

Влияние автосейсмических колебаний фундамента на показания баллистического гравиметра с индукционно-динамической катапульты

В. Ф. БОЛЮХ¹, А. В. ОМЕЛЬЧЕНКО², А. И. ВИННИЧЕНКО³

¹ Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: vfbolyukh@gmail.com

² Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

³ Национальный научный центр «Институт метрологии», Харьков, Украина

Разработана математическая модель вертикальных колебаний, возникающих в системе основание—фундамент баллистического лазерного гравиметра с индукционно-динамической катапульты, реализующего симметричную схему измерений ускорения свободного падения. Получены аналитические выражения для силового импульса, воздействующего на фундамент при разгоне пробного тела, описывающие колебания в механической системе баллистического лазерного гравиметра. Исследовано влияние длительности измерительного интервала и коэффициента демпфирования основания на результаты измерений ускорения свободного падения.

Ключевые слова: силовой импульс, переходная функция, колебания фундамента, баллистический лазерный гравиметр, коэффициент жесткости основания, коэффициент демпфирования.

A mathematical model of vertical oscillations appearing in the base—foundation system of a symmetric ballistic laser gravimeter has been developed. The analytical expressions describing the oscillations in the mechanical system of the ballistic laser gravimeter occurring as a result of the force pulse impact on the foundation at the moment of the test body acceleration have been found. The influence of the measurement interval duration and of the factor of foundation oscillation damping on the results of gravity acceleration measurement has been studied.

Key words: force pulse, transfer function, foundation fluctuations, ballistic laser gravimeter, base stiffness coefficient, damping coefficient.

Для высокоточных измерений абсолютного значения ускорения свободного падения g применяют баллистические лазерные гравиметры (БЛГ), в которых происходит подбрасывание пробного тела (ПТ), являющегося оптическим угловым отражателем в специальном корпусе и составной частью измерительной системы лазерного интерферометра Майкельсона [1—4]. В мировой практике используют два типа гравиметров со свободным движением ПТ в гравитационном поле, реализующих симметричный и несимметричный методы измерений g . При симметричном методе измерение g осуществляют как на восходящей, так и на ниспадающей ветвях траектории движения ПТ, а при несимметричном методе — только на ниспадающей. Гравиметры с симметричной схемой измерений имеют ряд достоинств. Так как силы сопротивления газовой среды воздействуют на результаты измерений с противоположными знаками при взлете и падении ПТ, то происходит их взаимная компенсация.

Основной недостаток гравиметров с симметричной схемой — механическое воздействие, которое возникает при броске ПТ катапульты. Короткий толчок катапульты вызывает колебания фундамента, называемые автосейсмическими, и всех механических элементов гравиметра, что обуславливает соответствующую составляющую погрешности измерений g [1].

Один из возможных путей уменьшения автосейсмической составляющей погрешности (АСП) с использованием БЛГ состоит в уменьшении массы ПТ и движущихся элементов катапульты. Для этого предложено в БЛГ использовать индукционно-динамическую катапульту, обеспечивающую вертикальное подбрасывание якоря с ПТ относительно

индуктора, возбуждаемого от емкостного накопителя энергии [5, 6]. В этой катапulte неподвижный индуктор возбуждает короткий импульс магнитного поля, который индуцирует вихревые токи в коаксиально расположенном электропроводящем якоре. Под воздействием возникающей электродинамической силы якорь вместе с ПТ подбрасывается вверх. При последующем их падении и приближении к индуктору возбуждается повторный импульс магнитного поля, который гарантирует безударное взаимодействие якоря с индуктором. При этом импульсные электромагнитные процессы в катапulte протекают намного быстрее, чем механические, поэтому во время перемещения якоря с ПТ импульсные токи в индукторе и якоре отсутствуют, а значит, магнитные поля индукционно-динамической катапульты не влияют на погрешности измерений g . Влияние магнитных полей катапульты во время протекания импульсных токов при использовании наружного ферромагнитного экрана можно исключить. Указанный экран устраняет поля рассеяния и повышает эффективность катапульты [7], однако из-за электродинамической силы импульсного характера, действующей между индуктором и якорем катапульты, возникают автосейсмические колебания фундамента, влияющие на погрешность измерения g .

Целью работы является исследование влияния автосейсмических колебаний фундамента на погрешность измерения g симметричным способом при допущении, что все узлы БЛГ, кроме ПТ, жестко закреплены в фундаменте.

