

В.Ф. БОЛЮХ, д.т.н., проф., НТУ "ХПІ", Харків
О.І. ВІННИЧЕНКО, провідний інженер, ННЦ "Інститут метрології",
Харків

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ МЕТРОЛОГІЧНОЇ АТЕСТАЦІЇ ГРАВИМЕТРИЧНОГО ПУНКТУ ДЕРЖАВНОЇ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ

Запропоновано метод вимірювання абсолютного значення та вертикального градієнта прискорення вільного падіння без механічних переміщень, що необхідно для метрологічної атестації гравіметричного пункту Державної фундаментальної мережі. Зміна висоти підкидання пробного тіла здійснюється шляхом регулювання напруги збудження лінійного імпульсного електромеханічного перетворювача індукційно-динамічного типу.

Предложен метод измерения абсолютного значения и вертикального градиента ускорения свободного падения без механических перемещений, что необходимо для метрологической аттестации гравиметрического пункта Государственной фундаментальной сети. Изменение высоты подбрасывания пробного тела осуществляется путем регулирования напряжения возбуждения линейного импульсного электромеханического преобразователя индукционно-динамического типа.

Вступ. Основним науковим завданням, яке розв'язується за допомогою фундаментальної гравіметричної мережі, є вивчення змін гравітаційного поля Землі у часі. Для цього на фундаментальних пунктах, розташованих у різних геолого-тектонічних регіонах, систематично вимірюються абсолютні й відносні значення прискорення вільного падіння (ПВП). Для високоточних вимірювань абсолютного значення ПВП з наступною редукацією обмірюваного значення на рівень фундаменту пункту застосовуються балістичні гравіметри (БГ), в яких здійснюється підкидання пробного тіла (ПТ), що є елементом лазерно-оптичної системи вимірювань.

Питанням редукації присвячена значна кількість робіт, що пояснюються важливістю проблеми та відсутністю задовільного рішення [1-5]. Складність проблеми редукування абсолютного значення ПВП на гравіметричному пункті Державної фундаментальної мережі полягає в тому, що при переносі обчисленого ПВП із однієї точки (на ефективній висоті гравіметра) в іншу (на рівень фундаменту) необхідно знати, як

змінюється напруженість силового поля Землі в пункті спостереження. Розглянемо методикою діючої метрологічної атестації гравіметричного пункту Державної фундаментальної мережі.

Вимір абсолютного значення і вертикального градієнта ПВП за діючою методикою. Метрологічна атестація гравіметричного пункту Державної фундаментальної мережі проводиться відповідно до ДСТУ 3215-95 [6]. Гравіметричний пункт відповідно до ДСТУ 3382-96 [7] відноситься до робочих еталонів 1 розряду. Задачею метрологічної атестації є визначення абсолютного значення прискорення вільного падіння на рівні фундаменту з похибкою, що не перевищує 30 мкГал.

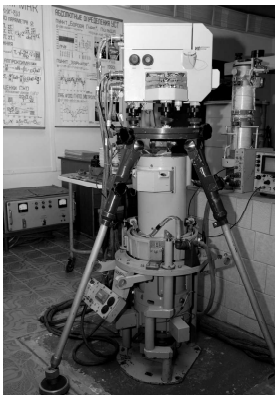


Рис. 1. Транспортбельний балістичний гравіметр.

Виміри проводяться на транспортбельному балістичному гравіметрі симетричним способом при визначенні інтервалів шляху й часу, пройденим ПТ на висхідній та спадній траєкторіях вільного руху (рис. 1). Основними елементами БГ є прилад динамічний, в якому здійснюється підкидання ПТ, і лазерний інтерферометр, який з ним оптично взаємодіє. Абсолютне значення та вертикальний градієнт ПВП визначаються в наступній послідовності (рис. 2).

