

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.768.082.14

В.Д. Вавилов

УСТРАНЕНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ И ШУМОВЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ)

Статья посвящена вопросам устранения вибрационных и шумовых погрешностей микроакселерометров осевого типа посредством конструктивных решений. Рассмотрены наиболее часто встречающиеся факторы, влияющие на вибрационные и шумовые погрешности микроакселерометров и разработаны методы их снижения до допустимого уровня. Например, для снижения помех, проходящих от корпуса к чувствительному элементу, а также для снижения энергетических потерь монтажную пластину, на которой выполнен ЧЭ соединяют с корпусной с помощью лестничного упора. Лестничный упор может быть выполнен лабиринтным, Микромеханический узел (маятник) и электронный блок рассмотрены отдельно и в совокупности. Получена математическая модель микроакселерометра как динамической системы в виде передаточной функции четвертого порядка и ее реализация в виде компьютерной программы.

Ключевые слова: микроакселерометр, струны подвески, лабиринтная консоль, контурное демпфирование, точка резонанса, спад АЧХ.

Микросистемный акселерометр с электростатической пружиной отработки может быть выполнен по осевому типу (рис. 1). Состоит акселерометр из однородной пластины 1 проводящего кремния, внутри которой размещена монтажная пластина 2. Монтажная пластина 2 соединена с корпусной пластиной 1 посредством упора 9 лестничного типа. Гребенки встречно-штыревых преобразователей 3 и 4 выполнены посредством ионного травления на той же монтажной пластине 2 и электрически изолированы от нее зазорами 8.

Подвижные электроды всех встречно-штыревых преобразователей выполнены на чувствительной массе 7. Для ограничения хода чувствительной массы 7 в ней сделан выступ 5, а в монтажной пластине 2 сделана соответствующая канавка.

Осевой микросистемный акселерометр (рис. 1) со встречно-штыревыми преобразователями перемещения и силы выгодно отличается от маятниковых тем, что его чувствительный элемент выполнен всего лишь на одной пластине. При этом исключаются погрешности от неточности соединений составляющих пластин и от процессов возникающих в местах соединений разнородных материалов.

Микросистемный акселерометр со встречно-штыревыми преобразователями может быть выполнен на любые диапазоны измерений, требуемые в технике. Еще одним преимуществом является то, что его жесткость подвесов может быть выполнена сколько угодно малой за счет увеличения длины пружины подвеса с меандровой формой. Так жесткость одной секции подвеса с меандровой пружиной оценивается следующей формулой:

$$k = \frac{E \cdot a_n \cdot b_n \cdot c_n}{n \cdot l} \quad (1)$$

где a_n, b_n, c_n - соответственно длина, ширина и толщина пружины подвеса в его сечении; n - число витков в меандре подвеса. Причем ширина пружины b_n выполняется более чем на порядок ее

толщины c_n , тем самым устраняется погрешность акселерометра от воздействия боковой составляющей по оси z . Из приведенной расчетной формулы видно, что снижение жесткости пружины в зависимости от числа витков в меандре осуществляется по кубическому закону.

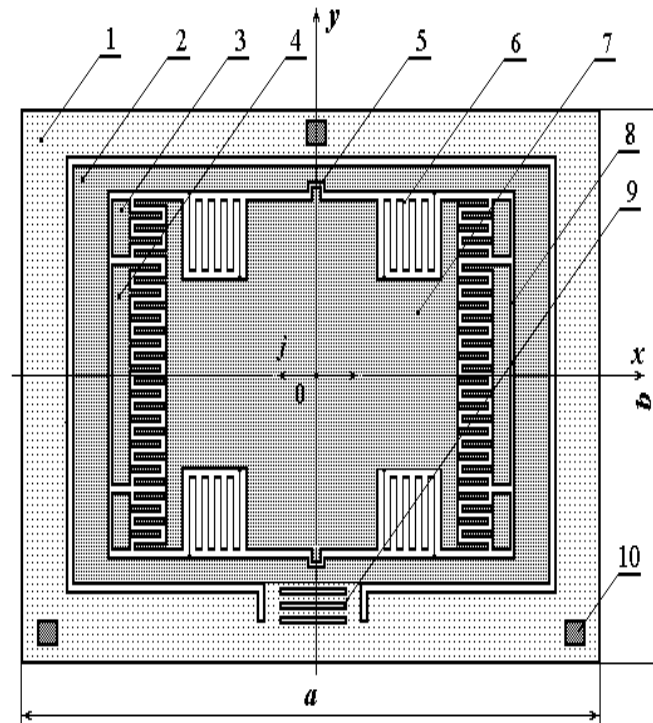


Рис. 1. Чувствительный элемент микроакселерометра:

1 – несущая пластина; 2 – монтажная пластина; 3 – электроды преобразователя перемещений; 4 – встречно-штыревые электроды силовой отработки; 5 – ограничитель перемещений; 6 – упругие подвесы; 7 – чувствительная масса; 8 – зазор между гребенкой электродов и монтажной пластиной; 9 – лестничный упор консольной пластины; 10 – площадка соединения с корпусом

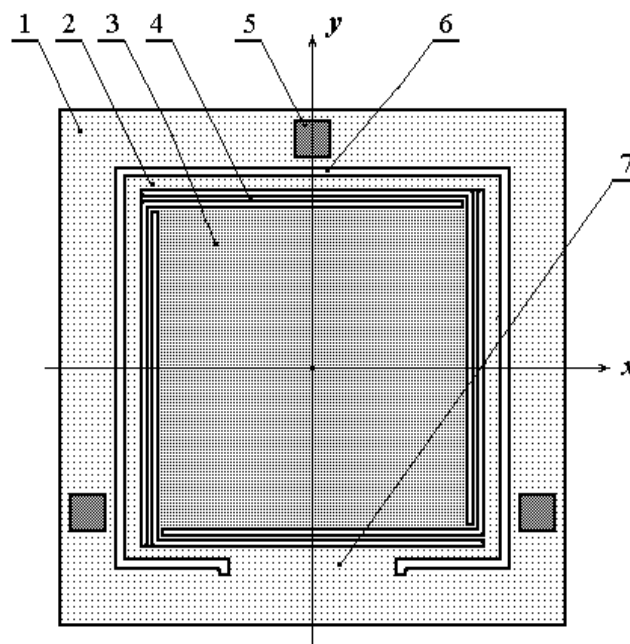


Рис. 2. Чувствительный элемент осевого типа:

1 – несущая пластина; 2 – монтажная рамка; 3 – чувствительная масса (челнок); 4 – упругие подвесы; 5 – площадка для соединения с неподвижной обкладкой; 6 – зазор между подвижным электродом и несущей пластиной; 7 – консоль

Лестничный упор 7 монтажной пластины 2 предназначен для снижения помех, проходящих от корпуса к чувствительному элементу, а также для снижения энергетических потерь ЧЭ через упор. Лестничный упор 9 может быть выполнен лабиринтным, так как это показано на рис. 1.

Соединение несущей пластины 1 с корпусом акселерометра осуществляется по жесткому треугольнику с центром треугольника в центре тяжести чувствительной массы 7. Обычно соединение осуществляют посредством промежуточной ситалловой пластины. Температурные коэффициенты корпуса, несущей и промежуточной пластин должны совпадать. Чаще всего для корпуса применяют нержавеющую сталь типа ковара.

Еще одной разновидностью ЧЭ осевого микроакселерометра является элемент типа «свастика». Названия позиций ЧЭ отмечены в подрисуночных подписях, а его свойства и математические описания аналогичны свойствам ЧЭ по рис. 1.

Даже при оптимальном демпфировании и оптимальных запасах устойчивости по амплитуде и фазе имеется множество факторов могущих отрицательно повлиять на точность микроакселерометров. Например, вибрационные и ударные нагрузки на объект, на котором установлены микроакселерометры. Не маловажное значение на точность микроакселерометров имеют также термодинамические воздействия. В динамическом плане подвижный узел осевого акселерометра имеет одну степень свободы и соответственно описывается передаточной функцией второго порядка:

$$W_{\text{пу}}(s) = \frac{m}{ms^2 + K_d s + G}, \quad (2)$$

где K_d – суммарный коэффициент потерь.

