

УДК 621.317

О.М. Безвесільна, д.т.н., проф.  
А.А. Остапчук, аспір.  
Житомирський державний технологічний університет

### АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕННЯ СИЛИ ВАГИ ЗА ДОПОМОГОЮ АБСОЛЮТНОГО БАЛІСТИЧНОГО ГРАВИМЕТРА

*В статті розглянуто питання наявних можливостей вимірювання прискорення сили ваги за допомогою абсолютних балістичних гравіметрів, вдосконалення системи автоматизації обробки інформації та можливість подальшого створення системи відеоспостереження за процесом отримання результатів, що повинно усунути похибки та забезпечити максимальну точність вимірювання.*

**Постановка проблеми.** Вимірювання абсолютного значення прискорення сили тяжіння ( $g$ ) з високою точністю є базовим елементом успішного розв'язання широкого спектра наукових задач: визначення форми Землі, побудова моделей руху глибинних мас, оцінка пружних деформацій поверхні планети, передбачення землетрусів, побудова моделей глибинних щільнісних неоднорідностей, пошук покладів корисних копалин, використання величини  $g$  як основи для визначення інших фізичних величин. Апаратним забезпеченням для розв'язання цих наукових задач є гравіметричні прилади.

Сучасні дослідження в області розробки гравіметричної апаратури зосереджені на двох аспектах: перший – підвищення точності вимірювань балістичними гравіметрами шляхом усунення впливу сейсмічних коливань на процес вимірювання, другий – побудова ефективних автоматизованих систем процесу гравіметричних вимірювань.

Дані про сучасні розробки таких систем свідчать про те, що вітчизняні прилади на даний час поступають за своїми технічними характеристиками (за кінцевою точністю результатів вимірювань та іншими метрологічними параметрами) зарубіжним розробкам. Крім того, в даний час в Україні проводиться програма оновлення гравіметричного обладнання опорних пунктів національної геодезичної мережі.

В наш час широкого поширення набувають комерційні варіанти конструкції гравіметрів. Комерційні гравіметри пристосовуються до умов роботи у важких кліматичних умовах: підвищена вологість, високі температури навколишнього середовища, шуми місцевого транспорту, інші шуми міста (будівельні майданчики, промислові шуми й ін.). Точність таких гравіметрів зазвичай менша, це дозволяє знизити їх ціну. Великі промислові групи як правило закуповують гравіметри для проведення власних науково-дослідницьких робіт у галузі геологорозвідки: пошуки покладів нафти, газу, інших корисних копалин. До таких приладів висувають певні вимоги: компактність, універсальність у застосуванні, зручність та простота обслуговування, ремонтпридатність, тривалий наробіток на відмову, уніфікованість вузлів поєднання з іншою апаратурою, спроможність працювати у важких умовах навколишнього середовища, достатня точність, доступна ціна.

**Аналіз досліджень.** Проведені дослідження в області вимірювання прискорення сили ваги показали, що балістичний метод полягає у вимірюванні довжини шляху, що пройшло вільно падаюче тіло, яке почало свій рух з нульової початкової швидкості за певний проміжок часу. На основі залежності довжини шляху від часу визначається прискорення вільного падіння.

Створення досконалих вимірювачів переміщень для балістичних гравіметрів стало можливим після винаходу лазерів, які володіють високою монохроматичністю та когерентністю.

Широке впровадження у вимірювальну техніку лазерів та фотоелектричних перетворювачів, які модулюють світловий потік в електричні сигнали дозволило створити в нашій країні та закордоном цілий ряд конструкцій лазерних вимірювачів переміщень. Основними перевагами яких є:

- підвищення точності вимірювань;
- скорочення часу вимірювань;
- автоматизація вимірювального процесу;
- зниження рівня підготовки обслуговуючого персоналу.

В роботі досліджено можливості підвищення характеристик точності гравіметричної апаратури, побудованої на основі лазерів та фотоелектричних перетворювачів, розраховано математичні моделі балістичних гравіметрів та розглянуто можливість побудови функціональних схем основних модулів автоматизованої системи гравіметричних вимірювань.