Спочатку прилад динамічний встановлюють на рівні фундаменту (положення А) і визначають абсолютне значення ПВП \bar{g}_A . Потім прилад піднімають на технологічну підставку (положення Б) з висотою $h_{ПД}$ над рівнем фундаменту і проводять вимір ПВП \bar{g}_B . За результатами вимірів визначають ПВП

$$\bar{g} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \bar{g}_i, \quad (1)$$

де \bar{g} – результат i -ої серії вимірювання; M – кількість серій вимірювань.

Вертикальний градієнт ПВП визначається за формулою:

$$\gamma = \frac{\bar{g}_A - \bar{g}_B}{h_{ПД}}, \quad (2)$$

де \bar{g}_A – абсолютне значення ПВП на рівні фундаменту (положення А); \bar{g}_B – абсолютне значення ПВП на збільшеній висоті (положення Б).

Редукція абсолютного значення ПВП, отриманого для ефективної

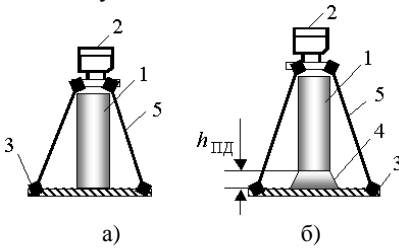


Рис. 2. Схема вимірів транспортбельним балістичним гравіметром: а) положення А; б) положення Б: 1 – прилад динамічний; 2 – інтерферометр лазерний; 3 – фундамент; 4 – технологічна підставка; 5 – тринога.

висоти гравіметра h_{eff} , на рівень фундаменту дорівнює:

$$\bar{g}_n = \bar{g}_A + \Delta g_\gamma, \quad (3)$$

де Δg_γ – поправка за вертикальний градієнт ПВП:

$$\Delta g_\gamma = h_{eff} \times \gamma. \quad (4)$$

За даною методикою висота лазерного інтерферометра змінюється регульованою триногою. Результати вимірів, виконаних за допомогою БГ різних конструкцій, показують, що величина похибки ПВП істотно змінюється залежно від умов виміру і застосованих технічних засобів [8, 9]. Для одержання мінімальної похибки необхідно, щоб механізми, що впливають на результати вимірів, не змінювалися із часом, тобто щоб були відсутні переміщення елементів БГ [10].

Мета роботи полягає в розробці методу вимірювання абсолютно-го значення та вертикального градієнта прискорення вільного падіння без механічних переміщень.

Метод зміни траєкторії руху пробного тіла без механічних переміщень. Розглянемо катапульту БГ на базі лінійного імпульсного електромеханічного перетворювача індукційно-динамічного типу для реалізації багаторівневого симетричного способу виміру ПВП і його вертикального градієнта. Зазначений електромеханічний перетворювач забезпечує безконтактну взаємодію й вертикальне переміщення якоря з ПТ за рахунок магнітного поля нерухливого індуктора, що збуджується від імпульсного джерела – зарядженого ємнісного накопичувача (рис. 3) [11].

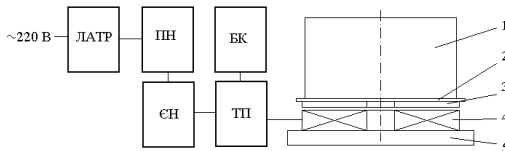


Рис. 3. Блок-схема катапульты: ЛАТР – лабораторний автотрансформатор; ПН – помножувач напруги; ЄН – ємнісний накопичувач; БК – блок керування; ТП – тиристорний перетворювач; 1 – пробне тіло; 2 – силова пластина; 3 – яркір електропровідний; 4 – обмотка індуктора; 5 – опора.

Електронна схема формує однополярний імпульс струму в індукторі, по закінченні якого відбувається перезарядження ємнісного накопичувача до напруги, зниженої стосовно вихідної. Другий імпульс струму в індукторі формується при наближенні якоря до індуктора й забезпечує електродинамічне гальмування якоря, запобігаючи жорсткому удару його об індуктор (рис. 4).

