

МЕТОД БАЛАНСИРОВКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО МАЯТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

В. Л. ТКАЛИЧ¹, М. Е. КАЛИНКИНА¹, А. Г. КОРОБЕЙНИКОВ^{1,2},
О. И. ПИРОЖНИКОВА¹

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru

²Санкт-Петербургский филиал

Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН,
199034, Санкт-Петербург, Россия

Представлен метод балансировки чувствительного элемента маятникового акселерометра путем лазерного испарения металла. Рассматривается процесс юстировки балансировочного груза микромеханического акселерометра для нижнего и верхнего положений чувствительного элемента по отношению к вертикали. Чувствительным элементом прибора служит физический маятник. При использовании микромеханического маятникового акселерометра в качестве датчика пороговая чувствительность будет определять чувствительность микромеханического акселерометра к наклону основания в поле сил земного притяжения. Выведены расчетные формулы для нижнего и верхнего положений маятника. Для практической реализации рассматриваемого метода предлагается использовать технологию лазерного испарения материала с поверхности балансировочного груза.

Ключевые слова: чувствительный элемент, микромеханический акселерометр, маятниковый акселерометр, центр масс, лазерное испарение

В последнее время требования к качеству управления движущимися объектами значительно возросли [1], что объясняется не только увеличением скоростей, но и новыми задачами по обеспечению дистанционного управления транспортными средствами, которые движутся независимо по конкретному маршруту.

Микромеханические акселерометры (ММА) являются датчиками линейного ускорения и, следовательно, используются, как правило, для измерения углов наклона компонентов и узлов транспортного средства, сил инерции, ударных нагрузок и вибраций. Особенность этого типа датчиков — полная герметичность и низкая чувствительность к внешним электромагнитным воздействиям.

Маятниковый акселерометр выполняет функцию чувствительного элемента для использования в инерциальных авиационных системах различного класса и назначения.

Чувствительным элементом (ЧЭ) прибора является физический маятник. При воздействии на маятник составляющей силы земного притяжения в направлении измерительной оси прибора маятник отклоняется относительно корпуса. Это вращение маятника, с использованием емкостного датчика угла, состоящего из дифференциального конденсатора и дифференциального трансформатора, преобразуется напряжением переменного тока в электрический сигнал, определяемый направлением отклонения маятника. Сигнал датчика угла, т.е. сигнал выходной обмотки дифференциального трансформатора, подается на усилитель-преобразователь, который предназначен для усиления и преобразования сигнала. Полученный усиленный сигнал поступает на обмотку магнитоэлектрического датчика силы. Момент, возникающий при взаимодействии тока, протекающего в обмотках датчика силы, с полем постоянного магнита, уравнивает момент составляющей сил земного притяжения. Итак, значение

этого тока пропорционально углу отклонения плеча маятника от вертикали места. Порогом чувствительности ММА называют минимальное ускорение, на которое он реагирует. Отклонение ММА от измерительной оси прибора выбирают исходя из условия обеспечения заданного порога чувствительности при наличии возможных вредных моментов вокруг оси поворота маятника и характеризуют произведением ml , где m — масса балансировочного груза, l — длина плеча маятника.

При использовании маятникового ММА в качестве датчика его пороговая чувствительность будет определять чувствительность ММА к наклону основания в поле сил земного притяжения. Рассмотрим поведение маятника, подвешенного на упругом шарнире, в поле сил притяжения Земли. Выберем в качестве основания маятника плоскость, перпендикулярную положению плеча маятника, когда момент возмущения упругого шарнира (упругий момент) равен нулю. Исходным является положение маятника, когда его основание совпадает с плоскостью горизонта, а центр масс маятника находится над плоскостью горизонта. При повороте маятник отклоняется от исходного положения на малый угол α .

Чувствительные элементы маятниковых ММА имеют малые габаритные размеры и вес и обладают достаточно большой стабильностью смещения нуля, однако погрешность коэффициента преобразования в течение срока эксплуатации составляет 1—2 %. Кроме того, в связи с необходимостью преобразования аналогового сигнала в импульсную или цифровую форму массогабаритные характеристики прибора значительно увеличиваются.

Для маятника в упругом подвесе, центр масс которого лежит в вертикальной плоскости, проходящей через ось подвеса, упругий момент равен нулю. При вращении маятника вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной плоскости, проходящей через ось пружинного элемента и центр масс, центр тяжести не смещается и, следовательно, сигнал датчика угла не изменяется. Предполагается, что при этом выполняется соотношение

$$K_y \alpha > mlg \sin \alpha, \text{ для малых углов } K_y > mlg,$$

где K_y — жесткость упругого подвеса, α — конструктивный угол, определяющий погрешность ММА [2].