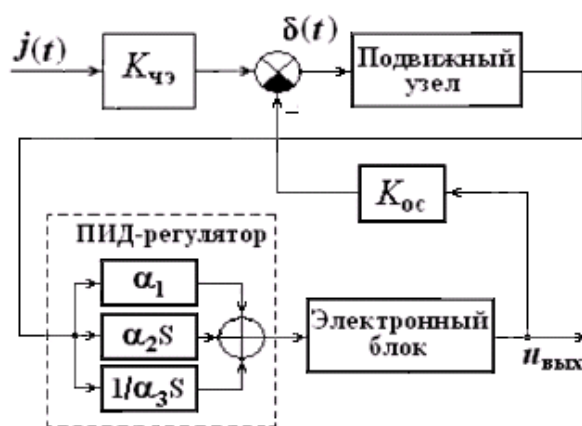


Рис. 3. Структурная схема микроакселерометра

Для определения передаточной функции осевого акселерометра в замкнутом контуре справедлива структурная схема (рис. 3) с соответствующими параметрами. Одно из важных требований, предъявляемых к системам регулирования, заключается в том, чтобы постоянное входное воздействие обрабатывалось без установившейся ошибки. Для статических систем при классическом синтезе этого можно добиться с помощью включения ПИД-регулятора

Таким образом, для определения формы корректирующего устройства можно повторить все, что было установлено для маятникового акселерометра, где было выявлено, что наиболее эффективным корректирующим устройством является устройство по принципу ПИД-регулятора. И тогда передаточная функция корректирующего устройства может быть записана в следующем виде:

$$W_{\text{кор}}(s) = \alpha_1 + \alpha_2 s + \frac{1}{\alpha_3 s}, \quad (3)$$

где α_1 , α_2 , α_3 – постоянные времени звеньев: пропорционального, дифференцирующего и интегрирующего.

Для обеспечения синхронной работы узлов акселерометра постоянные времени механического подвижного узла, дифференцирующего звена и интегратора должны быть равными:

$$T_{\text{мех}} = T_{\text{диф}} = T_{\text{инт}}. \quad (4)$$

Учитывая требование (4) определим постоянные коэффициенты корректирующего устройства в следующем виде:

$$\alpha_2 = \alpha_3 = \sqrt{G/m}. \quad (5)$$

Независимо от типа ЧЭ структурная схема датчика с ПИД-регулятором одна и та же, представлена на рис. 2.

Пользуясь структурной схемой (рис. 3) в замкнутом контуре, найдем передаточную функцию осевого микросистемного акселерометра.

$$W_{\text{акс}}(s) = \frac{M(B_2 s^2 + B_1 s + B_0)}{A_4 s^4 + A_3 s^3 + A_2 s^2 + A_1 s + A_0}, \quad (6)$$

где $M = mK_{\text{мп}}K_{\text{yc}}$; $N = K_{\text{ос}}K_{\text{мп}}K_{\text{yc}}$; $B = 1$; $B_1 = T$; $B_2 = T^2$ – коэффициенты числителя передаточной функции; $A_0 = N$; $A_1 = (G + N)T$; $A_2 = (K_{\text{д}} + G\tau + NT)T$; $A_3 = (m + K_{\text{д}}\tau)T$; $A_4 = m\tau T$ – коэффициенты знаменателя передаточной функции.

Силовой электростатический преобразователь линеаризован по напряжению и работает на притяжение. Зазор между подвижным и неподвижным электродами составляет порядка десяти микрометров. Величина развиваемой силы электростатического преобразователя, определяется следующим выражением:

$$F_3 = \frac{2\varepsilon_0 b_3 c_3}{h^2} u_{\text{оп}} u_{\text{упр}}, \quad (7)$$

с относительной ошибкой нелинейности по перемещению, равной

$$\delta_n = 2z/h, \quad (8)$$

где a_3 и b_3 – длина и ширина электрода; z – смещение чувствительной массы от нейтрального положения; h – начальный зазор между подвижным и неподвижными электродами.

В связи с тем, что ошибки компенсационных приборов определяются ошибками обратного преобразователя, без принятия специальных мер, его ошибка нелинейности целиком будет присуща всему измерительному прибору. Проблема может быть решена различными путями. Первый, наиболее приемлемый и точный, это использование интеграторов в прямой цепи, что придает компенсационным приборам астатический режим и отработку к нулю смещения x . В тех случаях, когда применение астатизма невозможно, например, из-за потери динамической устойчивости прибором, ошибку нелинейности можно снизить до допустимого значения ограничением величины смещения. Демпфирование подвижного узла во всех случаях осуществляется в электрическом контуре.