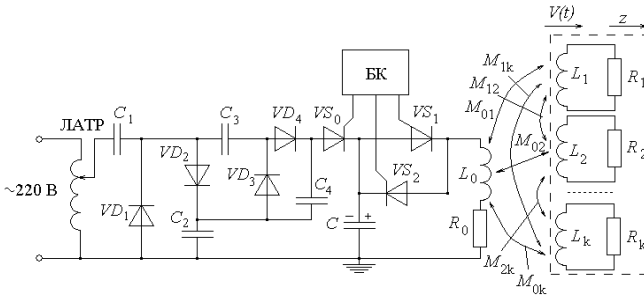


Рис.4. Електрична схема управління катапульти БГ.

Змінна напруга подається на лабораторний автотрансформатор ЛАТР, випрямлюється і збільшується в задане число раз. Після надходження сигналу з блоку керування БК на тиристор VS_0 ємнісний накопичувач C заряджається. При надходженні сигналу на тиристор VS_1 здійснюється розряд ємнісного накопичувача на індуктор. Магнітне поле індуктора наводить в електропровідному якорі вихрові струми, взаємодія яких з магнітним полем приводить до виникнення електродинамічної сили, яка здійснює підкидання якоря із ПТ. При падінні якоря в певний момент часу (на відстані магнітної взаємодії з індуктором) на тиристор VS_2 з блоку керування БК надходить сигнал і виникає електродинамічна сила, що гальмує якір.

При роботі катапульти в диску електропровідного якоря виникає істотна нерівномірність розподілу індукovanого струму. Для врахування цього в математичній моделі якір представляється сукупністю елементарних короткозамкнених контурів, рівномірно розподілених по поверхні диска, а багатовитковий індуктор – первинним контуром, приєднаним до ємнісного накопичувача енергії. Електричні процеси описуються системою диференціальних рівнянь [12]:

$$R_0(T_0) \cdot i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C_0} \int_0^t i_0 dt + M_{01}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{0k}(z) \times$$

$$\begin{aligned}
& \times \frac{di_k}{dt} + V(t) \left(i_1 \frac{dM_{01}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{0k}}{dz} \right) = U_0; \\
& R_1(T_1) \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{01}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1k} \frac{di_k}{dt} + \\
& + V(t) \left(i_0 \frac{dM_{01}}{dz} + i_2 \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{1k}}{dz} \right) = 0; \quad (5) \\
& R_k(T_k) \cdot i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + M_{0k}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{1k} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{k-1k} \times \\
& \times \frac{di_{k-1}}{dt} + V(t) \left(i_0 \frac{dM_{0k}}{dz} + i_1 \frac{dM_{1k}}{dz} + \dots + i_{k-1} \frac{dM_{k-1k}}{dz} \right) = 0,
\end{aligned}$$

де i_0, L_0, R_0 – відповідно струм, індуктивність і опір обмотки індуктора; i_k, L_k, R_k – відповідно струм, індуктивність і опір елементарного короткозамкненого k -го контуру якоря, що переміщується зі швидкістю $V(t)$ уздовж осі z щодо індуктора; M_{kp} – взаємні індуктивності між відповідними струмовими контурами ($k \neq p$); T_k – температура k -го струмового контуру; C, U_0 – відповідно ємність і напруга ємнісного накопичувача.

При близькому взаємному розташуванні активних елементів перетворювача струми і діючі на них електродинамічні сили в значній мірі визначаються точністю розрахунку величин само- і взаємні індукції. Аналогічна ситуація виникає і при нерівномірному розподіленні струмів по поперечному перетину якоря. Виходячи з цього, доцільно усі струмові елементи розбивати на ряд елементарних котушок з малими розмірами поперечного перетину відносно діаметра з однородною густиною струму. Індуктивність p -го і його взаємні індуктивності з q -им елементом представляються у вигляді [13]

$$L_p = \sum_{n=1}^N L_n + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N M_{nm}, \quad m \neq n; \quad M_{pq} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=N+1}^{N+P} M_{nm}, \quad (6)$$

де N, P – кількість елементарних котушок прямокутного перерізу, на які розбиваються p -ий і q -ий елементи; L_n – власна індуктивність n -ої елементарної котушки; M_{nm} – взаємна індуктивність n -ої і m -ої елементарних котушок.