**Мета роботи** визначається таким чином: підвищення точності вимірювання прискорення сили тяжіння шляхом дослідження абсолютного гравіметричного приладу та розробки на основі наукового пошуку автоматизованої системи вимірювань значень прискорення сили тяжіння.

**Основна частина.** Принцип дії гравіметра полягає в балістичному методі вимірювання абсолютного значення прискорення сили ваги (ПСВ)  $g$ , яке визначається за результатами вимірювання шляху та часу вільного падіння оптичного кутового відбивача. Вимірювання шляху, пройденого падаючим тілом, здійснюється лазерним інтерферометром, а мірою інтервалів часу є сигнали прецизійного (наприклад рубідієвого) стандарту частоти [5].

Визначення абсолютного значення прискорення сили ваги виконується гравіметрами з похибкою 5–6 мкГал, яка включає як інструментальну похибку, так і вплив зовнішніх умов вимірювання.

Балістичний гравіметр, що застосовується, повинен мати майже необмежений діапазон вимірювань, нестабільність довжини хвилі випромінювання робочого лазера за час спостереження не повинна перевищувати  $5 \cdot 10^{-9}$ , відносна похибка стандарту частоти повинна бути не більше  $5 \cdot 10^{-10}$ , тиск залишкового газу в балістичній камері не повинен перевищувати  $5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. стовпа.

Технічні характеристики абсолютного балістичного гравіметра:

- середньоквадратична похибка вимірювання – не більше  $\pm 2 \cdot 10^{-8}$  м/с<sup>2</sup>;
- систематична похибка – не більше  $\pm 5 \cdot 10^{-8}$  м/с<sup>2</sup>;
- габарити гравіметра:
  - оптико-механічний блок – 1200×700×700 мм;
  - електронний блок – 620×560×660 мм;
- загальна вага гравіметра – 180 кг.

На основі вивчення сучасної патентної інформації та науково-технічних джерел встановлено, що в розвитку балістичних гравіметричних приладів чітко визначилися таких два напрямки балістичного методу: “Free-fall” і “Rise&fall” (несиметричний та симетричний). Аналіз конструктивних елементів приладу свідчить про недосконалість будови та складність вирішення технічних проблем, пов’язаних з підвищенням точності вимірювань за допомогою абсолютного балістичного гравіметра. У вступній частині представлено перелік сфер, що потребують дані на основі точних гравіметричних вимірювань. На сьогоднішній день не існує конструктивної схеми балістичного вимірювального приладу, який вимірює прискорення сили тяжіння з високою точністю, що підтверджує актуальність визначених нами завдань.

Набір технічних методів та засобів вимірювання шляху і часу дуже різноманітні, проте, незважаючи на це, можна описати структуру сучасного балістичного абсолютного гравіметра.

У склад гравіметра входять:

- інтерферометр, який призначений для перетворення часово-просторових параметрів руху пробного тіла в електричний сигнал;
- вимірювач шляху та часу;
- балістичний блок, в якому реалізується вільний рух пробного тіла;
- прилад врахування або компенсації зовнішніх інерційних перешкод;
- прилад автоматики і управління роботою гравіметра;
- система оперативного контролю працездатністю й індикація відмов;
- система контролю та підтримки вакууму;
- система горизонтування;
- обчислювальний пристрій;
- система документування;
- блок живлення.

Кожний із структурних елементів конструктивно оформлюється у вигляді окремого блока. Структура гравіметра та конкретна реалізація його складових одиниць істотно залежать від алгоритму вимірювань, призначень та технічних вимог до приладу.

На рис. 1 подана спрощена схема одного з сучасних гравіметрів [6], що працюють за симетричним методом.

Головним недоліком балістичних гравіметрів є їх висока чутливість до великої кількості впливових факторів, що, в свою чергу, тягне за собою конструктивну складність, великі габаритні розміри та вагу гравіметрів, а також їх периферійних приладів, складність обробки результатів, невисоку продуктивність вимірювань тощо.

