадку, оскільки досліджується консервативна електромеханічна система (взаємодії, що призводять до дисипації енергії, не враховуються), в якості функції Ляпунова обрана повна енергія системи.

Очевидно, що кінетична енергія позитивно визначена (див. (10)), а для позитивності потенційної енергії, записаної в квадратичній формі (9), будемо вимагати відповідно до критерію Сільвестра [10] виконання нерівностей.

$$\begin{aligned}
 \left. \frac{\partial^2 U_M}{\partial x_1^2} \right|_0 &> 0, \\
 \left. \frac{\partial^2 U_M}{\partial x_2^2} \right|_0 &> 0, \\
 \left. \frac{\partial^2 U_M}{\partial x_3^2} \right|_0 &> 0, \\
 \left. \frac{\partial^2 U_M}{\partial x_4^2} \right|_0 &> 0, \\
 \left. \frac{\partial^2 U_M}{\partial x_5^2} \right|_0 &> 0, \\
 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x_2^2} \frac{\partial^2 U}{\partial x_5^2} \right)_0 - \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x_2^2 \partial x_5} \right)_0^2 &> 0, \\
 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x_3^2} \frac{\partial^2 U}{\partial x_4^2} \right)_0 - \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x_3^2 \partial x_4} \right)_0^2 &> 0.
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Ці нерівності є достатні умови стійкості рівноваги (6). Основною вимогою для вираження похідних через повні еліптичні інтеграли є збіг осей ЧЕ і нерухомих кілець. Для цього необхідно координатам $x_2 = x_5$ надати значення (6), а положення на осі точки x_{10} залежить від електромагнітних параметрів і обмежується тільки конструктивними міркуваннями. Крім того, для забезпечення взаємодії вільних кілець з нерухомими струми повинні протікати у всіх контурах. На практиці це досягається наступним чином. Співвісні нерухомі кільця 3 розташовуються на відстані $2h^{(0)}$ один від одного. Між ними співвісно поміщають чутливий елемент, відстань між кільцями якого дорівнює $2e$, причому величина $h - e$ для пар кілець 2 і 3 однакова. В цьому положенні нерухомі кільця живляться струмом заданої величини, потім все контури переводяться в надпровідний стан, при цьому потягів кілець виявляються «замороженими». Оскільки струми в контурах ЧЕ відсутні, взаємодії чутливого елемента з нерухомими контурами немає. Токи в контурах ЧЕ наводяться при зміні зазору $h^{(0)} - e$. Досягається це тим, що відстань між нерухомими кільцями змінюють до величини $2h$, а положення ЧЕ залишається симетричним щодо котушок 3. При цьому в котушках 2 наводяться струми, і в залежності від того, позитивна величина $h - h^{(0)}$ або негативна, між вільними і нерухомими контурами виникають сили взаємного тяжіння або відштовхування. Зміна $h - h^{(0)}$ за величиною істотно впливає на характер залежності магнітних сил від змінної x_1 . Таким чином, похідні в нерівностях (4.1) є функціями координати x_1 і параметрів $h^{(0)}$, h , e , але якісні зміни у взаємодії контурів відбуваються лише при зміні різниці $h - h^{(0)}$. Тому в подальшому параметрам $h^{(0)}$ і e додамо конкретні значення: $h^{(0)} = 1, 2$; $e = 1, 0$, h ($m = 1, 2$; $e = 1, 0$, а область стійкості знайдемо для змінних x_1 , і $h - h^{(0)}$.

Формули для других похідних (4.1) дозволяють визначити зміни магнітного взаємодії при малих відхиленнях системи від положення рівноваги. Наприклад, похідну $\partial^2 U / \partial q_1 \partial q_j$ можна трактувати як узагальнену силу $\partial U / \partial q_i$, що з'являється в результаті зміни координати (або навпаки, силу $\partial U / \partial q_j$ при зміні

координати q_i). На ділянках, де друга похідна d^2U/dq_i^2 позитивна, зі збільшенням збільшується сила, спрямована проти чинного обурення, таким чином система стійка по даній координаті. На координати, взаємозв'язані за допомогою змішаної похідної, накладаються додаткові умови (останні дві нерівності в (13)).

Область стійкості показана на рисунку 4.2, а на рисунку 4.3 наведено залежності осьових магнітних сил, взятих з протилежним знаком, від координати x_i при зазначених значеннях $h - h^{(0)}$: криві 1 - магнітні сили, що враховують взаємодію верхньої котушки 2 з нерухомими струмами; криві 2 - сили, що діють на нижню котушку 2; криві 3 - результуюча сила, що діє на ЧЕ з боку нерухомих контурів. на малюнках заштриховані області, де виконуються достатні умови стійкості рівноваги (6).

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що запропонована конструкція датчика покращує характеристики підвісу, заснованого на взаємодії двох надпровідних контурів. Наявність жорсткого зв'язку між кільцями чутливого елемента послаблює обмеження, пов'язані з нестійкістю за кутом між осями ЧЕ і нерухомих кілець, а значить зазор між взаємодіючими кільцями може бути як завгодно малим.

У пропонованому датчику для окремо взятого кільця чутливого елемента характер взаємодії залишається таким же, як і для ізольованої пари контурів [13], але залежність результуючої сили, що діє на ЧЕ, від зсуву по x_i монотонна, причому $\frac{\partial^2 U}{\partial x_1^2} > 0$ при всіх допускаються конструкцією значеннях x_i (рисунок 4.3, а, б), т. е. при $h < x_i < 2h - e$. Збільшення h веде до розширення області стійкості, однак для кожного h^0 існує деяке значення h (в даному випадку $h \approx 1,35$), вище якого всередині з'являється область нестійких положень рівноваги, тобто. превалює закон дипольного взаємодії.

Вирішальну роль у формуванні області стійкості відіграє факт появи сили відштовхування між кільцями. В області $h - h^{(0)} < 0$ де сили відштовхування діють при будь-яких зсувах ЧЕ, стійких положень рівноваги взагалі не існує.

Представлені на рисунку 4.3 графіки залежності сил, що діють на ЧЕ, від зсуву x_1 несуть інформацію і про чутливість магнітного підвісу до зміни зовнішніх (гравітаційних) сил. При виконанні певних умов підвіс може володіти нульовою жорсткістю в точці $x_1 - h = 0$ (рисунку 4.3, в), тобто поява мінімального збурення може викликати значний зсув ЧЕ.

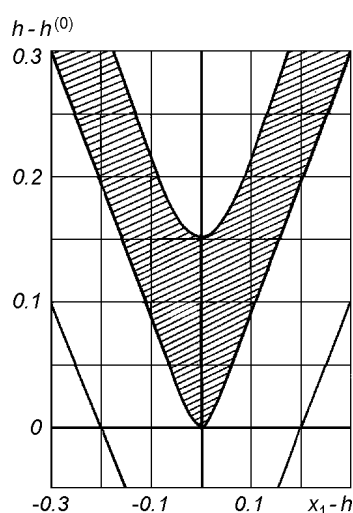


Рис. 4.2. Область стійких положень рівноваги ЧЕ датчика (заштрихована)

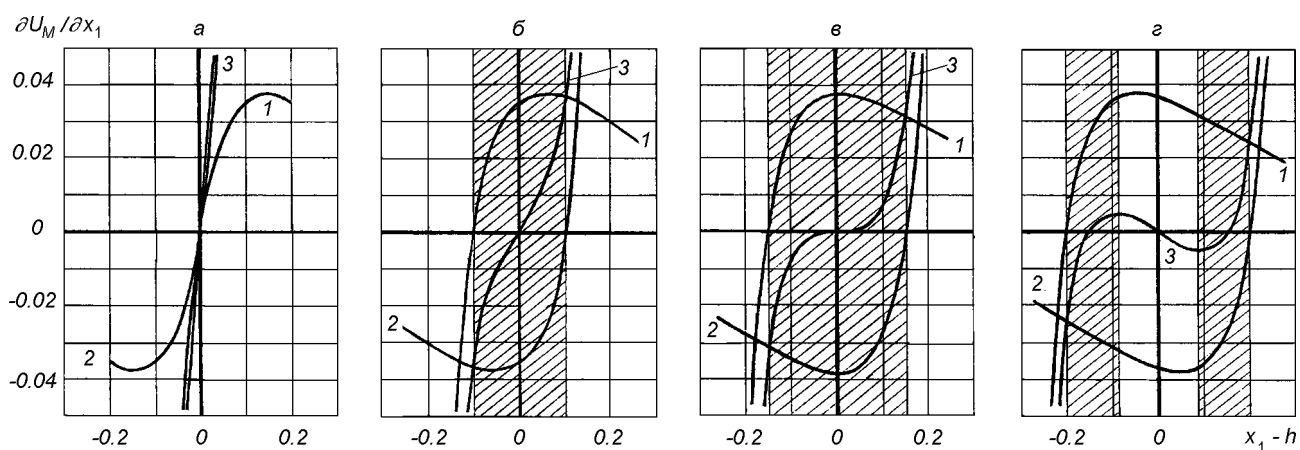


Рис. 4.3. Графіки залежних магнітних сил, що діють на ЧЕ, від зміщення ЧЕ

4.3. Функціональна структура вимірювально-обчислювальної системи.

На рисунку 4.4 основні складові частини цієї системи: надпровідний підвіс, оптична система реєстрації інформації та мікропроцесорний обчислювальний блок.

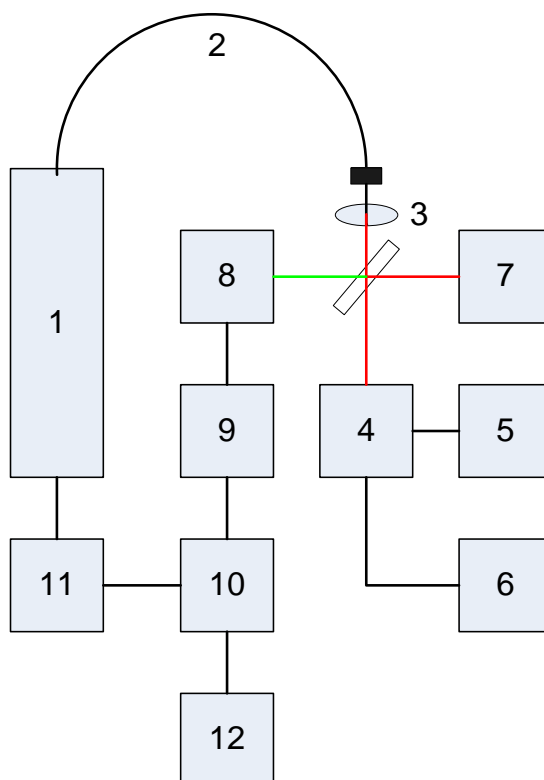


Рис. 4.4. Функціональна схема вимірювально-обчислювальної системи: 1 – кріостат з вставкою, на якому змонтована оптична головка; 2 - оптичний кабель; 3 – фокусуєчий об’єктив; 4 – головка з лазерним діодом; 5 – блок живлення лазерного діода; 6 – блок стабілізації температури; 7 – інтерферометр Фарбі – Перо ИФП-1; 8 – фотоприймач; 9 – синхронний детектор; 10 - мікроконтролер з вбудованим ЦАП і АЦП; 11 – модулятор; 12 – блок клавіатури та індикації.

