

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ УСТАНОВКИ ЯКОРЯ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОЙ КАТАПУЛЬТЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО ГРАВИМЕТРА С СИММЕТРИЧНЫМ СПОСОБОМ ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

В. Болюх, доктор технических наук, профессор кафедры общей электротехники, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,

А. Омельченко, кандидат технических наук, доцент кафедры «сети связи», Харьковский национальный университет радиоэлектроники,

П. Неежмаков, доктор технических наук, генеральный директор,

А. Винниченко, ведущий инженер, ученый-хранитель эталона единицы ускорения свободного падения, Национальный научный центр «Институт метрологии», Харьков

выполнены оценки предельных отклонений траектории свободного полета пробного тела от вертикали, которые могут привести к срыву интерференции в лазерно-оптическом приемно-излучающем устройстве баллистического лазерного гравиметра с симметричным способом измерения ускорения свободного падения. Обоснована конструкция гравиметра с индукционно-динамической катапультой, в которой осуществляется прямое электропримеханическое преобразование энергии. С использованием 3D математической модели катапульти установлены предельные значения начального бокового смещения якоря и его наклона относительно обмотки индуктора. Предложено техническое решение по обеспечению допустимой начальной несимметрии якоря в катапульте гравиметра.

The limiting deviations of the trajectory of the free flight of the test body from the vertical are estimated, which can lead to disruption of interference in the laser-optical receiving-emitting device of a ballistic laser gravimeter with a symmetrical method of measuring the acceleration of gravity. The design of a gravimeter with an induction-dynamic catapult, in which a direct electromechanical energy conversion is realized, is substantiated. Using the 3D mathematical model of the catapult, the limiting values of the initial lateral displacement of the armature and its inclination relative to the winding of the inductor are established. A technical solution is proposed to ensure the permissible initial asymmetry of the anchor in the gravity catapult.

Ключевые слова: баллистический лазерный гравиметр, симметричный способ измерения ускорения свободного падения, индукционно-динамическая катапульта, предельные отклонения траектории свободного полета, предельные значения начальной несимметрии.
Keywords: ballistic laser gravimeter, symmetrical method of measuring the acceleration of gravity, induction-dynamic catapult, limiting deviations of the trajectory of the free flight, limiting values of the initial asymmetry.

Для высокоточных измерений абсолютного значения ускорения свободного падения g применяются баллистические лазерные гравиметры (БЛГ), в которых осуществляется подбрасывания пробного тела (ПТ), представляющего собой оптический угловой отражатель (УО) в специальном корпусе и являющегося составной частью измерительной системы лазерного интерферометра Майкельсона [1–3]. В мировой практике используются два типа баллистических гравиметров со свободным движением ПТ в гравитационном поле, которые реализуют симметричный и несимметричный способы измерения ускорения свободного падения. Гравиметры с сим-

ды воздействуют на результат измерения с противоположными знаками при взлете и падении ПТ, происходит их взаимная компенсация. Основным недостатком гравиметров с симметричным способом измерения состоит в наличии механического воздействия, которое возникает при броске ПТ катапультой. Сравнительно короткий толчок катапульти порождает колебания фундамента и всех оптико-механических элементов гравиметра, что обуславливает соответствующую составляющую погрешности измерения g [4]. Один из возможных путей уменьшения автосейсмической составляющей погрешности измерения g состоит в уменьшения массы в БЛГ использовать индукционно-динамическую

катапульту (ИДК), обеспечивающую вертикальное подбрасывание якоря с ПТ относительно индуктора, возбуждаемого от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) [5]. При этом осуществляется прямое электро-механическое преобразование энергии при свободном перемещении якоря и устраняется целый ряд систематических погрешностей.

