

УДК 531

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771382019202995>

В. А. Галицький¹, *пошукач*, **Л. В. Кузьмич**², *к.т.н., доцент*,
В. П. Квасніков³, *д.т.н., професор*

МЕТОДИКА ЮСТУВАННЯ МАЯТНИКОВИХ ВИМІРЮВАЧІВ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЕННЯ

En

The most important characteristics of inertial navigation systems based on accelerometers are the accuracy of determining their inertial speed and the coordinates of the carrier. In order to achieve high output data, it is necessary to take into account the features of the production of sensitive elements, threshold sensitivity, zero offset, nonlinearity, and other important indicators. To achieve the required parameters in linear accelerometers in order to achieve high performance in the manufacture of a sensitive element, it is necessary to develop a method of alignment of the linear accelerometer.

The method of alignment of the linear accelerometer on the example of a precision pendulum accelerometer of compensatory type is offered in the article.

For a pendulum in an elastic suspension in which its center of mass lies in a vertical plane passing through the axis of the suspension, the elastic moment is zero. In the circular rotation of such a pendulum relative to the horizontal axis of the perpendicular plane passing through the axis in the elastic suspension, the latter will not come out of this plane, and therefore, the signal of the angle sensor will not change.

Thus, the adjustment of the sensing element of the accelerometer without feedback should include the following operations:

Attending of the zero signal of the sensor in the vertical position of the axis of the PP, when there is no twisting of the elastic element and the elastic moment is zero;

Balancing of the suspension, in the displacement of CM the pendulum (by changing the weight of the balancing load) with a vertical plane passing through the axis of the PP.

To obtain the necessary ratios that determine the additional mass, the value of which must be changed during the alignment of the main load balancing, consider the accelerometer in two positions of the sensing element relative to the vertical position - in the position of the lower pendulum and in the position of the upper pendulum.

Ru

В статье предложена методика юстировки измерителя линейного ускорения на примере прецизионного маятникового акселерометра компенсационного типа, которая позволяет достичь высоких показателей при изготовлении чувствительного элемента является важным для характеристик инерционных навигационных систем на базе акселерометров.

¹ Національний авіаційний університет

² Національний авіаційний університет

³ Національний авіаційний університет

Вступ

Найбільш істотними характеристиками інерційних навігаційних систем на базі акселерометрів залишаються точність встановлення їхньої інерційної швидкості та координат носія. Для досягнення високих показників вихідних даних необхідно враховувати особливості виготовлення чутливих елементів, їх порогову чутливість, зсув нуля, нелінійність та інші важливі показники. Для досягнення необхідних параметрів у вимірювачах лінійного прискорення із метою досягнення високих показників під час виготовлення чутливого елемента необхідно розробити методику юстування вимірювача лінійного прискорення.

Аналіз останніх досліджень

У сучасних навігаційних системах на даний час використовуються прецизійні осьові та маятникові компенсаційні акселерометри. Останнім часом широке застосування знаходять кварцові акселерометри. У показниках перевантажень використовуються акселерометри нижчого класу, до них відносяться акселерометри із механічною пружиною або компенсаційні низького класу точності [1 – 7].

У якості вихідного сигналу акселерометра використовується параметр, який однозначно пов'язаний із силою реакції підвісу. Якщо вихідна величина пов'язана із силою реакції підвісу лінійною залежністю, то такі акселерометри називаються лінійними. Показання лінійного акселерометра тарується у одиницях питомої сили, яка має розмірність прискорення. Акселерометри, у яких сила реакції підвісу пов'язана лінійною залежністю із першою або другою похідною по часу від вихідної величини, називаються одноразово або дворазово інтегруючими акселерометрами. Показання одноразово інтегруючого акселерометра тарується у одиницях одноразового інтеграла за часом від питомої сили, що має розмірність швидкості. Показання дворазово інтегруючого акселерометра тарується у одиницях дворазового інтеграла за часом від питомої сили і мають розмірність шляху [7 - 11].

