

УДК 581.383

**О.О. Добржанський, магістрант**  
Житомирський державний технологічний університет

## ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СУЧАСНИХ БАЛІСТИЧНИХ ГРАВІМЕТРІВ

(Представлено д.т.н., проф. Безвесільною О.М.)

*У статті розглянуто принципи проектування сучасних абсолютних гравіметрів. На основі сучасних патентних даних досліджено три інноваційні технології в конструюванні гравіметрів. На базі аналізу даних визначені напрямки подальшого дослідження щодо збільшення відношення сигнал/шум в результатах вимірювань.*

### 1. Постановка проблеми

1.1. Однією з глобальних проблем сучасної науки є дослідження теоретичних основ вивчення сили тяжіння, її аномалій і практичного застосування отриманих результатів у таких галузях, як пошук корисних копалин, розширення знань про внутрішню будову Землі, побудова моделей глибинних неоднорідностей за локальними аномаліями сили тяжіння.

1.2. Основними приладами, що застосовується для абсолютних вимірювань сили тяжіння, є гравіметри, які базуються на балістичному методі. Балістичний метод передбачає вимірювання відрізків шляху, пройденого вільнопадаючим тілом відповідно до закону руху з прискоренням [1]. У цьому випадку проблемним питанням є отримання результатів вимірювань, що проводяться за допомогою лазерного балістичного гравіметра, з максимально можливою точністю.

### 2. Мета дослідження

2.1. Робота сучасних конструкторів і вчених спрямована на удосконалення конструктивних особливостей гравіметра.

2.2. Метою даної статті є дослідження конструктивних особливостей сучасних гравіметричних приладів. На базі аналізу сучасних патентних даних визначити можливі шляхи вирішення проблеми підвищення відношення сигнал/шум в результатах вимірювань даним приладом.

### 3. Основна частина

3.1. Конструкторами Державного унітарного підприємства «Всеросійський науково-дослідний інститут «Сигнал» розроблений абсолютний лазерний гравіметр [5], [6].

Точність вимірювань його визначається введенням другого інформаційно-вимірювального каналу (рис. 1) за рахунок установки додаткового оптичного рефлектора інтерферометра. Перший інформаційний канал – відносно сейсмоізолюваний, другий, додатковий, – піддатний впливу сейсмічних коливань. Виключення впливу сейсмічних коливань здійснюється введенням поправок за різницею показників двох каналів з урахуванням кореляційного зв'язку між ними.

Метод вимірювання – симетричний. Вимірювання шляху за дані проміжки часу  $T$  проводяться як на висхідній, так і на низхідній гілках траєкторії синхронно. Виміряні одиничні значення прискорення вільного падіння  $g_{1i}$  та  $g_{2i}$  у кожному каналі визначаються за формулою:

$$g_i = (N_{h1} + N_{h2}) \cdot \frac{h}{T \cdot (T + \tau)}, \quad (1)$$

де  $N_{h1}$  та  $N_{h2}$  – кількість квантів  $h$  шляху, сформованих з інтерференційного сигналу на висхідній та низхідній гілках траєкторії польоту пробної маси з кутовим рефлектором;  $\tau$  – пауза на вершині траєкторії. У першому каналі шлях вимірюється з послабленням сейсмічних коливань, у другому – майже без послаблення. Після проведення серії  $n$  одиничних вимірювань визначаються середні квадратичні відхилення  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$  по кожному каналу та коефіцієнт послаблення сейсмічних коливань  $r$  у відповідності до виразу:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{g}_1 - g_{1i})^2}{n-1}}; \quad (2)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{g}_2 - g_{2i})^2}{n-1}}; \quad (3)$$

$$r = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}; \quad (4)$$

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{n} \tag{5}$$

Необхідною умовою введення поправок у результати вимірювань є  $r > 1$ , яке на практиці за наявності сейсмічних коливань від індустріальних джерел, як правило виконується. При  $r = 1$  інерційна перешкода відсутня, і подальша процедура обчислення поправок не виконується.

