

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

А.А. Гаврилов, А.Н. Шипунов

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА», Арзамас

Предложен способ увеличения точности интегрального акселерометра с магнитоэлектрической обратной связью без снижения диапазона и прочностных характеристик. Увеличение инерциальной массы нового акселерометра по сравнению с прототипом приводит к повышению точностных характеристик датчика. В статье произведено математическое обоснование данного способа, произведен расчет, подтверждающий диапазон измерения и прочностной расчет чувствительного элемента

*Ключевые слова:* акселерометр, структурная схема, упругий подвес, диапазон измерения, ударопрочность.

Постоянное совершенствование объектов управления, в том числе летательных аппаратов, инклинометров, боеприпасов требует постоянного улучшения и доработки датчиков первичной информации. Основными направлениями модернизации последних являются миниатюризация и повышение точностных характеристик.

В статье предложен способ повышения точностных характеристик интегрального акселерометра с магнитоэлектрической обратной связью АТ 1104-50 без снижения диапазона измерения и ударопрочности. Акселерометр состоит из двух герметичных объемов, в одном из которых находится маятниковый чувствительный элемент (ЧЭ), в другом – электронный преобразователь.

Структурную схему акселерометра можно представить в следующем виде:

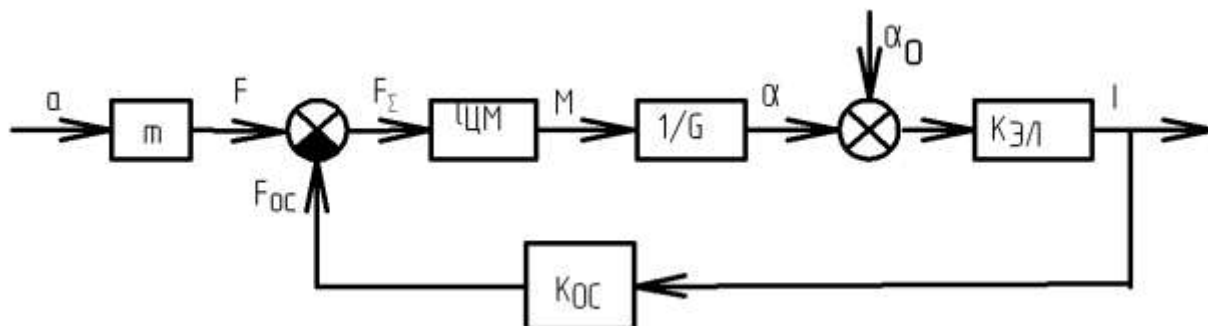


Рис. 1. Структурная схема акселерометра в статике

На схеме  $a$  – действующее ускорение;  $m$  – масса чувствительного элемента;  $F$  – инерционная сила;  $l_{ЦМ}$  – расстояние от оси подвеса до центра масс маятника;  $G$  – жесткость упругих подвесов;  $K_{ЭЛ}$  – коэффициент усиления электронного преобразователя;  $K_{OC}$  – коэффициент обратной связи датчика момента обратной связи (ДМОС);  $\alpha$  – угол, на который отклоняется маятник при действии ускорения;  $\alpha_0$  – вредное возмущающее воздействие;  $I$  – выходной ток акселерометра.

Отношение выходного сигнала к действующему ускорению записывается:

$$\frac{I}{a} = \frac{m \cdot l_{ЦМ} \cdot (1/G) \cdot K_{ЭЛ}}{1 + l_{ЦМ} \cdot (1/G) \cdot K_{ЭЛ} \cdot K_{OC}}$$

Поскольку  $l_{ЦМ} \cdot (1/G) \cdot K_{ЭЛ} \cdot K_{OC} \gg 1$ , то

$$\frac{I}{a} = \frac{m}{K_{OC}}$$

Отношение вредного сигнала к действующему ускорению записывается:

$$\frac{I'}{\alpha_0} = \frac{K_{ЭЛ}}{1 + \frac{K_{ЭЛ} \cdot l_{ЦМ} \cdot K_{OC}}{G}} = \frac{G}{l_{ЦМ} \cdot K_{OC}}$$

Погрешность датчика определится как отношение выходного сигнала, вызванного вредным возмущающим воздействием, к выходному к сигналу от полезного воздействия

$$\Delta = \frac{I'}{I} = \frac{G \cdot \alpha_0}{m \cdot a \cdot l_{ЦМ}} \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что снижение жесткости упругих подвесов и увеличение чувствительной массы прямо пропорционально снижению погрешности.

