

УДК 004.942 + 004.383.3

М. В. Наливайчук

Національний технічний Університет України "Київський політехнічний інститут"

В. О. Яценко

Інститут космічних досліджень НАНУ-ГКАУ

В.В. Гніденко

Національний технічний Університет України "Київський політехнічний інститут"

## ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ ОТРИМАННЯ ОПЕРАТИВНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЩОДО ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОЛЯ

*Обґрунтовані принципи створення перспективного супутникового гравіметра, придатного для отримання оперативної інформації щодо гравітаційного поля. Розроблено математичні моделі динаміки та стійкості керованого надпровідного підвісу. Побудовано чисельні алгоритми оцінювання величини гравітаційного збурення, що впливає на левітуюче пробне тіло. Обґрунтовано технологію створення макету супутникового гравіметра на основі високотемпературних надпровідних наноплівки.*

**Ключові слова:** вимірювально-обчислювальна система, алгоритм, пробне тіло, динамічна модель, гравіметр, моделювання, оптимізація, керуючий вплив, адаптивна фільтрація, мікропроцесор.

*Форм. 11. Рис.4. Літ. 13.*

На сьогодні дистанційне зондування є однією з технологій, що швидко розвиваються. Це індустрія рівня багатьох мільярдів доларів, а число віддалених тематичних зображень в різних ділянках Землі постійно зростає. Вирішення багатьох практичних проблем залежить від широкомасштабного використання вимірювальних систем і принципів, на основі яких вони функціонують. Ці проблеми включають моніторинг природних ресурсів на основі аналізу гравітаційних аномалій, вивчення глобальних геодинамічних процесів, гравітаційного поля Землі, руху полюсів Землі тощо. Щоб збільшити точність спостережень визначення місця розташування та орієнтації для довготривалих авіа польотів і плавань підводних апаратів, необхідно знати гравітаційне поле Землі, включаючи його аномалії. Детальна інформація про гравітаційне поле Землі необхідна також багатьом галузям прикладних наук (космічні дослідження, геологія, навігація, наука про форму Землі). Дійсно, точне і швидке детектування геодинамічних процесів може дозволити отримати дані щодо зародження і розвитку критичних локальних і глобальних екологічних станів. Іншою практичною проблемою є потреба отримання інформації щодо нерозвіданих корисних копалин Землі.

Для розв'язання задачі деталізації гравітаційного поля Землі використовуються вимірювання гравітаційних градієнтів по трьох просторових напрямках на основі тривісного гравітаційного градієнтметра, який може бути встановленим на борту супутника (Рис. 1.), і 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 градієнтметричних вимірювань європейського супутника GOCE. Вченими різних країн проводяться детальні виміри параметрів гравітаційного поля з використанням різних типів гравіметрів.



**Рис. 1.** Для розв'язання задачі деталізації гравітаційного поля Землі доцільно використовувати вимірювання гравітаційних градієнтів та визначати орбіти супутника за допомогою апаратури супутникової навігації.

Гравіметр – дуже тонкий інструмент [5, 13] для вимірювань прискорення сили тяжіння  $g$ . В даний час точність найкращих стаціонарних наземних гравіметрів складає  $10^{-8} g$ , для гравіметрів морського базування –  $10^{-7} g$ , а для авіаційного –  $10^{-6} g$ . Більшість гравіметрів, які випускаються промисловістю, засновані на властивостях розтягнутої пружини або пружних властивостях пружин, виготовлених із кварцу або інших спеціальних сплавів. Їх точність недостатня для вирішення зазначених проблем. Оскільки похибка гравіметрів на основі традиційних принципів стала принципово вичерпаною, багато розробників протягом останніх десятиліть намагаються використовувати нетрадиційні підходи в спробах створити суперточні гравіметри [5, 13]. Ці спроби можна згрупувати за способом неконтактного підвищення чутливої маси гравіметра, за використанням електричних або магнітних сил, за методами вимірювання зміщень чутливої маси гравіметра (системи оптичної реєстрації, Джозефсонівські ефекти як основа вимірювань тощо), а також за комп'ютерними методами обробки сигналів. Стрибок у вдосконаленні гравіметрів став можливим завдяки фінансуванню розробок надпровідних гравіметрів. В роботі [5] Гудкіним описується в деталях надпровідний гравіметр. Як він констатує, базова конструкція надпровідного гравіметра залишається незмінною протягом майже 30-ти років з моменту першої публікації в [13]. Вільний стан (левітація) чутливої маси цього гравіметра досягається на основі ефекту Браунбека-Мейснера [10, 12].

