МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

А.Н. Шипунов, А.А. Гаврилов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ДАТЧИКА УГЛОВЫХ УСКОРЕНИЙ

ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА», Арзамас

Предложенная конструкция датчика угловых ускорений позволяет регистрировать низкий уровень входного сигнала и обеспечивает требуемые точностные характеристики. В статье проведено описание конструкции чувствительного элемента, построены структурная и функциональная схемы, на основании которых выведена передаточная функция.

Ключевые слова: чувствительный элемент, угловое ускорение, передаточная функция, уравнение Лагранжа, колебательное звено.

Для получения полной информации о движении различного рода объектов в современных навигационных системах, системах автоматического управления, телеуправления применяются датчики первичной информации (ДПИ).

Уровень сигнала линейного ускорения в разы превышает уровень сигнала углового ускорения, поэтому возникают сложности при создании датчика углового ускорения (ДУУ). Принимая во внимание быстрый рост технологий и усовершенствования измерительной техники в сфере ее быстродействия и миниатюризации, стало возможным изготавливать угловые акселерометры, способные регистрировать низкий уровень входного сигнала.

При выборе схемы построения датчика предпочтительней оказалась схема компенсационного типа с магнитоэлектрической обратной связью, так как в датчиках прямого измерения не обеспечиваются требуемые динамические характеристики, а датчики с электростатической ОС имеют низкий уровень компенсации внешнего воздействия, что с увеличением инерционной массы ЧЭ для повышения чувствительности приведет к увеличению статической погрешности устройства.

Проектируемый датчик состоит из чувствительного элемента (ЧЭ), сервисной электроники, располагающихся в герметичном корпусе с выводными контактами.

Чувствительный элемент содержит (рис. 1):

1) кристаллический элемент *1*, выполненный по интегральным технологиям, представляющий собой подвижную обкладку, перемещающуюся на двух подвесах *3*, находящихся на оси симметрии элемента;

2) 2 обкладки *5* из стекла ЛК-105, одна из которых образует вместе с подвижной обкладкой кристаллического элемента датчик угла, а посредством другой элемент крепится к корпусу всего датчика. Полигоны датчика угла образованы напылением слоя алюминия на стеклянную неподвижную обкладку.

3) 2 катушки, образующих с магнитными системами датчик момента *4*. Катушки крепятся на кронштейн и устанавливаются на подвижную обкладку кристаллического элемента.

4) инерционное кольцо *2*, содержащее элементы статической и динамической балан-

сировки (6 винтов), устанавливающееся непосредственно на подвижную обкладку кристаллического элемента.

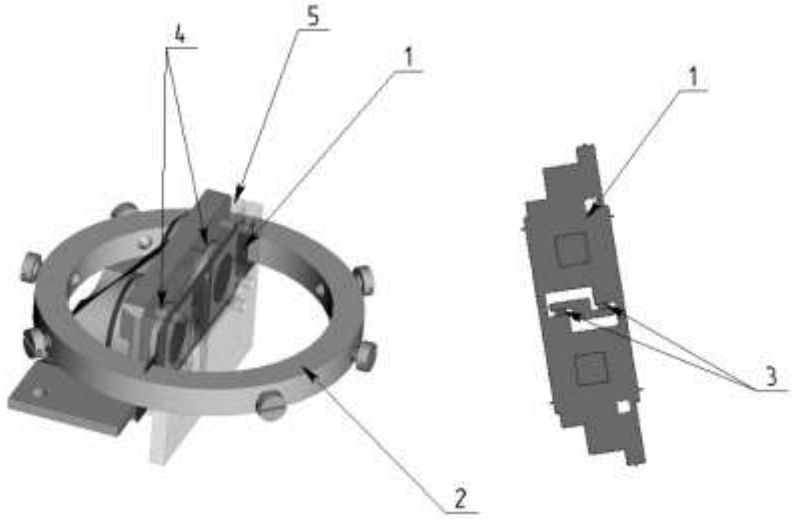

Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента

Конструкция подвесов выполнена таким образом, чтобы при воздействии ускорений по неизмерительным осям перемещение инерционной массы не происходило. Подвес представляет форму параллелепипеда, геометрические параметры которого выбираются исходя из прочности при максимальном ударном воздействии, а также из условий наибольшей чувствительности элемента.

