

УДК 623.4.084.2

Р. А. Подругин, А. В. Воронков,
А. И. Сапожников
(ФГУП “НПЦ АП им. академика Н.А. Пилюгина”)

РАДИАЛЬНАЯ НЕРАВНОЖЕСТКОСТЬ РАСТЯЖКИ УПРУГОГО ПОДВЕСА КАК ПРИЧИНА ОРИЕНТАЦИОННОЙ ПОГРЕШНОСТИ МАЯТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Исходя из радиальной неравножесткости растяжек с прямоугольным сечением рассмотрена ориентационная погрешность от “выламывающего” момента маятника при действии перегрузок вдоль оси подвеса акселерометра. Представлены основные зависимости, описывающие перемещения оси чувствительности, оценена величина этой погрешности и сделан вывод о ее влиянии на точность прецизионных акселерометров. Предложен способ регулировки подвижной системы прибора с целью уменьшения рассматриваемой погрешности до приемлемых величин.

Одним из наиболее перспективных направлений в разработке малогабаритных прецизионных акселерометров является использование упругого подвеса чувствительной массы, обладающего рядом преимуществ. Однако применение упругого подвеса на растяжке в маятниковом компенсационном поплавковом акселерометре приводит к появлению ряда специфических погрешностей при действии измеряемого и перекрестных ускорений. Необходимость применения растяжек с малым поперечным сечением с целью получения высокой чувствительности определяет сравнительно небольшую радиальную жесткость подвеса и значительную неравножесткость растяжки в ортогональных направлениях. Вследствие указанных свойств растяжки действие разнонаправленных перегрузок может вызвать линейные смещения подвижной системы относительно базовых элементов прибора и сложные развороты ее, что приводит к ориентационным погрешностям и к погрешностям коэффициента преобразования и смещения нуля. Большинство перечисленных погрешностей связано с действием перегрузок вдоль оси маятника (ОМ) и оси чувствительности (ОЧ); известны традиционные способы их минимизации: компенсация веса подвижной системы заливочной жидкостью, применение двойного дифференциального датчика угла, настройка параметров жесткой обратной связи и др.

В то же время, “выламывающий” момент маятника, возникающий при действии ускорений вдоль оси подвеса (ОП) и всегда равный полезному измеряемому моменту, характерен для конструкции маятниковых акселерометров и не может быть компенсирован. При этом подвижная система, связанная упругими растяжками с корпусом прибора, стремится развернуться вокруг ОЧ, что в общем случае приводит к возникновению моментов, действующих вокруг ОМ и ОП. Моменты, действующие вокруг ОП, приводят к погрешности смещения нуля, а моменты, разворачивающие подвижную систему вокруг ОМ, приводят к ориентационной погрешности. Рассмотрим в настоящей работе последнюю погрешность, покажем ее влияние на точностные характеристики акселерометра и найдем способы ее минимизации.

Рассмотрим ориентационную погрешность от “выламывающего” момента.

Схематично подвижная система с упругими растяжками изображена на рис. 1.

При ускорении \dot{W} вдоль ОП на подвижную систему действует “выламывающий” момент вокруг ОЧ

$$M_B = m_g n_{\text{ОП}},$$

где $m_g = mgl_M$ — величина, характеризующая инерцию маятника (маятниковость), $\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$; m — чувствительная масса, кг; l_M — плечо маятника, м; $n_{\text{ОП}}$ — значение перегрузки по ОП; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Зависимость, характеризующая радиальное смещение подвижной заделки Y_m при действии рассматриваемых ускорений и полученная ре-

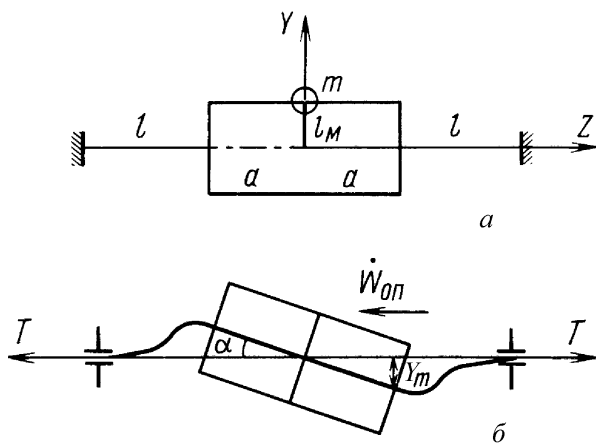


Рис. 1. Схема подвижной системы на упругом подвесе (а) и ее перемещения при действии ускорения по оси подвеса (б)

шением статически неопределимой задачи [1], имеет вид

$$Y_m = \frac{m_g n_{\text{оп}}}{2a \left(\frac{T}{l} \left(1 + \frac{l}{a} \right) + \frac{12EI_x}{l^3} \left(1 + \frac{l}{2a} \right) \right)}, \quad (1)$$

где $I_x = bh^3/12$ — осевой момент инерции прямоугольного сечения растяжки; b, h — размеры сечения растяжки, плоскость которой ориентирована вдоль ОМ ($b \ll h$) или вдоль ОЧ ($b \gg h$), м; E — модуль упругости, кг/м²; T — усилие натяжения, кг; l — длина растяжки, м; $2a$ — длина подвижной системы, м.