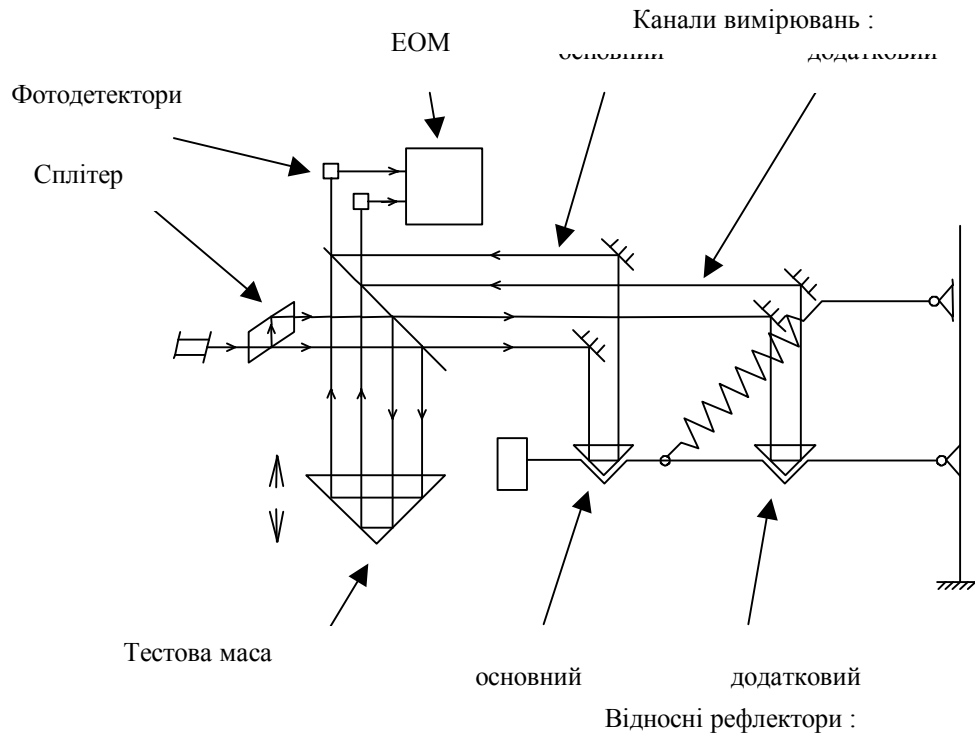


Рис. 1. Абсолютний гравіметр НДП «Сигнал»

Для визначення ступеня лінійного зв'язку показників двох вимірювальних каналів обчислюється коефіцієнт кореляції:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{g}_1 - g_{1i}) \cdot (\bar{g}_2 - g_{2i})}{n \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2} \tag{6}$$

Визначається різниця показів по кожному окремо взятому одиничному вимірюванню:

$$\Delta g_i = g_{1i} - g_{2i} \tag{7}$$

При лінійному зв'язку двох вимірювальних каналів коефіцієнти поправок є функцією коефіцієнта послаблення сейсмічних коливань і коефіцієнта кореляції:

$$R_1 = \rho \cdot \frac{r}{r-1}; \tag{8}$$

$$R_2 = \rho \cdot \frac{r}{r-1} \tag{9}$$

Скоректовані значення показів гравіметра визначаються через вирази:

$$g_{1i}^* = g_{1i} - \Delta g_i \cdot R_1; \tag{10}$$

$$g_{2i}^* = g_{2i} - \Delta g_i \cdot R_2. \tag{11}$$

Після корекції виконується статистична обробка по кожному з каналів.

3.2. На західному ринку високих технологій у даний час доступний абсолютний гравіметр FG5, що виробляється фірмою Micro-g Solutions Co., USA. В абсолютному гравіметрі FG5 падаючий елемент піднімається механічним способом (рис. 2) і потім просто запускається у вільне падіння [4].

Для розрахунку значення гравітаційного прискорення проводяться вимірювання поточної позиції падаючого елемента та відповідного поточного значення часу. Інтерферометр розташований між відносним рефлектором, що підтримується пружиною, і падаючим елементом, використовується для

підрахунку кількості інтерференційних полос, так вимірюється позиція падаючого елемента. Розрізняюча здатність даного способу визначається як переміщення в половину довжини хвилі випромінювання джерела світла, що застосовується в інтерферометрі. Для отримання достатньої кількості даних довжина вільного падіння встановлена як 20 см.

Відносне дзеркало, що підтримується пружиною, необхідне для зниження впливу вібрацій земної поверхні. Причому вібрації високої частоти знижуються набагато ефективніше, ніж вібрації низької частоти. Наступними модифікаціями віброізолюючого пристрою стали активні пружинні системи, які за допомогою електропривода, під'єданого до верхнього кінця пружини, імітують пружину 1 км довжини із характеристичним періодом 30–60 с. У даних пристроях вдається досягти зниження рівня вібрацій на 46 дБ ( $K$  послаблення = 200, для коливань з періодом  $T \leq 30\text{--}60$  с).

