

**В.Ф. Болюх<sup>1</sup>, А.В. Омельченко<sup>2</sup>, А.И. Винниченко<sup>3</sup>, В.С. Купко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Национальный технический университет "ХПИ", Харьков, Украина

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

<sup>3</sup>Национальный научный центр "Институт метрологии", Харьков, Украина

## УМЕНЬШЕНИЕ ВЛИЯНИЯ АВТОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В БАЛЛИСТИЧЕСКОМ ГРАВИМЕТРЕ С ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОЙ КАТАПУЛЬТОЙ ПРИ СИММЕТРИЧНОМ СПОСОБЕ ИЗМЕРЕНИЯ

*The paper considers a ballistic laser gravimeter (BLG) with a symmetrical way of the gravity acceleration (GA) measuring. Special treatment is given to the problem of eliminating the measurement error due to the vertical movement of a test body (TB). The use of the induction and dynamic catapult makes possible to decrease the indicated errors. However, a short-term boost, the catapult produces, generates vibrations of the basement and the mechanical elements of the gravimeter; these vibrations result in the auto-seismic component of the measurement error. The effectiveness of employing in a BLG methods of vibrodamping to ensure the reduced auto-seismic component of the error (ACE) of the GA measuring is investigated. To decrease the ACE of the GA measuring it is proposed to launch the TB from a massive platform, installed on a light spring. It is shown that in the considered case, the BLG is capable of providing values of the ACE of measurement being less than 1  $\mu\text{Gal}$ .*

**Ключевые слова:** баллистический лазерный гравиметр, симметричный способ измерения, индукционно-динамическая катапульта, автосейсмическая составляющая погрешности.

### Введение

Для высокоточных измерений абсолютного значения ускорения свободного падения (УСП) применяют баллистические лазерные гравиметры (БЛГ), в которых реализуются симметричная или несимметричная схемы измерений. Гравиметры с симметричной схемой измерений не требуют высокого вакуума. Кроме того, данные гравиметры имеют малые размеры и могут использоваться в качестве транспортабельных измерительных приборов. Основным недостатком гравиметров с симметричной схемой — механическое воздействие, которое возникает при броске ПТ катапульти, например, индукционно-динамического типа [1]. Толчок катапульти вызывает колебания фундамента, называемые автосейсмическими, и всех механических элементов гравиметра, что обуславливает соответствующую компоненту погрешности измерения УСП, достигающую величины несколько десятков и даже сотен микрогал [2, 3].

Для снижения уровня автосейсмических колебаний в [4] предложено запускать ПТ с массивной платформы, установленной на пружине малой жесткости. Для реализации такой пружины предлагается использовать электромагнитный компенсатор жесткости.

Целью настоящей работы является исследование эффективности использования методов

виброзащиты в БЛГ с симметричной схемой измерения УСП, обеспечивающих малую автосейсмическую составляющую погрешности (АСП) измерения УСП.

### Виброзащита путем упругого подвеса референтного отражателя

В интерферометре БЛГ часто применяется упругий подвес (виброзащитное устройство) референтного отражателя [5]. За счет этого при достаточно большом периоде собственных колебаний в системе подвеса можно ослабить влияние как внешних сейсмических помех, так и автосейсмических помех. Рассмотрим эффективность такого решения для подавления автосейсмических помех.

На рис. 1 представлена модель механической системы БЛГ, соответствующая случаю упругого крепления референтного отражателя. Здесь использованы следующие обозначения:  $m$  — масса ПТ;  $m_0$  — суммарная масса фундамента, баллистического блока и установленных на нем устройств,  $c_0$  — коэффициент жесткости грунтового основания,  $b_0$  — коэффициент вязкого трения основы;  $m_v$  — масса виброзащитного устройства вместе с референтным отражателем;  $c_v$  и  $b_v$  — коэффициент жесткости и коэффициент демпфирования виброзащитного устройства.