В результате смещения Y_m появляется сила $P = Y_m B$, искривляющая растяжку, и сила $P_T = Y_m A$, вызванная натяжением растяжки; здесь

$$A = \frac{T}{l} \left(1 + \frac{l}{a} \right), \quad B = \frac{12EI_x}{l^3} \left(1 + \frac{l}{2a} \right)$$

— эквивалентные жесткости подвеса в осевом и радиальном направлениях соответственно.

Поворот вокруг ОЧ не приводит к появлению каких-либо дополнительных погрешностей.

Теперь рассмотрим случай, когда плоскость растяжки отклонена на угол φ от плоскости, в которой действует “выламывающий” момент (приводимые рассуждения верны также для случая, когда ОМ перпендикулярна плоскости растяжки). Соответственно, сила P направлена под углом φ к широкой стороне растяжки (рис. 2).

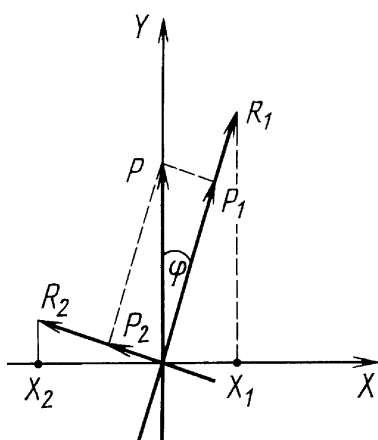


Рис. 2. Распределение сил, действующих на подвижную систему в заделке растяжки упругого подвеса

Разложим силу P на составляющие $P_1 = P \cos \varphi$ и $P_2 = P \sin \varphi$. Под действием сил P_1, P_2 происходит перемещение подвижной системы, причем перемещениям по оси X соответствует разворот ОЧ вокруг ОМ, что приводит к ориентационной погрешности, так как появляется проекция ускорения \dot{W} на ОЧ.

Сила P_1 вызовет перемещение под углом φ к оси Y

$$R_1 = \frac{m_g n_{\text{оп}} \cos \varphi}{2a (A_1 + B_1)},$$

где A_1 и B_1 — эквивалентные жесткости подвеса по осям X и Y соответственно для перемещения под действием силы P_1 ; проекция этого перемещения на ось X составит

$$\Delta X_1 = R_1 \sin \varphi = \frac{m_g n_{\text{оп}}}{2a(A_1 + B_1)} \sin \varphi \cos \varphi. \quad (2)$$

Сила P_2 вызовет перемещение под углом φ к оси X

$$R_2 = \frac{m_g n_{\text{оп}} \cos \varphi}{2a(A_2 + B_2)},$$

где A_2 и B_2 — эквивалентные жесткости подвеса по осям X и Y соответственно для перемещения под действием силы P_2 ; проекция этого перемещения на ось X составит

$$\Delta X_2 = R_2 \cos \varphi = \frac{m_g n_{\text{оп}}}{2a(A_2 + B_2)} \sin \varphi \cos^2 \varphi. \quad (3)$$

Здесь $A_1 = A_2$, $B_1 \gg B_2$.

Суммарное смещение по оси X составляет

$$\Delta X = \Delta X_1 + \Delta X_2 = \frac{m_g n_{\text{оп}}}{2a} \sin \varphi \cos \varphi \left(\frac{1}{A_1 + B_1} - \frac{1}{A_2 + B_2} \right). \quad (4)$$

Этому смещению соответствует поворот подвижной системы вокруг ОМ на угол

$$\Delta \beta = \frac{\Delta X}{a}. \quad (5)$$

Конструкции реальных акселерометров позволяют обеспечить ориентацию плоскости растяжки по ОМ с погрешностью $\pm \varphi$ (в несколько угловых градусов), что может привести к погрешности от изменения ориентации ОЧ (повороту вокруг ОМ), пропорциональной квадрату действующего по ОП ускорения. Такие погрешности являются существенными для прецизионных акселерометров и требуют принятия мер по их уменьшению.