До акселерометра пред'являються дуже високі вимоги по надійності і точності. Наприклад, для забезпечення точності польоту ракети похибка акселерометра не повинна перевищувати $(10^{-4} \dots 10^{-6})g$, тобто $(10^{-1} \dots 10^3)$ см/с². Допустима похибка акселерометрів повинна бути у межах сотих чи тисячних часток відсотка від вимірюваного прискорення $(0,01 \dots 0,001) \%$ [12, 13].

Постановка задачі

У даній статті розглядається методика юстування вимірювача лінійного прискорення на прикладі прецизійного маятнікового акселерометра компенсаційного типу.

Виклад основного матеріалу

Для маятника у пружному підвісі (ПП), якого його центр мас (ЦМ) лежить у вертикальній площині, що проходить через вісь підвісу, пружний момент дорівнює нулю. У разі кругового обертання такого маятника відносно горизонтальної осі перпендикулярної площини, яка проходить через вісь ПП і ЦМ, останній не буде виходити із цієї площини, а отже, не буде змінюватися сигнал датчика кута.

Передбачається, що виконується співвідношення:

$$K_y \alpha > ml \cdot g \cdot \sin \alpha, \quad \text{для малих кутів } K_y \alpha > ml \cdot g,$$

у протилежному випадку положення верхнього маятника буде нестійким.

Таким чином, юстування чутливого елемента (ЧЕ) акселерометра без зворотного зв'язку повинно включати у себе наступні операції:

- встановлення нульового сигналу датчика в вертикальному положенні осі ПП, коли відсутня закрутка пружного елемента і пружний момент рівний нулю;
- балансування підвісу, тобто зміщення ЦМ маятника (за рахунок зміни маси вантажу балансування) із вертикальної площини, яка проходить через вісь ПП.

Для отримання необхідних співвідношень, що визначають додаткову масу, на величину якої необхідно змінити у процесі юстирування основний вантаж балансування, розглянемо акселерометр у двох положеннях чутливого елемента по відношенню до вертикалі місця – у положенні нижнього маятника і у положенні верхнього маятника.

У разі поєднання базової площини приладу із площиною горизонту маятник займе положення як це зображено на рис. 1, а. Якщо у вихідному положенні момент, що створюється пружними перемичками $M_y = 0$, то після повороту для положення рівноваги можна записати:

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

де $M_m = M_0 \cdot g(\alpha - \alpha_{\text{нм}})$ (у припущенні, що кути α і $\alpha_{\text{нм}}$ – малі);

$M_0 = m \cdot l$ – маятниковість ($M_{0\text{расч}} = 5,14 \cdot 10^{-6}$ кгм);

α – конструктивний кут, що визначає похибку акселерометра;

$\alpha_{\text{нм}}$ – кут закрутки пружних перемичок, вимірюваний датчик (нижній маятник); $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

$M_y = K_y \alpha_{\text{HM}}$, K_y – жорсткість підвісу ($K_{y \text{ розр}} = 4,133 \cdot 10^{-4}$ Нм/рад).