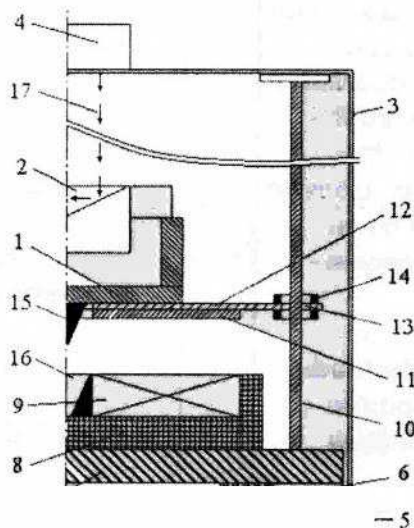
Индукционно-динамические преобразователи широко используются в различных областях науки и техники [6—8]. В известных электро-механических преобразователях для централизованного аксиального перемещения якоря применяются специальные направляющие элементы. Однако для БЛГ необходима катапульта, в которой не должно быть взаимодействия между якорем, подбрасывающим ПТ, и направляющими элементами, поскольку при этом нарушается динамика свободного полета ПТ. Нарушение динамики вертикального полета ПТ возможно за счет начальных отклонений якоря относительно неподвижной обмотки индуктора катапульты.

Целью статьи является оценка влияния начальных отклонений якоря, подбрасывающего ПТ, относительно обмотки индуктора индукционно-динамической катапульты, на точность БЛГ.

КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА БЛГ С ИДК

Рассмотрим БЛГ с ИДК, в которой при соосности обмотки индуктора и якоря осуществляется свободный вертикальный полет ПТ (рис. 1).

БЛГ содержит ПТ 1 с УО 2, вакуумную камеру 3, на верхней стенке которой установлена лазерно-оптическое приемно-излучающее устройство 4 [9, 10]. На днище 5 вакуумной каме-



ры 3 на демпферах 6 установлена массивная силовая плита 7, на которой зафиксированы ферромагнитный сердечник 8 с обмоткой индуктора 9, направляющие вертикальные стойки 10. В вакуумной камере 3 расположен якорь 11, который соединен с силовым толкающим диском 12. В силовом толкающем диске 14 выполнены отверстия 13, коаксиально соединенные с подшипниками 14, которые охватывают вертикальные стойки 10. Подшипники 14 обеспечивают свободное перемещение вдоль направляющих стоек, осуществляя взаимодействие только при критическом отклонении якоря с ПТ от вертикальной оси. Для стабилизации начального положения якоря 11 к днищу ПТ 1 присоединен направляющий конус 15, форма боковых стенок которого совпадает с формой направляющей конусообразной аксиальной выемки 16 центрального сердечника обмотки 9. Ферромагнитный сердечник 8 выполнен из магнетодизлектрика, что устраняет вихревые токи и обеспечивает экранирование магнитных полей рассеяния [11].

При разряде ЕНЭ на обмотке индуктора 9 возникает первый импульс тока, под действием которого магнитное поле наводит в электропроводящем якоре 11 ток. Под действием аксиальных электродинамических усилий (ЭДУ) f_z отталкивания якорь 11 вместе с силовым диском 12 и ПТ 1 совершают свободное вертикальное перемещение Δz . При этом включается приемно-излучающее устройство 4, воздействующее на УО 2 посредством оптического луча 17, и осуществляется измерение g . При падении якоря 11 вниз в момент приближения его к обмотке индуктора 9 возбуждают повторный импульс тока. Поскольку остаточное напряжение ЕНЭ меньше начального, возникающие ЭДУ f_z отталкивания достаточны для плавного торможения якоря с ПТ.

В данной ИДК возможны начальные отклонения якоря, такие как осевое смещение или поворот на некоторый угол относительно оси обмотки индуктора. Такие начальные отклонения влияют на характер свободного полета якоря с ПТ. В результате свободный полет якоря с ПТ будет происходить с отклонением от вертикальной оси, что может привести к нарушению интерференции отраженного луча в лазерно-оптическом приемно-излучающем устройстве БЛГ и к невозможности высокоточных измерений g .

Проанализируем влияние параметров свободного полета ПТ на показатели БЛГ и установим величины допустимых отклонений траектории движения ПТ. Такой анализ необходим для оценки точности

начальной установки подвижного якоря относительно неподвижной обмотки индуктора ИДК.

ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕТА ПТ НА ПОКАЗАТЕЛИ БЛГ

Оценим отклонения траектории свободного полета ПТ от вертикали, которые могут привести к срыву интерференции в лазерно-оптическом приемно-излучающем устройстве БЛГ. УО представляет собой совокупность трех плоских зеркал, расположенных во взаимноперпендикулярных плоскостях, проходящих через две оси декартовой системы координат $\{x, y, z\}$ (рис. 2).

УО изменяет направления компонент волнового вектора k падающей плоской волны на противоположные [12]:

$$(k_x, k_y, k_z) \rightarrow (-k_x, -k_y, -k_z). \quad (1)$$

Преобразование светового луча в УО описывается выражением [12]:

$$E_{ref}(x, y, z) = \rho E_{inc}(-x + 2x_0, -y + 2y_0, -z + 2z_0), \quad (2)$$

где E_{ref} , E_{inc} — амплитуды, соответственно световых волн отражения и падения; ρ — амплитудный коэффициент; x_0, y_0, z_0 — координаты вершины УО.

Для системы координат, в которой центр совпадает с вершиной УО, выражение (2) для отраженного светового луча принимает вид:

$$E_{ref}(x, y, z) = \rho E_{inc}(-x, -y, -z). \quad (3)$$

В плоскости, перпендикулярной направлению падающего луча, картина отражения имеет вид, изображенный на рис. 3.

Здесь точка 0 — проекция вершины УО на указанную плоскость; точки А и С представляют собой проекции падающего и отраженного лучей на указанную плоскость. В силу выражения (3) точки А и С расположены симметрично относительно точ-

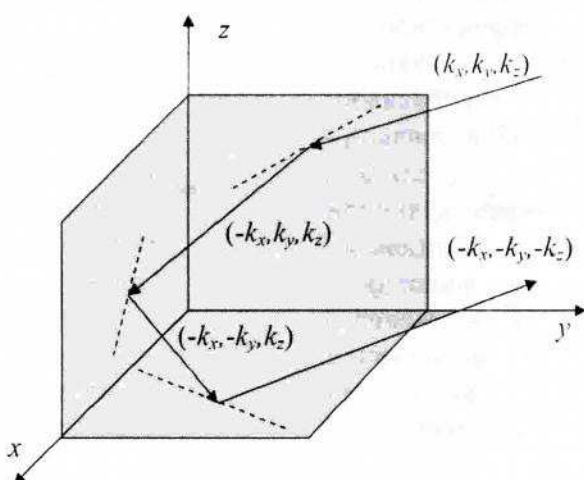


Рис. 2. Отражение оптического луча плоскими

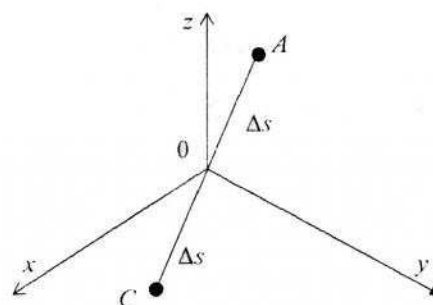


Рис. 3. Проекция падающего и отраженного лучей на плоскость, перпендикулярную направлению падения

Fig. 3. Projections of the incident and reflected rays onto a plane perpendicular to the direction of incidence

ки 0 и удалены от нее на одинаковое расстояние Δs .

Таким образом, отклонение ПТ на величину Δs от вертикали приводит в худшем случае к отклонению отраженного луча от начального положения на расстояние $2\Delta s$. Если величина этого отклонения превысит диаметр светового пятна d , то интерференция лучей в лазерно-оптическом приемно-излучающем устройстве БЛГ исчезнет. Поэтому будем считать допустимыми такие смещения ПТ от вертикали, при которых

$$\Delta s \leq d/4. \quad (4)$$

Таким образом, при диаметре светового пятна $d = 3,0$ мм смещение ПТ Δs не должно превышать величины 0,75 мм.