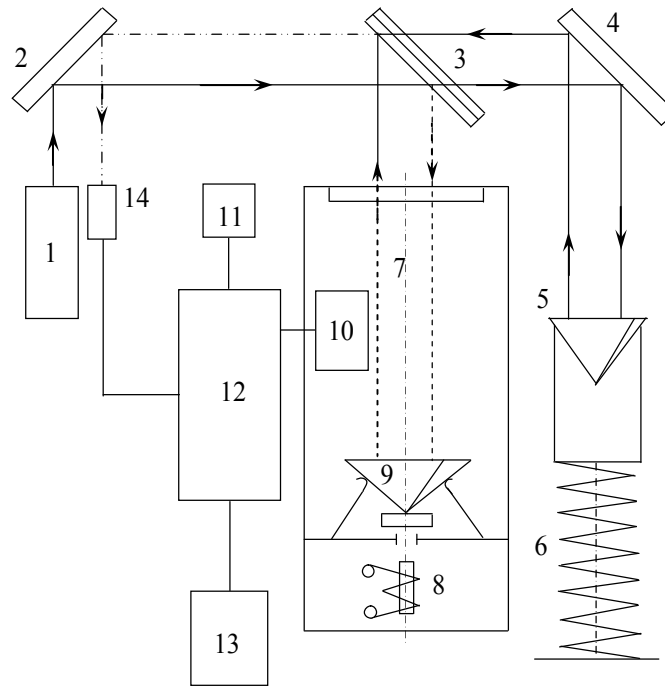


Рис. 1. Схема балістичного гравіметра:

- 1 – лазер; 2, 3, 4 – дзеркала сейсмографа та інтерферометра; 5 – закріплений кутівий відбивач сейсмографа; 6 – довгоперіодичний сейсмограф; 7 – вакуумна камера; 8 – пусковий пристрій; 9 – пробне тіло; 10 – манометр; 11 – генерал міток часу; 12 – мікро-ЕОМ; 13 – цифродрук; 14 – фотоелектричний помножувач

Задача вимірювання сили ваги балістичними методами зводиться до вимірювання довжини та часу. Це впливає, наприклад, з аналізу розмірності прискорення. Тому математична модель повинна виявити аналітичний зв'язок шляху, пройденого пробним тілом, з часом і зовнішніми гуртуючими впливами. Найбільш конструктивним буде такий підхід до побудови моделі, при якому, з однієї сторони, розглядається вільний рух пробного тіла в інерційній системі координат з урахуванням вертикального градієнта ПСВ та сил опору, а з іншої – визначається закон руху деякої зв'язаної системи координат, яка зміщується під дією зовнішніх інерційних гуртувань і утримуючої відлікової системи гравіметра [3].

Розгляд вільного руху пробного тіла, підкинутого вертикально вгору в інерційній системі координат, зводиться до розв'язання нелінійного диференціального рівняння 2-го порядку:

$$m \cdot z'' = m \cdot (g_0 + \alpha \cdot z) - \gamma_1 \cdot z' - \gamma_2 \cdot (z')^2, \tag{1}$$

де  $m$  – маса пробного тіла;

$z$  – вертикальна координата;

$\alpha$  – вертикальний градієнт;

$\gamma_1, \gamma_2$  – коефіцієнти, які визначають вклад сил опору відповідно пропорційних першій та другій ступеням швидкості руху пробного тіла.

Розв'язання рівняння (1) методом послідовних наближень з використанням перетворень Лапласа і подальшим розкладом у ряд по ступенях  $z$  призводить до рівняння:

$$z(t) = g_0 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot t^n, \tag{2}$$

де  $A_n$  – сукупність коефіцієнтів, які визначаються з умов руху пробного тіла в балістичному блоці відносно відлікової системи.