Основные результаты. В БЛГ с симметричной траекторией движения ПТ решение о значении g принимается по

значениям пар пути и времени, регистрируемым с помощью схемы измерения параметров движения ПТ:

$$\{z(t_k), t_k\}, k=\overline{0, K-1};$$

$$z(t_k) = \sum_{i=0}^2 a_i (t_k - \tau^*)^i + \zeta(t_k), \quad (1)$$

где $z(t_k)$ — отсчеты пути; τ^* — момент времени, при котором достигается максимальная высота при вертикальном подбрасывании ПТ; $a_i, i = 1, 2$ — коэффициенты полиномиальной аппроксимации траектории движения ПТ; $\zeta(t)$ — аддитивная помеха, обусловленная сейсмическим влиянием; K — общее число пар пути и времени.

Удвоенное инвертирование коэффициента при второй степени полинома в (1) соответствует $g = -2a_2$.

При линейной обработке показания БЛГ в каждом из бросков можно представить в виде [8, 9]:

$$\hat{g} = \sum_{k=0}^{K-1} z(t_k) w(k),$$

где $w(k)$ — весовые коэффициенты обработки, которые могут быть определены с использованием метода наименьших квадратов или его обобщений.

Погрешность измерений g представляет разность его измеренного и опорного значений [10]. При теоретическом анализе в качестве опорного значения УСП используем его истинное значение g и определим погрешность измерения как $\hat{g} - g$. Оценим влияние автосейсмических колебаний на показания БЛГ под воздействием силового импульса, возникающего при подбрасывании ПТ.

Баллистический лазерный гравиметр с симметричной траекторией движения ПТ состоит из установленных на фундаменте баллистического блока, в котором катапультируется ПТ, и опор штатива интерферометра, поддерживающих интерферометр и референтный отражатель [2]. Пробное тело представляет выполненный из оптического стекла уголкового отражатель, жестко закрепленный в титановом корпусе цилиндрической формы так, что центр массы ПТ и оптический центр отражателя совпадают. В момент разгона ПТ катапультируется создается сила импульсного характера, воздействующая на баллистический блок, который передает сейсмическое воздействие на фундамент и, в итоге, на референтный отражатель интерферометра. Указанное воздействие негативно влияет на измерения абсолютного значения g .

Возникающее при воздействии импульсной силы перемещение χ фундамента в вертикальном направлении можно описать дифференциальным уравнением

$$m_0 \frac{d^2 \chi}{dt^2} + b_0 \frac{d\chi}{dt} + c_0 \chi = f(t),$$

где m_0 — суммарная масса фундамента, баллистического блока и всех установленных на нем устройств (кроме ПТ); c_0 — коэффициент жесткости грунтового основания; b_0 — коэффициент вязкого трения основания.

Силу воздействия на фундамент представим в следующем виде:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0; \\ f_0 - mg & \text{при } 0 < t \leq \tau; \\ -mg & \text{при } t > \tau, \end{cases} \quad (2)$$

где τ — время разгона ПТ; f_0 — сила, действующая на ПТ со стороны катапульты; m — масса ПТ.

Силу f_0 можно определить из условия сохранения импульса силы $(f_0 - mg)\tau = mv$, где v — скорость движения ПТ после разгона.

Запишем дифференциальное уравнение (2) в виде, описывающем колебательную систему второго порядка с одной степенью свободы [11]:

$$\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 \chi}{dt^2} + 2\xi \frac{1}{\omega_0} \frac{d\chi}{dt} + \chi = \frac{f(t)}{c_0}, \quad (3)$$

где $\omega_0 = (c_0/m_0)^{1/2}$ — частота собственных колебаний; $\xi = b_0 / (2m_0\omega_0)$ — безразмерный коэффициент демпфирования.

Для системы, описываемой уравнением (3), переходную функцию, как реакцию на единичный скачок силы, представим в виде [11]:

$$h(t) = c_0^{-1} \left[1 - (1 - \xi^2)^{-1/2} e^{-\eta t} \cos(\lambda t - \varphi) \right], \quad t \geq 0,$$

где $\lambda = \omega_0 (1 - \xi^2)^{1/2}$; $\eta = \xi \omega_0$; $\varphi = \arcsin \xi$.