Величину індуктивності L_n визначають за формулою [14]

$$L_n = \frac{2\mu_0 w_n^2}{(b_{n2} - b_{n1})^2 (r_{n2} - r_{n1})^2} \int_{b_{n1}}^{b_{n2}} \int_{r_{n1}}^{r_{n2}} r \int_{r_{n1}}^{r_{n2}} r^{\odot} \sum_{\gamma=1}^2 (-1)^{\gamma} \frac{z - b_{n\gamma}}{\sqrt{(z - b_{n\gamma})^2 + (r + r^{\odot})^2}} \times$$

$$\times \left\{ \frac{K(k_\gamma) - E(k_\gamma)}{k_\gamma^2} + 0,25 \frac{(r - r')^2}{r r'} [K(k_\gamma) - \Pi(h, k_\gamma)] \right\} dr' dr dz, \quad (7)$$

де $K(k_\gamma)$, $E(k_\gamma)$, $\Pi(h, k_\gamma)$ – повні еліптичні інтеграли першого, другого і третього роду; $k_\gamma = 2\sqrt{r' r \left[(z - b_{n1})^2 + (r + r')^2 \right]^{-1}}$ – модуль еліптичних інтегралів; $h = 4r' r (r + r')^{-2}$ – параметр еліптичного інтеграла; w_n – кількість витків n -ої котушки; b_{n1} , b_{n2} – мінімальний і максимальний аксіальні розміри n -ої елементарної котушки; r_{n1} , r_{n2} – мінімальний і максимальний радіальні розміри n -ої елементарної котушки.

Величина взаємодуктивності між n -ою і m -ою елементарними котушками визначається за методом розкладання в ряд Тейлора [13]

$$M_{nm} = \frac{w_n w_m}{6} \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 M^*(z, r_{ni}, r_{mj}) - 2M^*(z, r_n, r_m) + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 M^*(z_{ij}, r_n, r_m) \right],$$

де $M^* = \mu_0 \sqrt{r_{ni} r_{mj}} \left[(2/k_\gamma - k_\gamma) K(k_\gamma) - 2E(k_\gamma)/k_\gamma \right]$;

$z_{ij} = (b_{n2} - b_{n1})(3 - 2j)$; $r_{xy} = r_{x2}(3,5 - 2y) + r_{x1}(2y - 2,5)$; $y = i, j$; $x = n,$

m ; $r_x = (r_{x2} + r_{x1})/2$; w_m – кількість витків m -ої котушки.

При необхідності для розрахунку величин само- і взаємодуктивностей використовуються більш складні вирази, які враховують крок намотки, нерівномірність розподілу струму, перерозподіл полів в обмотці [15].

Аксіальне переміщення якоря ΔZ з ПТ виникає під дією електродинамічної сили

$$f_z(t) = i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz}(z). \quad (8)$$

Швидкість якоря можна представити у вигляді рекурентного співвідношення:

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{m_1 + m_2} i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz} - g(m_1 + m_2), \quad (9)$$

де m_1, m_2 – маса якоря й ПТ, відповідно.

Для визначення температури індуктора або якоря використовується нелінійне рівняння теплопровідності

$$c^*(T) \cdot \gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_w(T) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + j^2(t) \cdot k_z \cdot \rho(T), \quad (10)$$

де $c^*(T)$ – усереднена питома теплоємність; γ – усереднена щільність матеріалу; $j(t)$ – щільність струму; $\lambda_w(T)$ – коефіцієнт теплопровідності; k_z – коефіцієнт заповнення індуктора; $\rho(T)$ – питомий опір.