Підвіс є коаксіальним, тобто утримуючі магніти зміщені з коаксіальної позиції на позиції, коли їх осі паралельні осі підвісу. З різних варіантів кількості утримуючих магнітів (два, три, чотири) було обрано систему з чотирьох рідкісноземельних постійних магнітів з вертикальною віссю. Кожен магніт в горизонтальній площині мав прямокутну форму. Вертикальні магнітні осі чотирьох наборів магнітів були зміщені від осі підвісу так, що утворився простір розміром 18 мм в діаметрі для розміщення оптичного датчика. Проблема не вертикальності положення підвішеної вільної пробки, що виникла в результаті неоднакових магнітних властивостей наборів постійних магнітів, вирішувалася двома змінами конструкції. Одна з них – збільшення маятниковості пробної маси, інша зводилася до тонкого феромагнітного кільця, що компенсувало азимутальну

неоднорідність магнітного поля підвісу. Після теоретичних та експериментальних досліджень підвісу, оптичного датчика та програмного забезпечення вимірювань, аналізувалася доцільність реалізації обраної в проекті конструкції в цілому. У частині підвісу основні роботи стосувалися змін конструкції магнітної системи, коли замість розміщення утримуючих магнітів на осі підвісу вони повинні були бути зміщені від осі для розміщення на ній оптичного лазерного датчика.

Нова конструкція робочого макету (рисунок 4.5) включає чотири набори постійних рідкісноземельних магнітів, вертикальні осі яких були зрушені від осі підвісу в чотирьох радіальних напрямках. Пробна маса має два ніобій-титанових кільця. Верхня площина пробного тіла була полірованою як відбиваюча площина для лазерних променів. Левітаційний зазор в залежності від маси пробного тіла був від 7-ми до 15-ти міліметрів. На базі цієї робочої моделі було проведено теоретичні та експериментальні дослідження спільної роботи системи підвіс – реєстрація. Аналізувався вплив фізичного стану гелію (рідина або газ) на спільну роботу системи підвіс – реєстрація. Вивчався також вплив пасивного фільтра на точність вимірювань. Аналізувалися чинники, що впливають на зменшення жорсткості підвісу, зокрема, наявність додаткової феромагнітної маси на вільній пробі.

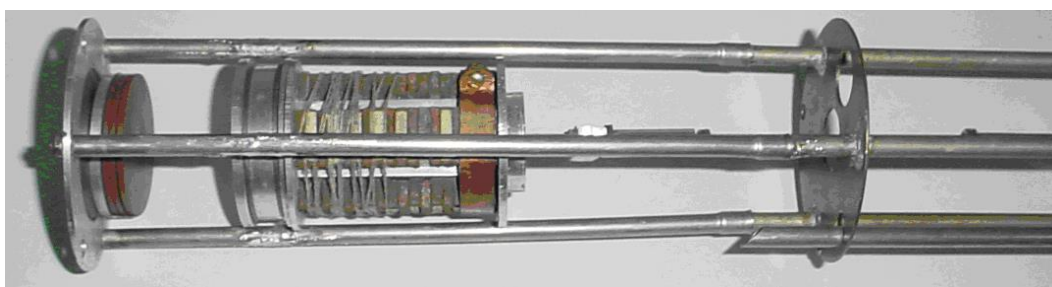


Рис. 4.5. Надпровідна система підвіски пробного тіла

Були проведені експериментальні дослідження спільної роботи з визначення властивостей робочого макету гравіметра, динамічних характеристик магнітного підвісу вільної пробної маси робочого макета гравіметра (спільно з групою Інституту фізики НАНУ), а також доопрацювання чутливого елемента в

частині магнітного підвісу, що було продиктовано експериментальними роботами.

4.4. Оптичні вимірювання на основі інтерферометра Майкельсона

Для проведення оптичних вимірювань краще всього використовувати інтерферометр Майкельсона. ОпМетодика проведення таких вимірювань приведена в [1].

Багато оптичних двопробневих інтерференційних схем можуть бути зведені до ідеалізованої схеми (рисунок 4.6). Розщеплення початкової хвилі від джерела на дві та подальше їх зведення на екрані - загальна ознака всіх двопробневих інтерференційних схем. Таке розщеплення може бути виконано багатьма методами, і саме цим різні інтерференційні схеми відрізняються одна від одної.

Цей прилад зіграв та відіграє величезну роль в історії науки. Так 14 вересня 2015 р. колаборація LIGO вперше спостерігала коливання простору-часу - гравітаційні хвилі, що дійшли до Землі після катастрофи, що сталася далеко у Всесвіті. Гравітаційні хвилі були детектовані за допомогою інтерферометра Майкельсона із довжиною оптичних шляхів $L_1 = L_2 = 4$ км [28 -30].

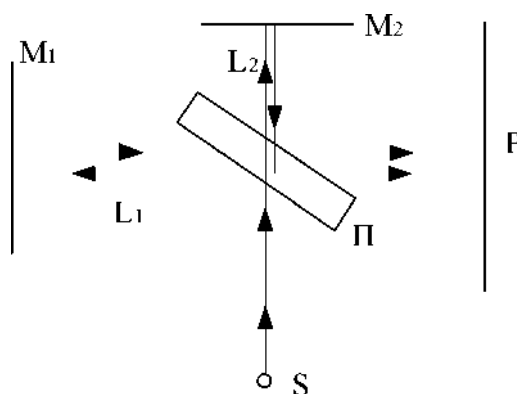


Рис. 4.6. Спрощена схема інтерферометра Майкельсона

Світло від джерела S розщеплюється на напівпрозорій пластинці P і поширюється далі у двох перпендикулярних напрямках. Різниця ходу між

променями в точці спостереження P дорівнює $\Delta = 2(L_2 - L_1)$, де L_1 і L_2 — довжини «плечей» інтерферометра. При чіткій перпендикулярності дзеркал M_1 і M_2 інтерферометр може бути від'юстований так, що промені, які надходять у точку спостереження, виявляються паралельними. У цьому випадку кут сходження променів $\varphi = 0$ і, отже, все інтерференційне поле на екрані має однакову інтенсивність (ширина інтерференційних смуг стала дуже великою), що залежить від реалізованої різниці ходу Δ . Зазначимо, що реально умова $\varphi = 0$ виконується лише в межах невеликої площі екрана, на якій спостерігається інтерференція. При більших розмірах екрана на ньому мають спостерігатися інтерференційні кільця.

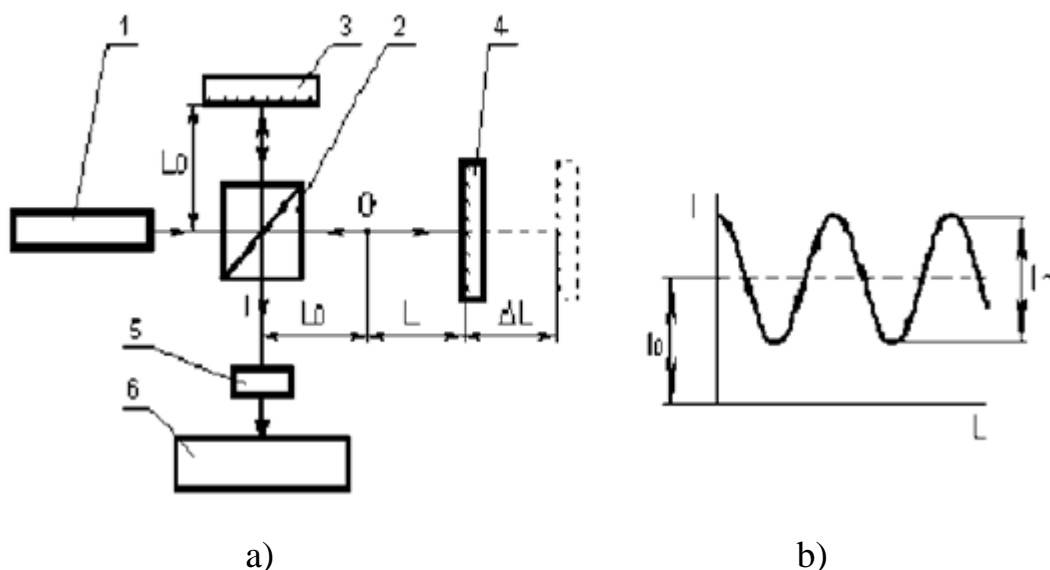


Рис. 4.7. Вимір відстані й лінійного переміщення:

- а) схема лазерного вимірювального інтерферометра (ЛВІ);
 б) закон зміни інтерференційного сигналу під час переміщення вимірювального дзеркала

З розвитком лазерів, як джерело в інтерферометрі Майкельсона, стали використовуватися стабілізовані за частотою одночастотні та одномодові He-Ne лазери. Дві особливості випромінювання цих лазерів визначають успішність їхнього застосування в інтерферометрі. Перша - висока стабільність частоти випромінювання. Кількісна оцінка стабільності частоти випромінювання

визначається через величину абсолютної й відносної нестабільності частоти. Друга - дуже мала розбіжність пучка випромінювання - $3 \cdot 10^{-3}$ рад.

Узагальнена схема виміру відстаней і лінійних переміщень за допомогою стабілізованого за частотою лазера представлена на рисунку 4.7 [31 - 33].

До складу схеми ЛВІ входять: лазер - 1; світлодільник - 2; опорний відбивач - 3; вимірювальний відбивач - 4, що переміщується за напрямком вимірів; фотоприймач - 5; блок керування й обробки сигналу - 6;

Для роботи інтерферометра необхідне випромінювання, хвильовий фронт якого максимально наближається до плоского фронту. Для технічного забезпечення таких властивостей випромінювання лазера використовується коліматор, що формує плоско-паралельний пучок діаметром 3 - 5 мм. Спочатку за допомогою першої групи лінз збільшується розбіжність лазерного пучка, після чого випромінювання за допомогою іншої групи лінз перетворюється в плоскопаралельний пучок.