Цей вираз описує рух пробного тіла в інерційній системі координат. В умовах реального вимірювання ПСВ координата пробного тіла визначається у зв'язаній системі координат, що підлягає гуртуванням. Як відомо, координати пробного тіла в інерційній системі однозначно залежать від його координат у зв'язаній системі:

$$\bar{R}_i = \bar{r} + \bar{R}, \tag{3}$$

де  $\bar{R}_i$  – радіус-вектор пробного тіла в інерційній системі;

$\bar{r}$  – радіус-вектор пробного тіла у зв'язаній системі;

$\vec{R}$  – радіус-вектор, що описує зміщення зв’язкової системи.

Тому як правило робота з балістичним гравіметром здійснюється так, щоб вісь чутливості (в нашому випадку вісь  $z$ ) утримувалася вертикально; рівняння (3) можна спростити:

$$S(t) = z(t) + R_z(t). \tag{4}$$

В цьому виразі компонента  $S(t)$  описує поведінку пробного тіла в інерційній системі, а компонента  $R_z(t)$  – вплив зовнішніх гуртуючих дій інерційної природи.

Алгоритми вимірювань ПСВ, що використовують описану модель, дуже різноманітні, як за способом реалізації вільного руху пробної маси, так і за методами вимірювання шляху і часу.

Залежно від способу реалізації вільного руху всі методи можна розділити на дві групи:

- з несиметричним вільним рухом (рис. 2);
- із симетричним вільним рухом (рис. 2).

При використанні симетричних методів (обидві гілки параболи на рис. 2) пробне тіло підкидають вгору, а вимірювання шляху та часу відбуваються на піднімаючій та спускаючій гілках траєкторії. При використанні несиметричних методів (права гілка параболи на рис. 2) пробне тіло вільно рухається (падає) у вакуумі.

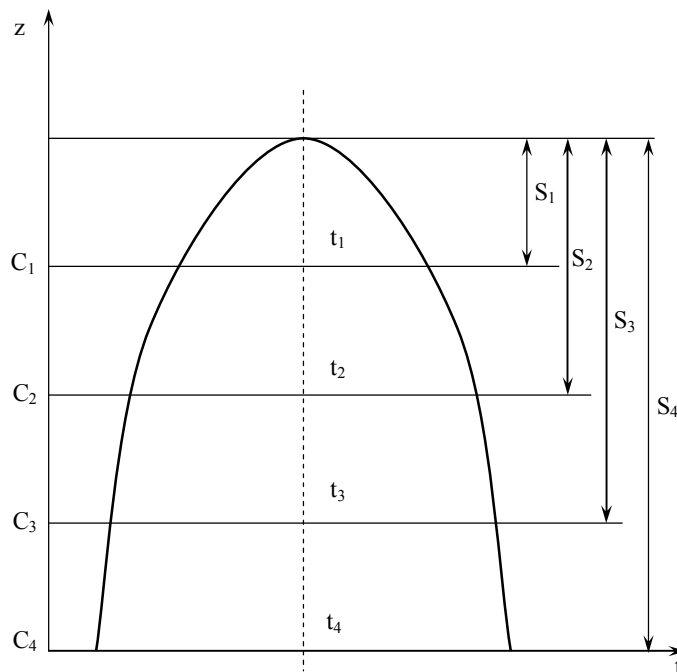


Рис. 2. Траєкторія польоту пробного тіла в балістичному гравіметрі:  
 $C_1-C_4$  – рівні (станції) спостережень;  $t_1-t_2$  – моменти закінчень  
 інтервалів вимірювань;  $S_1-S_2$  – інтервали вимірювань

Ці методи відрізняються порівняно простою реалізацією вільного руху і відсутністю необхідності прикладення імпульсної (ударної) сили при запуску пробного тіла, яка залежить від висоти кидання, що значно покращує динамічні умови роботи гравіметра.

