

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

И.В. Вавилов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДУС ТИПА
«ЛИНЕЙНЫЙ ВИБРАТОР»

Арзамасский НПП ОАО «ТЕМП-АВИА»

В статье приводятся материалы разработки микросистемного ДУС в качестве чувствительного элемента, в котором используется вибрирующая пластина из кристаллического кремния на меандровом подвесе. Особенностью разработки является то, что с целью повышения точности в качестве привода в ДУС используется электростатический встречно-штыревой преобразователь.

Ключевые слова: вибрирующая пластина, микросистемный ДУС, кристаллический кремний, переходный процесс, добротность упругого элемента, встречно-штыревой преобразователь.

Построение датчика угловых скоростей возможно с применением электростатического силового преобразователя со встречно-штыревыми микропластинами (рис. 1).

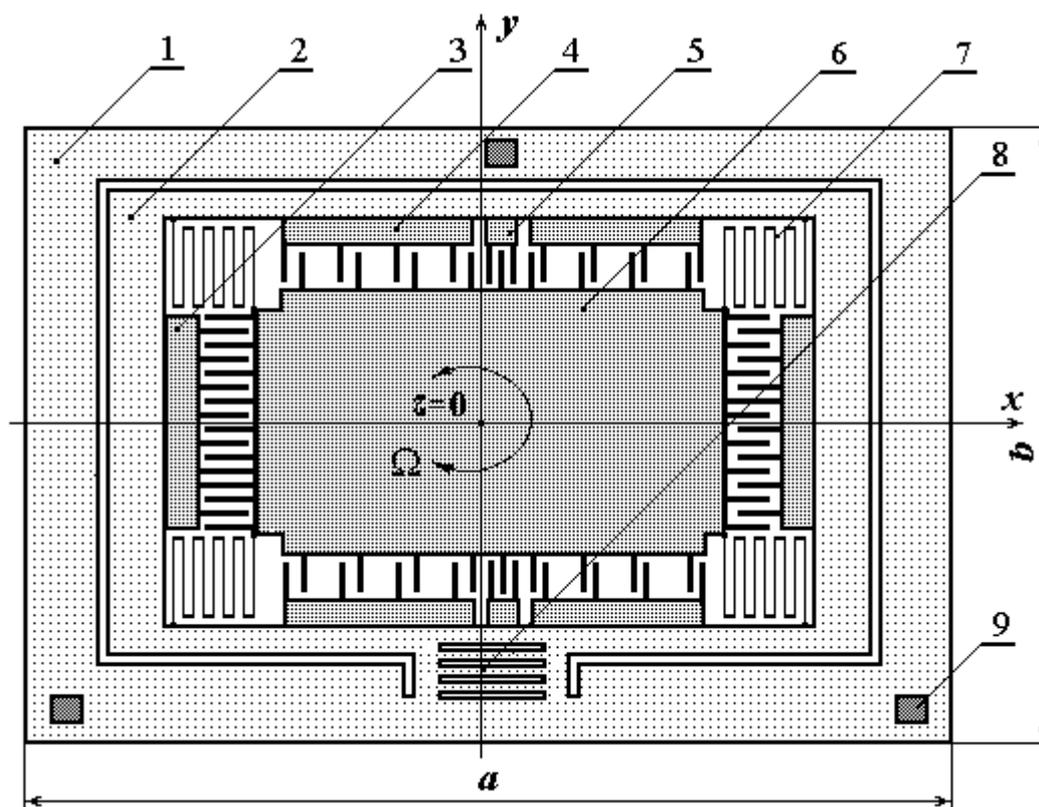


Рис. 1. Кристалл чувствительного элемента ДУС типа «линейный вибратор» с меандровыми подвесами:

1 – несущая пластина; 2 – монтажная пластина; 3 – гребенка неподвижных электродов возбуждения колебаний; 4 – гребенка неподвижных электродов силового датчика; 5 – гребенка неподвижных электродов датчика емкостного датчика перемещений; 6 – подвижная масса; 7 – упругий подвес; 8 – лестничный упор монтажной пластины; 9 – площадка соединения с корпусом

В данной конструктивной схеме чувствительная масса b выполнена «развязанной» по отношению к несущей корпусной пластине 1. С целью развязки чувствительного элемента от

влияния корпуса в конструкции имеется промежуточная монтажная рамка 2, соединенная с основанием 1 посредством лестничной консоли 10. Относительно промежуточной рамки 2 чувствительная масса б соединена меандровыми подвесами 7. Подвижные электроды всех преобразователей: силового, перемещения и возбуждения принудительных колебаний – жестко соединены с чувствительной массой. Относительно основания 1 чувствительная масса б может совершать колебательные движения по двум направлениям: x и y , – обеспечивая тем самым возможность измерения угловой скорости Ω относительно оси z .

Принцип работы конструктивной схемы микросистемного ДУС с меандровыми подвесами аналогичен принципу работы конструктивной схемы с линейными подвесами. Очевидно, что и математические модели обеих схем, записанные в общем виде, являются идентичными.