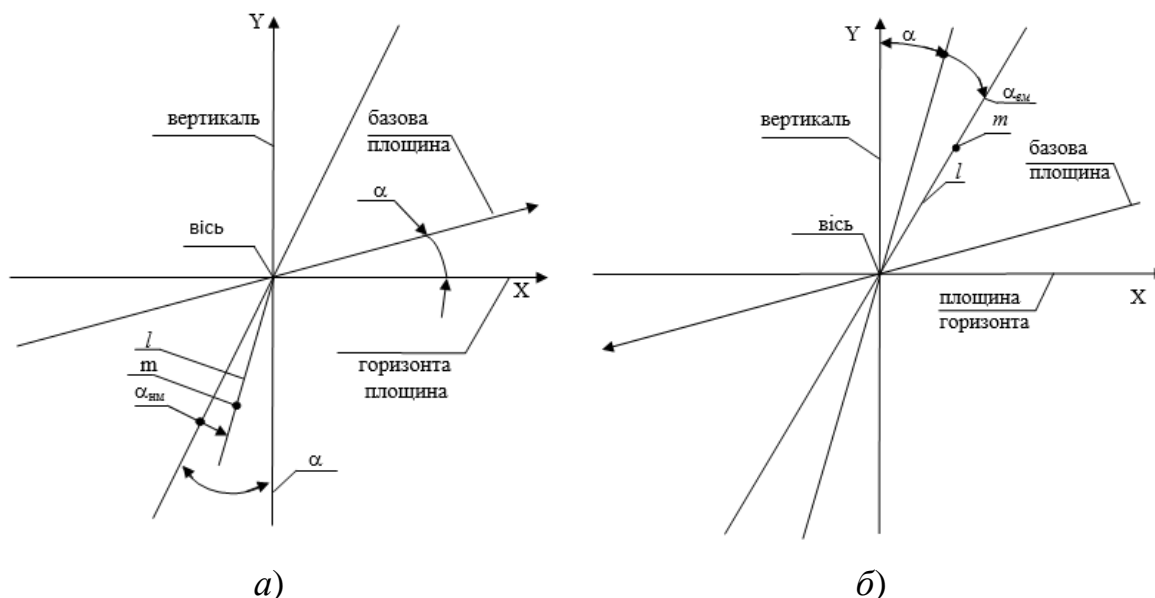


Рис. 1. Чутливий елемент – у положенні нижній маятник (а) та у положенні верхній маятник (б)

Із рівності (1) для вихідного положення (до юстування) знаходимо:

$$\alpha_0 = \frac{K_y + ml \cdot g}{ml \cdot g} \cdot \alpha_{0, \text{HM}} = (\varepsilon + 1) \cdot \alpha_{0, \text{HM}}, \quad (2)$$

де $\varepsilon = \frac{K_y \cdot \alpha}{ml \cdot g \cdot \sin \alpha}$. Для малих кутів α : $\varepsilon = \frac{K_y}{ml \cdot g}$.

Звідси для розрахункових значень K_y і ml отримуємо $\varepsilon = 8,2$.

Для забезпечення $\alpha = 0$, у рівнянні (1) необхідно додати додатковий момент ΔM , підбором якого можна забезпечити виконання цієї умови:

$$M_M - M_y - \Delta M_{\text{HM}} = 0. \quad (3)$$

Вирішивши це рівняння відносно α , із урахуванням (1) отримаємо:

$$\alpha_0 = \frac{K_y + ml \cdot g}{ml \cdot g} \cdot \alpha_{0, \text{HM}} - \frac{\Delta M_{\text{HM}}}{ml \cdot g} = \alpha_0 - \frac{\Delta M_{\text{HM}}}{ml \cdot g}. \quad (4)$$

Поклавши $\alpha = 0$, отримаємо вираз для визначення ΔM_{HM} :

$$\Delta M_{\text{HM}} = (K_y + ml \cdot g) \cdot \alpha_{0, \text{HM}}, \quad \text{або} \quad \Delta M_{\text{HM}} = ml \cdot g \cdot (1 + \varepsilon) \cdot \alpha_{0, \text{HM}}. \quad (5)$$

Для того, щоб після юстирування $\alpha = 0$, необхідно:

$$\Delta M_{\text{HM}} = ml \cdot g \cdot \alpha_0 \quad \text{або} \quad \Delta M_{\text{HM}} = ml \cdot g \cdot (\varepsilon + 1) \cdot \alpha_{0, \text{HM}}.$$

У разі положення чутливого елемента – у положенні верхній маятник.

Після поєднання базової площини із площиною горизонту, отримаємо:

$$M_M - M_y = 0, \quad (6)$$

де $M_M = M_0 \cdot g(\alpha - \alpha_{\text{BM}})$, $M_y = K_y \alpha_{\text{BM}}$,

α_{BM} – кут закрутки пружних перемичок, вимірюваний датчик (верхній маятник).