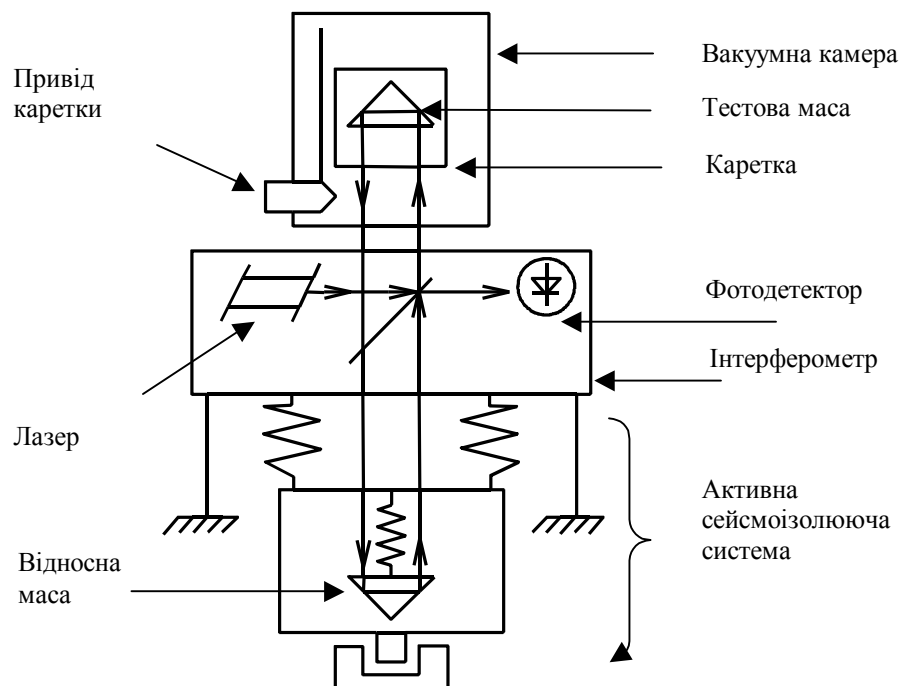


Рис. 2. Абсолютний гравіметр FG5 Micro-g Solution Co., USA

Як операційні еталони довжини хвилі та часу застосовують He-Ne стабілізований лазер (з довжиною хвилі 0,6328 мкм) та рубідієвий генератор частоти (10 МГц) відповідно. He-Ne лазер, стабілізований за допомогою лембівського провалу, дозволяє проводити вимірювання з точністю  $\pm 5$  мкГал. Стабілізація парами йоду ( $^{129}\text{I}_2$ ) (зворотний лембівський провал) дозволяє підвищити точність до  $\pm 2$  мкГал. Рубідієвий генератор коректується за частотою за допомогою стандартного сигналу Logan-C.

3.3. У 2001–2002 роках вченими А.Л. Вішуткіним та Д.Е. Фоллером самостійно розпочата розробка абсолютних балістичних гравіметрів з ексцентриковим механізмом, який забезпечує коротшу довжину шляху вільного падіння: приблизно 20 мм [2], [8]. Запропонована конструкція забезпечує реалізацію симетричного методу вимірювань (рис. 3).

Ексцентриковий механізм (кулачок) для приводу каретки, яка переміщує тестову масу, використовується в даному гравіметрі. Траєкторія руху каретки визначається формою кулачка, який дає можливість виконати цілий цикл, «пуск вгору–захват–пуск вгору» за один оберт з постійною кутовою швидкістю навколо горизонтальної осі. Механізм дає можливість виконувати 200 циклів за хвилину. Це значно зменшує час, необхідний для досягнення потрібної точності.