В конструкции чувствительного элемента предусмотрено инерционное кольцо, крепящееся к подвижной обкладке кристаллического элемента, поэтому масса кольца и его геометрические размеры будут непосредственно влиять на прочность подвесов и момент, вызываемый угловым движением ЧЭ.

Для оптимальной работы датчика момента, необходимо чтобы сила, вызываемая им для компенсации внешнего воздействия, не превышала силы, создаваемой датчиком момента в линейном акселерометре.

$$F_{AT} = m_{si}\cdot 20\cdot g = 0,31\cdot 10^{-3}\,\text{êã}\cdot 20\cdot 9,8\frac{\text{ì}}{\text{ñ}^2} = 0,062\,\text{Í} \;,$$

где m_{si} - масса маятника чувствительного элемента акселерометра АТ1104.

Момент создаваемый данной силой в ЧЭ ДУУ:

$$\text{Ì}_x = F_{AT}\cdot l_{\text{ö}} = 0,062\,\text{Í}\cdot 7,9\cdot 10^{-3}\,\text{ì} = 4,8\cdot 10^{-4}\,\text{Í}\cdot\text{ì} \;,$$

где $l_{\text{ö}}$ - расстояние от центра чувствительного элемента до места расположения катушек датчика момента.

Момент, создаваемый инерционной массой ДУУ при воздействии углового ускорения, будет определяться моментом инерционного кольца, так как масса подвижной обкладки кристаллического элемента много меньше массы кольца.

Внутренний радиус кольца определяется исходя из размеров ЧЭ ДУУ: $r_{\text{âíóò}} = 16,5\cdot 10^{-3}\,\text{ì}$, размеры сечения кольца примем 4мм×4мм.

Масса кольца с учетом массы регулировочных винтов, а также массы подвижного узла ЧЭ будет:

$$m = 2\cdot\pi\cdot\rho_{Al}\cdot a\cdot b\cdot\left(r_{\text{âíóò}} + \frac{a}{2}\right) + m_{\text{ÏÓ}} + m_{\text{âèíò}} = 6,4\cdot 10^{-3}\,\text{êã},$$

где ρ_{Al} - плотность алюминия, из которого изготовлено кольцо; a,b - ширина и высота сечения кольца; $m_{\ddot{I}\ Ó}$ - масса подвижного узла (подвижной обкладки); $m_{\hat{a}\grave{e}í\ ò}$ - масса регулировочных винтов; $m_{\ddot{I}\ Ó} + m_{\hat{a}\grave{e}í\ ò} \approx 1\cdot 10^{-3}\,\hat{e}\tilde{a}$.

Момент инерции кольца:

$$J_x = m \cdot r_{\tilde{n}\eth}{}^2 = 6,4\cdot 10^{-3}\,\hat{e}\tilde{a}\cdot(18,5\cdot 10^{-3})^2 = 2,2\cdot 10^{-6}\,\hat{e}\tilde{a}\cdot \grave{i}^{\ 2},$$

где $r_{\tilde{n}\eth} = r_{\hat{a}í\ \acute{o}\eth} + \dfrac{a}{2}$ - средний радиус кольца.

Момент вызываемый инерционным кольцом при действии максимального углового ускорения:

$$M = J_x \cdot \ddot{\psi} = 2,2\cdot 10^{-6}\cdot 42 = 0,91\cdot 10^{-4}\,Í\ \cdot \grave{i}\ ,$$

где $\ddot{\psi} = \pm 42\dfrac{\eth\grave{a}\ddot{a}}{\tilde{n}^2} = \pm 2400°/\tilde{n}^2$ - заданное угловое ускорение.