Із рівності (1) для вихідного положення (до юстирування) знаходимо:

$$\alpha_0 = \frac{K_y - ml \cdot g}{ml \cdot g} \cdot \alpha_{0,\text{BM}} = (\varepsilon - 1) \cdot \alpha_{0,\text{BM}}. \quad (7)$$

Додаймо додатковий момент ΔM_{HM} у (6), і запишемо вираз для α :

$$\alpha = \frac{K_y - ml \cdot g}{ml \cdot g} \cdot \alpha_{0,\text{BM}} - \frac{\Delta M_{\text{BM}}}{ml \cdot g} = \alpha_0 - \frac{\Delta M_{\text{BM}}}{ml \cdot g}. \quad (8)$$

Із рівняння (8), поклавши $\alpha = 0$, знайдемо ΔM_{BM} :

$$\Delta M_{\text{BM}} = (K_y - ml \cdot g) \cdot \alpha_{0,\text{BM}}, \text{ або } \Delta U_{\text{BM}} = m_{\text{BG}}(1 + \varepsilon) \cdot \alpha_{0,\text{HM}}. \quad (9)$$

Покажемо, що ΔM_{HM} та ΔM_{BM} , розраховані по формулам (5) і (9), відповідно, тотожно рівні. Із цією ціллю знайдемо зв'язок α_{HM} та α_{BM} .

Поділимо (4) на (8) і після нескладних операцій, отримаємо:

$$\alpha_{0,\text{BM}} = \frac{K_y + ml \cdot g}{K_y - ml \cdot g} \cdot \alpha_{0,\text{HM}} = \frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1} \cdot \alpha_{0,\text{HM}}. \quad (10)$$

Це співвідношення залишається справедливим для малих α_0 .

Підставимо (10) в (9), отримаємо:

$$\Delta M_{\text{BM}} = (K_y + ml \cdot g) \cdot \alpha_{0,\text{HM}} = \Delta M_{\text{HM}}, \quad (11)$$

що і потрібно було довести.

Підставимо у (10) розрахункові значення K_y і $ml \cdot g$, отримаємо:

$$\alpha_{0,\text{BM}} \cong 1,28 \alpha_{0,\text{HM}}. \quad (12)$$

Для визначення ΔM підставимо у (3) значення $ml \cdot g$ і ε , отримаємо:

$$\Delta M = 5,01 \cdot 10^{-5} \cdot (1 + 8,2) \cdot \alpha_{0,\text{HM}} = 4,61 \cdot 10^{-4} \alpha_{0,\text{HM}}. \quad (13)$$

Помножимо і поділимо праву частину (5) і (9) на крутизну вихідної характеристики датчика K_d , отримаємо значення ΔM , виражене через вихідний сигнал датчика вимірний, або у разі нижньої (U_{HM}), або у разі верхньої (U_{BM}) маятниковості:

$$\left. \begin{aligned} \Delta M &= \frac{ml \cdot g (\varepsilon + 1)}{K_{\text{дк}}} \cdot U_{\text{нм}} \\ \Delta M &= \frac{ml \cdot g \cdot (\varepsilon - 1)}{K_{\text{дк}}} \cdot U_{\text{вм}} \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

де $U_{\text{нм}} = K_{\text{дк}} \cdot \alpha_{0,\text{нм}}$, $U_{\text{вм}} = K_{\text{дк}} \cdot \alpha_{0,\text{вм}}$.

Формули справедливі, коли постійне зміщення нульового сигналу датчика $U_0 = 0$. Тому до визначення $U_{\text{нм}}$ і $U_{\text{вм}}$ необхідно провести виставлення датчика із ціллю забезпечення $U_0 = 0 \pm \Delta U_0$, де ΔU_0 – допустиме значення не виставлення.

Для виставлення U_0 необхідно встановити ЧЕ так, щоб осі його підвісу була близька до вертикалі місця. У цьому положенні сигнал датчика можна представити у вигляді суми двох складових:

$$U_{\text{дк},0^\circ} = U_0 + \Delta U, \quad (15)$$

де ΔU – складова сигналу датчика, що визначається невідповідністю осі підвісу ЧЕ із вертикаллю у разі встановлення його на оптичну розділювальну головку (ОРГ):

– індекс 0° відповідає вихідному положенню шпинделя ОРГ.