В противном случае положение верхнего маятника будет неустойчивым.

Таким образом, процесс юстировки ЧЭ ММА без обратной связи должен включать в себя следующие операции:

— установку датчика угла в начальное положение, что соответствует вертикальному положению оси ЧЭ, когда отсутствует закручивание упругого элемента и упругий момент равен нулю;

— балансировку подвеса относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось ЧЭ.

В процессе юстировки массу основного балансировочного груза необходимо изменить. Для получения соотношений, определяющих приращение массы, рассмотрим два положения ЧЭ ММА по отношению к вертикали места — нижнее положение (нижний маятник) и верхнее положение (верхний маятник).

При совмещении базовой плоскости прибора с плоскостью горизонта маятник займет нижнее положение, как показано на рис. 1.

Если в исходном положении создаваемый упругими перемычками момент $M_y = 0$, то после поворота для положения равновесия можно записать

$$M_M - M_y = 0, \quad (1)$$

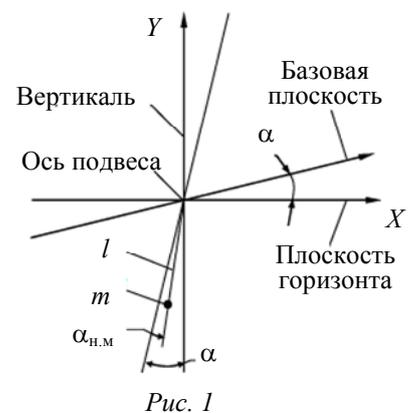


Рис. 1

где $M_M = M_0 g (\alpha - \alpha_{н.м})$ (в предположении, что углы α и $\alpha_{н.м}$ — малые; $M_0 = ml$ ($M_{0p} = 5,14 \cdot 10^{-6}$ кг·м); $\alpha_{н.м}$ — угол закрутки упругих перемычек, измеряемый датчиком угла (ДУ); $g = 9,81$ м/с²; $M_y = K_y \alpha_{н.м}$, где расчетная жесткость подвеса $K_{yp} = 4,133 \cdot 10^{-4}$ Н·м/рад.

Используя выражение (1), для исходного положения ЧЭ (до юстировки) находим

$$\alpha_0 = \frac{K_y + mlg}{mlg} \alpha_{0,н.м} = (\varepsilon + 1) \alpha_{0,н.м}, \quad (2)$$

где $\alpha_{0,н.м}$ — начальный угол закрутки упругих перемычек при нижнем положении маятника;

$$\varepsilon = \frac{K_y}{mlg} \cdot \frac{\alpha}{\sin \alpha} = \frac{K_y}{M_0 g} \cdot \frac{\alpha}{\sin \alpha}, \text{ при малых } \alpha : \varepsilon = \frac{K_y}{mlg} = \frac{K_y}{M_0 g}.$$

Отсюда для расчетных значений K_{yp} и $M_{0p} = ml$ получаем $\varepsilon = 8,2$.

Для обеспечения $\alpha = 0$ в выражение (1) необходимо добавить дополнительный момент нижнего маятника $\Delta M_{н.м}$; подбор значения $\Delta M_{н.м}$ позволяет обеспечить выполнение условия

$$M_M - M_y - \Delta M_{н.м} = 0.$$

Решив это уравнение относительно α , с учетом (2) получим

$$\alpha = \frac{K_y + mlg}{mlg} \alpha_{0,н.м} + \frac{\Delta M_{н.м}}{mlg} = \alpha_0 + \frac{\Delta M_{н.м}}{mlg}.$$

Подставив $\alpha = 0$, получим выражение для определения $\Delta M_{н.м}$:

$$\Delta M_{н.м} = -(K_y + mlg) \alpha_{0,н.м} = -mlg(1 + \varepsilon) \alpha_{0,н.м} = -M_0 g(1 + \varepsilon) \alpha_{0,н.м}. \quad (3)$$

Таким образом, для того чтобы после юстировки $\alpha = 0$, необходимо выполнение условия

$$\Delta M_{н.м} = -mlg \alpha_0 = -mlg(\varepsilon + 1) \alpha_{0,н.м} = -M_0 g(\varepsilon + 1) \alpha_{0,н.м}.$$

После совмещения базовой плоскости с плоскостью горизонта маятник займет верхнее положение (рис. 2). В этом случае получим

$$M_M - M_y = 0, \quad (4)$$

где $M_M = M_0 g (\alpha + \alpha_{в.м})$ (в предположении, что углы α и $\alpha_{в.м}$ — малые); $M_y = K_y \alpha_{в.м}$; $\alpha_{в.м}$ — угол закрутки упругих перемычек, измеряемый датчиком момента (ДМ).