Оскільки на величину струму індуктора істотно впливають теплові параметри, то оцінку тривалості протікання струму густиною j по провіднику, що знаходиться при температурі T_0 в умовах близьких до адіабатичного нагріву можна виконати, припускаючи лінійні залежності питомого опору і теплоємності від температури:

$$\rho(T) = \rho(T_0) \left[1 + \alpha_\rho (T - T_0) \right]; \quad c(T) = c(T_0) \left[1 + \alpha_c (T - T_0) \right]. \quad (11)$$

Керування катапультою (висотою підкидання ПТ), основні параметри якої представлені в табл. 1, легко здійснюється зміною напруги заряду ємнісного накопичувача за допомогою ЛАТРа.

Таблиця 1 – Основні параметри катапульти

Параметр	Величина
Зовнішній діаметр індуктора, мм	55
Внутрішній діаметр індуктора, мм	5
Висота індуктора, мм	5
Зовнішній діаметр якоря, мм	55
Внутрішній діаметр якоря, мм	1
Висота якоря, мм	2,0
Початкова відстань між індуктором і якорем, мм	0,5
Число витків в індукторі, шт	12
Переріз витка індуктора (мідна шина), мм ²	1,8×4,8
Маса виконавчого елемента, кг	0,12
Ємність накопичувача, мкФ	400
Зарядна напруга накопичувача, В	300...700

На рис. 5 представлені електромеханічні характеристики катапульти, отримані при різних значеннях напруги заряду ємнісного накопичувача. Під дією отриманої швидкості якір із ПТ починає вертикально переміщатися (рис.6). При цьому висота підкидання якоря й час польоту нелінійно зростають при підвищенні напруги ємнісного накопичувача.

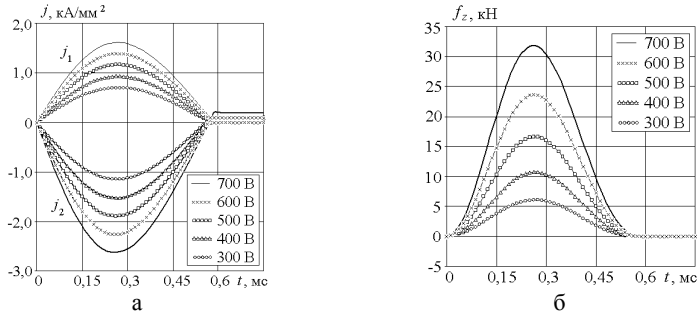


Рис. 5. Щільності струму в індукторі j_1 і якорі j_2 (а) та аксіальні сили, що діють на якір f_z (б)

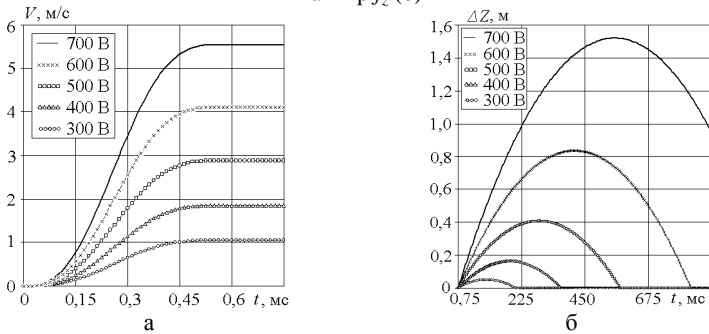


Рис. 6. Швидкість (а) та переміщення (б) якоря із пробним тілом.

Таким чином, запропоновано метод метрологічної атестації гравіметричного пункту Державної фундаментальної мережі, в якому відсутні переміщення основних елементів. За рахунок цього забезпечується підвищення точності вимірювання вертикального градієнта та абсолютного значення прискорення вільного падіння.