Наступний елемент, що забезпечує роботу інтерферометра Майкельсона - світлодільник 2, за допомогою якого виконується поділ оптичного пучка. В одному випадку світлодільник ділить випромінювання з лінійною поляризацією на два пучки з рівною потужністю. Цей випадок належить до інтерферометра, що працює з одночастотним випромінюванням. В іншому випадку пучок, що містить дві частоти, кожна з яких має свою поляризацію, світлодільник розділяє за напрямками поляризації.

Світлодільник може бути виконаний у вигляді ділильного кубика або ділильної пластини, робоча поверхня яких вкрита діелектричною багат шаровою плівкою. В одному випадку плівка ділить енергію падаючого випромінювання, в іншому - плівка, що має поляризаційні властивості, поділяє випромінювання з ортогональною поляризацією.

Інтенсивність інтерференційного сигналу I на фотоприймачі 5 змінюється за законом (рисунок 4.7, б):

$$I = I_0 + I_{\sim} \cos(4\pi L/\lambda), \quad (4.2)$$

де I_0 і I_{\sim} - постійна складова й амплітуда змінної складової сигналу відповідно;

$2L$ - геометрична різниця ходу інтерферуючих пучків;

λ - довжина хвилі випромінювання.

Відстань від нуля інтерферометра до вимірювального відбивача 4 дорівнює:

$$L = \frac{m\lambda}{2} = \frac{\varphi\lambda}{4\pi} \quad (4.3)$$

де m - порядок інтерференції,

φ - фаза інтерференційного сигналу I , обумовленого формулою (4.2).

4.2 Принцип роботи інтерферометрів із рахуванням смуг

Метод рахунку смуг полягає у вимірі (рахунку) кількості періодів зміни інтерференційного сигналу. Для запобігання помилкового рахунку внаслідок механічних вібрацій і турбулентності повітря здійснюють реверсивний рахунок, при якому визначають знак кожного рахункового періоду збільшення порядку інтерференції [34 - 38]

Широке розповсюдження отримав спосіб рахунку смуг на основі квадратурних сигналів. Квадратурними називають два сигнали, що містять інформацію про одну й ту саму характеристику, але зміщені за фазою на $\pi/2$:

$$\begin{aligned} I_1(t) &= I_{10} + I_{1\sim} \cos[\varphi(t),] \\ I_2(t) &= I_{20} + I_{2\sim} \sin[\varphi(t)]. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Фіксуючи перетинання сигналами середнього рівня (4.3), вимірюють збільшення характеристики з дискретом $\pi/4$ (рисунок 4.8, б). Знак кожної дискрети визначають за фазовим зміщенням між сигналами, що дорівнює $\pi/2$ або $3\pi/2$.

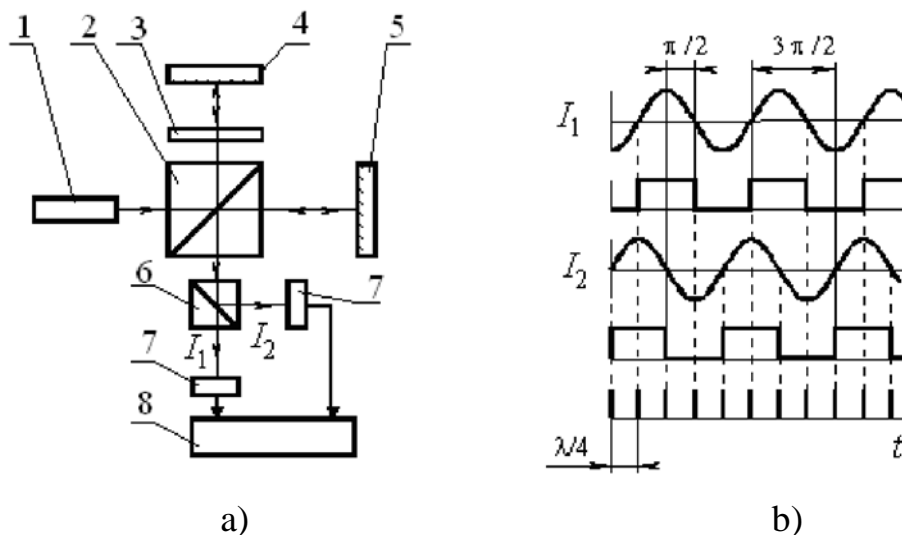


Рис. 4.8. Розрахунок смуг на основі квадратурних сигналів: а) схема ЛВІ; б) схема обробки інтерференційних сигналів

Схема ЛВІ складається з лазера - 1; світлоділительної призми-куб - 2; фазової пластини $\pi/8$ - 3; опорного відбивача - 4; вимірювального відбивача - 5; поляризаційної призми-куб - 6; фотоприймача - 7; блока керування й обробки сигналів - 8.

Структура ЛВІ забезпечує одержувати сигнали оптичним способом. Площина поляризації випромінювання одночастотного лазера 1 становить кут 45° із площиною креслення. Фазова пластинка 3, одна із власних осей якої лежить у площині креслення, вносить в інтерферометр, утворений світлоділительною призмою-кубом 2 і опорними відбивачами 4, різницю $\lambda/4$, для складових випромінювання лазера паралельної й перпендикулярної площині креслення. Поляризаційна призма-куб 6 розділяє ці складові. Внаслідок інтерференційні сигнали I_1 і I_2 на фотоприймачах 7 зміщені за фазою на $\pi/2$.

Інформаційний спектр сигналів в виразах (4.3) містить постійні складові I_{i0} і I_{i20} . Подібні ЛВІ називають системами без переносу спектра сигналу або системами "постійного струму". Метод розрахунку смуг на основі квадратурних інтерференційних сигналів не обмежує швидкість зміни й максимальне значення діапазону вимірюваних відстаней. Час виміру ЛВІ, що працюють на основі цього методу, визначається тільки пропускною спроможністю електронного тракту й може становити соті частки мікросекунди (швидкість рахунку смуг 100 МГц), що

при дискреті $\lambda/4$ відповідає швидкості збільшення до 16 м/с. Вимірювані відстані перевищують десятки метрів. Мінімальну похибку виміру відстані визначає дискрета рахунку, найчастіше вона дорівнює $\lambda/8$.

Аналіз основних складових похибки вимірювання переміщень

Фізичними межами точності виміру є похибка виміру фази інтерференційного сигналу $\Delta\phi$ і відносна похибка визначення довжини хвилі лазера $\Delta\lambda/\lambda$. Диференціюючи вираз (4.3), максимальна похибка виміру відстані буде мати вигляд [39 — 41]:

$$\Delta L = \frac{\Delta \cdot \phi}{4\pi} + L \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (4.5)$$

Під час виміру малих відстаней (ближньої зони) ($L \ll \Delta\phi\lambda^2 / (4\pi\Delta\lambda)$) ΔL визначається тільки похибка $\Delta\phi$. Під час виміру більших відстаней (далекій зони) ($L \gg \Delta\phi\lambda^2 / (4\pi\Delta\lambda)$) ΔL визначається величиною $\Delta\lambda/\lambda$. В інших випадках необхідно враховувати обидва доданки в виразі (4.6).

Довжина хвилі лазера в повітрі $\lambda = \lambda_{\text{вак}} / n$, де $\lambda_{\text{вак}}$ - довжина хвилі лазера у вакуумі, n - показник заломлення повітря. Тому похибка довжини хвилі містить дві складові:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{\text{вак}}}{\lambda} + \frac{\Delta n}{n} \quad (4.6)$$

де $\lambda_{\text{вак}}$ - похибка відтворення довжини хвилі лазера у вакуумі,

Δn - похибка виміру показника заломлення повітря.

В табл 4.1 наведені мінімальні значення похибки, досягнуті на практиці в ЛВІ.

Таблиця 4.1

Мінімальні значення похибки, досягнуті на практиці в ЛВІ

$\Delta\phi/2\pi$	$\Delta\lambda/\lambda$			$\Delta n/n$
	Лазер CO ₂	Лазер He-Ne	Лазерний діод	
10^{-4}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-7}

У 1990 р. на Міжнародному симпозиумі "Вимір розмірів у процесі виробництва й контролю якості" для промислового застосування ЛВІ фізичними межами, що обмежують точність вимірів, було прийнято вважати: відносну похибку довжини хвилі лазера у вакуумі 10^{-10} ; показник заломлення повітря - 10^{-8} ; а фізичними межами точності виміру довжини: 0,01 мкм для більших відстаней і 1 нм - для малих.

Дослідження похибки показника заломлення повітря

Основні фактори заломлення, що впливають на нестабільність показника повітря - це температура, вологість і тиск. Для визначення поточного показника заломлення повітря застосуємо метод виміру за допомогою відповідних датчиків значень температури t , вологості e і тиску p за допомогою формули Едлена [39 - 42]:

$$(n - 1) = \frac{(nc-1) \cdot p}{1+0,003671 \cdot t} - \left(5,722 - \frac{0,0457}{\lambda_{\text{вак}}^2}\right) \cdot e \cdot 10^{-8}, \quad (4.7)$$

e ($nc-1$) - рефракція стандартного повітря при $t = 15^\circ\text{C}$ і $p = 760$ мм. рт. ст.; $\lambda_{\text{вак}}$ — довжина хвилі випромінювання лазера у вакуумі.

Розглянемо реальні границі зміни параметрів середовища: тиск повітря (720 - 790 мм.рт.ст.); температура (10 - 30°C); вологість (середня 10 мм. рт. ст.); довжина хвилі випромінювання лазера у вакуумі (0,6929 мкм).

Розрахунки за формулою Едлена наведені у табл. 4.2.

Результати обчислення за формулою Едлена

p , мм.рт.ст.	n , за $i = 10$ °C	n , за $i = 20$ °C	n , за $i = 30$ °C
720	1,000266	1,000257	1,000248
730	1,000270	1,000260	1,000252
750	1,000277	1,000268	1,000259
770	1,000285	1,000275	1,000266
790	1,000292	1,000282	1,000273

З одержаних результатів можна зробити висновок, що показник заломлення повітря збільшується при збільшенні тиску й зменшенні температури. При $i = 10$ °C і тиску $p = 790$ мм.рт.ст. отримаємо максимальний показник заломлення повітря $n_{\max}=1,000292$. При $i = 30$ °C і тиску $p = 720$ мм.рт.ст. мінімальний показник заломлення повітря дорівнює $n_{\min}=1,000248$.

Середнє значення похибки зміни показника заломлення повітря без урахування параметрів середовища дорівнює:

$$\Delta n = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{2}$$

$$\frac{\Delta n}{n} = 2,200 \cdot 10^{-5},$$

Точність виміру датчиків:

- $\Delta p = 0,1$ мм. рт. ст. (для датчика тиску);
- $\Delta t = 0,1$ мм. рт. ст. (для датчика температури).