Увеличение чувствительной массы ЧЭ нового акселерометра в 3 раза по сравнению с чувствительной массой ЧЭ АТ1104-50 приводит к снижению погрешности акселерометра в 3 раза, а именно, при нестабильности нулевого сигнала АТ1104-50 в 1,5 мг нестабильность нулевого сигнала нового акселерометра равна 0,5 мг.

Величина максимального ускорения акселерометра с ДМОС с параллельным соединением катушек определяется:

$$a_{MAX} = \frac{B \cdot I_{MAX} \cdot L_k}{2(m_{кр} + m_k) + M_M} \quad (2)$$

где  $B$  – индукция в рабочем зазоре, Тл;  $L_k$  – длина провода в катушке, м;  $m_{кр}$  – масса кронштейна, кг;  $m_k$  – масса катушки, кг;  $M_M = 0.0504$  кг – масса маятника;  $I$  – максимальный ток, протекающий в катушках ДМОС, А.

Используя магнитную систему изделия АТ1108 (рис. 2) с измеренным значением индукции в зазоре  $B = 0,37$  Тл, можно рассчитать число витков и массу катушки, для обеспечения диапазона измерения  $a_T = 16$  g.

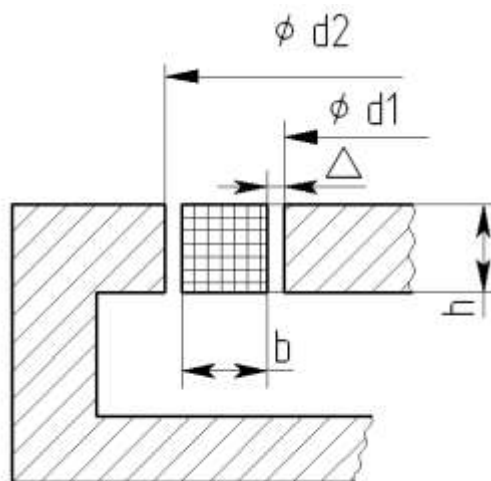


Рис. 2. Магнитная система АТ1108

Диаметр провода ПЭТР – 155 0,04 по ТУ 16-705.048-78  $d_{max} = 0,051$  мм.

Число витков в катушке определяется:

$$N = \frac{h}{d_{\max}} \cdot \frac{b}{d_{\max}} = \frac{1}{0,051} \cdot \frac{0,75}{0,051} = 14 \cdot 19 = 266 \text{ витков,}$$

где  $h, d_{\max}, b$  - геометрические размеры магнитной системы, мм.

Средний диаметр катушки определяется:

$$D_{\text{cp}} = d_1 + 2\Delta + \frac{2 \cdot h_k}{2} = 8 + 2 \cdot 0,25 + \frac{2 \cdot 14 \cdot 0,051}{2} = 9,214 \text{ мм.}$$

Средняя длина одного витка:

$$L_{\text{cp}} = 3,14 \cdot D_{\text{cp}} = 3,14 \cdot 9,214 = 28,93 \text{ мм.}$$

Длина провода в катушке:

$$L_k = N \cdot L_{\text{cp}} = 266 \cdot 28,93 = 7,7 \text{ м.}$$

Масса катушки определится:

$$M_k = m_{\text{ПЭТР}} \cdot L_k = 7,7 \cdot 12 \cdot 10^{-6} = 92,4 \cdot 10^{-6} \text{ кг.}$$

где  $m_{\text{ПЭТР}}$  - масса 1 метра провода ПЭТР – 155 0,04, кг.

Учитывая максимальную массу катушки и требуемую крутизну выходного сигнала  $K_i=3$  мА/г, можно рассчитать максимальную массу кронштейна, на которую устанавливается катушка.