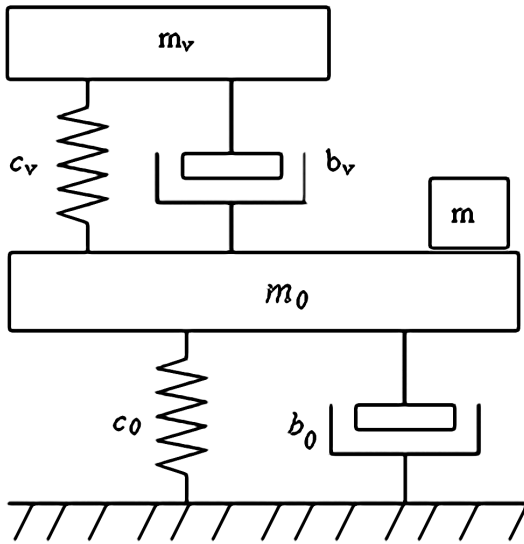


Рис. 1. Модель механической системы БГ при упругом креплении референтного отражателя

Обозначим через силу  $F(t)$ , действующую на платформу вертикально вниз при разгоне ПТ. В качестве простейшей модели силы может рассматриваться воздействие прямоугольного вида

$$F(t) = \begin{cases} mg, & \text{при } t \leq 0; \\ mg + F_0, & \text{при } 0 < t \leq \tau; \\ 0, & t > \tau, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\tau$  — время разгона ПТ.

Из условия сохранения закона импульса  $F_0\tau = \nu m$  следует

$$F_0 = \frac{\nu}{\tau} m. \quad (2)$$

Движение платформы и фундамента в вертикальном направлении, а значит и референтного отражателя, описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} m_v \frac{d^2 x_v}{dt^2} = b_v \cdot \frac{d}{dt} (x_0 - x_v) + c_v \cdot (x_0 - x_v); \\ m_0 \frac{d^2 x_0}{dt^2} = -b_0 \frac{dx_0}{dt} - b_v \cdot \frac{d}{dt} (x_0 - x_v) - c_0 x_0 - c_v (x_0 - x_v) + F, \end{cases} \quad (3)$$

где  $x_0$  и  $x_v$  соответственно отклонение фундамента и референтного отражателя от начального положения со снятым ПТ.

Из (3) следует, что в начальном положении

$$x_0 = x_v = \frac{mg}{c_0}. \quad (4)$$

Из решения системы уравнений (3) при начальных условиях (4) и

$$\frac{dx_0(0)}{dt} = \frac{dx_v(0)}{dt} = 0 \quad (5)$$

определим функции  $x_0(t)$  и  $x_v(t)$ .

Величину АСП измерения УСП определим согласно выражению [2, 3]

$$\Delta g = - \sum_{k=0}^{K-1} x_v(kh + t_0 - \frac{T}{2}) \cdot w(k), \quad (6)$$

где  $x_v(t)$  — процесс перемещения референтного отражателя;  $h$  — интервал дискретизации отсчетов пути, пройденного ПТ;  $t_0$  — момент достижения вершины ПТ;  $w(k)$  — весовые коэффициенты обработки отсчетов путь-время в БЛГ.

### Виброзащита при помощи упругого подвеса платформы, с которой стартует ПТ

Данная работа посвящена развитию еще одного метода ослабления эффекта автосеймики за счет подвеса платформы, с которой стартует ПТ. Для исследования эффективности этого метода в модели механической системы БЛГ использовано предположение о жесткой установке референтного отражателя относительно фундамента. В дальнейшем предполагается использовать этот метод совместно с упругим подвешиванием референтного отражателя интерферометра, что должно практически полностью исключить влияние эффекта автосеймики на погрешность измерений ускорения.

На рис. 2 представлена модель механической системы БЛГ, соответствующая схеме при жестком креплении на нем референтного отражателя. Эта модель может быть использована для анализа передачи воздействий от толчка индукционно-динамической катапульты референтному отражателю. Здесь использованы следующие обозначения:  $m_1$  — масса стартовой платформы;  $c$  и  $b_1$  — коэффициент жесткости и коэффициент демпфирования установки платформы.