Данный момент удовлетворяет условию $\grave{I}\ \le \grave{I}\ _x$.

При действии углового ускорения инерционная масса, подвешенная на «мягких» кремниевых упругих элементах, отклоняется от исходного положения. Это отклонение приводит к дебалансу емкостного моста.

Сигнал дебаланса усиливается по мощности и поступает в магнитоэлектрический преобразователь, который воздействует на инерционную массу с силой, равной по величине, но противоположной по направлению инерционной силе. При этом ток в преобразователе пропорционален дистанционному ускорению.

Функционально компенсационный акселерометр состоит из следующих частей: инерционной массы, включающей в себя кремниевую пластину с катушками датчика момента; упругого подвеса, газового демпфера, дифференциального емкостного преобразователя перемещения инерционной массы, усилителя, магнитных систем датчика момента.

Функциональная схема акселерометра изображена на рис. 2.

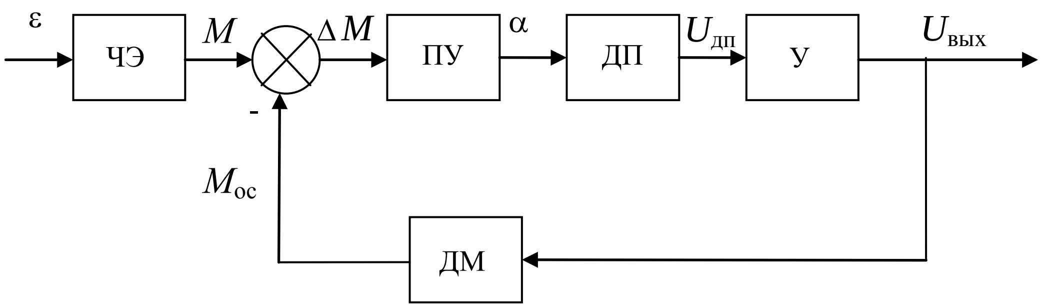

Рис. 2. Функциональная схема акселерометра

Для функциональной схемы: ЧЭ – чувствительный элемент, ПУ – подвижный узел, ДП – датчик перемещений (датчик угла), У – усилитель, ДМ – датчик момента, ε – измеряемое угловое ускорение, M – инерционный момент, $M_{ос}$ – момент обратной связи, α – угол отклонения маятника от нейтрали, $U_{дп}$ – выходное напряжение датчика угла, $U_{вых}$ – выходное электрическое напряжение.

При действии измеряемого углового ускорения на чувствительный элемент возникает момент инерции M, который вместе с моментом обратной связи $M_{ос}$ образуют сигнал ΔM, вызывающий перемещение подвижного узла ПУ на угол α. ПУ перемещается относительно обкладок измерительных емкостей датчика перемещений ДП. В результате изменения величины зазора между обкладками происходит изменение емкостей на выходе мостовой схемы, в которую они включены, появляется напряжение $U_{дп}$, которое затем проходит усилитель У, преобразующий его в выходное напряжение датчика $U_{\text{вых}}$, сигнал которого используется в обратной связи.

На рис. 3 приведена структурная схема ДУУ.