Для силы (см. (2)) реакцию фундамента БЛГ можно записать в виде суммы двух элементарных скачков с последующим применением принципа суперпозиции. После соответствующих преобразований перемещения фундамента в вертикальном направлении будут иметь вид

$$\chi(t) = \frac{m}{m_0 \omega_0 \lambda} \left[\left(g + \frac{v}{\tau} \right) e^{-\eta(t-\tau)} \cos[\lambda(t-\tau) - \varphi] - \frac{v}{\tau} e^{-\eta t} \cos(\lambda t - \varphi) \right] - \frac{mg}{c_0}. \quad (4)$$

При $\tau \rightarrow 0$ выражение (4) запишем как

$$\chi(t) = \frac{m}{m_0 \omega_0} e^{-\eta t} \left\{ v \sin(\lambda t - \varphi) + \lambda^{-1} (\eta v + g) \cos(\lambda t - \varphi) \right\} - \frac{mg}{c_0}. \quad (5)$$

Для расчета характеристик вертикальных колебаний фундамента воспользуемся методикой, применяемой для проектирования фундаментов при воздействии динамических нагрузок [12].

Коэффициент жесткости фундамента определим согласно формуле [12]:

$$c_0 = C_z S,$$

где S — площадь фундамента; C_z — коэффициент упругого сжатия основания фундамента, $C_z = bE [1 + (S_0/S)^{1/2}]$; b — коэффициент, $b=1$ для песков, $b=1,2$ для супесей и суглинков, $b=1,5$ для глин и крупнообломочных грунтов; E — модуль

деформации грунта, $E = 5...40$ МПа для глинистых грунтов и супесей; базовая площадь основания $S_0 = 10$ м².

Приняв площадь фундамента БЛГ $S = 2,25$ м², модуль деформации $E = 15$ МПа, получим $C_z = 55,95$ МН/м³, $c_0 = 125,88$ МН/м. При массе фундамента $m_0 = 3000$ кг круговая частота собственных колебаний фундамента составляет $\omega_0 = 204,8$ рад/с.

Коэффициент относительного демпфирования оснований для неустановившихся колебаний можно оценить по формуле [12]:

$$\xi = 6 (E/C_z \rho)^{1/2},$$

где ρ — среднее статическое давление.

Рассмотрим индукционно-динамическую катапульту БЛГ, параметры которой приведены в [6]. Аксиальное перемещение якоря с ПТ возникает под влиянием электродинамической силы f_0 , действующей со стороны неподвижного индуктора, установленного на фундаменте. Указанная сила имеет импульсный характер, зависящий от параметров емкостного накопителя энергии.

На рис. 1 представлены зависимости от времени электродинамических сил f_0 , возникающих между индуктором и якорем при одинаковой энергии емкостного накопителя, но различных емкостях C . Увеличение C емкостного накопителя энергии, а значит, уменьшение его напряжения, вызывает уменьшение силового импульса, но его длительность τ при этом возрастает.

На рис. 2 приведены аналитические зависимости для колебаний фундамента, возникающих вследствие броска ПТ с помощью силовых импульсов следующих длительностей: 0 (δ -функция), 1 и 5 мс. При этом использованы параметры: $\xi = 0,06$; $m = 0,08$ кг; $v = 1,4$ м/с. Как следует из представленных зависимостей, изменение τ в интервале 0—5 мс практически не влияет на процесс перемещений фундамента.

В БЛГ с симметричной траекторией движения ПТ при измерении g используют отсчеты пути и времени, симметрично расположенные относительно момента достижения ПТ максимальной высоты подбрасывания. Временная координата этих отсчетов принадлежит интервалу $[\tau^* - 0,5T, \tau^* + 0,5T]$, где T — длительность интервала обработки.

Автосейсмические колебания фундамента БЛГ приводят к АСП измерений, которая не изменяется при фиксированных условиях наблюдения. Выполним анализ АСП, которая зависит от T , τ^* , а также других факторов (характеристик фундамента, импульса силы и пр.).

Автосейсмическую составляющую погрешности измерений g определим согласно выражению

$$\Delta g = - \sum_{k=0}^{K-1} \chi \left(k\theta + \tau^* - \frac{T}{2} \right) w(k), \quad (6)$$

где θ — интервал дискретизации по времени траектории движения ПТ.

Исследуем влияние T на АПС измерений Δg . Для этого примем условия модельного эксперимента, описанные выше. При этих условиях перемещение референтного отражателя БЛГ описывается выражениями (4), (5) со следующими значениями параметра $\xi \in [0,03; 0,20]$. Определим Δg из (6), где примем $\theta = 0,5$ мс.