При подбрасывании ПТ возникает вращение его оптического центра относительно центра масс. Оптическая разность хода χ при этом описывается выражением [13]:

$$\chi = -(H\theta^4/4)(1/\mu^2 + 1/3\mu) - \Delta h(\theta^2 - \theta^4/12) + 2\delta(\theta - \theta^3/6), \quad (5)$$

где θ — угол поворота УО вокруг горизонтальной оси, проходящей через центр масс; H — высота УО; μ — показатель преломления вещества УО; μ и δ — величины несовпадений центра масс ПТ с оптическим центром УО, соответственно по вертикали и горизонтали.

Пренебрегая в выражении (5) членами, пропорциональными величине θ^4 , и предполагая равномерное вращение с угловой скоростью ω , получим

$$\chi = -\Delta h\omega^2 t^2 + 2\delta(\omega t - \omega^3 t^3/6). \quad (6)$$

Для оценки влияния оптической разности хода χ на погрешность измерения g симметричным способом сделаем в выражении (6) замену переменной $t = \tau + u$, где τ — время от броска ПТ до достижения им вершины полета, а u — время относительно вершины полета ПТ. В результате, с точностью до незначительных для измерения членов, получаем

Из выражения (7) следует, что погрешность измерения g равна

$$\Delta g = -\Delta h \cdot \omega^2 - \delta \cdot \tau \cdot \omega^3. \quad (8)$$

Поскольку для типовых условий величина $\omega t \ll 1$, то, согласно выражению (8), основное влияние на измерение g симметричным способом оказывает несовпадение центра масс ПТ с оптическим центром УО по вертикали. Если пренебречь вторым членом в выражении (8), то придем к известной оценке погрешности измерения g [14]:

$$|\Delta g| = \Delta h \cdot \omega^2. \quad (9)$$

Из выражения (9) вытекает ограничение для скорости вращения ПТ:

$$\omega \leq \sqrt{\Delta g / \Delta h}. \quad (10)$$

За счет особой конструкции и калибровки можно добиться, чтобы величина Δh не превышала 0,1 мм [14]. С учетом этого, при $\Delta g \leq 10^{-8}$ м/с² и $\Delta h = 10^{-4}$ м, получим ограничение для допустимой угловой скорости вращения ПТ $\omega \leq 0,01$ рад/с.

Рассмотрим, при каких начальных отклонениях от симметрии якоря относительно обмотки индуктора ИДК обеспечиваются рассчитанные выше ограничения, не приводящие к срыву интерференции в лазерно-оптическом приемно-излучающем устройстве БЛГ.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ИДК

В ИДК, при возбуждении от ЕНЭ, возникают импульсные электромагнитные и механические процессы, проявляющиеся при перемещении якоря относительно индуктора. Рассмотрим математическую модель ИДК, которая использует метод конечных элементов [11]. Для определения электромагнитных параметров ИДК рассчитывается векторный магнитный потенциал A и составляющие вектора магнитной индукции B . Граничными условиями системы

внешней цепи; U_0 — напряжение заряда ЕНЭ; C — емкость ЕНЭ; N_0 — число витков индуктора; s — площадь поперечного сечения индуктора, пронизываемая магнитным потоком; A_t — проекция векторного магнитного потенциала на направление обхода контура; V — объем индуктора.

ЭДУ, действующие на якорь, находятся с использованием тензора натяжения Максвелла:

$$f_z = 0,5 \oint_{S_0} [H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)] ds, \quad (12)$$

где S_0 — площадь, ограничивающая поперечное сечение якоря; n — единичный вектор нормали к поверхности якоря.

Скорость и перемещение якоря с ПТ относительно обмотки индуктора вдоль оси z представляются в виде рекуррентного соотношения [7]:

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + \vartheta \cdot \Delta t / (P_a + P_c) \\ \Delta z(t_{n+1}) = \Delta z(t_n) + V(t_n) \Delta t + \vartheta \cdot \Delta t^2 / (P_a + P_c), \quad (13)$$

где $\vartheta = f_z + (-1)^m g(P_a + P_c)$; P_a , P_c — массы якоря и ПТ соответственно; $m = 1$ при восходящей и $m = 2$ при нисходящей траекториях свободного движения.