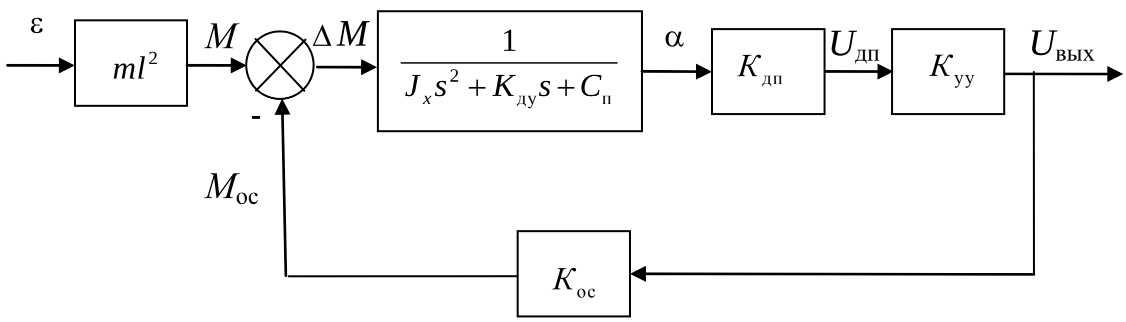

Рис. 3. Структурная схема акселерометра

В данном случае подвижный узел ЧЭ имеет одну степень свободы – угловое перемещение, поэтому система уравнений Лагранжа второго рода выродится в одно уравнение:

$$\frac{d\partial T}{dt\partial\dot{\varphi}} - \frac{\partial T}{\partial\varphi} = Q_{\varphi}, \tag{1}$$

где $T = \frac{mv^2}{2} + \frac{J_x\omega^2}{2}$ – кинетическая энергия чувствительного элемента, m – масса подвижного узла, $v = \dot{y}$ – линейная скорость центра масс ЧЭ, $\omega = \dot{\varphi}$ – угловая скорость центра масс ЧЭ, J_x – момент инерции маятника относительно центра масс.

Кинетическая энергия определяется по следующей формуле:

$$T = \frac{m\dot{y}^2}{2} + \frac{J_x\dot{\varphi}^2}{2}. \tag{2}$$

С учетом сил и момента газодинамического демпфирования углового движения ЧЭ, а также угловой жесткости упругого подвеса обобщенный момент можно выразить следующим образом:

$$Q_x = ml^2\varepsilon - K_{\text{ду}}\dot{\varphi} - C_{\text{п}}\varphi, \tag{3}$$

где ε - действующее угловое ускорение, $K_{\text{ду}}$ - абсолютный угловой коэффициент газодинамического демпфирования, $C_{\text{п}}$ - угловая жесткость подвеса.

Подставляя уравнения для кинетической энергии (2) и обобщенного момента (3) в исходное уравнение Лагранжа (1), получим:

$$ml^2\varepsilon - K_{\text{ду}}\dot{\varphi} - C_{\text{п}}\varphi = J_x\ddot{\varphi},$$

$$J_x\ddot{\varphi} + K_{\text{ду}}\dot{\varphi} + C_{\text{п}}\varphi = ml^2\varepsilon. \tag{4}$$

Уравнение можно записать в операторной форме:

$$\left(J_x s^2 + K_{\text{ду}} s + C_{\text{п}}\right)\varphi = ml^2\varepsilon, \tag{5}$$

где $s = \frac{d}{dt}$ – оператор Лапласа.

Передаточная функция подвижного элемента примет вид:

$$W(s) = \frac{\varphi(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{ml^2}{J_x s^2 + K_{\text{ду}} s + C_{\text{п}}}. \tag{6}$$

Выходное напряжение углового акселерометра можно выразить следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = W(s)\cdot\varepsilon, \tag{7}$$

где $W(s)$ - передаточная функция акселерометра.

Запишем для данного ДУУ передаточную функцию в соответствии со структурной схемой:

$$W_{\text{дуу}}(s) = ml^2 \cdot \frac{\frac{1}{\left(J_x s^2 + K_{\text{ду}} s + C_{\text{п}}\right)}\cdot K_{\text{дп}}\cdot K_{\text{уу}}}{1+\frac{1}{\left(J_x s^2 + K_{\text{ду}} s + C_{\text{п}}\right)}\cdot K_{\text{дп}}\cdot K_{\text{уу}}\cdot K_{\text{ос}}}. \tag{8}$$