Для знаходження максимального значення похибки заломлення повітря з урахуванням параметрів середовища необхідно продеференціювати формулу Едлена й взяти суму диференціалів для випадку максимального значення похибки:

$$\Delta n = \frac{(nc-1) \cdot 0,001138823 \cdot \Delta p}{(1+0,003671 \cdot t)} + \frac{(nc-1) \cdot 0,00128823 \cdot 0,003671 \cdot p \cdot \Delta t}{(1+0,03671 \cdot t)^2}, \quad (4.8)$$

Результати розрахунку максимальної похибки зміни показника заломлення з урахуванням параметрів середовища наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Таблиця розрахунків

p , мм.рт.ст.	$\Delta n/nt = 10$	$\Delta n / nt = 20$	$\Delta n / nt = 30$
720	$1,314 \cdot 10^{-7}$	$1,238 \cdot 10^{-7}$	$1,169 \cdot 10^{-7}$
730	$1,327 \cdot 10^{-7}$	$1,250 \cdot 10^{-7}$	$1,180 \cdot 10^{-7}$
740	$1,340 \cdot 10^{-7}$	$1,262 \cdot 10^{-7}$	$1,192 \cdot 10^{-7}$
750	$1,353 \cdot 10^{-7}$	$1,275 \cdot 10^{-7}$	$1,203 \cdot 10^{-7}$
760	$1,366 \cdot 10^{-7}$	$1,287 \cdot 10^{-7}$	$1,214 \cdot 10^{-7}$
770	$1,379 \cdot 10^{-7}$	$1,299 \cdot 10^{-7}$	$1,226 \cdot 10^{-7}$
780	$1,393 \cdot 10^{-7}$	$1,311 \cdot 10^{-7}$	$1,237 \cdot 10^{-7}$
790	$1,406 \cdot 10^{-7}$	$1,323 \cdot 10^{-7}$	$1,249 \cdot 10^{-7}$

З отриманих даних видно, що максимальне значення похибки зміни показника заломлення при зміні параметрів середовища спостерігатиметься при температурі 10°C і тиску 790 мм. рт. ст. - $\Delta n/n = 1,406 \cdot 10^{-7}$.

Визначення похибки виміру відстаней

Аналіз впливу довжини хвилі і нестабільності атмосферних умов на похибку вимірювання переміщень показує на необхідність визначення, коли вирішальною буде похибка довжини хвилі, а коли - нестабільність атмосферних умов [41 - 48].

При дослідженні діапазону зміни похибки довжини хвилі при значеннях $\lambda_{\text{вак}}/\lambda = 10^{-5}$, $\lambda_{\text{вак}}/\lambda = 10^{-7}$, $\lambda_{\text{вак}}/\lambda = 10^{-9}$ отримаємо розраховані значення похибки зміни показника заломлення: $\Delta n/n = 1,406 \cdot 10^{-7}$, $\Delta n/n = 2,2 \cdot 10^{-5}$.

Діапазон зміни $\Delta\phi$ має два значення: $\Delta\phi = \pi/2$, $\Delta\phi = \pi/16$.

При дослідженні діапазону виміру довжин L в інтервалі від 1 мкм до 1 м і розрахунку із отриманих залежностей, можна виділити основні три групи:

1. Вирішальний вплив має похибка довжини хвилі та нестабільність атмосферних умов:

- випадок: $\lambda_{\text{вак}} / \lambda = 10^{-5}$, $A_{\text{п}} / \text{п} = 2,2 \cdot 10^{-5}$;
- випадок: $\lambda_{\text{вак}} / \lambda = 10^{-5}$, $A_{\text{п}} / \text{п} = 1,406 \cdot 10^{-7}$.

2. Вирішальний вплив має похибка довжини хвилі та нестабільність атмосферних умов:

- випадок: $\lambda_{\text{вак}} / \lambda = 10^{-7}$, $A_{\text{п}} / \text{п} = 1,406 \cdot 10^{-7}$.

3. Вирішальний вплив має нестабільність атмосферних умов, але наразі реальна похибка довжини хвилі $\lambda_{\text{вак}} / \lambda = 10^{-7}$:

- випадок: $\lambda_{\text{вак}} / \lambda = 10^{-9}$, $A_{\text{п}} / \text{п} = 1,406 \cdot 10^{-7}$.

4.5. Система обробки сигналів

Для обробки сигналів у криогенно-оптичному гравіметрі використовується кілька етапів:

Перший етап складається з компенсації шуму, яка впливає на механічну частину пристрою.

Другий етап орієнтований на використання зворотної динамічної моделі датчика.

На третьому етапі обробки сигналу використовується адаптивний цифровий фільтр.

Поєднання левтуючого зонда, оптичної системи реєстрації та нових інструментів обробки сигналів, надають нашому пристрою, нові динамічні властивості.

Функціональна структура системи обробки сигналів складається з адаптивного компенсатору, адаптивного Калманівського та цифрових фільтрів, оцінювачів на основі оберненої динамічної моделі та показників Ляпунова, нейромережі, системи, що моделює динаміку пробного тіла та бази даних. Оригінальність підходу до обробки визначається засобами, що інтегрують оцінювання гравітаційного збурення з моделями обробки даних. ASP включає підсистему взаємодії ядра програми з базою даних, а також з алгоритмами для її взаємодії з зовнішнім сенсором і моделями оцінки сигналів. Вона забезпечує

також послідовне включення програмних модулів, що можуть бути розроблені на основі Matlab. Були передбачені спеціальні засоби для суттєвого зменшення рівнів внутрішніх та генерованих світлом шумів на основі використання особливостей оперування детектора і програмного забезпечення.

Проведено аналіз характеристик інтенсивності шуму оптичного вимірювача координат з метою використання його результатів при розробці чутливого елемента. Було отримано кореляційну функцію та спектральну щільність шуму з урахуванням властивостей полосової фільтрації в інтерферометрі і довільної модуляції хвильового фронту. Аналіз включав модуляцію дробового шуму як спеціального випадку шуму інтенсивності. Для детектування обмеженого дробовим шумом сигналу було знайдено відношення сигнал-шум як функції модуляційних параметрів і описана процедура оптимізації відношення сигнал-шум по відношенню до демодуляції сигналу. Запропоновано алгоритм компенсації шуму, який базується на глобальній оптимізації. Цей компенсатор має можливість отримувати корисну інформацію з зашумленого оптичного сигналу. Інформаційний сигнал являє собою оптичний сигнал, який спотворено адитивним гаусівським шумом. Система компенсації шуму припускає використання двох типів сенсорів. Первинний сенсор формує зашумлений вихідний сигнал. Вторинний сенсор вимірює шум, який некорельований з корисним сигналом і корельований з шумом в первинному сенсорі.

Розроблено нейромережні алгоритми аналізу сигналів та оцінювання гравітаційних збурень на основі аналізу інформаційного підходу. Досліджено похибку ентропійно-мінімізаційного підходу в ідентифікації динаміки пробного тіла. Проведено порівняльний аналіз мінімізації ентропії похибки та мінімізації ентропії середньоквадратичної похибки стосовно короткочасового прогнозу експериментальних даних. Статистичні властивості похибки оцінювання центральних моментів високого порядку експериментальних часових рядів та прогнозування використовуються в якості критеріїв порівняння. Розроблено математичний опис нової структури нейромережі інгібіторного типу, які складають важливий клас нейромереж. Розглянуто і визначено необхідні умови

стійкості поведінки компетитивної інгібіторної нейромережі (КІНМ) та розроблено алгоритм, що базується на умовах стійкості. Розроблено алгоритм реалізації інгібіторної нейромережі в застосуванні до задачі оцінювання сигналу, що характеризує положення левітуючого тіла в просторі. Алгоритм КІНМ може бути реалізований у послідовній або паралельній формі. Моделювання КІНМ за допомогою запропонованого алгоритму вимагає приблизно на три порядки менше часу ніж безпосереднє інтегрування рівнянь. Розв'язок задачі оцінювання впливу збурень на левітуюче тіло має важливе значення для успішного виконання фізичних експериментів. Запропонований алгоритм буде використано для виділення корисних компонент вимірів при дослідженні поведінки левітуючого тіла.

Запропоновано ряд методів обробки сигналу з метою пошуку найбільш інформативних характеристик щодо оцінки корисного сигналу та чисельні алгоритми, призначені для автоматизації обчислень гравітаційних збурень. Було запропоновано чотири підходи до обробки сигналів:

- a) підхід на основі використання нормалізованого по методу найменших квадратів адаптивного фільтру в рамках методу лінійного прогнозу;
- b) підхід на основі адаптивного компенсатора з RLS фільтром;
- c) підхід на основі нестационарного канального оцінювання та фільтру Калмана;
- d) підхід на основі цифрового фільтру з скінченною імпульсною характеристикою.

Було запропоновано декілька реалізацій на основі запропонованих підходів. Перша реалізація згідно пункту a) побудована на основі методу найменших квадратів та адаптивного фільтру з лінійним прогнозом

Друга реалізація згідно пункту b) побудована з використанням відомого в літературі підході на основі адаптивного коменсатора з RLS фільтром.

Третя реалізація базується на нестационарному канальному оцінюванні та фільтрі Калмана.

Четверта реалізація базується на формулі Савицького-Голая для фільтрації. Показано, що частковим випадком цифрового фільтру Калмана є фільтр Савицького-Голая. Проведено експериментальне тестування алгоритмів по експериментальним даним.

Перша реалізація дозволила визначити параметри, що забезпечують стійкість алгоритмів.

4.6. Чисельний аналіз моделі

Розглянемо систему оцінки, показану на (рисунок 4.9). Нехай $S_1; S_2; \dots; S_{14}$ - оператори перетворення сигналів, побудовані з використанням математичних моделей підсистем 1–14 (рисунок 4.9). Тоді математичну модель системи оцінки можна виразити набором таких операторів:

оператор S_1 , що вимірює сигнал $u_3(t)$,

оператор S_2 , що вимірює вектор стану y ,

оператор адаптивного оцінювання S_4 ,

інверсний оператор $S_5 = (S_1 S_2)$,

оператори зчитування сигналів S_7, S_9 ,

оператор ідентифікації параметрів білінійної моделі спостереження S_{10} ,

оператор S_{11} , що синтезує параметри контролера,

і оператори S_{13}, S_{14} , що підтримують відношення сигнал/шум $r_1(t) = s_1(t)$ необхідні для оптимальної фільтрації.

Оператори S_{13}, S_{14} побудовані з використанням гамільтонової моделі системи вільних фізичних маятників з парою коаксіальних ідеально провідних кілець на їх торцях і двоканальною схемою компенсації шуму для $s_1(t)$.