**Постановка проблеми.** Розглядається проблема створення перспективного супутникового гравіметра, придатного для отримання оперативної інформації щодо гравітаційного поля. Для її розв'язання необхідно розробити математичну модель динаміки та стійкості керованого надпровідного підвісу, побудувати чисельні алгоритми оцінювання величини гравітаційного збурення, що впливає на левітуюче пробне тіло. Необхідно також провести аналіз впливу різних чинників на жорсткість підвісу, серед яких, зокрема – наявність додаткової феромагнітної маси на вільній пробній масі, вплив пасивного фільтру сигналів на точність вимірювань та обґрунтувати технологію створення макету супутникового гравіметра на основі високотемпературних надпровідних наноплівочок.

Мета роботи — розробка наукових основ створення перспективних супутникових гравіметрів на основі наноструктур з використанням нових фізичних принципів обробки інформації, обґрунтування принципово нового керованого магнітного підвісу (чутливого елемента) на основі наноплівочок, обґрунтування та розроблення пропозицій щодо створення перспективного супутникового гравіметра на основі явища керованої магнітної левітації та

процесорного мікромодуля для перспективних космічних місій; обґрунтування технології розробки функціональних вузлів на основі високотемпературних надпровідних наноплівки для створення малогабаритного супутникового гравіметра.

Функціональна структура вимірювально-обчислювальної системи. На Рис. 2. Функціональна схема вимірювально-обчислювальної системи. Основні складові частини цієї системи: надпровідний підвіс, оптична система реєстрації інформації та мікропроцесорний обчислювальний блок.

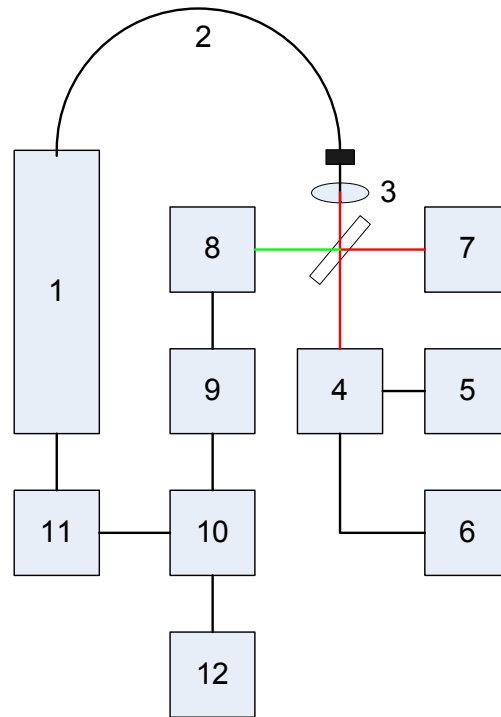


Рис. 2. Функціональна схема вимірювально-обчислювальної системи:

1 – криостат з вставкою, на якому змонтована оптична головка; 2 - оптичний кабель; 3 – фокусуючий 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 ферромагнітного 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 (Рис. 3.) 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 –

ресстрація. Аналізувався вплив фізичного стану гелію (рідина або газ) на спільну роботу системи підвіс – ресстрація. Вивчався також вплив пасивного фільтра на точність вимірювань. Аналізувалися чинники, що впливають на зменшення жорсткості підвісу, зокрема, наявність додаткової феромагнітної маси на вільній пробі.

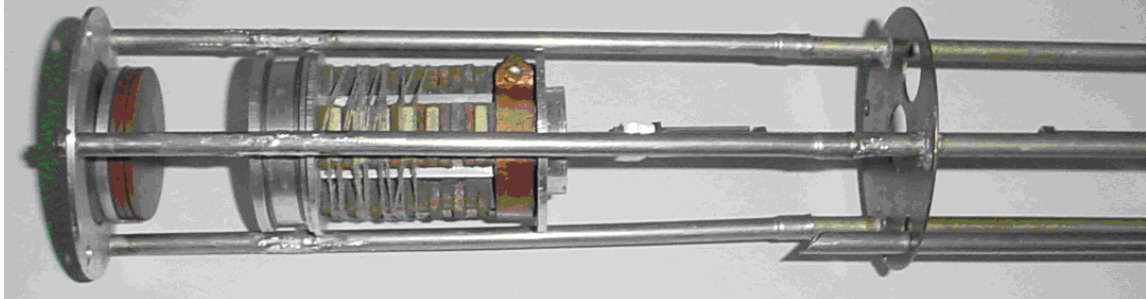


Рис. 3. Надпровідна система підвіски пробного тіла

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.