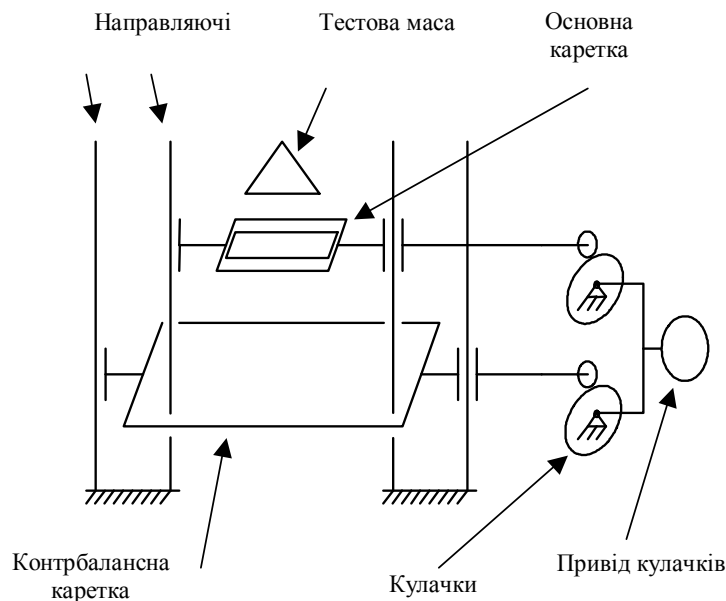


Рис. 3. Кулачковий механізм реалізації симетричного циклу вимірювань

Важливою рисою системи є використання 2-х кареток, що рухаються зустрічно. Обидві каретки мають свої кулачки. Форма кулачків виконана таким чином, щоб знизити рівень вібрацій системи під час вимірювань. Перша каретка переміщує тестову масу, друга – виступає у ролі контрбалансу. Вібрації виникають у момент відриву тестової маси від каретки, через різку зміну маси. Таке рішення дозволяє забезпечити постійну масу системи і постійний момент навантаження на привідний двигун під час вимірювань.

Таким чином значно зменшені габарити приладу, зменшена віддача від запускаючого механізму, зменшений час вимірювань, досягнута точність  $\pm 5$  мкГал.

3.4 Незважаючи на представлену різноманітність конструкцій, всі абсолютні лазерні балістичні гравіметри мають обов'язкові елементи [7]:

- тестова маса (пробна маса)  $\gg$  тіло, на якому розташований також кутовий рефлектор і яке призначене для запуску у вільне падіння;

- відносна маса (референтна, опорна маса)  $\gg$  тіло, на якому розташований також кутовий рефлектор і яке закріплене у віброізолюючому пристрої;

- віброізолюючий пристрій (сейсмоізолююча система)  $\gg$  конструкція, що поєднує пружинний маятник і активну систему корекції, призначену для виключення впливу сейсмічних коливань на результат вимірювань;

- лазер (еталон довжини хвилі світла)  $\gg$  активний пристрій, що служить джерелом когерентного поляризованого випромінювання для інтерферометра;

- лазерний інтерферометр (на основі інтерферометра Майкельсона)  $\gg$  пристрій, призначений для створення інтерференційної картини шляхом поєднання двох променів: перший – відбитий послідовно від рефлектора тестової маси і рефлектора відносної маси; другий – є частиною випромінювання безпосередньо від лазерного джерела. Зміна інтерференційної картини відбувається з частотою Доплера [3];

- фотодетектор (лавинний фотодіод)  $\gg$  призначений для перетворення зміни освітленості інтерференційної картини в електричний сигнал;

- контролер (автоматизована система проведення вимірювань та збору даних)  $\gg$  призначена для реалізації процесу вимірювань в автоматизованому режимі;

- вакуумна камера (камера запусків)  $\gg$  призначена для здійснення пусків тестової маси зі зменшеним впливом повітряного опору на падаючий елемент;

- каретка  $\gg$  пристрій, призначений для доправлення тестової маси у вихідну точку і пуску тестової маси у вільне падіння (у приладах несиметричного типу), або для запуску вгору тестової маси з наступним її захватом для доправлення у вихідну точку (для приладів симетричного типу);

- повітряно-вакуумний інтерфейс  $\gg$  паразитний інтерфейс між вакуумною камерою та іншими пристроями, призначений для передачі лазерних променів від інтерферометра до падаючої тестової маси і відбитих променів у зворотному напрямку до інтерферометра.

3.5. Аналіз конструктивних особливостей сучасних лазерних балістичних гравіметрів дозволяє визначити можливі джерела шумів [1], [7]:

- флуктуації частоти та некогерентність лазерного випромінювання;

- фазові похибки через наявність повітряно-вакуумного інтерфейсу;
- власні шуми фотодетектора (теплові шуми);
- електромагнітні та вібраційні шуми від приводів кареток та кулачкових механізмів;
- обмежені стабілізуючі властивості сейсмоізолюючої системи (вплив низькочастотних вібрацій земної поверхні);
- нестабільність рубідієвого генератора часових імпульсів;
- шуми каналу передачі сигналів від приладу до обчислювальної системи;
- обертання тестового тіла навколо свого центру мас під час вільного падіння;
- впливи навколишнього середовища: температура, тиск рельєф, вологість, індустриальні шуми, земні припливи, рівень ґрунтових вод...