Упростив данное выражение, получим:

$$W_{\text{дуу}}(s) = ml^2 \cdot \frac{K_{\text{дп}}\cdot K_{\text{уу}}}{\left(J_x s^2 + K_{\text{ду}} s + C_{\text{п}}\right) + K_{\text{дп}}\cdot K_{\text{уу}}\cdot K_{\text{ос}}}. \tag{9}$$

Приведем выражение (9) к нормированному виду, получим:

$$W_{\text{дуу}}(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1}, \tag{10}$$

где k – статический коэффициент передачи, определяющийся следующим образом:

$$k = \frac{ml^2\cdot K_{\text{дп}}\cdot K_{\text{уу}}}{C_{\text{п}} + K_{\text{дп}}\cdot K_{\text{уу}}\cdot K_{\text{ос}}}, \tag{11}$$

T – постоянная времени:

$$T = \sqrt{\frac{J_x}{C_{\text{п}} + K_{\text{дп}}\cdot K_{\text{уу}}\cdot K_{\text{ос}}}}, \tag{12}$$

ξ – относительный коэффициент газодинамического демпфирования, который можно определить из следующего выражения:

$$2\xi T = \frac{K_{\text{ду}}}{C_{\text{п}} + K_{\text{дп}}\cdot K_{\text{уу}}\cdot K_{\text{ос}}}. \tag{13}$$

Получим формулу для определения относительного коэффициента газодинамического демпфирования:

$$\xi = \frac{K_{\text{ду}}}{2T\cdot\left(C_{\text{п}} + K_{\text{дп}}\cdot K_{\text{уу}}\cdot K_{\text{ос}}\right)}. \tag{14}$$

Определим передаточные функции отдельных звеньев углового акселерометра.

Передаточная функция чувствительного элемента (чувствительной к ускорениям массы) представляет собой безинерционное звено:

$$W_{\text{чэ}}(s) = ml^2, \tag{15}$$

где m – масса маятника, l – плечо маятника.

Передаточная функция подвижного узла акселерометра представляет собой колебательное звено второго порядка:

$$W_{\text{пу}}(s) = \frac{1}{J_x s^2 + K_{\text{ду}} s + C_{\text{п}}}. \tag{16}$$

Здесь момент инерции маятника относительно оси качания определяется следующим образом [5]:

$$J_x = m\left(\frac{a_{\text{м}}^3}{3} + \frac{c_{\text{м}}^3}{12}\right), \tag{17}$$

где $a_{\text{м}}$ - длина маятника, $c_{\text{м}}$ - толщина маятника.

Угловой коэффициент газодинамического демпфирования в общем случае для прямоугольного подвижного узла выражается следующим образом:

$$K_{\text{äó}} = \frac{\mu}{4h^3} \cdot \frac{a_{\text{ì}}^5 b_{\text{ì}}^3}{\left(a_{\text{ì}}^2 + b_{\text{ì}}^2\right)}, \tag{18}$$

где $b_{\text{м}}$ – ширина маятника, h – зазор между подвижным и неподвижным узлами; μ – динамическая вязкость демпфирующего газа (для азота $\mu = 1{,}82 \cdot 10^{-5}$ $\text{Па} \cdot \text{с}$).

Угловая жесткость одного упругого подвеса:

$$C_{\text{п}1} = \frac{E_{[100]} b_{\text{п max}} c_{\text{п}}^3}{6a_{\text{п}}\left(2 + a_{\text{п}} / l_{\text{цм}}\right)} F(\lambda), \tag{19}$$

где $l_{\text{цм}}$ – расстояние от центра тяжести подвижной массы до жесткой заделки подвеса с корпусной пластиной (в данном случае $l_{\text{цм}} = l$), $E_{[100]} = 1{,}295 \cdot 10^{11}$ Н/м^2 – модуль упругости кремния для направления [100], $a_{\text{п}}$ - длина упругого подвеса, $c_{\text{п}}$ - толщина упругого подвеса, $F(\lambda)$ - функция, учитывающая кривизну обводов упругого подвеса, которая определяется следующим образом:

$$F(\lambda) = \frac{\sqrt{\lambda(1-\lambda)}}{(\operatorname{arctg}\sqrt{1/\lambda - 1})}, \tag{20}$$