**Математична модель динаміки та стійкості пробного тіла.** Однією з актуальних задач механіки вільного тіла в магнітному полі є завдання складання та аналізу рівнянь динаміки вільного тіла в полі ідеально провідних струмових контурів. Це обумовлено можливістю використовуванню ефектів діамагнітного відштовхування [10,11] та мінімуму магнітної потенційної енергії [2, 11], що дозволяють стабілізувати рівновагу вільного тіла [11]. В [2] обґрунтовано ефект мінімуму магнітної енергії і стійкості рівноваги вільного ідеально провідного струмового кільця, співвісного в положенні рівноваги до нерухомого ідеально провідного струмового кільця,

Проведено дослідження рівняння руху і стійкості при наявності не одного, а двох нерухомих ідеально провідних струмових кілець, що представляють собою консервативну потенційну систему. Для складання рівнянь динаміки використовується метод Лагранжа, який в [2,4] розвинений, стосовно електромеханічних перетворювачів енергії. Виберемо в якості кінетичної енергії магнітного поля. Нехай механічними координатами вільного ідеально провідного кільця є циліндричні координати його центру маси  $\rho, \alpha, \xi$  і кути Ейлера  $\varphi, \psi, \theta$ , які визначають орієнтацію кільця щодо тригранника  $O\xi\eta\zeta$  (Рис. 4.). Початок тригранника  $O\xi\eta\zeta$  поміщено в центрі верхнього нерухомого ідеально провідного кільця, а вісь  $O\xi$  співпадає з спільною віссю двох нерухомих ідеально провідять кілець.

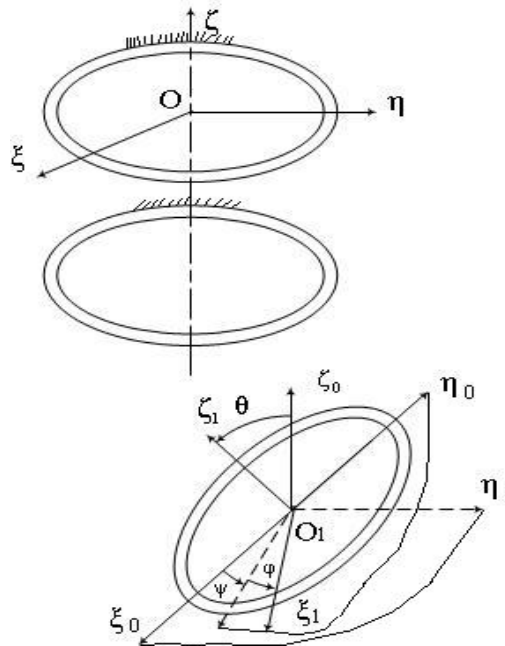


Рис. 4. Орієнтація кільця відносно тригранника  $O\xi\eta\zeta$

Математична модель описується наступним білінійним рівнянням [6]:

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

$$z = \alpha y_1 + \beta y_2. \quad (1)$$

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  $u_3(t) = 0$ ,  $u_4(t) = 0$ . Одержимо умови асимптотичної стійкості білінійної системи із лінійної системи вимірювання, умови існування якої приведені в [2,7]. Лінеаризуючи систему (1) в околі точки  $y_1 = 0$ ,  $y_2 = 0$  стійкої рівноваги пробного тіла при  $u_1(t) = 0$ , одержимо

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

$$z = [\alpha \ \beta][y_1 \ y_2]^T. \quad (2)$$

Систему (2) запишемо в більш загальному вигляді:

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

Визначимо керування [6,9, 10]

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

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

Із керованості лінеаризованої системи

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

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

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

В силу керованості системи (5) існує матриця  $F = \|f_j\|$  ( $j=1,2$ ) така, що  $A + BF$  має заданий спектр. Отже, існування шуканої матриці  $K$  еквівалентне існуванню розв'язку рівняння

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

Введемо наступні позначення:

$$C_1 = \alpha, C_2 = \beta, E_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, E_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Для існування матриці  $K$ , яка задовольняє рівнянню (6), необхідно і достатньо виконання умови (8)

$$FQ = 0, Q = E_2 - E_1 C_1^{-1} C_2, \quad (8)$$

в якій враховується (2),

$$Q = \begin{bmatrix} -\alpha^{-1}\beta \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Якщо елементи матриці (9) розглядати як координати вектора  $q$  в двовимірному просторі, то умова (8) 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 (8) задовольняє однопараметричній множині матриць  $F$  вигляду