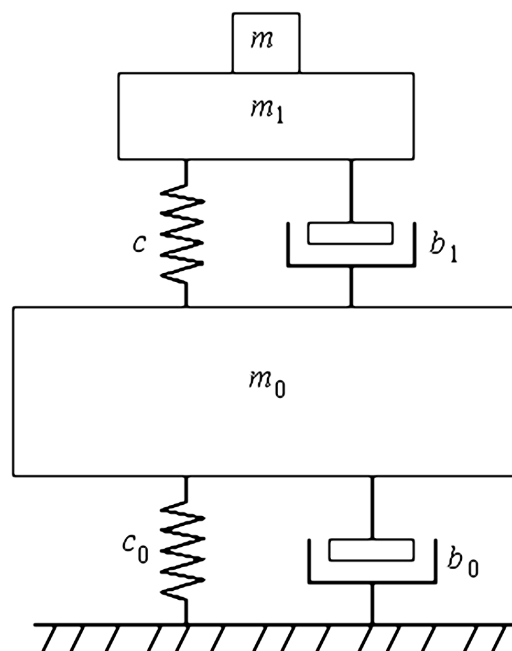


Рис. 2. Модель механической системы БГ с использованием стартовой платформы

Движение платформы и фундамента в вертикальном направлении, а значит и референтного отражателя, описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = b_1 \cdot \frac{d}{dt}(x_0 - x_1) + c \cdot (x_0 - x_1) + F; \\ m_0 \frac{d^2 x_0}{dt^2} = -b_0 \frac{dx_0}{dt} - b_1 \cdot \frac{d}{dt}(x_0 - x_1) - c_0 x_0 - c(x_0 - x_1), \end{cases} \quad (7)$$

где  $x_0$  и  $x_1$  соответственно отклонение фундамента и стартовой платформы от начального положения со снятым ПТ.

В начальном положении система уравнений (7) принимает вид

$$\begin{cases} c \cdot (x_0 - x_1) + mg = 0; \\ c_0 x_0 = c(x_1 - x_0), \end{cases}$$

откуда следует

$$x_0(0) = \frac{mg}{c_0}, \quad x_1(0) = \left(\frac{1}{c_0} + \frac{1}{c}\right)mg. \quad (8)$$

Из решения системы уравнений (7) при начальных условиях (8) и

$$\frac{dx_0(0)}{dt} = \frac{dx_1(0)}{dt} = 0 \quad (9)$$

определим функции  $x_0(t)$  и  $x_1(t)$ .

В предположении жесткой установки интерферометра с референтным отражателем относительно фундамента, величину АСП измерения УСП определим согласно выражению (6) с учетом того, что в рассматриваемом случае  $x_v(t) = x_0(t)$ .

### Результаты моделирования

Приведем результаты исследования эффективности систем выбросзащиты в БЛГ, полученные методом моделирования в среде программирования *Wolfram Mathematica* с использованием приведенных выше выражений.

При моделировании, следуя работе [2], примем массу фундамента  $m_0 = 3000$  кг, жесткость основания  $c_0 = 125,88$  МН/м, коэффициент вязкого трения основания  $b_0 = 73743,2$  Н·с/м; массу ПТ  $m_1 = 0,08$  кг; начальную скорость ПТ  $v = 1,4$  м/с (что соответствует броску на высоту около 0,10 м). Время разгона ПТ положим равным 2 мс.

Вначале исследуем эффективность упругого подвеса референтного отражателя на уровень АСП измерения УСП. Примем массу референтного отражателя  $m_v = 0,1$  кг, а период собственных колебаний

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_v}{c_v}} = 10 \text{ с}.$$

При этом будем считать, что виброзащитная система работает в критическом режиме [6], что соответствует наиболее быстрому затуханию колебаний.

Величину АСП измерения УСП определим согласно (6), положив интервал дискретизации  $h$  равным 0,5 мс. При этом используем коэффициенты обработки  $w(k)$ , соответствующие методу наименьших квадратов.

На рис. 3 приведены результаты моделирования в виде зависимостей АСП измерения УСП от времени обработки для случаев: а) жесткого крепления референтного отражателя; б) упругого подвеса референтного отражателя с указанными значениями параметров. Из результатов моделирования следует, что за счет упругого подвеса референтного отражателя интерферометра можно примерно в 100 раз уменьшить АСП измерения УСП.