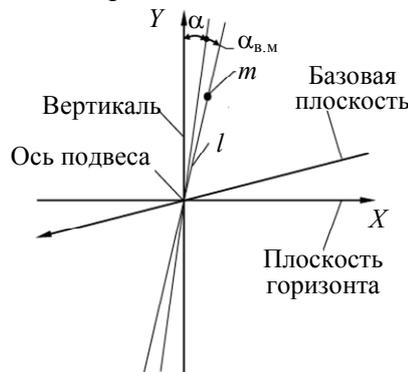


Рис. 2

В соответствии с (4) для исходного положения ЧЭ (до юстировки) находим

$$\alpha_0 = \frac{K_y - mlg}{mlg} \alpha_{0,в.м} = (\varepsilon - 1) \alpha_{0,в.м}, \quad (5)$$

где $\alpha_{0,в.м}$ — начальный угол закрутки упругих перемычек при верхнем положении маятника.

Добавив в выражение (4) дополнительный момент верхнего маятника $\Delta M_{\text{в.м}}$, запишем решение для α :

$$\alpha = \frac{K_y - mlg}{mlg} \alpha_{0,\text{в.м}} + \frac{\Delta M_{\text{в.м}}}{mlg} = \alpha_{0,\text{в.м}} (\varepsilon - 1) + \frac{\Delta M_{\text{в.м}}}{mlg}, \quad (6)$$

откуда, подставив $\alpha = 0$, найдем $\Delta M_{\text{в.м}}$:

$$\Delta M_{\text{в.м}} = -(K_y - mlg) \alpha_{0,\text{в.м}} = -mlg(\varepsilon - 1) \alpha_{0,\text{в.м}} = -M_0 g (\varepsilon - 1) \alpha_{0,\text{в.м}}. \quad (7)$$

Покажем, что моменты $\Delta M_{\text{н.м}}$ и $\Delta M_{\text{в.м}}$, рассчитанные по формулам (3) и (7), тождественно равны. С этой целью найдем связь $\alpha_{\text{н.м}}$ и $\alpha_{\text{в.м}}$. Разделив формулу (5) на (2), после преобразований получим

$$\frac{(\varepsilon - 1) \alpha_{0,\text{в.м}}}{(\varepsilon + 1) \alpha_{0,\text{н.м}}} = 1 \Rightarrow \alpha_{0,\text{в.м}} = \alpha_{0,\text{н.м}} \frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1}. \quad (8)$$

Соотношение (8) справедливо для малых $\alpha_{0,\text{в.м}}$ и $\alpha_{0,\text{н.м}}$. Подставив выражение (8) в (7), получим

$$\Delta M_{\text{в.м}} \equiv -M_0 g (\varepsilon - 1) \alpha_{0,\text{в.м}} \equiv -M_0 g (\varepsilon - 1) \alpha_{0,\text{н.м}} \frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1} \equiv -M_0 g (\varepsilon + 1) \alpha_{0,\text{н.м}} \equiv \Delta M_{\text{н.м}}, \quad (9)$$

что и требовалось доказать.

Подставив в (9) расчетные значения $K_{\text{ур}}$ и $M_{0\text{р}} = ml$, получим

$$\alpha_{0,\text{в.м}} \cong 1,28 \alpha_{0,\text{н.м}}.$$

Для определения ΔM подставим в уравнение (9) значения $M_0 g$ и ε :

$$\Delta M = 5,01 \cdot 10^{-5} \cdot (1 + 8,2) \cdot \alpha_{0,\text{н.м}} = 4,61 \cdot 10^{-4} \alpha_{0,\text{н.м}}. \quad (10)$$

Используя формулы (9) и (10), получим выражение для определения моментов верхнего и нижнего положений маятника. Умножим и разделим правые части выражений (9) и (10) на крутизну выходной характеристики ДМ — $k_{\text{ДУ}}$: получим значение ΔM , выраженное через выходной сигнал ДМ, измеренный либо при нижнем ($U_{\text{н.м}}$), либо при верхнем ($U_{\text{в.м}}$) положении маятника:

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_{\text{н.м}} &= \frac{mlg(\varepsilon + 1)}{k_{\text{ДУ}}} U_{\text{н.м}}, \\ \Delta M_{\text{в.м}} &= \frac{mlg(\varepsilon - 1)}{k_{\text{ДУ}}} U_{\text{в.м}}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где $U_{\text{н.м}} = k_{\text{ДУ}} \alpha_{0,\text{н.м}}$, $U_{\text{в.м}} = k_{\text{ДУ}} \alpha_{0,\text{в.м}}$.

Эти формулы справедливы при постоянном смещении ДУ в начальное положение $U_0 = 0$. Поэтому для определения $U_{\text{н.м}}$ и $U_{\text{в.м}}$ необходимо провести балансировку ДУ, чтобы обеспечить $U_0 = 0 \pm \Delta U_0$, где ΔU_0 — допустимое выставленное значение. Для выполнения этого условия необходимо установить ЧЭ так, чтобы ось его подвеса была близка к вертикали маятника. В этом случае сигнал ДУ можно представить как сумму двух составляющих:

$$U_{\text{ДУ},0} = U_0 + \Delta U, \quad (12)$$

где $U_{\text{ДУ},0}$ — составляющая сигнала ДУ, определяемая несовпадением оси подвеса ЧЭ по вертикали при его установке на оптическую делительную головку (ОДГ); индекс „0“ соответствует исходному положению шпинделя ОДГ.

При повороте шпинделя ОДГ относительно исходного положения на угол 180° выходной сигнал будет определяться выражением

$$U_{\text{ДУ},180^\circ} = U_0 - \Delta U. \quad (13)$$

В положении 0 и 180° , как видно из рис. 3 а, б, векторы поворота действительно должны быть одинаковыми по модулю и направлены в противоположные стороны: а — положение 0 ($\Delta U = -k_{\text{ДУ}}\Delta\alpha$), б — положение 180° ($\Delta U = -k_{\text{ДУ}}\Delta\alpha$).

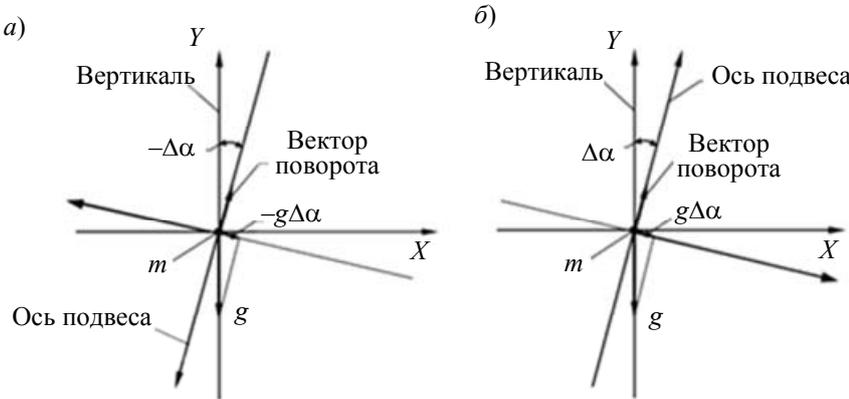


Рис. 3

На основании выражений (12) и (13) получаем

$$U_0 = \frac{U_{\text{ДУ},0} + U_{\text{ДУ},180^\circ}}{2}. \quad (14)$$

Используя уравнения (11), определим приращение массы балансирующего груза. Обозначив через r участок длины плеча маятника, при котором происходит изменение массы путем испарения, вместо системы уравнений (11) возможно записать:

$$\left. \begin{aligned} \Delta m &= \frac{ml(\varepsilon + 1)}{rk_{\text{ДУ}}} U_{\text{Н.М}}, \\ \Delta m &= \frac{ml(\varepsilon - 1)}{rk_{\text{ДУ}}} U_{\text{В.М}}, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где Δm — приращение массы.

Учитывая разброс измерений при определении Δm для нижнего и верхнего положений маятника, следует усреднить результаты расчетов по формуле (15). Тогда можно записать:

$$\Delta m_{\text{ср}} = \frac{ml}{rk_{\text{ДУ}}} \left[\varepsilon \left(\frac{U_{\text{Н.М}} + U_{\text{В.М}}}{2} \right) + \frac{U_{\text{Н.М}} - U_{\text{В.М}}}{2} \right]. \quad (16)$$

Исключим из формул для расчета Δm величину ε , зависящую от жесткости подвеса K_y , экспериментальное определение которой требует разработки специальной методики.