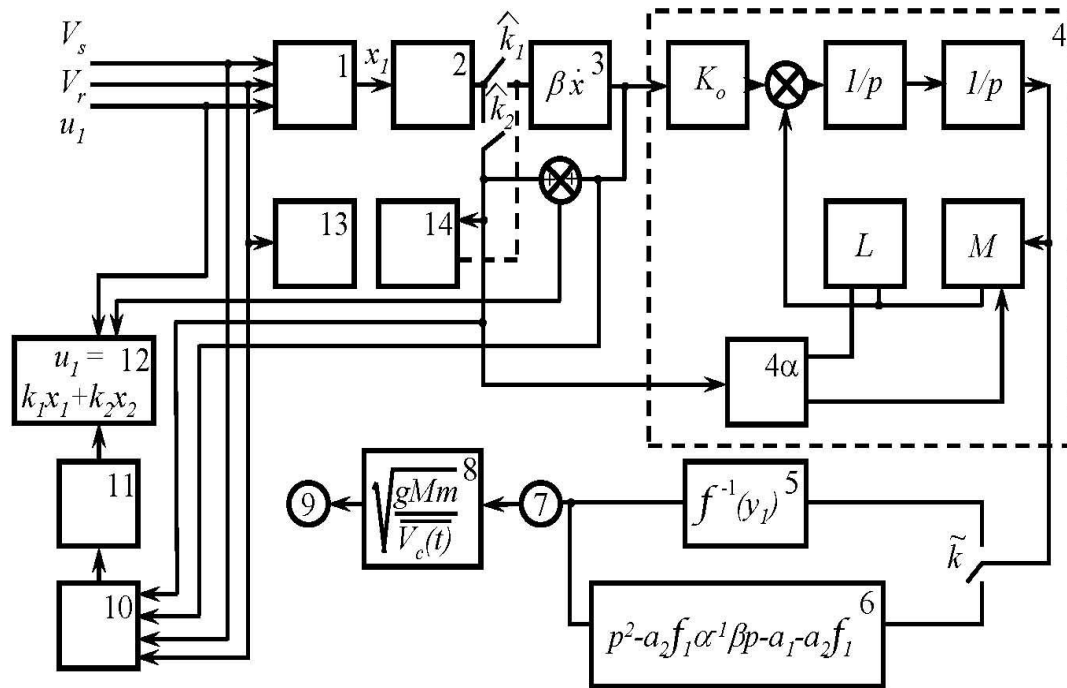


Рис. 4.9. 1) зонд у магнітній потенціальній ямі; (2) квантовий інтерферометр; (3) диференціатор; (4) адаптивний фільтр; (4а) блок адаптації; (5, 6), зворотна до моделей 1, 2; (7) показник гравіметра; (8) визначення координати x_m ; (9) переміщення зчитування датчика; (10) дволінійний ідентифікатор моделі; (11) синтез параметрів контролера; (12) зворотній зв'язок; (13) компенсація вібрацій опорних датчиків; (14) двоканальний компенсатор шуму.

Чисельне моделювання підтвердило незмінність математичної моделі оцінки щодо шуму $u_4(t)$ з верхньою межею спектру та до нерухомого шуму $s(t)$ з невідомим параметром спектральної щільності. Встановлено інваріантність моделі до імпульсних збурень та досліджено динаміку білінійної моделі спостереження з вихідним зворотним зв'язком. Конкретні сигнали використовувались для аналізу ефективності цифрової адаптивної фільтрації в системі оцінки. Оцінки мінімального виявленого сигналу, отримані в цьому дослідженні, свідчать про придатність методики до деяких фундаментальних експериментів, таких як перевірка принципу еквівалентності в теорії відносності, виявлення гравітаційних хвиль тощо. Подальше поліпшення чутливості може бути досягнуто шляхом оптимізації моделі вимірювання з використанням результатів Ermoliev and Wets (1984) та Horst and Pardalos (1995).

4.7. Методика прогнозої оцінки нафтогазоносності території

Пропонується методика оцінки прогнозої оцінці нафтогазоносності території на основі інтегрованого використання даних дистанційного зондування (гіперспектральних, спектральних, гравіметричних та ін.), яка призначена для створення кількісних карт прогнозої оцінки перспективності території на пошуки покладів нафти і газу. На всіх етапах робіт, для систематизації, зберігання і обробки інформації широко використовуються ГІС-технології.

Прогнозна оцінка перспективності території ґрунтується на використанні зв'язку покладів вуглеводнів (ПВ) з розривними структурами різного масштабного рівня, вузлами перетину розломів, кільцевими структурами, антиклінальними складками. Також враховується проявленість покладів вуглеводнів в спектральних яркостях рослинного покриву.

Прогноз покладів проводиться на основі врахування всього комплексу ознак. Для оцінки перспективності території використовуються різні методи прогнозу, засновані на SVM-методі. В результаті виходить оцінка ймовірності виявлення об'єктів прогнозу в кожній точці досліджуваної території, яка відповідає мінімальній площі, розпізнаваної на космічних знімках. Достовірність результатів прогнозу підтверджена чисельним моделюванням, даними буріння на ділянках.

4.8. Гравіметричні виміру на основі надпровідного датчика нового типу

Надпровідна високоточний гравіметрична система орієнтована на пошук корисних копалин, виявлення осередків підготовлювані землетрусів, геофізичних і астрофізичних досліджень в стаціонарних та польових умовах. Гравіметр дозволяє виявляти і досліджувати нафтогазоносні лінзи, рудні тіла, алмазні трубки та інші корисні копалини. Крім того, він дозволяє виявляти вулканічні камери, тектонічні розломи, плотностні неоднорідності кордону геосфер та інші науково - дослідні об'єкти. Він застосуємо в стаціонарних та польових умовах будь-якої складності, в морських і аерокосмічних дослідженнях, при підготовці будівельних і гірничо - прохідницьких робіт. Дія приладу заснована на явищі

магнітної потенційної ями з автоматичною стабілізацією становища рівноваги пробного тіла. Слід зауважити, що ринок абсолютних гравіметрів, придатних для роботи в польових умовах практично не заповнений. Лідером (після злиття з американською виробником «Лакоста - Ромберг») є канадська фірма «Сінтрекс».

Для вирішення завдання деталізації гравітаційного поля Землі використовуються вимір гравітаційних градієнтів по трьох просторових напрямках на основі трьохосного гравітаційного градієнтометра, який може бути встановленим на борту супутника, та визначення орбіти супутника за допомогою апаратури супутникової навігації. Кінцевими результатами роботи можуть бути методика, алгоритми і результати уточнення тонкої структури гравітаційного поля Землі на основі математичної обробки супутникових градієнтометричних вимірів європейського супутника GOCE. Вченими різних країн проводяться детальні вимірювання параметрів гравітаційного поля з використанням різних типів гравіметрів.

4.9. Етапи робіт по прогнозній оцінці нафтогазоносності території

1. Збір та систематизація наявних даних (гіперспектральних, спектральних, гравіметричних та ін.) Для проведення прогнозних досліджень, виділення найбільш інформативних ознак, що забезпечують подальшу комп'ютерну обробку. Аналіз інформативності зібраних даних з використанням метода головних компонент для рішення задач прогноза і формування вектора пошукових ознак.
2. Адаптація розроблених програм прогнозу для конкретних геолого-геофізичних умов.
3. Розрахунки прогнозної оцінки перспективності території на виявлення покладів УВ по комплексу обраних пошукових ознак з використанням спеціальних математичних методів.
4. Аналіз результатів прогнозної оцінки перспективності території на виявлення покладів УВ з використанням експертних оцінок і підготовка рекомендацій на проведення подальших робіт.

4.10. Прогнозна оцінка нафтогазоносності території: SVM-метод

Робота з використанням методу розпізнавання образів складається з трьох етапів:

- Перший етап - формування вектора найбільш інформативних ознак об'єктів пошуку в просторі використовуваних пошукових ознак (структурних, спектральних та ін.);
- Другий етап - рішення задачі розпізнавання образів з використанням SVM методу;
- Третій етап - порівняння всієї досліджуваної території з сформованим «образом» об'єктів пошуку. Прогнозною оцінкою нафтогазоносності служить міра подібності ділянок території з «образом» об'єкта прогнозу.

Підхід до обробки найбільш інформативних ознак базується на системному використанні нелінійних методів фільтрації, класифікації та розпізнавання образів. Метод опорних векторів (SVM - support vector machines) - це набір схожих алгоритмів виду «навчання з учителем », які використовуються для задач класифікації та регресійного аналізу. Цей метод належить до сімейства лінійних класифікаторів. Він може також розглядатися як спеціальний випадок регуляризації за А. Н. Тихоновим. Особливою властивістю методу опорних векторів є безперервне зменшення емпіричної помилки класифікації і збільшення зазору. Тому цей метод також відомий як метод класифікатора з максимальним зазором.

Основна ідея методу опорних векторів - переведення вихідних векторів у простір більш високої розмірності і пошук розділяє гіперплощини з максимальним зазором в цьому просторі. Дві паралельних гіперплощини будуються з обох сторін гіперплощин, яка розділяє наші класи. Розділяюча гіперплощина максимізує відстань до двох відповідних паралельних гіперплощин. Алгоритм працює в припущенні, що чим більше різниця або відстань між цими паралельними гіперплощинами, тим менше буде середня помилка класифікатора.

Знайдена пара гіперплощин, які дають максимальну ширину смуги, шляхом вирішення наступного завдання оптимізації з обмеженнями

$$\min_w \frac{1}{2} \|w\|^2, \quad (4.9)$$

за умови

$$\begin{aligned} z_{j'}(x_{j'} \cdot w + b) - 1 &\geq 0 \\ \forall j', j' &= 1, \dots, J, \end{aligned} \quad (4.10)$$

Один з підходів до класифікації найбільш інформативних ознак на класів, залежно від структури району пошуку, заснований на методі опорних векторів. Для навчання алгоритму використані еталонні структури. Валідація моделі класифікації проводилася з використанням знань експертів. Після того, як була проведена класифікація даних, результати порівнювалися з результатами класифікації експертами. Якщо результати відрізнялися, пропонувалося заново навчити алгоритм класифікації. Експериментальні дослідження показали високу ймовірність правильного розпізнавання передбачуваного району пошуку.

Висновки до розділу 4

Описано конструкцію надпровідного чутливого елемента, та проведені експериментальні дослідження динаміки та стікості надпровідного підвісу.