Під час розвороту шпинделя ОРГ від вихідного положення на кут 180° значення вихідного сигналу буде визначатися виразом:

$$U_{\text{дк},180^\circ} = U_0 - \Delta U, \quad (16)$$

Із рис. 2, а, рис. 2, б видно, що положення 0° і $180^\circ \Delta U$ дійсно повинні бути однакові по модулю і направлені у протилежні сторони.

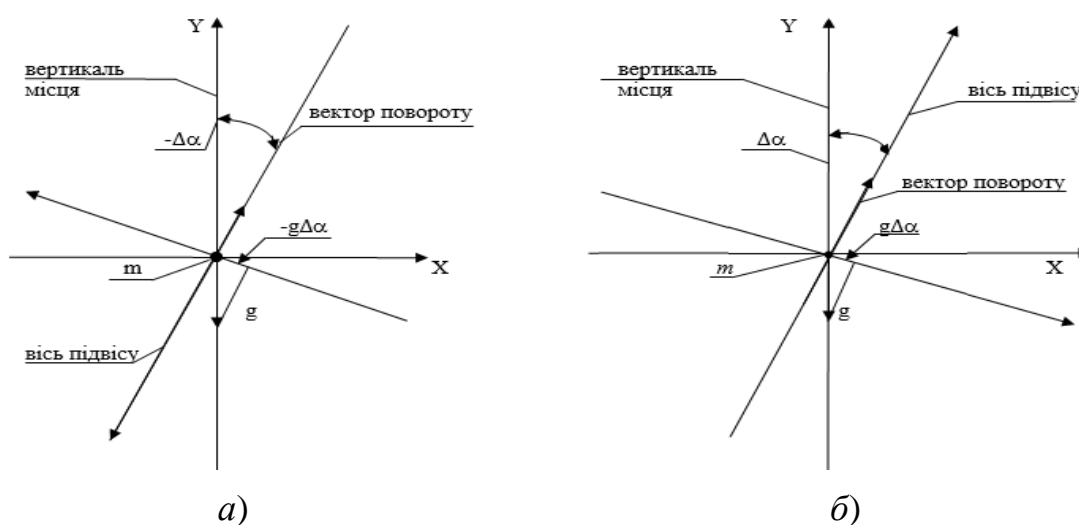


Рис. 2. Положення 0° і $180^\circ \Delta U$: а) – положення 0° ($\Delta U = K_{\text{дк}} \Delta \alpha$),

б) – положення 180° ($\Delta U = -K_{\text{дк}} \Delta \alpha$)

На основі (15) і (16) можна записати:

$$U_0 = \frac{U_{\text{дк},0^\circ} + U_{\text{дк},180^\circ}}{2}. \quad (17)$$

Використовуючи формули (14) визначимо додаткову масу, на яку потрібно збільшувати чи зменшувати величину вантажу балансування. Якщо позначити r радіус, на якому відбувається зміна маси, замість (14) можна записати:

$$\left. \begin{aligned} \Delta m &= \frac{ml(\varepsilon + 1)}{r \cdot K_{\text{дк}}} \cdot U_{\text{нм}} \\ \Delta m &= \frac{ml(\varepsilon - 1)}{r \cdot K_{\text{дк}}} \cdot U_{\text{вм}} \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

де Δm – позначена додаткова маса.

Враховуючи розкид замірів у разі визначення Δm для випадків нижнього і верхнього положення маятника, варто усереднити результати розрахунків по формулах (18).

На основі (18) можна записати формулу для вирахування $\Delta m_{\text{ср}}$:

$$\Delta m_{\text{ср}} = \frac{ml}{r \cdot K_{\text{дк}}} \left[\varepsilon \left(\frac{U_{\text{нм}} + U_{\text{вм}}}{2} \right) + \frac{U_{\text{нм}} - U_{\text{вм}}}{2} \right]. \quad (19)$$

Виключимо із формул для розрахунку Δm величину ε , що залежить від жорсткості підвісу K_y , експериментальне визначення якої потребує розробку спеціальної методики.