Уравнения (11)—(13) описывают электромеханические процессы в ИДК при начальных условиях: $u_c(0) = U_0$; $i_1(0) = 0$; $\Delta z(0) = 0$; $V(0) = 0$, где u_c — напряжение ЕНЭ. Решения этих уравнений получены с использованием метода конечных элементов при интегрировании по пространственным переменным и усовершенствованного метода Гира при интегрировании по времени. При перемещении якоря используется «деформируемая» сетка. Для достижения поставленной цели была разработана компьютерная 3D модель ИДК в программном пакете *Comsol Multiphysics*, который позволяет адаптивно изменять сетку и контролировать ошибки при работе с различными численными решениями [15]. Расчетный шаг по времени автоматически варьировался в зависимости от условий сходимости и показателей погрешности полученных решений.

Рассмотрим ИДК, которая содержит неподвижный индуктор с многовитковой, плотно намотанной и пропитанной эпоксидной смолой обмоткой с параметрами: внешний диаметр $D_{ex1} = 100$ мм, внутренний диаметр $D_{in1} = 10$ мм, высота $H_1 = 10$ мм, количество витков $N_1 = 46$ ед. медной шины сечением $a \times b = 1,8 \times 4,8$ мм². Якорь ИДК выполнен в виде медного диска с параметрами: внешний диаметр $D_{ex2} = 100$ мм, внутренний диаметр $D_{in2} = 10$ мм, высота $H_2 = 3$ мм. К якорю присоединено ПТ массой m и зарядное напряжение $U_0 = 500$ В.

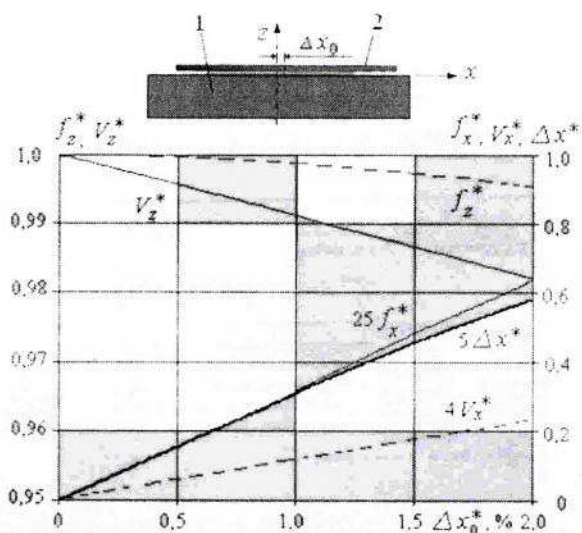


Рис. 4. Зависимость относительных значений составляющих скоростей, ЭДУ и смещения в верхней точке подбрасывания ПТ от относительного начального бокового смещения якоря

Fig. 4. Dependence of the relative values of the velocity components, EDE and bias at the upper point of the tossing of the PT from the relative initial lateral displacement of the armature

Электромеханические характеристики ИДК, в которой осуществляется строго вертикальное перемещение якоря, представлены в работе [5]. Исследуем влияние несимметрии якоря относительно обмотки индуктора, а именно, начального угла наклона α_0 и бокового смещения Δx_0 , на показатели ИДК. Как показывают расчеты, в результате таких отклонений якоря, помимо вертикальных составляющих скорости V_z и ЭДУ f_z , возникают и боковые составляющие скорости V_x и ЭДУ f_x . В верхней точке подбрасывания якорь отклоняется от вертикальной оси на расстояние Δx .

На рис. 4 представлены относительные составляющие скорости и ЭДУ в зависимости от начального бокового смещения якоря Δx_0 . Все указанные значения представлены в безразмерном виде и обозначены звездочкой. Составляющие скорости и ЭДУ нормированы соответствующими величинами варианта ИДК при строго вертикальном перемещении якоря, а величины смещений Δx_0 и Δx нормированы внешним диаметром якоря $D_{\text{акт}}$.