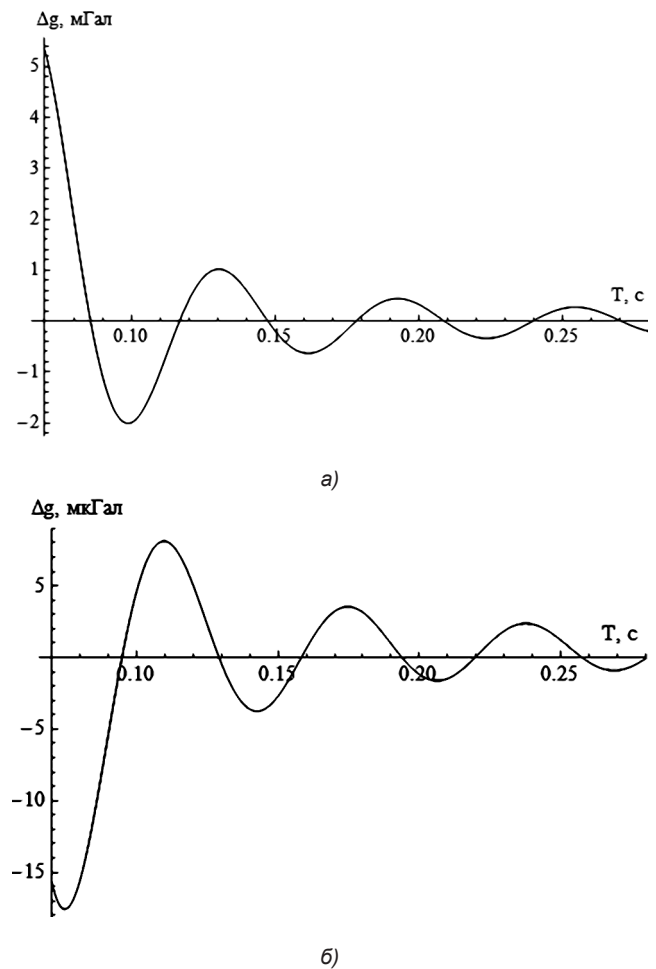


Рис. 3. Зависимость АСП измерения УСП от времени обработки для случаев: а) жесткого крепления референтного отражателя; б) упругого подвеса референтного отражателя

Исследуем теперь эффективность упругого подвеса платформы, с которой стартует ПТ, при жестком креплении референтного отражателя. При этом будем полагать коэффициент демпфирования  $b_1 = 0$  и с использованием среды программирования *Wolfram Mathematica* решим систему уравнений (7) при начальных условиях (8, 9) для различных значений жесткости пружины  $c$ .

Величину  $\Delta g$  определим с использованием выражения (6), положив интервал дискретизации  $h$  равным 0,5 мс. На рис. 4 отображены зависимости АСП измерения УСП симметричным БЛГ с применением метода наименьших квадратов от времени обработки  $T$ . Из анализа этих зависимостей следует, что при установке стартовой платформы (массой  $m_s = 1,6$  кг) с коэффициентом жесткости  $c \approx 2,1$  Н/м АСП измерения УСП не превышает 1 мкГал. Отметим, что в отсутствие электромагнитного компенсатора  $c \approx 209$  Н/м.