Помноживши праву та ліву частини (10) на $K_{\text{дк}}$ отримаємо

$$U_{\text{вм}} = \frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1} U_{\text{нм}}. \quad (20)$$

Якщо ввести позначення

$$v = \frac{U_{\text{вм}}}{U_{\text{нм}}}, \quad (21)$$

То можна отримати наступні співвідношення, які поєднують ε і v :

$$\varepsilon = \frac{v + 1}{v - 1}. \quad (22)$$

Підставляючи (22) у (14) отримаємо формулу для визначення додаткової маси вантажу балансування:

$$\left. \begin{aligned} \Delta m &= \frac{2ml}{r \cdot K_{\text{дк}}} \cdot \frac{v}{v-1} U_{\text{нм}} \\ \Delta m &= \frac{2ml}{r \cdot K_{\text{дк}}} \cdot \frac{1}{v-1} U_{\text{вм}} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Для практичного здійснення розглянутого методу балансування ЧЕ допускається застосувати лазерне випаровування матеріалу із поверхні вантажу балансування. Такий спосіб видалення матеріалу для деталей добре відомий. Для деталей із різних матеріалів лазерне випаровування металу відбувається по різному. Для розрахунків маса випаровування металу за один імпульс розраховується дослідним шляхом.

Висновки

Запропонована методика юстування вимірювача лінійного прискорення на прикладі прецизійного маятникового акселерометра компенсаційного типу дозволяє досягнути високих показників під час виготовлення чутливого елемента, що є важливим для характеристик інерційних навігаційних систем на базі акселерометрів.

Список використаної літератури

1. Кузьмич Л. В. Сучасні тенденції створення приладових систем вимірювання механічних величин [Текст] / Л. В. Кузьмич // Вісник Інженерної Академії України. Київ, 2016. – №2. – С. 180-184.
2. L. Kuzmich; O. Kobylanskyi; M. Duk. Current state of tools and methods of control of deformations and mechanical stresses of complex technical systems. Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108085J (1 October 2018); doi: [10.1117/12.2501661](https://doi.org/10.1117/12.2501661).
3. Digital's Kompensation sverfahren zur Verbesserung von Messfuhlern. *Erb. K., Fisher P.* "Bulletin SEV/VSE", 1989, 80, №7, 8, p.365-368.
4. Экспериментальная механика [Текст] : монография в 2 кн: Кн. 1 / пер. с англ.; под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – 552 с.
5. Rus, G. Optimized damage detection of steel plates from noisy impact test [Text] / G. Rus, S. Y. Lee, S. Y. Chang, S. C. Wooh // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2006. – Vol. 68, Issue 7. – P. 707-727. doi: [10.1002/nme.1720](https://doi.org/10.1002/nme.1720).
6. Harada, T. Droplet generation using a torsional Langevin-type transducer and a micropore plate [Text] / T. Harada, N. Ishikawa, T. Kanda, K. Suzumori, Y. Yamada, K. Sotowa // Sensors and Actuators A: Physical. – 2009. – Vol. 155, Issue 1. – P. 168–174.

7. *Schroder, A.* Evaluation of cost functions for FEA based transducer optimization [Text] / A. Schroder, J. Rautenberg, B. Henning // *Physics Procedia.* – 2010. – Vol. 3, Issue 1. – P. 10031009. doi: 10.1016/j.phpro.2010.01.129.
8. *Шрюфер Е.* Обробка сигналів: цифрова обробка дискретизованих сигналів: Підручник / За ред. В. П. Бабака. К.: Либідь, 1992. – 296 с.
9. *Басараб, М. А.* Математическое моделирование физических процессов в гироскопии / М. А. Басараб, В. Ф. Кравченко, В. А. Матвеев. – М.: Радиотехника, 2005 г. – 176 с.
10. *Белов Ю. А.* Математическое обеспечение сложного эксперимента. - К.: Наукова думка, Т.1, 1982.-300 с.; Т. 4, 1986.-260 с.
11. *Круча Г. К.* Теоретические основы планирования исследований. – М.: Машиностроение, 1973. – 194 с.
12. *Лебедев А. Н.* Моделирование в научно-технических исследованиях. – М.: Радио и связь, 1989. – 258 с.
13. *Ехлаков В. П., Маков Л. В.* Измерение и контроль параметров технических комплексов. – М.: Воениздат, 1978. – 128 с.