1. Результати вимірювання гравітаційної константи G , отриманої в лабораторії на відстанях близько 1 м, за допомогою надпровідного гравіметра. Прилад вимірював гравітаційний ефект завдяки кільцевій масі близько 330 кг, що рухалася вгору-вниз навколо гравіметра. В результаті експерименту для гравітаційної константи отримано значення $G = (6.679 - 0: 008) 10^{-11} \text{ Нм}^2 / \text{кг}^2$, яке в межах своєї невизначеності узгоджується з останнім вимірюванням анемометра CODATA, що відповідає точності вимірювання для Землі прискорення гравітаційного поля на рівні $\sim 10^{-10}$ гАлл.

2. Описано перспективні інформаційні технології прогнозої оцінки нафтогазоносності території. Запропоновано методи математичного моделювання та класифікації для використання в геології.
3. Запропоновано використовувати метод опорних векторів для класифікації векторів найбільш інформативних ознак з урахуванням процедури валідації. Методи дослідження можуть бути використані в різних областях знань, у тому числі в екології та сільському господарстві.
4. Проведені прогнозні модельні дослідження дозволили отримати оцінки ймовірності нафтогазоносності територій за матеріалами дистанційних досліджень, незалежно від геологічних і природних умов.
5. Комплексування матеріалів дистанційних досліджень з даними геолого-геофізичних досліджень підвищує вірогідність і ефективність результатів прогнозу.
6. Запропонована методика прогнозу нафтогазоносності дозволяє:
 - (а) проводити оцінку перспективності території на нафту і газ незалежно від пори року та природних умов;
 - (б) видавати рекомендації з постановки детальних пошукових робіт;
 - (в) оперативно проводити прогнозні дослідження на будь-якій території в необхідному масштабі;
 - (г) виділяти локальні ділянки з максимально можливою вірогідністю виявлення покладів нафти і газу, таким чином скорочуючи фінансові витрати і терміни на виконання пошуково-розвідувальних робіт.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему, 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.

1. Запропоновано нові принципи створення керованих ЧЕ гравіметра з використанням явища високотемпературної надпровідності, що дозволяє створювати моделі ЧЕ зі стабілізованою рівновагою вільного левітуючого тіла.

2. Досліджено системні властивості ЧЕ і отримані умови стійкості рівноваги пробного тіла по частині змінних в магнітному полі двох нерухомих кілець.

3. 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.

4. Вирішено проблему оцінювання гранично малого зашумленого сигналу з невідомими параметрами спектральної щільності, діючого на макроскопічне пробне тіло у керованій потенціальній ямі. Запропоновано більш точна математична модель безперервного і релейного оцінювання гранично малого зашумленого сигналу на основі білінійної моделі вимірювання. Розв'язана також задача ідентифікації БМ ЧЕ.

5. Поставлена і вирішена 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. Отримано періодограмні оцінки параметрів вхідного сигналу, що нелінійно входять в рівняння регресії відомого виду. Розроблені алгоритми оцінювання є більш точними в порівнянні з відомими і дозволяють знайти величину мінімально виявленого сигналу. Отримані оцінки безпосередньо

застосовні для оцінювання величини гравітаційного сигналу в керованих кріогенних вимірювачах. Запропоновано нові типи спостерігачів сигналів.

6. Чисельне моделювання підтвердило інваріантність математичної моделі оцінювання до шуму з обмеженим зверху спектром і до стаціонарного шуму з невідомим параметром спектральної щільності. Встановлено інваріантність моделі до збурень імпульсного характеру і досліджена динаміка БМ вимірювання зі зворотним зв'язком по виходу. На прикладах конкретних сигналів проведено аналіз ефективності цифрової адаптивної фільтрації в системі оцінювання. Отримані оцінки сигналу дають підставу на проведення експериментів фундаментального характеру: перевірки принципу еквівалентності в теорії відносності, виявлення гравітаційних хвиль і інш. Подальше підвищення чутливості може бути отримано оптимізацією моделі вимірювання.

7. Запропоновано нову ідею щодо можливості використання нейронної мережі для визначення невідомого вхідного впливу за експериментально вимірними положенням та швидкістю левітуючого пробного тіла. Показано, що ідеї та методи теорії керування можуть бути використані для стабілізації левітуючого пробного тіла. Побудовано нейромережевий алгоритм оцінювання слабких гравітаційних збурень. Запропоновані алгоритми забезпечать більш стабільну роботу приладів на основі ефекту магнітної левітації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А.П.Быков, В.П.Кулеш, Л.М.Москалик, А.А.Орлов. Применение лазерных измерителей перемещений при создании высокоточных силоизмерительных приборов. Сб. “Датчики систем измерения, контроля и управления”, Пенза, ППИ,1985,с.67-71.
2. А.П.Быков, В.П.Кулеш, Л.М.Москалик. Лазерный гетеродинный интерференционный гравиметр. Разведка и охрана недр, 2005, №12, с.65-68.
3. Безвесільна О. М. Апаратно-програмний комплекс для експериментального дослідження ємнісного гравіметра [Текст] / О. М.Безвесільна, К. С. Козько // Вісник інженерної академії України. – 2013. –№2. – с.15-17
4. Безвесільна О. М. Конструкція та математична модель ємнісного гравіметра [Текст] // О.М. Безвесільна, К. С. Козько // VIII НПК студентів та аспірантів "Погляд у майбутнє Приладобудування".– Київ, 2015. – С. 76..
5. В. Гніденко, М. Наливайчук, В. Яценко. Нейромережеве оцінювання слабких впливів на кероване левітуюче пробне тіло // Наукові праці національного університету харчових технологій.–Київ: Видавництво національного університету харчових технологій.— 2013. —№ 48. — 2013. —С. 44–48.
6. В. П. Кулеш, В. Л.Москалик, Л. М. Москалик. Устройство для счёта интерференционных полос. А.с.№1598610, 1988 г.
7. В.П.Кулеш. Анализ работы электрооптического частотного модулятора в качестве оптического гетеродина. Измерительная техника, 1986, № 12, с.33-35.
8. Гравиметр. Патент РФ на изобретение № 2253882, МПК G 01 V 7/02, авторы А.П.Быков, В.П.Кулеш, Л.М.Москалик, О.Е.Енина. - Бюл.№16, 2005.
9. К.Е.Веселов. Гравиметрическая съёмка. М.: «Недра», 1986.
10. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справочная книга. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
11. Кнопов П. С., Яценко В. А. Оценивание неизвестных параметров почти периодического сигнала по управляемым билинейным наблюдениям // А и Т 1992. - №3. – С. 65-73.

12. Козорез В. В. Динамические системы свободных магнитно взаимодействующих тел / В.В. Козорез – Киев: Наукова думка, 1981. – 140 с.
13. Крючков Е.И., Яценко В.А. // Проблемы управления и информатики. 2003. № 6. С. 106.
14. Лялько В.И. Методология и опыт поиска залежей углеводородов на суше с использованием аэрокосмической информации. /А.И. Архипов, З.М. Товстюк, О.И. Левчик., Т.А. Архипова, Т.В. Осканьян, В.И. Лялько, М.А. Попов. // Науки про землю та космос суспільству. Праці Першої наукової конференції Київ, 25—27 червня 2007 р. –С. 55- 60.
15. М. Наливайчук., В. Яценко, В. Гніденко. Вимірювальна—обчислювальна система для отримання оперативної інформації щодо гравітаційного поля // Комп'ютерно—інтегровані технології: освіта, наука, виробництво.—Луцк: Видавництво Луцького національного технічного університету. — 2013. — №12.—С. 167–173.
16. Меркин Д.Р. Введение в теорию устойчивости движения. 3-е изд. М.: Наука, 1987.
17. Михалевич В. С., Козорез В. В., Рашкован В. М. и др. “Магнитная потенциальная яма” – эффект стабилизации сверхпроводящих динамических систем. Киев: Наук. думка, 1991.
18. Наливайчук М. Вимірювальна-обчислювальна система для отримання оперативної інформації щодо гравітаційного поля /М. Наливайчук., В. Яценко, В. Гніденко. // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво.—Луцк: Видавництво Луцького національного технічного університету. – 2013.—№12. –С. 167- 173.
19. Наливайчук Н. Аппаратно программное обеспечение адаптивного опто-криогенного гравиметра на основе наноструктур/Н. Наливайчук, В. Яценко. // Збірник тез 13-ї української конференції з космічних досліджень.—Київ: Видавництво “Кафедра”: – 2013.—С. 139.
20. Негрійко А. М., Качалова Н.М., Малицький Р.А., Потьомкіна Ж.В., Романенко В.І., Сушій В.М., Удовицька О.Г., Ходоковський В.М., Яценко В.О., Яценко

- Л.П. "Оптичний лазерний сенсор для надпровідного гравіметра". Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції "Сенсорна електроніка і мікросистемні технології", Україна, Одеса, 1-5 червня 2004, стор. 152.
21. Плишко Н. Л. Моделирование управляемых процессов в гравиметрическом датчике//Труды Третьей укр. конф. по перспективным космическим исследованиям. — Кацивели, Крым, 2003. - С. 73.
22. Плишко Н. Л., Яценко В. А. Алгебраические аспекты нелинейной фильтрации в сенсорах//Физико-технические и технологические приложения математического моделирования: Сб. на-уч. тр. — Київ: Ін-т математики НАН України, 1998. — С. 204-206.
23. Плишко Н. Л., Яценко В. А. Системи управління с сенсорами и коммуникационными сетями в контуре обратной связи // Труды Четвертой Укр. конф. по автоматическому управлению "Ав-томатика-97", Черкаси, 1997. - Т. 2. С. 53.
24. Плишко Н. Л. Моделивання динаміки та стійкості керованого криогенного чутливого елементу//Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1 (24). Дніпропетровськ, 2003. С. 146-152.
25. Тронин А. А. Обзор достижений последнего десятилетия в области применения спутниковых методов дистанционного зондирования при геологических и геофизических исследованиях./В. И. Горный, А. А. Тронин// Современные проблемы дистанционного зондирования земли и космоса. 2012. Т9. №5. С 116-132.
26. Яценко В. Нейромережеве оцінювання слабких впливів на кероване левітуюче пробне тіло /В. Гніденко, М. Наливайчук, В. Яценко. // Наукові праці національного університету харчових технологій.—Київ: Видавництво національного університету харчових технологій. — 2013.— № 48. —С. 44-48.
27. Яценко В. А. Адаптивное оценивание воздействий на макроскопическое тело в управляемой потенциальной яме // Кибернетика. — 1989. № 2. С. 81-85.