#### Висновок

Проаналізувавши представлені дані, можливо визначити основні напрямки, яких необхідно дотримуватись при проведенні науково-дослідницької роботи, пов'язаної зі створенням нових гравіметричних приладів – абсолютних гравіметрів. У даний час на жаль не існує альтернативи балістичному методу з точки зору простоти ідеї і можливості практичної реалізації. Тому основний напрямок досліджень повинен полягати в пошуку методів підвищення точності вимірювань абсолютними гравіметрами шляхом доробки (модифікації) стандартних схем приладу. Особливу увагу слід звернути на наступні пункти: підвищення точності та розрізняючої здатності інтерферометра, стабілізацію лазерного джерела випромінювання, удосконалення оптики, пошук нових джерел шумів, удосконалення сейсмоізолюючого пристрою, зменшення габаритів гравіметра, зменшення довжини шляху вільного падіння тестової маси, відмові від активnodіючих під час вимірювання механічних частин, інтеграція максимальної кількості елементів у вакуумній камері, підвищення жорсткості та інерційності корпусного елемента, пошуку чутливих фотоелектричних датчиків з низьким рівнем власних шумів, зменшення тривалості підготовчого часу, підвищення частоти одиничних вимірювань, створення автоматизованих систем локального контролю за гравіметром, корекції та стабілізації, моніторингу зовнішнього середовища, систем цифрового зв'язку з ЕОМ, систем зв'язку із службами еталонних сигналів та службами навігації.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Безвесільна О.М.* Вимірювання гравітаційних прискорень. – Житомир: ЖІТІ, 2002. – 264 с.
2. *Вишуткин А.Л., Фоллер Д.Е.* Разработка и исследование транспортабельного абсолютного баллистического гравиметра // Измерительная техника. – № 9. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – С. 3–7.
3. *Застрогин Ю.Ф.* Контроль параметров движения с использованием лазеров. – М.: Машиностроение, 1981. – 176 с.
4. *Niebauer T.M. et.al.* “A New Generation of Absolute Gravimeters”. – Metrologia. – Vol. 32. – 1995, – pp.159 – 180.
5. *RU Patent 2193786 C1.*
6. *RU Patent 2192024 C1.*
7. *US Patent 6772630 B2.*
8. *US Patent 6298722 B1.*

ДОБРЖАНСЬКИЙ Олександр Олексійович – студент-магістрант факультету інформаційно-комп'ютерних технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- гравіметричні прилади і системи;
- математичне моделювання систем автоматичного керування та управління.

Тел.: 8(0412) 229195.

E-mail: [at8\\_doo@ziet.zt.ua](mailto:at8_doo@ziet.zt.ua)

Подано 31.03.2005

**Добржанський О.О.** Принципи побудови сучасних балістичних гравіметрів  
**Добржанский А.А.** Принципы построения современных баллистических гравиметров  
**Dobrzhansky O.O.** Modern absolute gravimeter design principles

УДК 581.383

**Принципи побудови сучасних балістичних гравіметрів / О.О. Добржанський**

У статті розглянуто принципи проектування сучасних абсолютних гравіметрів. На основі сучасних патентних даних досліджено три інноваційні технології в конструюванні гравіметрів. На базі аналізу даних визначені напрямки подальшого дослідження щодо збільшення відношення сигнал/шум в результатах вимірювань.

УДК 581.383

**Принципы построения современных баллистических гравиметров / А.А. Добржанский**

В статье рассмотрены принципы проектирования современных абсолютных гравиметров. На основе современных данных исследовано три инновационные технологии в конструировании гравиметров. Определены источники внутренних и внешних шумов, определены направления дальнейшего исследования относительно увеличения отношения сигнал/шум в результатах измерений.

УДК 581.383

**Modern absolute gravimeter design principles / O.O. Dobrzhansky**

Modern absolute gravimeter design principles are considered in the article. Three innovations as for the used technologies in up-to-date gravimeter design are investigated on the base of the latest patents. Data analysis gives opportunity to estimate inner and external noise sources. Further investigation directions as for ratio signal/noise result increasing.