Крутизна выходного сигнала определится:

$$K_i = \frac{I_{\max}}{a_{\max}}, \quad \text{отсюда } I_{\max} = K_i \cdot a_{\max}, \quad (3)$$

Подставим формулу (2) в формулу (3):

$$a_{\max} = \frac{B \cdot K_i \cdot L_k \cdot a_{\max}}{2m_{\text{кр}} + 2m_k + M_K},$$

Отсюда масса кронштейна определится:

$$M_{\text{кр}} = \frac{B \cdot K_i \cdot L_k - 2m_k - M_K}{2} = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ кг,}$$

Максимальный допустимый ток, который может протекать в катушке ДМОС, при максимальном выходном напряжении  $U_{\text{вых}} = 8$  В определится:

$$I_{\max} = \frac{U_{\text{Э}} - U_{\text{вых}}}{R_{K_{\Sigma}}},$$

где  $U_{\text{Э}} = 11$  В – минимальное напряжение, выдаваемое ЭП.

Поскольку катушки соединены параллельно, то сопротивление катушки будет равно  $R_k/2$ .

$$I_{\max} = \frac{(U_{\text{Э}} - U_{\text{вых}})/2}{\gamma_{\text{ПЭТР}} L_k},$$

где  $\gamma_{\text{ПЭТР}} = 14,23$  Ом/м – сопротивление 1 м провода.

$$I_{\max} = \frac{(11-8)/2}{14.23 \cdot 7.7} = 0.055 \text{ A,}$$

Максимальное ускорение равно:

$$a_{\max} = \frac{0,37 \cdot 0,055 \cdot 7,7}{2 \cdot 0,32 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 92,4 \cdot 10^{-6} + 0,05 \cdot 10^{-3}} = 17,8 \text{ g} > a_T.$$

Поскольку масса чувствительного элемента выросла в три раза, то в три раза уменьшится прочность конструкции.

Для подтверждения возможности увеличения чувствительной массы необходимо проверить на прочность (на срез) ЧЭ, который должен выдерживать ударную нагрузку 150 g.