28. Яценко В. О., Плишко Н.Л. Білінійна модель системи керування з чергою у контурі зворотного зв'язку//Вісн. Київ, ун-ту. — 2000. - - С. 309-311.
29. Яценко В., Бекмуратов Т., Козориз В., Козориз О, Кунцевич В., Ісмаїлі Х., Набиев О., Негрійко О. Черемних О., Яценко Л., Живило. Разработка криогенно—оптического датчика для высокочувствительных гравитационных измерений // Космическая наука и технология.— 2003.— 9, N5. —С. 71–75.
30. Яценко В.А., Плишко Н.Л. Нейросетевое оценивание слабих воздействий на левитирующее пробное тело//Физико-технические и технологические приложения математического моделирования: Сб. науч. тр. - Київ: Ін-т математики НАН України, 1998. - С. 271-273.
31. Яценко В.А., Плишко Н.Л. Оценивание слабих воздействий на левитирующее пробное тело//Труды Пятой Укр. конф. по автоматическому управлению "Автоматика-98", Киев, 1998. Т. 3. С. 345-349.
32. Яценко В. О. Моделювання та оптимізація адаптивного криогенного гравіметра /В. О. Яценко, М. В. Наливайчук //19 Міжнародна конференція з автоматичного керування, 26-28 вересня 2012. Київ, Україна. – С. 344.
33. A. Bernard, P. Touboul. The GRADIO accelerometer: design and development status // Proc. of ESA—NASA Workshop on the Solid Earth Mission ARISTOTELES. Anacapri (Italy), 23–24 September 1991.
34. A. Bernard, M. Gay, A—M. Mainguy. Super—cactus: project of 10–11 g three—axis accelerometer // Acta Astronautica.—1980.—7, N 4–5.—P, 401–416.
35. Abbaspour E., Huang R.S. and Kwok C.Y. A Novel Electromagnetic Accelerometer // IEEE. Electron Device Letters. — 1994. — 15, N 8. — P. 272—273.
36. Abbaspour—Sani E, Huang R.S, Kwok C.Y. A novel electromagnetic accelerometer // Electron Device Lett IEEE.—1994.— 15, N8.—P.272–273.
37. Agnew, D. C., 1997. NLOADF: a program for computing ocean tide loading. J. Geophys.Res. 102 (B3), 50109-51110.
38. B. Norling. Accelerometers: current and emerging technology // Kinematic Systems in Geodesy, Surveying, and Remote Sensing International Association of Geodesy Symposia.— 1991.—107.— P. 70—84.

39. Bao M.—H. Micro mechanical transducers pressure sensors, accelerometers and gyroscopes // Elsevier B.V. — 2000.— 8. — P. 378.
40. Chan H.A., Paik H.J. // Phys. Rev. D. June 1987. V. 35. № 12. P. 3551.
41. Chu H., Mills J., Cleghorn W. Design of a high sensitivity capacitive force sensor // Proc. of nanotechnology IEEE 7th conference.— 2007.—P. 29–33.
42. Chu H.K., Mills J.K., Cleghorn W.L. Design of a high sensitivity capacitive force sensor // Proc. of nanotechnology IEEE 7th conference. — 2007.— P. 29–33.
43. Crossley, D., and Hinderer, J., 2002. GGP Ground Truth for Satellite Gravity Missions. Bull. d'Inf. Marées Terr. 136, 10735-10742.
44. Crossley, D., Hinderer, J., Boy, J-P., 2004. Regional gravity variations in Europe from superconducting gravimeters. J. Geodyn. 38 (3-5), 325-342.
45. Crossley, D., Hinderer, J., Boy, J-P., 2005. Time variations of the European gravity field from superconducting gravimeter. Geophys. J. Int., 161, 257-264.
46. D. Blair. Superconducting accelerometer using niobium-on-sapphire rf resonator // Review of Scientific Instruments.—50, N 3.—P.286–291.
47. Dickey J.O. Lunar laser ranging: continuing legacy of the Apollo program // Science.—1994.—265.—P. 482—490.
48. Dirmeyer, P. A., Z. Guo, and X. Gao, 2004. Validation and forecast applicability of multi-year global soil wetness products. Journal of Hydrometeorology, 5., 1011-1033.
49. Fan, Y., Van den Dool, H. (2004). The CPC global monthly soil moisture data set at 1/2 degree resolution for 1948-present. J. Geophys. Res. 109, D10102, doi:1029/2003JD004345.
50. Goodkind J. M. The superconducting gravimeter./ J. M. Goodkind // Rev. Sci. Instrum.-Vol. 70, № 11. – P. 4131-4152, 1999.
51. Goodkind J. M. / J. M. Goodkind, R. J.Warburton IEEE Trans. Magn. MAG – 11, № 2, 1975.
52. H. Farahani, J.Mills, W. Cleghorn. Design, fabrication and analysis of micromachined high sensitivity and 0% cross—axis sensitivity capacitive accelerometers // Microsystem Technologies.—2009.—15, N 12.— P.1815–1826.

53. H.-G.Wenzel. Zur Genauigkeit von gravimetrischen Erdezeitenbeobachtungen. Wissenschaftliche Arbeiten der Lehrstuehle fuer Geodaesie. Photogrammetrie und Kartographie an der technischen Universitaet Hannover nr. 67, VI...XV, Hannover 1976.
54. Ilmastokatsaus, 1999-2005. Finnish Meteorological Institute, (Monthly survey in Finnish).
55. K.McPherson, M. Nati, P. Touboul, A. Schütte, G. Sablon. A summary of the quasi-steady acceleration environment on-board STS-94 (MSL-1).—http://biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/id/43136421.html.
56. Kozorez O., Kozoriz V., Ljashko O., Trachenko R. About the Free Body Dynamics in the Case of Gravitational Interaction and Magnetic Interaction of Quasi Coaxial Super Conductive Rings. Proc. of the NASU, 2004. (In English, accepted to be published.
57. Kozoriz V. Novel Magnetic Levitation and Propulsion Phenomena/ V. Kozoriz// ISBN 966-7108-10-4, Zaporizhya, 1999, 271 p.
58. Kryuchkov Yev. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. September 2004. V. 14. № 3. P. 2001.
59. Llubes, M., Florsch, N., Hinderer, J., Longuevergne, L., Amalvict, M., 2004. Local hydrology, the Global Geodynamics Project and CHAMP/GRACE perspective: some case studies. J. Geodynamics 38, 355-374.
60. M. Nati, A. Bernard, B. Foulon, P. Touboul. ASTRE – a highly performans accelerometer for the low frequency range of the microgravity environment // 24th Conference on environmental systems, 20—23 June 1994.—Friedrichshafen (Germany). — 1994.
61. Meteorological yearbook, 1994-1998. Finnish Meteorological Institute, SVT, Official Statistics of Finland Status of the MEMS industry.—http://www.i-micronews.com/upload/Rapports/MEMS_report09_flyer_launch_offer_oct09.pdf.
62. MHR, 1994-2005. Monthly Hydrological Report, Finnish Environment Institute, Hydrology and Water Management Division, 1994 – 2005, Helsinki.

63. Moon F. C. Superconducting Levitation: Application to bearings and magnetic transportation, John Willey & Sons, NY, 1994, 295 p.
64. Moon F. C. Superconducting levitation: application to bearings and magnetic transportation.—New York: JohnWilley&Sons, 1994.—295p.
65. N. Yazdi, F. Ayazi, K. Najafi. Micromachined inertial sensors // Proc. of the IEEE.— 86, N8.—P. 1640–273.
66. Neumeyer, J., Barthelmes, F., Dierks, O., Flechtner, F., Harnisch, M., Harnisch, G., Hinderer, J., Imanishi, Y., Kroner, C., Meurers, B., Petrovic, S., Reigber, Ch., Schmidt, R., Schwintzer, P., Sun,H.-P., Virtanen, H., 2006. Combination of temporal gravity variations resulting from Superconducting Gravimeter recordings, GRACE satellite observations and global hydrology models. J. Geodesy, doi: 10.1007/S00190-005-0014-8.
67. Neumeyer, J., Schwintzer, P., Barthelmes, F., Dierks,O., Imanishi, Y., Kroner, C., Meurers, B., Sun, H.-P., Virtanen, H., 2004. Comparison of Superconducting Gravimeter and CHAMP Satellite Derived Temporal Gravity Variations. Ed. C. Reigber et. Al. Earth Observations with Champ, Results from Three Years in Orbit. Springer, 31-36.
68. P. Pardalos, P. Knopov, S. Urysev, V. Yatsenko. Optimal estimation of signal parameters using bilinear observation / Rubinov, A. and Gloveredited, B. // Optimization and Related Topics. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht–Boston–London.-2001.-P.103-116.
69. P. Pardalos, V. Yatsenko. Optimization and Control of Bilinear Systems: Theory, Algorithms, and Application. Springer.—2009.—P.360.
70. P. Shirron, V. Moody. Development of a superconducting angular accelerometer // Proc. of SPIE 2814, Cryogenic optical systems and instruments.—1996.—VII.—P.187.
71. P. Touboul, B. Foulon. Space accelerometer developments and drop tower experiments // Space Forum.— 1998.—N4.—P.145–165.
72. P. Touboul. Space accelerometers: present status // Lecture Notes in Physics.— 2001.—562.—P. 273—291.

73. Partridge A., Reynolds J.K., Chui B.W., Chow E.M., Fitzgerald A.M., Zhang L., Cooper S.R., Kenny T.W. A high performance planar piezoresistive accelerometer // *The Journal of Microelectromechanical Systems*. — 2000.— 9, N 1. — P. 58–66.
74. Partridge A., Reynolds J., Chui B., Chow E., Fitzgerald A., Zhang L., Cooper S., Kenny T. A high performance planar piezoresistive accelerometer // *Microelectromechanical Systems*.—2000.—9, N1.—P.58–66.
75. Prothero W.A. A superconducting gravimeter/ W.A.Prothero, J. M. Goodkind// – *Rev. Sci. Instr.*, № 2, Vol. 39, № 9. 1968.– P. 1257 – 1261.
76. R. Rummel, O.L. Colombo. Gravity field determination from satellite gradiometry // *Bull. Geod.*—1985.— 59.—P. 233–246.
77. Rodell, M., P. R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J. K. Entin, J. P. Walker, D. Lohmann, and D. Toll, 2004. The Global Land Data Assimilation System. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 85, 381–394.
78. Su Y., Heckel B.R., Adelberger E.G., Gundlach J.H., Harris M., Smith G.L., Swanson H.E. New tests of the universality of free fall // *Phys. Rev.*—1994.—51, N6.—P.31—35.
79. Tervo, M., Virtanen, H., Bilker-Koivula, M., 2006, Environmental loading effects on GPS time series, *Bull. d'Inf. Marées Terr.* (ibid).
80. Touboul P., Metris G., Lebat V., Robert A. The MICROSCOPE experiment, ready for the in—orbit test of the equivalence principle // *J. Class. Quantum Grav.*—2012.—29, N18.—P.1–14.
81. Touboul P., Rodrigues M. The MICROSCOPE space mission // *J. Class. Quant.*—2001.—18, N13.—P. 2487–2498.
82. Touboul P., Rodrigues M., Willemenot E., Bernard A. Electrostatic accelerometers for the equivalence principle // *J. Class. Quantum Grav.*—1996.—13, N.11A.—P.67–78.