Как уже отмечалось, “выламывающий” момент маятника равен полезному измеряемому моменту, и поэтому уменьшение маятниковости приводит к увеличению доли паразитных моментов в измерительном моменте, что становится серьезной проблемой при обеспечении стабильности основных точностных параметров акселерометра. Таким образом, перед разработчиками стоит задача оптимизации величины маятниковости и жесткости подвеса, которая решается, в том числе, исходя из условий конкретного применения акселерометра (его чувствительности, диапазона измеряемых ускорений, допустимых перегрузок и др.). Очевидно, что применение растяжки с равножестким (квадратным, круглым) сечением позволяет устранить причину возникновения рассмотренной ориентационной погрешности, но для таких растяжек характерно меньшее отношение удельного противодействующего

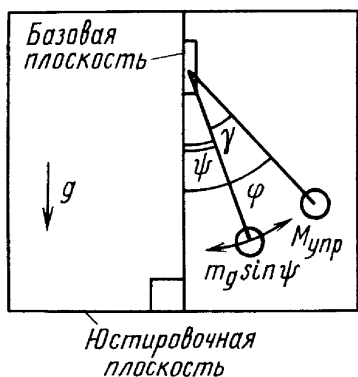


Рис. 3. Принцип работы приспособления для регулировки положения ОМ относительно плоскости растяжки

вливается в юстировочное приспособление в положение маятником вниз (ОП расположена горизонтально) так, что плоскости растяжек во внешних узлах крепления расположены вертикально.

При разомкнутой обратной связи маятник занимает положение, близкое к вертикальному, причем угол ψ отклонения маятника от вертикали определяется моментами, действующими вокруг ОП от закрутки растяжки на угол γ (рис. 3).

Приняв, что базовая плоскость точно сориентирована по вертикали места, из условия равновесия моментов получим

$$m_g \psi = c \gamma, \quad \varphi = \psi + \gamma,$$

или

$$\varphi = \gamma \left(1 + \frac{c}{m_g} \right),$$

где c — угловая жесткость подвеса.

Следовательно, величина угла φ является функцией угла закрутки γ . Принцип измерения угла γ основан на задании тарированных изменений натяжения T растяжки, например, воздействием тарированного усилия на упругую мембрану в одном из внешних узлов крепления. При этом происходит изменение ΔT (уменьшение) натяжения, которое вызывает изменение упругого момента $M_{упр}$, связанного с углом закрутки функциональной зависимостью $\Delta M_{упр} = f(\Delta T \gamma)$, поскольку $c = f(T)$ [2].

Изменение $M_{упр}$ приводит к повороту маятника на угол, пропорциональный φ и фиксируемый датчиком угла приспособления. Невертикальность плоскости растяжки $\Delta \varphi$ вызывает дополнительную закрутку подвеса маятником и, соответственно, определяет погрешность измерения по данной методике. Регулировка угла φ может производиться

момента к прочности на растяжение, такие растяжки являются менее технологичными. Практически в датчиках первичной информации находят применение растяжки с соотношением сторон сечения порядка 10.

Оптимальным подходом к решению этой проблемы является введение в технологический процесс изготовления приборов регулировки положения ОМ относительно плоскости растяжки. Оригинальная методика такой регулировки основана на свойствах закрученного упругого подвеса. Прибор устанавливается

ся перемещением или подбором регулировочных грузов в направлении нормали к ОМ подвижной системы.

Таким образом, при обеспечении точности базирования плоскости растяжки относительно юстировочных поверхностей приспособления и при выборе необходимой дискретности регулировки подбором или перемещением регулировочных элементов можно регулировать угловое положение ОМ относительно плоскости растяжки с точностью $\pm 1^\circ$ и уменьшить до приемлемых величин составляющую погрешности от действующего по ОП ускорения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С т е п и н П. А. Соппротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1979.
2. П я т и н Ю. М. Проектирование элементов измерительных приборов. – М.: Машиностроение, 1977.

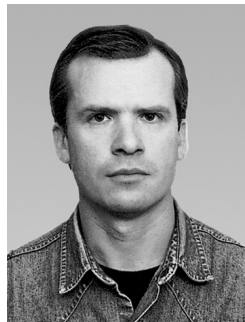
Статья поступила в редакцию 22.03.2004

Александр Владимирович Воронков родился в 1962 г., окончил в 1986 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Начальник лаборатории ФГУП “Научно-производственный центр автоматике и приборостроения имени академика Н.А. Пилюгина”. Автор двух научных работ в области датчиков и систем управления.



A.V. Voronkov (b. 1962) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1986. Head of laboratory of the Federal State Unitary Enterprise “Scientific and Production Center for Automatics and Device Engineering n. a. Academician N.A. Pilyugin”. Author of 2 publications in the field of sensors and systems of control.

Роман Александрович Подругин родился в 1962 г., окончил в 1986 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Старший научный сотрудник ФГУП “Научно-производственный центр автоматике и приборостроения имени академика Н.А. Пилюгина”.



R.A. Podrugin (b. 1962) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1986. Senior researcher of the Federal State Unitary Enterprise “Scientific and Production Center for Automatics and Device Engineering n.a. Academician N.A. Pilyugin”.

Александр Илариевич Сапожников родился в 1957 г., окончил в 1983 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Заместитель начальника отделения ФГУП “Научно-производственный центр автоматике и приборостроения имени академика Н.А. Пилюгина”.



A.I. Sapozhnikov (b. 1957) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1983. Deputy head of division of the Federal State Unitary Enterprise “Scientific and Production Center for Automatics and Device Engineering n. a. Academician N.A. Pilyugin”.