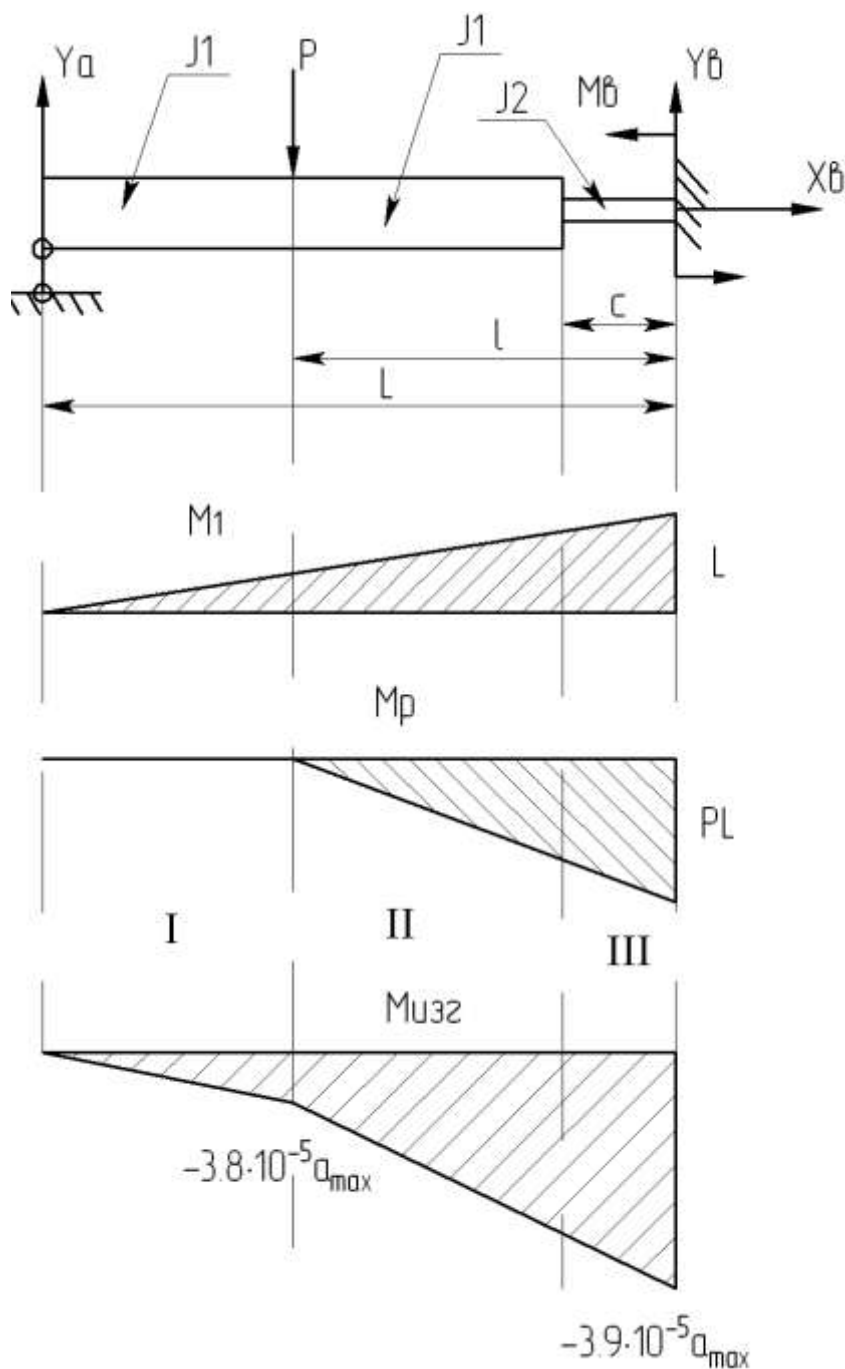


Рис. 3. Эпюры

Для формализации расчетов кристаллический элемент представим в виде балки (рис. 3), один конец которой консольно закреплен, а другой – ограничен в перемещении по одной оси.

Балка имеет одну трехсвязную (консольную) и одну односвязную (шарнирно-подвижную) опору. Статика для плоской системы сил дает три уравнения равновесия, следовательно, система один раз статически неопределима.

В качестве лишней связи примем опору А. Тогда лишней неизвестной является вертикальная сила  $Y_a$ . Каноническое уравнение системы имеет вид:

$$\delta_{11} \cdot Y_a + \Delta_{1P} = 0,$$

где  $\delta_{11}$  - единичное перемещение;  $\Delta_{1P}$  - грузовое перемещение.

Определение единичного и грузового перемещения будем вести методом Мора.

На рис. 3 построена эпюра изгибающих моментов ( $M_1$ ) от действия единичной силы. Единичное перемещение найдем, вычислив интеграл Мора на каждом из трех участков балки:

$$\text{I. } M_1^I = x, \quad (x=0 \dots (L-l));$$

$$\text{II. } M_1^{II} = (L-l)+x, \quad (x=0 \dots (l-c));$$

$$\text{III. } M_1^{III} = (L-c)+x, \quad (x=0 \dots c).$$

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= \frac{1}{EJ_1} \int_0^{L-l} x^2 dx + \frac{1}{EJ_1} \int_0^{l-c} (L-l+x)^2 dx + \frac{1}{EJ_2} \int_0^c (L-c+x)^2 dx = \\ &= \frac{L^3 - 3L^2c + 3Lc^2 - c^3}{3EJ_1} + \frac{L^3}{EJ_2} - \frac{L^3 - 3L^2c + 3Lc^2 - c^3}{3EJ_2}. \end{aligned}$$

Аналогично определим перемещение от грузового момента ( $M_p$ ):

$$\text{I. } M_p^I = 0;$$

$$\text{II. } M_p^{II} = Px, \quad (x=0 \dots (l-c));$$

$$\text{III. } M_p^{III} = P(L-c)+Px, \quad (x=0 \dots c).$$

$$\begin{aligned} \Delta_{P1} &= \frac{1}{EJ_1} \int_0^{L-l} (L-l+x)Pxdx + \frac{1}{EJ_2} \int_0^c (L-c+x)^2 Pdx = \\ &= \frac{P(-l^3 + 3lc^2 - 2c^3 + 3Llc + 3Lc^2)}{6EJ_1} + \frac{L^3P}{3EJ_2} - \frac{P(L^3 - 3L^2c + 3La^2 - c^3)}{3EJ_2}. \end{aligned}$$

С учетом геометрических размеров ЭК ( $a=0,4 \cdot 10^{-3}$  м,  $c=4,7 \cdot 10^{-3}$  м,  $L=9,4 \cdot 10^{-3}$  м,  $b=0,7 \cdot 10^{-3}$  м,  $h=0,035 \cdot 10^{-3}$  м,  $b_1=9 \cdot 10^{-3}$  м,  $h_1=3,34 \cdot 10^{-3}$  м), получаем:

$$J_1 = \frac{b_1 h_1^3}{12} = \frac{(3,34 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 9 \cdot 10^{-3}}{12} = 2,94 \cdot 10^{-14} \text{ м}^4,$$

$$J_2 = \frac{bh^3}{12} = \frac{(0,035 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3}}{12} = 7,3 \cdot 10^{-18} \text{ м}^4,$$

$$\delta_{11} = 3,12 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Величина силы, действующей на подвижный узел, определяется:

$$P = m \cdot a,$$

где  $m = 0,87 \cdot 10^{-3}$  – масса подвижного узла, кг;  $a = 9,81 \cdot a_{\max}$  – ускорение, действующее на подвижный узел, g.