83. V. A. Yatsenko Super light-weight materials for space-instrumentation // Збірник тез 12-ї української конференції з космічних досліджень.—Київ: Видавництво “Кафедра”. 2012. —С. 58.
84. V. Yatsenko, M. Nalyvaichuk. Cryogenic—Optical Gravimeter: Principles, Methods and Applications // Kharkov University Vestnik, Ser. Radiophysics and Electronics.—2011.— P. 107–113.
85. V. Yatsenko, M. Nalyvaichuk. Modeling and Optimization of Cryogenic—Optical Gravimeters // International journal of information theories & applications. — 2012. —19, N 3.— P. 232–240.
86. V. Yatsenko, N. Nalyvaichuk. Opto-cryogenic sensitive element with ultrasensitive laser interferometer and microprocessor controller // Abstracts. IEEE International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL.—2013. —Kharkov, UIRE.— 2013.—P. 39.
87. V. Yatsenko. Modeling and optimization of a superconducting space accelerometer based on functional thin films // International conference “Learning and Intelligent Optimization Conference” (LION 8), Florida.—USA, Feb 16-21, 2014 (Abstract).
88. V. Yatsenko. Functional structure of the cryogenic optical sensor and mathematical modeling of signal. Cryogenic Optical Systems and Instruments // Proc. of SPIE. Vol. 5172.-2003.-P. 97-107.
89. V. Yatsenko., N. Nalyvaichuk. Modeling and Optimization of Cryogenic – Optical Gravimeters//International Journal: Information Theories & Applications.— 2012.—19, N. 3.—P. 232–240.
90. Van Camp, M., and Vauterin, P., 2005. Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides, Computers & Geosciences 31 (5), 631-640.
91. Vassiloyannis D. et al. The effect of vicinal offcut on the morphology and defect microstructure of YBa₂Cu₃O_{7-x} thin films on (001) SrTiO₃ // Inst. Phys. Conf. Ser. —1997, № 153, Section 10.

92. Vassiloyannis D. The effect of substrate vicinal offcut on the morphology and physical properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films // IEEE Trans. on Appl. Superconductivity.–1999.–V. 9, №2, pt.2. –P. 1638.
93. Vehviläinen, B. and Huttunen, M., 2002. The Finnish watershed simulation and forecasting system (WSFS). XXI Conference of the Danubian countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management. Bucharest, Romania. 2-6 September 2002.
94. Virtanen H., 2000. On the observed hydrological environmental effects on gravity at the Metsähovi station, Finland. In B. Ducarme and J. Barthélemy (eds): Proceedings of the Workshop: High Precision Gravity Measurements with Application to Geodynamics, and Second GGP Workshop. Munsbach Castle (Grand Duchy of Luxembourg), March 24th to 26th. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 17, 169–175.
95. Virtanen, H., 2001. Hydrological studies at the gravity station Metsähovi in Finland. J. Geod. Soc. Japan 47 (1), 328–333.
96. Virtanen, H., 2004. Loading effects in Metsähovi from the atmosphere and the Baltic Sea. J. Geodynamics 38, 407–422.
97. Virtanen, H., 2006. Studies of Earth Dynamics with the Superconducting Gravimeter, Academic Dissertation in Geophysics, University of Helsinki, <http://ethesis.helsinki.fi/>.
98. Virtanen, H., Bilker, M., Mäkinen, J., Poutanen, M., Tervo, M., Vehviläinen, B., Huttunen, M., Mäkinen, R., 2005a. Comparison of modeled variation in water storage in Finland with GRACE and superconducting gravimeter observations. Geophysical Research Abstracts 7, 06248, 2005.
99. Virtanen, H., Bilker, M., Mäkinen, J., Tervo, M., Vehviläinen, B., Huttunen, M., Mäkinen, R., Peltoniemi, M., Hokkanen, T., Pirttivaara, M., 2005b. Comparison of modelled variation in water storage in Finland with superconducting gravimeter observations and with GRACE. Abstract in Dynamic Planet, Cairns, Australia, 22-26 August 2005.

100. Wellhofer F., Woodall P., Norris D., Johnson S., Vassiloyannis D. et al. The effect of substrate-off-cut on the properties of epitaxial thin films of YBa₂Cu₃O_{7-x} grown by pulsed laser deposition // *Appl. Surf. Sci.* –V. 127-129. – P. 525.
101. Yatsenko V. Cryogenic-Optical Gravimeter: Principles, Methods and Applications /V. Yatsenko, M. Nalyvaichuk// *Kharkov University Vestnik, Ser. Radiophysics and Electronics.*-2011.– P. 107-113.
102. Yatsenko V. Global optimization of cryogenic-optical sensor, in *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites*,/V.Yatsenko, P.Pardallos, // K. W.H. Fujisada, J. Lirie, ed., *Proc. SPIE 4550*, pp. 433 - 441, 2001.
103. Yatsenko V. Modeling and Optimization of Cryogenic-Optical Gravimeters /V. Yatsenko, M. Nalyvaichuk // *International Journal information theories & applications.* – 2012. – Vol. 19. № 3.– P. 232-240.
104. Yatsenko V. Modeling of Superconducting Gravimeter for Futute Space Missions: Optimization. Control, and Estimation /V. Yatsenko, M. Nalyvaichuk, V. Gnidenko, O. Kochkodan//2nd International Conference on memory of corresponding member of National Academy of Science of Ukraine V. S. Melnik, 4-6 April, 2012. Kyiv, Ukraine. – P.110.
105. Yatsenko V. Opto-cryogenic sensitive element with ultrasensitive laser interferometer and microprocessor controller / V. Yatsenko, N. Nalivaichuk// *Abstracts. IEEE International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL.*–2013. –Kharkov, UIRE.– 2013.–P. 39.
106. Yatsenko V., Bekmuratov T., Kozorez V., Kunzevich V., Ismaili Kh., Nabiyrv O., Negriyko A., Cheremnichm O., Yatsenko L., Jivilo S. Development of the cryogenicoptical sensor for high-sensitivity gravitational measurements // *Space Sciences and Technologies.* – 2003. –V. 9, №5/6. –P. 71.
107. Yatsenko V.A. On the possibility of application of “Magnetic Potential Well” effect for creation of a graviinertial cryogenic device/V.A. Yatsenko, E.I. Kryuchkov // *Journal of Automation and Information Science*, V. 34, 2003.-P. 106-119.

108. Yatsenko V.A., Kozorez V.V. et al. Cryogenic-optical sensor for high-sensitive gravitational measurements // Journal of Automation and Information Sciences. – 2006.-V. 17, №4. –P. 80-94.
109. Yatsenko V.A. Mathematical modeling and optimization of controlled superconducting sensors with magnetic levitation/V.A. Yatsenko, N.V. Nalivaichuk //Моделювання та дослідження стійкості динамічних систем: Збірник наукових праць міжнародна конференції DSMSI-2011.– Київ, 2011. – С. 146.
110. Yatsenko, V. (2003), Cryogenic sensor for space operation. AeroSence, SPIE Conference ‘AeroSence. Technologies and Systems for Defence & Security’, 21-25 April 2003, Orlando USA, Proc. of SPIE, V. 5071.
111. Yatsenko, V. (2003), Functional structure of the cryogenic optical sensor and mathematical modeling of signal, SPIE Conference ‘Optical Science and Technologies’, 3-8 August 2003, San Diego, USA, Proc. of SPIE, V. 5172.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А - ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ 1

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор з навчальної роботи
технічного
Национального
університету
України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»
к. фелос. н., доц.
Анатолій МЕЛЬНИЧЕНКО

« » 2020 р.



АКТ

Використання результатів дисертаційної роботи ст. викладача Наливайчука М. В. «Методи та засоби комп'ютерної обробки інформації в адаптивних супутникових надпровідних гравіметрах»

Матеріали дисертаційної роботи ст. викладача Наливайчука М. В. «Методи та засоби комп'ютерної обробки інформації в адаптивних супутникових надпровідних гравіметрах» використано:

- при виконанні 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 багатопроцесорних 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).

Заступник декана з наукової роботи
факультету прикладної математики


Ярослав Клятченко

Звідувач кафедри системного
програмування і спеціалізованих
комп'ютерних систем

Віталій РОМАНКЕВИЧ

ДОДАТОК Б - ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ 2

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Проректор з навчальної роботи
 Національного технічного
 університету
 України «Київський політехнічний
 інститут імені Ігоря Сікорського»
 к. філософ. н., доц.
 Анастасія МЕЛЬНИЧЕНКО
 «__» _____ 2021 р.



АКТ

Використання результатів дисертаційної роботи ст. викладача Наливайчука М. В. «Методи та засоби комп'ютерної обробки інформації в адаптивних супутникових надпровідних гравіметрах» кафедрою Системного програмування та спеціалізовані комп'ютерні системи.

Результати дисертаційної роботи на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук ст. викладача Наливайчука М. В. було використано у навчальному процесі кафедрою системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», зокрема в лабораторному практикумі із дисципліни «Моделювання».

При викладанні цієї дисципліни використовувались і використовуються такі матеріали дослідженні автором:

1. Дослідження стійкості динамічних систем по показникам Ляпунова;
2. Методи вирішення оберненої задачі з використання нейронних мереж.

Результати дисертаційної роботи ст. викладача Наливайчука М. В. «Методи та засоби комп'ютерної обробки інформації в адаптивних супутникових надпровідних гравіметрах» використовуються у дипломному проектуванні та магістерських роботах студентів освітньої програми 123. Комп'ютерна інженерія, спеціалізації «Системне програмування і спеціалізовані комп'ютерні системи».

Завідувач кафедри системного
 програмування і спеціалізованих
 комп'ютерних систем


 Віталій РОМАНКЕВИЧ

ДОДАТОК В - Список публікацій здобувача за темою дисертації та
відомості про апробацію результатів дисертації

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.
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.
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)
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.
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. -
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.

8. Наливайчук М. В. Вимірювально 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.

9. Наливайчук М. В. Вимірювально – 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. Nalyvaychuk. N. Measurement – Comuters 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

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–

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.

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 conference Problem 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 Applications. /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, Крим, Судак,. – 2013 – P.391-392.

19. Яценко В. А. Апаратно програмное 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. Моделирование та Оптимізація Адаптивного спутникового гравіметра. /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 gravimeter 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.