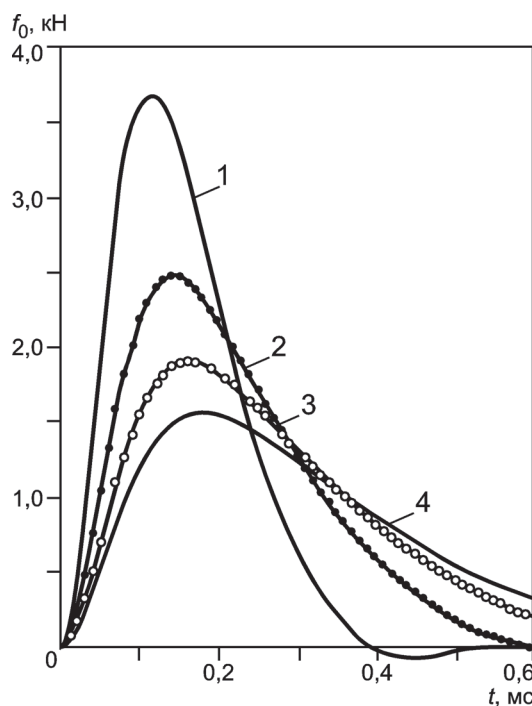


Рис. 1. Электродинамические силы, созданные индукционно-динамической катапультой при одинаковой энергии емкостного накопителя энергии:

1, 2, 3, 4 — $C = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ мФ, соответственно

На рис. 3 отображены зависимости АСП измерений g БЛГ, построенного по симметричной схеме, с применением метода наименьших квадратов от времени T для $\tau = 5$ мс и различных значений параметра затухания ξ . Из представленных графиков следует, что с увеличением ξ влияние перемещений фундамента на погрешность измерений g снижается.

В результате исследований установлено, что с увеличением времени разгона ПТ τ уменьшается АСП измерений Δg . Однако при длительности разгона ПТ, меньшей 10 мс, ее дальнейшее сокращение слабо сказывается на результатах

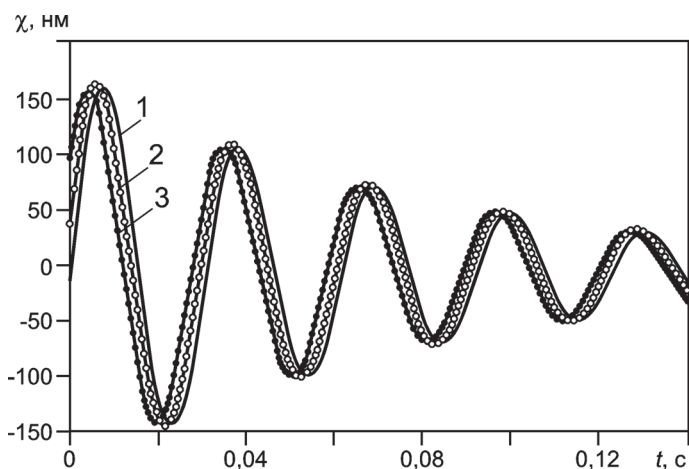


Рис. 2. Перемещения фундамента при броске пробного тела:

1, 2, 3 — $\tau = 0; 1; 5$ мс, соответственно

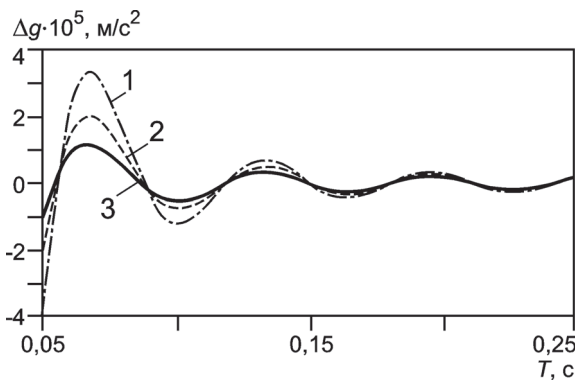


Рис. 3. Зависимость автосейсмической составляющей погрешности измерения ускорения свободного падения от времени измерений для различных значений параметра затухания ξ :

1, 2, 3 — $\xi = 0,08; 0,10; 0,12$, соответственно

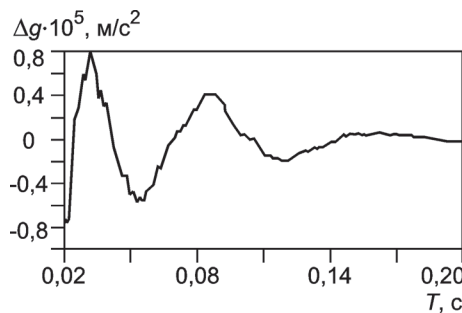


Рис. 4. Экспериментальная зависимость измерений ускорения свободного падения от времени, полученная с помощью портативного гравиметра ННЦ «Институт метрологии» на измерительном пункте в пос. Липцы (Украина, Харьков)

измерений. То же самое можно утверждать и о форме разгоняющей силы при указанном времени разгона.