Пусть по оси x подвижный узел приведен в принудительные колебания с помощью магнитоэлектрического или электростатического автогенератора. При действии поворотной угловой скорости относительно оси z , перпендикулярной к плоскости подвижного узла, возникает кориолисова сила, действующая по оси y :

$$F_k = 2m\Omega\dot{x},$$

где m - масса подвижного узла; Ω - угловая скорость относительно оси z (внешнее воздействие); \dot{x} - линейная скорость перемещения подвижного узла вдоль оси x .

Осредненное значение линейной скорости можно оценить через угловую скорость возбуждения колебаний и амплитуду перемещения:

$$\dot{x} = \omega_b \delta, \quad (1)$$

где ω_b - угловая скорость колебательного движения подвижного узла, возбуждаемая автогенератором; δ - амплитуда колебаний.

С целью определения математической модели ЧЭ микросистемного ДУС с допущением трех степеней свободы подвижного узла запишем уравнения Лагранжа в виде следующей системы:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial T}{\partial x} = Q_x, \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} - \frac{\partial T}{\partial y} = Q_y, \quad (2)$$

где T - кинетическая энергия рассматриваемой системы; Q_x , Q_y , Q_z - проекции обобщенных сил по соответствующим направлениям.

Величину кинетической энергии для данной динамической системы можно записать в следующем виде:

$$T = \frac{m}{2} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2), \quad (3)$$

где l_{cx} , l_{cy} - смещение геометрического центра симметрии подвижного узла в результате технологических разбросов упругости подвесов и симметрии подвижного узла.

В развернутом виде обобщенные силы и моменты запишутся:

$$\left. \begin{aligned} Q_x &= P_{эл} - G_x x - K_{dx} \dot{x}, \\ Q_y &= F_k - G_y y - K_{dy} \dot{y}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $P_{эл} = BIU/R$ - электрическая сила, возбуждающая принудительные колебания подвижного узла по оси x ; G_x, G_y - жесткости упругого подвеса по соответствующим направлениям; $K_{дх}, K_{дy}$ - абсолютные коэффициенты демпфирования.

Для шестигранного сечения упругого подвеса с несглаженными острыми гранями жесткость определяется следующим выражением:

$$G_y = \frac{96E_{[100]}J}{a_n^3}, \quad (5)$$

где $J = \frac{c_n b_n^3}{12} - \left(\frac{b_n}{2} - \frac{2c_n}{3 \tan \alpha} \right)^2 \frac{c_n^2}{2 \tan \alpha}$ - момент инерции шестигранного подвеса относительно оси симметрии оси y .

Подставляя (3), (4) и (5) в систему уравнений (2), получим

$$\left. \begin{aligned} m(\ddot{x}) + K_{дх}\dot{x} + G_x x &= P_{эл}, \\ m(\ddot{y}) + K_{дy}\dot{y} + G_y y &= F_k. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Учитывая предыдущее соотношение, а также независимость декартовых координат, принятых в уравнениях Лагранжа (2) за обобщенные, система уравнений (6) сводится к операторной форме:

$$\left. \begin{aligned} (ms^2 + K_{дх}s + G_x)x &= P_{эл}, \\ (ms^2 + K_{дy}s + G_y)y &= 2m\Omega v_x. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Таким образом, из второго уравнения системы (7) запишем передаточную функцию подвижного узла в виде

$$W_{ny}(s) = \frac{K_{чз}}{ms^2 + K_{д}s + G}, \quad (8)$$

где $K_{чз} = 2m\delta\omega_x$ - коэффициент передачи чувствительного элемента; δ - амплитуда колебаний подвижного узла; ω_x - переносная частота колебаний, задаваемая приводом.

Особенностью конструктивной схемы микросистемного датчика угловых скоростей со встречно-штыревыми электродами является снижение жесткости упругого подвеса в связи с увеличением его длины, что соответствует эквивалентному повышению чувствительности датчика. Жесткость одного подвеса с меандровой пружиной оценивается следующей формулой:

$$G = E_{[100]}c_n^3 b_n / [(1+n)a_n]^3, \quad (9)$$

где $E_{[100]}$ - модуль упругости материала подвеса; a_n, b_n, c_n - соответственно длина, ширина и толщина пружины подвеса в его сечении; n - число витков в меандре подвеса.

Технологически ЧЭ микросистемного датчика угловых скоростей со встречно-штыревыми электродами выполняется по современной микроэлектронной технологии, включающей плазменное травление.

Выводы

С увеличением суммарной длины подвеса его жесткость снижается по кубическому закону, соответственно во столько же раз увеличивается чувствительность. Этим достигается цель повышения точности микросистемного датчика угловых скоростей.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики: учебник / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.
2. **Распопов, В.Я.** Микромеханические системы / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. – 410 с.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2010*

I.V. Vavilov

MATHEMATICAL MODEL OF THE DETECTOR ELEMENT DUS TYPE «LINEAR VIBRATOR»

The material of the development micro system DUS happen to In article as detector element in which is used vibrating plate from crystalline flint hang up on meander VVhang up. The Particularity of the development is that for the reason increasing of accuracy as drive in DUS is used electrostatic counter-shtyri converter.

Key words: vibrating plate, micro system DUS, crystalline silicon, connecting process, kindness springy element, counter-shtyri converter.