Одним из возможных недостатков рассматриваемой конструкции является возникновение высокочастотных колебаний в длинных струнах подвеса, удерживающих чувствительную массу. В нейтральном положении упругого подвеса, выполненных в виде струн без возбуждения колебаний в них, натяжение отсутствует. При возбужденных колебаниях в результате искривления струны возникает натяжение, являющееся как бы начальным. Далее при изгибе подвеса натяжение в струнах изменяется, влияя тем самым на резонансные частоты струн. Колебания струн в данном случае может привести к зашумленности выходного сигнала. Однако этого не произойдет, поскольку в силу специфики конструкции чувстви-

тельная масса может поворачиваться относительно перпендикулярной к массе оси и усилие натяжения струны становится равным нулю. Этому способствует также силовая отработка обратной связи, стремящаяся возратить чувствительную массу в нейтральное положение.

В общем виде колебания струны описываются волновым уравнением с той лишь разницей, что константа, представляющая смысл скорости распространения волн, имеет свои особенности:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2}, \quad (9)$$

где ε – смещение участков струны в направлении оси y относительно нейтрального положения; $v = [(T + T_0)/\rho S]^{1/2}$ – константа, имеющая размерность скорости; T_0 и T – соответственно начальное натяжение струны и натяжение, задаваемое изгибом упругого подвеса; ρ – плотность материала струны; S – площадь поперечного сечения струны.

Подстановкой $\varepsilon(x, t) = u(x) \exp(j\omega t)$ уравнение (8) можно преобразовать в обыкновенное дифференциальное уравнение следующего вида:

$$\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x^2} + \left(\frac{\omega}{v}\right)^2 u(x) = 0. \quad (10)$$

Из решения (9) с учетом начальных и граничных условий найдем распределение амплитуд колебаний вдоль струны

$$u(x) = A \sin(\omega x/v)$$

и резонансные частоты основного вида колебаний и гармоник

$$F = \frac{\pi n}{a} \sqrt{\frac{T_0 + T}{\rho S}}, \quad (11)$$

где n – номер гармоники; T_0 – технологическое натяжение струны подвеса при изготовлении; T – возможное натяжение струны при ее деформации. Учитывая, что натяжение струн снимается поворотом чувствительной массы (рис. 2) и соответственно возникновение их колебаний отсутствует,

Вибрационная помеха может также проникнуть к чувствительному элементу от объекта через соединения с акселерометром. Неподвижные обкладки чаще всего жестко соединяются с корпусной кремниевой пластиной в которой выполнен подвижный узел чувствительного элемента. Далее от площадок соединения 6 возмущения в виде механических напряжений передаются к упругим струнам 5 по телу корпусной пластины 1. Оценку напряжений в точках корпусной пластины можно провести по следующей формуле:

$$\sigma_i = p \frac{(1 - \nu^2) S}{(1 - \nu^2) S + y_0 L}, \quad (12)$$

где p – давление на контакт; ν – коэффициент Пуассона; S – площадь контакта; L – расстояние от точки приложения сосредоточенной силы до заданного сечения; y_0 – толщина пластины с ЧЭ.

Из формулы (11) видно, что с уменьшением размеров площадки соединения и с увеличением расстояния до упругих подвесов маятника, влияние контактных напряжений снижается. Для того чтобы реализовать свойство, описываемое формулой (11) чувствительная масса 3 выполняется в монтажной рамке 2. В свою очередь монтажная рамка относительно корпусной пластины 1 установлена на консоли 7. Консольное крепление монтажной рамки снижает также температурные напряжения в чувствительном элементе.

Ограничение по нижнему пределу (порогу чувствительности) определяется в основном напряжением тепловых шумов, имеющих место в емкостной мостовой схеме:

$$U_{\text{тн}} = (2k\Theta/\pi C)^{1/2}, \quad (13)$$

где $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана; Θ - температура чувствительного элемента, К; C - емкость между электродами преобразователя перемещений, Ф. В чистом виде напряжение тепловых шумов представляет собой погрешность нулевого уровня. Снизить эту погрешность возможно термостатированием чувствительного элемента при пониженной температуре или увеличением емкости преобразования перемещений. Последнее наиболее приемлемо для применения в микроакселерометрах.

Увеличение емкости между электродами преобразователя перемещений возможно двумя путями: уменьшением зазора между подвижным и неподвижным проводящими электродами, увеличением площади неподвижного проводящего электрода 3 (рис. 2) или одновременно тем и другим способами.