При увеличении начального бокового смещения Δx_0 аксиальные составляющие ЭДУ и скорости несколько уменьшаются. При относительном начальном смещении якоря $\Delta x_0^* = 0,02$ его вертикальные показатели снижаются: относительная скорость составляет $V_z^* = 0,982$, а относительные ЭДУ $f_z^* = 0,996$. Однако при этом появляются боковые составляющие

скорости и ЭДУ. При относительном начальном смещении якоря $\Delta x_0^* = 0,02$ относительная боковая скорость составляет $V_x^* = 0,055$, а относительные боковые ЭДУ $f_x^* = 0,025$. В результате этого в верхней точке подбрасывания якорь с ПТ смещается на относительное расстояние $\Delta x^* = 0,12$ от центральной оси.

На рис. 5 представлены относительные составляющие скорости и ЭДУ в зависимости от начального наклона якоря относительно обмотки индуктора на угол α_0 . При увеличении начального угла наклона якоря вертикальные составляющие ЭДУ и скорости также несколько уменьшаются. Так, при угле наклона $\alpha_0 = 2^\circ$ его относительная скорость составляет $V_z^* = 0,97$, а относительные ЭДУ — $f_z^* = 0,86$. При этом также возникают боковые составляющие скорости и ЭДУ. При угле наклона якоря $\alpha_0 = 2^\circ$ относительная скорость составляет $V_x^* = 0,06$, а относительные ЭДУ — $f_x^* = 0,026$. В результате этого в верхней точке подбрасывания якорь с ПТ смещается на относительное расстояние $\Delta x^* = 0,12$. Таким образом, наклон якоря на угол $\alpha_0 = 2^\circ$ по точностным показателям практически аналогичен наличию начального смещения якоря на относительную величину $\Delta x_0^* = 0,02$.

Для того, чтобы обеспечить устойчивую интерференцию в лазерно-оптическом приемно-излучающем устройстве БЛГ, начальное боковое смещение якоря не должно превышать $\Delta x_0 < 0,11$ мм, а начальный наклон якоря не должен превышать угол $\alpha_0 < 0,15^\circ$ относительно обмотки индуктора ИДК.

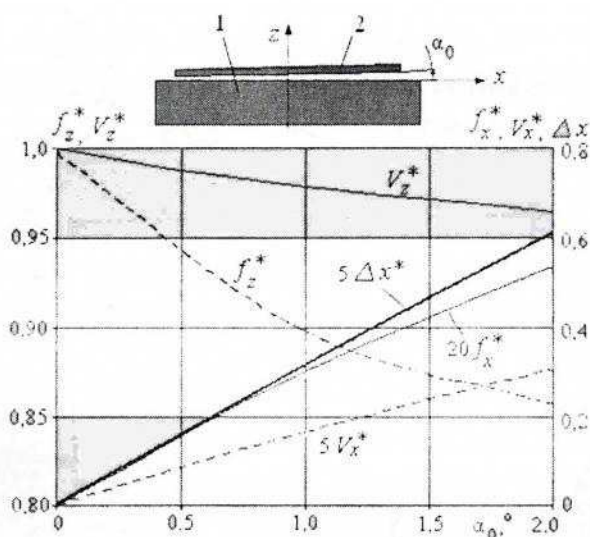


Рис. 5. Зависимость относительных значений составляющих скоростей, ЭДУ и смещения в верхней точке подбрасывания ПТ от начального угла наклона якоря

Fig. 5. Dependence of the relative values of the velocity components, EDE and bias at the upper point of the tossing of the PT from the initial angle of inclination of the armature

Чтобы обеспечить указанную начальную несимметрию якоря в ИДК, предлагается следующее конструктивное решение [9]. К днищу ПТ присоединяется направляющий конус, форма боковых стенок которого совпадает с формой направляющей конусообразной аксиальной выемки центрального сердечника обмотки (рис.1). Как показывают расчеты, вследствие этого обеспечиваются такие допустимые значения α_0 и Δx_0 , при которых реализуется практически вертикальная траектория свободного полета ПТ. А значит, в лазерно-оптическом приемно-излучающем устройстве БЛГ возникает устойчивая интерференция, при помощи которой измеряют величину g .

ВЫВОДЫ

Выполнена оценка предельных отклонений траектории свободного полета ПТ от вертикали, которые могут привести к срыву интерференции в лазерно-оптическом приемно-излучающем устройстве БЛГ с симметричным способом измерения g .