Умножив правую и левую части (15) на $k_{\text{ДУ}}$, получим

$$U_{\text{В.М}} = \frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1} U_{\text{Н.М}}. \quad (17)$$

Введем обозначение $v = U_{\text{В.М}}/U_{\text{Н.М}}$ и получим соотношение, связывающее ε и v :

$$\varepsilon = \frac{v + 1}{v - 1}.$$

Подставив выражение (16) в (17), получим формулу для определения приращения массы балансирующего груза:

$$\Delta m = \frac{2ml}{rk_{\text{ДУ}}} \frac{v}{v - 1} U_{\text{Н.М}}.$$

Для практической реализации рассмотренного метода балансировки ЧЭ предлагается использовать технологию лазерного испарения материала с поверхности балансирующего

груза [3—9], что приводит к изменению массы на величину Δm . Этот способ удаления таких материалов, как сталь, хорошо отработан, однако для бронзы лазерное испарение металла происходит иначе.

Лазерное испарение — относительно новая технология, более выгодная по сравнению с другими методами испарения, поскольку не требует охлаждения испаряемого образца, а также подачи тока в вакуумную камеру. Кроме того, при использовании лазера относительно летучие металлы и нелетучие металлы могут испаряться с почти одинаковой эффективностью [3—7, 9, 10].

В случае импульсного лазерного испарения параметры лазерного излучения (плотность энергии, длина волны, длительность импульса, частота повторения импульсов) и технические параметры процесса (расстояние между мишенью и подложкой, газообразная среда) оказывают большое влияние на метрологическую надежность ММА, поскольку свойства измельченного материала могут направленно изменяться.

Для сокращения времени и затрат на изготовление прототипов ММА при единичном и мелкосерийном производстве опытных образцов целесообразно применение метода лазерного формирования поверхностных структур ЧЭ, основанного на использовании проекции изображения. Наряду с этим можно сразу корректировать топологии и реализовать их быстрое применение при минимальном количестве операций технологического процесса. Предлагаемый метод позволит значительно ускорить и удешевить изготовление различных моделей для полевых испытаний и определения их точных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калинкина М. Е., Козлов А. С., Лабковская Р. Я., Пирожникова О. И., Ткалич В. Л.* Перспективы развития микроакселерометров // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. 2018. Т. 1, № 66. 70 с.
2. *Tkalich V. L., Labkovskaja R. I., Pirozhnikova O. I., Kalinkina M. E., Kozlov A. S.* Analysis of errors in micromechanical devices // Proc. of the 14th Intern. Sci.-Techn. Conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2018). 2018. Vol. 1, N 6. P. 272—276.
3. *Гладуш Г. Г., Смуров И. Ю.* Физические основы лазерной обработки материалов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. 600 с.
4. *Григорьян А. Г.* Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
5. *Коробейников А. Г., Гришенцев А. Ю.* Разработка и исследование многомерных математических моделей с использованием систем компьютерной алгебры. СПб: НИУ ИТМО, 2014. 100 с.
6. *Коротеев Н. И., Шумай И. Л.* Физика мощного лазерного излучения. М.: Наука, 1991. 312 с.
7. *Кузенов В. В., Лебо А. И., Лебо И. Г., Рыжов С. В.* Физико-математические модели и методы расчета воздействия мощных лазерных и плазменных импульсов на конденсированные и газовые среды. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. 328 с.
8. *Лабковская Р. Я., Козлов А. С., Пирожникова О. И., Коробейников А. Г.* Моделирование динамики чувствительных элементов герконов систем управления // Кибернетика и программирование. 2014. Т. 5. С. 70.
9. Исследование неравновесного импульсного нагрева металлов лазерным излучением / *В. И. Мажукин*. М., 1990. (Препринт /ИПМ, № 30).
10. *Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г.* Декомпозиция n -мерных цифровых сигналов по базису прямоугольных всплесков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 4 (80). С. 75—79.

Сведения об авторах

Вера Леонидовна Ткалич

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий;
E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru

- Мария Евгеньевна Калинкина** — аспирант; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru
- Анатолий Григорьевич Коробейников** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН им. Н. В. Пушкова; зам. директора по науке; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru
- Ольга Игоревна Пирожникова** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: cheesecake@mail.ru

Поступила в редакцию
30.10.19 г.