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

Щоб характеристичний поліном матриці  $A + BF$  співпадав з заданим поліномом  $\Theta(\lambda)$ , необхідно, щоб виконувалися умови  $f_1 = -(a_3 + a_1)a_2^{-1}$ ,  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = -a_2\alpha^{-1}\beta f_1$ . Таким чином, при  $\alpha_1 = 1$ ,  $a_2 \neq 0$ ,  $\alpha \neq 0$  матриця  $K = FE_1 C_1^{-1}$  зворотного зв'язку по виходу визначається виразом

$$K = [f_1\alpha^{-1}] \quad (11)$$

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

### Висновки

Обґрунтовано принципи створення перспективного супутникового гравіметра, придатного для отримання оперативної інформації щодо гравітаційного поля. Розроблено математичну модель динаміки та стійкості керованого надпровідного підвісу. Побудовано чисельні алгоритми оцінювання величини гравітаційного збурення, що впливає на левітуюче пробне тіло.

Розроблено технічні пропозиції щодо створення магнітного підвісу на високотемпературних наноплівках та здійснено наукове-технічне обґрунтування макету супутникового гравіметра на основі високотемпературних надпровідних наноплівок з використанням процесорного мікромодуля.

Проаналізовано вплив різних чинників на жорсткість підвісу, серед яких, зокрема – наявність додаткової феромагнітної маси на вільній пробній масі, вплив пасивного фільтру сигналів на точність вимірювань. Обґрунтовано технологію створення макету супутникового гравіметра на основі високотемпературних надпровідних наноплівок.

1. В.О. Яценко, М.В. Наливайчук. Моделювання та оптимізація адаптивного криогенного гравіметра // 19 Міжнародна конференція з автоматичного керування, 26-28 вересня 2012. Київ, Україна. – С. 344.
2. Козорез В.В. Динамические системы свободных магнитно взаимодействующих тел, Киев, Наукова думка, 1981, 140с.
3. Yatsenko V.A., Nalivaichuk N.V. Mathematical modeling and optimization of controlled superconducting sensors with magnetic levitation // Моделювання та дослідження стійкості динамічних систем: Збірник наукових праць міжнародної конференції DSMSI-2011. Київ, 2011. С. 146.
4. Yatsenko V.A. and Kryuchkov E.I. On the possibility of application of "Magnetic Potential Well" effect for creation of a graviinertial cryogenic device. Journal of Automation and Information Science, V. 34, 2003.-P. 106-119.
5. W.A. Prothero and J. M. Goodkind. A superconducting gravimeter. – Rev. Sci. Instr., № 2 , Vol. 39, № 9. 1968.– P. 1257 – 1261.
6. V.Yatsenko and P.Pardallos, Global optimization of cryogenic-optical sensor, in Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites, K. W.H. Fujisada, J. Lirie, ed., Proc. SPIE 4550, аа. 433 - 441, 2001.
7. V. Yatsenko, M. Nalyvaichuk. Modeling and Optimization of Cryogenic-Optical Gravimeters // International Journal information theories & applications. - 2012. - P. 232-240. Vol. 19. № 3.
8. V. Yatsenko, M. Nalyvaichuk. Cryogenic-Optical Gravimeter: Principles, Methods and Applications // Kharkov University Vestnik, Ser. Radiophysics and Electronics.-2011.– P. 107-113.
9. V. Yatsenko, M. Nalyvaichuk, V. Gnidenko, O. Kochkodan. Modeling of Superconducting Gravimeter for Futute Space Missions: Optimization. Control, and Estimation//2nd International Conference on memory of corresponding member of National Academy of Science of Ukraine V. S. Melnik, 4-6 Aprill, 2012. Kyiv, Ukraine. – P.110.
10. Moon F. C. Superconducting Levitation: Application to bearings and magnetic transportation, John Willey & Sons, NY, 1994, 295p
11. Kozoriz V. Novel Magnetic Levitation and Propulsion Phenomena, ISBN 966-7108-10-4, Zaporizhya, 1999, 271p
12. J. M. Goodkind. The superconducting gravimeter. Rev. Sci. Instrum.-Vol. 70, № 11. – P. 4131-4152, 1999.
13. J. M. Goodkind and R. J. Warburton, IEEE Trans. Magn. MAG – 11, № 2, 1975.