На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость g от T , полученная при использовании портативного гравиметра. Сравнение экспериментальной зависимости (см. рис. 4) с теоретической при $\xi = 0,12$ (см. рис. 3) позволяет сделать вывод об их подобии, что подтверждает основные теоретические положения.

Выводы. Получены аналитические выражения для вертикальных колебаний фундамента баллистических лазерных гравиметров с симметричной схемой, обусловленных броском пробного тела. Изучено действие таких колебаний на показания гравиметров. Исследовано влияние длительности обработки данных на автосейсмическую составляющую погрешности измерения ускорения свободного падения при различных значениях параметра относительного затухания основания фундамента. Установлено, что с увеличением затухания погрешность измерения ускорения свободного падения уменьшается. С сокращением времени разгона пробного тела автосейсмическая составляющая погрешности измерения ускорения свободного падения возрастает. При частоте собственных колебаний фундамента около 30 Гц длительность разгона пробного тела меньше 10 мс практически не сказывается на результатах измерения ускорения свободного падения.

Литература

1. Витушкин Л. Ф. и др. Лазерные интерферометры перемещений с субнанометровым разрешением в абсолютных баллистических гравиметрах // Измерительная техника. 2012. № 3. С. 3—8; Vitushkin L. F. et al. Laser displacement interferometers with subnanometer resolution in absolute ballistic gravimeters // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N. 3. P. 221—228.
2. Болюх В. Ф., Винниченко А. И. Совершенствование кинематической схемы баллистического гравиметра за счет линейного электромеханического преобразователя // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. № 2/7 (50). С. 9—15.
3. Jiang Z., et al. Final report on the Seventh International Comparison of Absolute Gravimeters (ICAG-2005) // Metrologia. 2011. V. 48. N. 5. P. 246—260.
4. Omelchenko A. V. et al. Development of methods for data processing in a rise-and-fall gravimeter on the basis of polynomial models // Proceedings of IAG Int. Symp. on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements St. Petersburg, 17-20 September, 2013. P. 143—147.
5. Пат. 2491581 РФ. Баллистический гравиметр с индукционно-динамическим приводом для симметричного способа измерений ускорения свободного падения / В. Ф. Болюх, А. И. Винниченко // Изобретения. Полезные модели. 2013, № 24.
6. Болюх В. Ф., Винниченко А. И. Концепция индукционно-динамической катапульты баллистического лазерного гравиметра // Измерительная техника. 2013. № 10. С. 6—10; Bolyukh V. F., Vinnichenko A. I. Concept of an Induction-Dynamic Catapult for a Ballistic Laser Gravimeter // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 10. P. 1098—1104.
7. Bolyukh V. F., Oleksenko S. V., Katkov I. I. The use of fast cryogenic cooling and ferromagnetic core greatly increases efficiency of a linear induction-dynamic converter // Refrigeration Sci. and Technol. Proc. 13th cryogenics 2014 IIR int. conf. Praha, Czech Republic. April 7-11, 2014. P. 268—275.
8. Омельченко А. В. и др. Анализ влияния характеристик полиномиальной модели на показания симметричных баллистических гравиметров // Украинский метрологический журнал. 2013. № 3. С. 33—38.
9. Омельченко А. В., Федоров А. В. Весовые функции полиномиального регрессионного анализа // Вестник Харьковского национального университета. Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления. 2008. № 83. Вып. 10. С. 193—205.
10. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины / Пер. с англ. и фр. СПб.: НПО «Профессионал», 2010.
11. Магнус К. Колебания: Введение в исследование колебательных систем / Пер. с нем. М.: Мир, 1982.
12. Швецов Г. И. и др. Основания и фундаменты: Справочник / Под ред. Г. И. Швецова. М.: Высшая школа, 1991.

Дата принятия 21.10.2014 г.