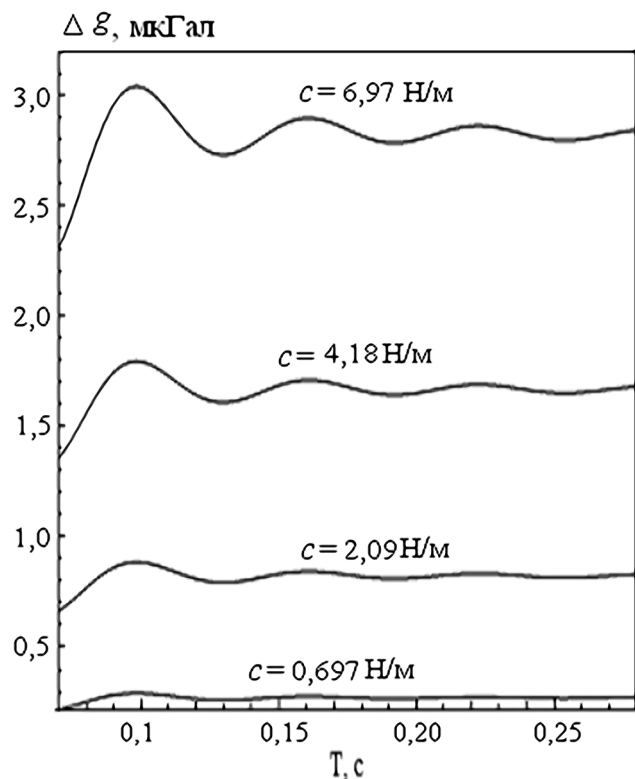


Рис. 4. Зависимость АСП измерения УСП от времени обработки для случая упругого подвеса стартовой платформы

Таким образом, баллистический гравиметр с симметричной схемой измерения может обеспечивать АСП измерений менее 1 мкГал. Для этого следует подбрасывать ПТ с массивного основания, установленного на пружине малой жесткости. С уменьшением жесткости этой пружины за счет применения электромагнитного компенсатора АСП измерения УСП уменьшается.

### Выводы

В БЛГ с симметричной схемой АСП измерения УСП может быть уменьшена до величины в несколько микрогал за счет упругого подвеса референтного отражателя. Однако такое решение не защищает от колебаний остальные узлы БЛГ, что

может приводить к дополнительным источникам погрешности измерений (влиять на работу фотоприемника, нарушать вертикальность луча интерферометра).

Представлена концепция БЛГ с симметричной схемой измерений УСП, в котором подбрасывание и ПТ осуществляется индукционно-динамической катапульты. Для снижения уровня автосейсмических колебаний предлагается запускать ПТ с массивной платформы, установленной на пружине малой жесткости. Такой подход защищает от автосейсмических колебаний все узлы БЛГ.

Обосновано нежесткое крепление пусковой платформы с индукционно-динамической катапульты, при котором обеспечивается пониженная АСП измерения УСП. Показано, что рассматриваемый БЛГ может обеспечивать АСП измерений менее 1 мкГал. С уменьшением жесткости пружины АСП измерения УСП уменьшается.

### Список литературы

- [1] Bolyukh V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter // Measurement Techniques. — January 2014. — Vol. 56, № 10. — P. 1098–1104.
- [2] Bolyukh V.F., Omel'chenko A.V., Vinnichenko A.I. Effect of self-seismic oscillations of the foundation on the readout of a ballistic gravimeter with an induction-dynamic catapult // Measurement Techniques. — 2015. — Vol. 58, № 2. — P. 137–142.
- [3] Омельченко А., Болюх В., Винниченко О. Автосейсмічна складова похибки симетричного балістичного гравіметра, зумовлена коливаннями фундаменту // Метрологія та прилади, 2014, № 3, С. 51–56.
- [4] Балістичний лазерний гравіметр з індукційно-динамічною катапультю для симетричного способу вимірювання прискорення вільного падіння: пат. № 111307 Україна: МПК G01V 7/14 / Болюх В.Ф., Омельченко А.В., Винниченко О.І.; Короткий Ю.О.; заявник і патентовласник В.Ф. Болюх, А.В. Омельченко, О.І. Винниченко, Ю.О. Короткий — № а201505402; заявл. 02.06.2015; опубл. 11.04.2016, Бюл. № 7, 2016.
- [5] D'Agostino G., Desogus S., Germak A., etc., The new IMGС-02 transportable absolute gravimeter: measurement apparatus and applications in geophysics and volcanology, Annals of geophysics, 2008, V. 51, № 1, P. 39–49.
- [6] Магнус К. Колебания: Введение в исследование колебательных систем. Пер. с нем. — М.: Мир, 1982. — 304 с.