Ссылка для цитирования: Ткалич В. Л., Калинкина М. Е., Коробейников А. Г., Пирожникова О. И. Метод балансировки чувствительного элемента микромеханического маятникового акселерометра // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 1. С. 70—77.

METHOD OF BALANCING THE SENSITIVE ELEMENT OF MICROMECHANICAL PENDULUM ACCELEROMETER

V. L. Tklich¹, M. E. Kalinkina¹, A. G. Korobeynikov^{1,2}, O. I. Pirozhnikova¹

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the RAS,
St. Petersburg Branch, 199034, St. Petersburg, Russia

A method of balancing the sensitive element of pendulum accelerometer by laser evaporation of a metal is presented. The process of adjusting the balancing load of the micromechanical accelerometer for the lower and upper positions of the sensor element in relation to the vertical is considered. A physical pendulum serves as a sensitive element of the device. When using a micromechanical pendulum accelerometer as a sensor, the threshold sensitivity determines the sensitivity of the micromechanical accelerometer to the slope of the base in the field of gravity. Calculated formulas for the lower and upper positions of the pendulum are derived. For the practical implementation of this method, it is proposed to use the technology of laser evaporation of material from the surface of the balancing load.

Keywords: sensitive element, micromechanical accelerometer, pendulum accelerometer, center of mass, laser evaporation

REFERENCES

1. Kalinkina M.E., Kozlov A.S., Labkovskaya R.Ya., Pirozhnikova O.I., Tklich V.L. *Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University*, 2018, no. 1, pp. 66–70. (in Russ.)
2. Tklich V.L., Labkovskaya R.I., Pirozhnikova O.I., Kalinkina M.E., Kozlov A.S. *Proc. of 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2018)*, 2018, no. 6(1), pp. 272–276.
3. Gladush G.G., Smurov I.Yu. *Fizicheskiye osnovy lazernoy obrabotki materialov* (Physical Fundamentals of Laser Processing of Materials), Moscow, 2017, 600 p. (in Russ.)
4. Grigor'yan A.G. *Osnovy lazernoy obrabotki materialov* (Basics of Laser Material Processing), Moscow, 1989, 304 p. (in Russ.)
5. Korobeynikov A.G., Grishentsev A.Yu. *Razrabotka i issledovanie mnogomernykh matematicheskikh modeley s ispol'zovaniem sistem komp'yuternoy algebry* (Development and Research of Multi-dimensional Mathematical Models Using Computer Algebra Systems), St. Petersburg, 2013, 100 p. (in Russ.)
6. Koroteyev N.I., Shumay I.L. *Fizika moshchnogo lazernogo izlucheniya* (Power Laser Physics), Moscow, 1991, 312 p. (in Russ.)
7. Kuzenov V.V., Lebo A.I., Lebo I.G., Ryzhov S.V. *Fiziko-matematicheskiye modeli i metody rascheta vozdeystviya moshchnykh lazernykh i plazmennyykh impul'sov na kondensirovannyye i gazovyye sredy* (Physico-Mathematical Models and Methods for Calculating the Effects of High-Power Laser and Plasma Pulses on Condensed and Gaseous Media), Moscow, 2017, 328 p. (in Russ.)
8. Labkovskaya R.Ya., Kozlov A.S., Pirozhnikova O.I., Korobeynikov A.G. *Kibernetika i programmirovaniye*, 2014, no. 5, pp. 70–77. (in Russ.)
9. Mazhukin V.I. *Issledovaniye neravnovesnogo impul'snogo nagreva metallov lazernym izlucheniym* (Investigation of Nonequilibrium Pulsed Heating of Metals by Laser Radiation), Moscow, 1990, 45 p. (in Russ.)
10. Grishentsev A.Yu., Korobeynikov A.G. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 4(80), pp. 75–79. (in Russ.)

Data on authors

- Vera L. Tkalich** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru
- Maria E. Kalinkina** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru
- Anatoly G. Korobeynikov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the RAS, St. Petersburg Branch; Deputy Director for Science; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru
- Olga I. Pirozhnikova** — PhD; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: cheesecake@mail.ru

For citation: Tkalich V. L., Kalinkina M. E., Korobeynikov A. G., Pirozhnikova O. I. Method of balancing the sensitive element of micromechanical pendulum accelerometer. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 1. P. 70—77 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-1-70-77