здесь λ - отношение минимальной ширины подвеса к максимальной:

$$\lambda = \frac{b_{\text{ï min}}}{b_{\text{ï max}}}. \tag{21}$$

Так как подвижный узел качается на двух упругих элементах, то формула (19) для определения угловой жесткости примет вид (с учетом, что $l_{\text{цм}} = l$):

$$C_{\text{п}} = 2C_{\text{п}1} = \frac{E_{[100]} b_{\text{п max}} c_{\text{п}}^3}{3a_{\text{п}}\left(2 + a_{\text{п}} / l\right)} F(\lambda). \tag{22}$$

Перемещение подвижного узла измеряется датчиком перемещений, коэффициент передачи которого определяется из соотношений дифференциального моста:

$$C_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{h - \Delta h}, \tag{23}$$

где ε_0 = 8,85 ·10^{-12} Ф/м – диэлектрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость среды заполнения (для азота $\varepsilon = 1{,}00058$), – площадь обкладок измерительных емкостей, Δh – изменение зазора.

$$C_2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{h + \Delta h}. \tag{24}$$

Напряжение, снимаемое с датчика:

$$U_{\text{дп}} = \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} \cdot U_{\text{оп}}, \tag{25}$$

где $U_{\text{оп}}$ – опорное напряжение генератора.

Подставляя (23) и (24) в (25), получим напряжение на выходе моста [5]:

$$U_{\text{дп}} = \frac{\Delta h}{h} \cdot U_{\text{оп}}. \tag{26}$$

Коэффициент передачи датчика перемещений будет равен:

$$K_{\text{дп}} = \frac{U_{\text{дп}}}{\Delta h} \cdot l_{\text{дп}} = \frac{U_{\text{оп}}}{h} \cdot l_{\text{дп}}. \tag{27}$$

где $l_{\text{дп}}$ - длина датчика перемещений (в нашем случае $l_{\text{дп}} = l$).

Коэффициент передачи датчика момента выражается следующим образом:

$$K_{\text{ос}} = \frac{B \cdot L \cdot n \cdot l}{R_{\text{н}}},$$

где $B_{\text{р}}$ – индукция в рабочем зазоре магнитной системы, L – длина одного витка катушки, n – число витков катушки, $R_{\text{н}}$ - сопротивление нагрузки.

Теоретически для углового акселерометра имеем передаточную функцию обыкновенного колебательного звена второго порядка. Параметры передаточной функции определяются из расчетов чувствительного элемента и электрической схемы с использованием исходных данных технического задания.

В настоящее время в приборостроении датчики угловых ускорений вызывают большой интерес, а исследование величины углового ускорения позволит решать новые, более сложные задачи военной и гражданской тематики. Разработка ДУУ создаст новый виток в развитии малогабаритных, более маневренных летательных объектов, а также более совершенных систем стабилизации.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.
2. **Вавилов В.Д.** Конструирование интегральных датчиков / В.Д. Вавилов, В.И. Поздяев. – М.: Изд-во МАИ, 1993. – 68 с.

Дата поступления
в редакцию 20.10.2011

A.N. Shipunov, A.A. Gavrilov

DEFINITION OF TRANSFER FUNCTION OF THE GAUGE OF ANGULAR ACCELERATIONS

The offered design of the gage of angular accelerations allows to register low level of an entrance signal and provides demanded characteristics. In article the description of a design of a sensitive element is spent, structural and functional schemes on which basis transfer function is deduced are constructed.

Key words: sensor, the angular acceleration of the transfer function,the Lagrange equation, vibrational element.