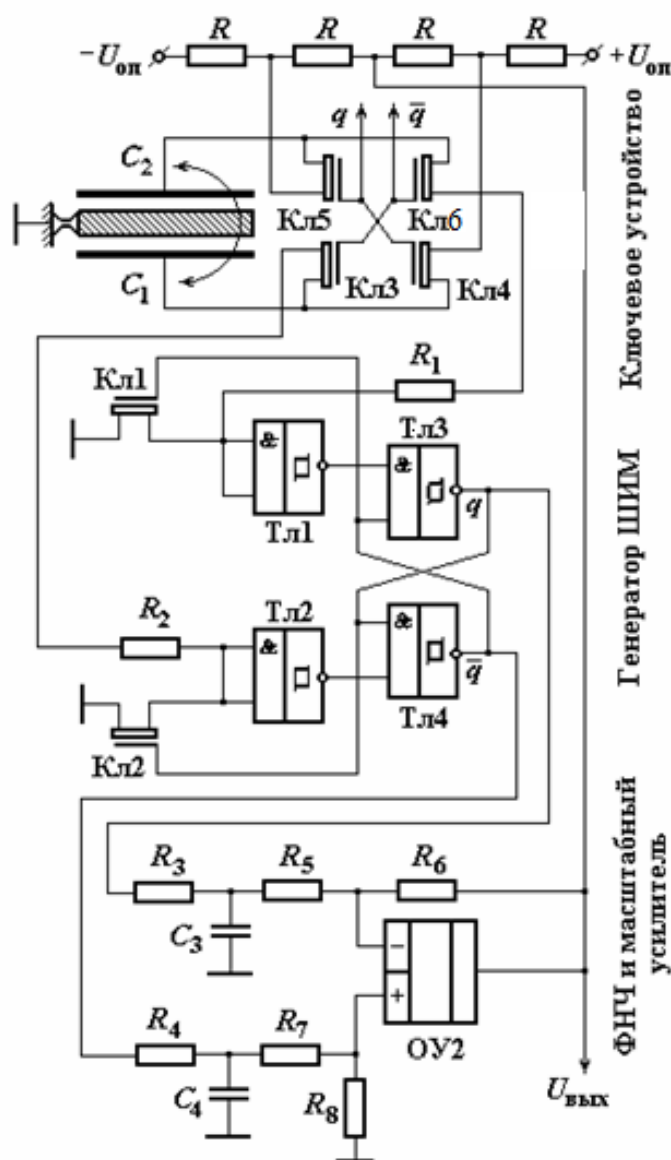


Рис. 4. Электрическая схема микроакселерометра

Уменьшение зазора между подвижным и неподвижным проводящими электродами ограничено критической напряженностью электрического поля, при которой возникает электрический пробой. Например, в среде сухого азота критическая напряженность составляет $E_{кр} \approx 5 \cdot 10^6$ В/м. Electrodes емкостей датчика перемещений и датчика силы размещены на проводящей площади неподвижной обкладки и суммарно не могут превосходить эту

площадь. В данном случае имеет место выбора оптимального соотношения между площадями датчика перемещений и датчика силы.

Одним из возможных вариантов является поочередное использование во времени датчика перемещений или датчика силы (рис. 4) при суммарной площади электродов. Цепочка постоянных резисторов R представляет линейаризатор по напряжению силового преобразователя. Управляется линейаризатор выходным напряжением масштабного усилителя. Посредством ключевой схемы Кл3 – Кл6 измерительные емкости $C_1 - C_2$ могут подключаться с тактовой частотой к выходам линейаризатора или ко входам генератора ШИМ.

Библиографический список

1. ГОСТ 24346-80. ВИБРАЦИЯ. Термины и определения.
2. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.

*Дата поступления
в редакцию 12.04.2013*

V.D. Vavilov

ELIMINATING VIBRATION AND NOISE ERRORS MICROACCELEROMETERS

Arzamas polytechnic Institute (branch) of Nizhny Novgorod state technical university
n.a. R.Y. Alexeev

Question removal vibratory inaccuracy microaccelerometers axial type is considered In article by means of constructive decisions. They Are Considered most often meeting factors, influencing upon vibratory and noise inaccuracy microaccelerometers and designed methods of their reduction before possible level. For instance, for reduction of the hindrances, passing from body to detector element, as well as for reduction of the energy losses erection plate, on which is executed by CHE connect with with body by means of stair stress. Stair stress can be executed labyrinth. Mikromehanicheskiy node (the pendulum) and electronic block are considered apart and in the aggregate. Mathematical model microaccelerometers is Received as dyne-ческой of the system in the manner of transmission function of the fourth order and its realization in the manner of computer program.

Key words: microaccelerometr, strings of the lavalier, console, contour air-cushion, point reasonable, decline АСНН.