Перемещение от грузового момента:

$$\Delta_{P1} = 2,66 \cdot 10^{-5} a_{\max} \text{ м.}$$

Искомая вертикальная реакция  $Y_a$  равна:

$$Y_a = -\frac{2,66 \cdot 10^{-5} a_{\max}}{3,12 \cdot 10^{-3}} = -0,85 \cdot 10^{-2} a_{\max} \text{ Н.}$$

Знак минус указывает на то, что направление реакции выбрано неверно,  $Y_a$  направлена вниз.

Для статически определимой системы находим остальные реакции опор и строим эпюру изгибающих моментов  $M_{\text{изг}}$  (рис. 3):

$$\begin{aligned} \Sigma M_B &= M_B + 8,52 \cdot 10^{-3} a_{\max} \cdot l - 0,85 \cdot 10^{-2} a_{\max} \cdot L = 0, \\ M_B &= a_{\max} (0,85 \cdot 10^{-2} \cdot L - 8,52 \cdot 10^{-3} \cdot l) = a_{\max} \cdot 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м,} \\ \Sigma F_Y &= (0,85 \cdot 10^{-2} - 8,52 \cdot 10^{-3}) + Y_B = 0 \\ Y_B &= 0,03 \cdot 10^{-5} a_{\max} \text{ Н.} \end{aligned}$$

$$\text{III. } M_{\text{изг}}^{\text{III}} = -M_B = -3,9 \cdot 10^{-5} a_{\max},$$

$$\text{II. } M_{\text{изг}}^{\text{II}} = -M_B + Y_B l = -3,8 \cdot 10^{-5} a_{\max},$$

$$\text{I. } M_{\text{изг}}^{\text{I}} = -M_B + Y_B L - Y_a l = 0.$$

По эпюре максимальный изгибающий момент в подвесах равен  $M_x = 3,9 \cdot 10^{-5} a_{\max}$ .

Определим максимальное ускорение, которое может выдержать чувствительный элемент при ударной нагрузке. Момент сопротивления сечения:

$$W_x = \frac{bh^2}{6} = \frac{(0,035 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3}}{6} = 1,63 \cdot 10^{-11}$$

Напряжение, возникающее в сечении подвесов:

$$\sigma_x = \frac{M_x}{W_x} = \frac{3,9 \cdot 10^{-5} a_{\max}}{1,63 \cdot 10^{-11}} = 2,39 \cdot 10^6 a_{\max} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

С учетом допустимого напряжения кремния на срез  $[\sigma_{cp}]$ , условие прочности сечения подвесов примет вид:

$$1,5 \sigma_x \leq [\sigma_{np}].$$

где 1,5 – коэффициент, учитывающий ударный характер возмущающего воздействия.

Максимальное ударное ускорение, которое может выдержать ЧЭ:

$$a_{\max} = \frac{[\sigma_{np}]}{1,5 \sigma_x} = 195 \text{ g.}$$

Прочностной расчет доказывает возможность увеличения чувствительной массы в  $n$  раз, без снижения требований по ударпрочности (150 g). А это позволяет использовать приведенный выше вариант повышения точности акселерометра.

*Дата поступления  
в редакцию 20.10.2011*

**A.A. Gavrilov, A.N. Shipunov,**

**INCREASE OF ACCURACY OF MEASUREMENT INTEGRATED GAGE  
OF ACCELERATIONS**

The way of increase in accuracy integrated gage of accelerations with magnetoelectric feedback without decrease in a range and durability characteristics is offered. The increase in inertial weight of the new gage of accelerations in comparison with a prototype leads to increase gage characteristics. In article the mathematical substantiation of the given way is made, calculation a confirming range of measurement and calculation on durability of a sensitive.

*Key words:* accelerometer, the block diagram, an elastic suspension, measuring range, impact resistance.