Висновки. Застосування катапульти у балістичному гравіметрі на базі лінійного електромеханічного перетворювача індукційно-динамічного типу дозволить підвищити точність виміру при метрологічній атестації гравіметричних пунктів Державної фундаментальної мережі й розширити область застосування гравіметрів.

Запропоновано для катапульти використовувати електромеханічний перетворювач, який забезпечує безконтактну взаємодію й вертикальне переміщення якоря з пробним тілом за рахунок магнітного поля нерухливого індуктора. Запропонована електронна схема збудження перетворювача, яка формує однополярний однонапівперіодний ім-

пульс струму в індукторі. Другий імпульс струму формується при наближенні якоря до індуктора й забезпечує електродинамічне гальмування якоря. Регулювання висоти підкидання пробного тіла здійснюється за допомогою зміни зарядної напруги ємнісного накопичувача.

Список літератури: 1. *Грушинский Н.П.* Основы гравиметрии. – М.: Наука, 1983. – 356 с. 2. *Маслов А.В., Гладина Е.Ф., Костик В.А.* – М.: Геодезия, 1986. – 416 с. 3. *Сагитов М.У.* Постоянная тяготения и масса Земли. – М.: Наука, 1969. – 188 с. 4. Определение силы тяжести на море / Под ред. *Н.П. Грушинского.* – М.: Недра, 1970. – 248 с. 5. Измерение силы тяжести / Под ред. *Ю.Д. Буланже.* – М.: Наука, 1981. – 96 с. 6. ДСТУ 3215-95. Метрологічна атестація засобів виміральної техніки. Організація та порядок проведення. 7. ДСТУ 3382-96. Державна повірочна схема для засобів вимірювань прискорення сили ваги. 8. *Юзефович А.П.* Гравиметрия / Итоги науки и техники. Геодезия и аэросъемка. – М.: Наука, 1987. – Т. 25. – С. 3-71. 9. Абсолютные определения ускорения силы тяжести: Обзорная информация / *С.С. Бондарев* и др. – М.: Наука, 1986. – 52 с. 10. *Левин Д.М., Кутепов В.С., Антонов В.Ф.* Статистический анализ погрешностей гравиметрических измерений // Измерительная техника. – 1997. – №7 – С. 3-5. 11. *Болух В.Ф., Данько В.Г.* Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2006. – 260 с. 12. *Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С.* Синтез параметров высокоэффективного электромеханического преобразователя ударного действия // Техническая электродинамика. Тем. выпуск: Проблемы современной электротехники. – 2008. – Ч. 2. – С. 63-68. 13. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с. 14. Расчет электрических цепей и электромагнитных полей на ЭВМ / *М.Г.Александрова, А.Н.Белянин, В.Брюкнер* и др./ Под ред. *Л.В. Данилова, Е.С. Филиппова.* – М.: Радио и связь, 1983. – 344 с. 15. *Алиевский Б.Л., Октябрьский А.М., Орлов В.Л.* Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 320 с.



Болух Владимир Федорович, профессор, доктор технічних наук. Захистив диплом інженера за фахом "Кріогенна техніка" в 1979 р., дисертації кандидата і доктора технічних наук в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини і апарати, відповідно в 1987 і 2003 рр. Професор кафедри "Загальна електротехніка" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" з 2004 р. Наукові інтереси пов'язані з лінійними електромеханічними перетворювачами імпульсної дії, кріогенними і надпровідниковими електромеханічними пристроями.



Вінніченко Олександр Іванович, провідний інженер ННЦ" Інститут метрології". Захистив диплом інженера за фахом "Фізика металів" в 1981 р. в Харківському політехнічному інституті. Наукові інтереси пов'язані з методами визначення прискорення вільного падіння за допомогою балістичних гравіметрів.

*Надійшла до редколегії 14.03.2011
Рецензент д.т.н., проф. Лупіков В.С.*