Обоснована конструкция БЛГ с ИДК, в которой осуществляется прямое электромеханическое преобразование энергии и якорь подбрасывает ПТ без взаимодействия с направляющими элементами.

На базе компьютерной 3D модели ИДК установлено влияние начального бокового смещения якоря и его наклона относительно обмотки индуктора на осевые и боковые составляющие скоростей, ЭДУ и смещения якоря от вертикальной оси в верхней точке подбрасывания ПТ. Показано, что начальное боковое смещение якоря не должно превышать $\Delta x_0 < 0,11$ мм, а начальный наклон якоря не должен превышать угол $\alpha_0 < 0,15^\circ$ относительно обмотки индуктора ИДК.

Для обеспечения допустимой начальной несимметрии якоря в ИДК к днищу ПТ присоединяется направляющий конус, форма боковых стенок которого совпадает с формой направляющей конусообразной аксиальной выемки центрального сердечника обмотки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Витушкин Л.Ф. и др. Лазерные интерферометры перемещений с субнанометровым разрешением в абсолютных баллистических гравиметрах // Измерительная техника (Vitushkin L.F. et al. Laser displacement interferometers with subnanometer resolution in absolute ballistic gravimeters // Measurement Techniques) — 2012. — № 3. — С/Р. 221–228.
2. D'Agostino G., Germak A. and Origlia C. Absolute Measurements of the Free-Fall Acceleration g in Sèvres (ICAG09) // Technical report I.N.R.I.M. 2009. RTN. 31/2009 (November) 36 p.
3. Jiang Z. et al. Final report on the Seventh International Comparison of Absolute Gravimeters (ICAG-2005) // Metrologia. 2011. № 48. P. 246–260.
4. Болюх В.Ф., Омельченко А.В., Винниченко А.И. Влияние автосейсмических колебаний фундамента на показания баллистического гравиметра с индукционно-динамической катапульты // Измерительная техника (Bolyukh V.F., Omelchenko 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. — № 2. — С/Р. 137–142.
5. 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. 2014. № 1. V. 56. N 10. P. 1098–1104).
6. Татмышевский К.В., Марычев С.Н., Козлов С.А. Магнитно-импульсные метательные средства поражения для систем активной защиты объектов особой важности // Современные технологии безопасности. 2005. № 4. С. 8–11.
7. Bolyukh V.F. et al. High-efficiency impact electro-mechanical converter // Russian electrical engineering. 2011. V. 82. N 2. P. 104–110.
8. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept // IEEE Trans. Magnetics. 2012. V. 48. N 11. P. 3315–3318.
9. Пат. № 2491581 РФ. Баллистический гравиметр с индукционно-динамическим приводом для симметричного способа измерений ускорения свободного падения / Болюх В.Ф., Винниченко А.И. // Изобретения. Полезные модели. 2013, № 24.
10. Bolyukh V., Omelchenko A., Vinnichenko A. A ballistic laser gravimeter for a symmetrical measurement method with the inductive-dynamic catapult and auto-seismic vibration preventing // Proceedings 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM-2016). — State Research Center of the Russian Federation. — Saint Petersburg, Russian Federation. 12-15 April 2016. Code 121590. P. 113–118.
11. Bolyukh V. F., Oleksenko S. V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter // Russian Electrical Engineering. 2015. V. 86, N 7. P. 425–431.
12. Петров В. В. и др. Анализ информации отраженного от ретрозеркал света // Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2005. Т. 7, № 3. С. 17–25.
13. Бренер В.Н., Бондарев С.С. К вопросу о применении угольковых отражателей для интерференционных измерений ускорения силы тяжести // Измерение ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной: Тр. метрол. ин-тов. Вып. 8. Харьков: ХГНИИМ. 1972. С. 109–123.
14. Torre B. Гравиметрия: Пер. с англ. — М.: Мир, 1999. 429 с.
15. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com>. 

ГІОУ. І.З. ГРЕВІТО, Д. ЗС. (десп.), Україне, recommended this article to be published.

Отримано / received: 10.11.2017.