До переваг симетричних методів слід віднести можливість майже повного виключення систематичних похибок, що пропорційно першому ступеню швидкості руху пробного тіла, при порівняно простому алгоритмі вимірювання, а також можливість скорочення вертикальних розмірів приладу, оскільки при одній і тій же висоті гравіметра сумарний шлях, пройдений тілом, в даному випадку буде великим. Однак в момент кидка виникає імпульсна реактивна сила, гуртуюча систему відліку і вносячи похибку в результати вимірювань за допомогою симетричного методу.

Зважаючи на наявність невизначених коефіцієнтів  $A_n$ , у виразі (2) воно не дозволяє безпосередньо визначити ПСВ  $g_0$  за вимірним значенням  $t$  та  $z(t)$ . Для цього необхідно провести вимірювання на декількох інтервалах спостереження:  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  (рис. 2). Тоді замість рівняння (2) одержимо систему рівнянь:



зарубіжної бази наукових даних. Дослідження практичних питань – шляхом аналізу даних експериментальних досліджень провідних у даній галузі вчених та самостійної розробки на їх основі функціональних схем модулів локальної системи вимірювань величини прискорення сили тяжіння та математичних моделей основних конструктивних частин абсолютного лазерного балістичного гравіметра, що передбачають обробку отриманих даних на ЕОМ.

Отже головним напрямком розробок є підвищення точності результатів вимірювання балістичними гравіметрами за рахунок удосконалення системи автоматизації обробки результатів та розробка системи відеоспостереження за процесом отримання інформації, що також повинно усунути похибки та забезпечити максимальну точність вимірювання.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Безвесільна О.М.* Вимірювання прискорень: Підручник. – К.: Либідь, 2001. – 264.
2. *Бондарев С.С. и др.* Экспериментальные исследования баллистических гравиметров // Метрология. – 1986. – № 1.
3. *Волосов С.С., Марков Б.Н., Педь Е.И.* Основы автоматизации измерений. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 368 с.
4. *Грушко И.М., Сиденко В.М.* Основы научных исследований. – Харьков: Выща школа, 1983.
5. *Попов Е.И.* Определение силы тяжести на подвижном основании. – М.: Наука, 1987. – 218 с.
6. *Юзефович А.П., Огородова Л.В.* Гравиметрия. – М.: Недра, 1980.

**БЕЗВЕСІЛЬНА** Олена Миколаївна – доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації та комп'ютеризованих технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційні системи;
- вимірювальні перетворювачі;
- гравіметри.

**ОСТАПЧУК** Анна Анатоліївна – аспірантка кафедри автоматизації та комп'ютеризованих технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційні системи;
- гравіметри.

Подано 14.11.2008

**Безвесільна О.М., Остапчук А.А.** Автоматизований контроль вимірювання прискорення сили ваги за допомогою абсолютного балістичного гравіметра

**Безвесильная Е.Н., Остапчук А.А.** Автоматизированный контроль измерения ускорения силы тяжести с помощью абсолютного баллистического гравиметра

**Bezvesilna E.N., Ostapchuk A.A.** The automated control of measuring of an acceleration due to gravity by means of terrain clearance ballistics

УДК 621.317

**Автоматизированный контроль измерения ускорения силы тяжести с помощью абсолютного баллистического гравиметра / Е.Н. Безвесильная, А.А. Остапчук**

В статье рассмотрен вопрос существующих возможностей измерений ускорения силы тяжести при помощи абсолютных баллистических гравиметров, усовершенствование системы автоматизации обработки информации и возможность дальнейшего создания системы видеонаблюдения за процессом получения результатов, что должно устранить погрешности и обеспечить максимальную точность измерений.

УДК 621.317

**The automated control of measuring of an acceleration due to gravity by means of terrain clearance ballistics / E.N. Bezvesilna, A.A. Ostapchuk**

In paper the question of existing possibilities of measuring of an acceleration due to gravity by means of terrain clearance ballistics gravimeters is observed, development of system of automation of machining of the information and possibility of the further making of system of video observation behind process of reception of effects that should eliminate lapses and provides the maximum accuracy of measurings.