

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.768.082.14

А.А. Гаврилов¹, А.Н. Шипунов²

ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА»²

Рассмотрен принцип действия акселерометра компенсационного типа с магнитоэлектрической обратной связью и емкостным датчиком угла. Приведена схема электрическая принципиальная усилителя преобразователя акселерометра. Представлен алгоритм преобразования емкостного датчика угла. Проанализировано влияние вибрации на акселерометр, выявлены механизмы образования вибропогрешности. Показано как нелинейность емкостного датчика угла при начальном рассогласовании его емкостей ведет к увеличению вибропогрешности указанного акселерометра. Получена оценка вибропогрешности акселерометра диапазоном измерения $\pm 50g$ при воздействии синусоидальной вибрации. Разработан метод увеличения виброустойчивости компенсационных акселерометров.

Ключевые слова: вибрация, виброустойчивость, вибропогрешность, акселерометр, датчик угла, датчик момента, нелинейность, снижение вибропогрешности.

Введение

Одним из основных актуальных требований, предъявляемых к акселерометрам, является виброустойчивость. Виброустойчивость характеризуется способностью акселерометра выдавать информацию об измеряемом ускорении с заданной точностью в условиях воздействия вибрации. Вибрация – это механические колебания тела, имеющие разный характер от гармонического колебания центра масс до случайных колебаниями разных точек тела со спектром частот, состоящим из множества гармонических колебаний в порядке возрастания. Вибрация может возникать, например, при движении транспортных средств, работе двигателей, турбин и т. д. и может привести к нарушению режимов работы, разрушению [1].

Виброустойчивость – один из видов стойкости изделий к воздействию механических внешних воздействующих факторов. Критерием виброустойчивости акселерометров является понятие вибропогрешности, которая характеризуется как изменение постоянной составляющей выходного сигнала при воздействии вибрации.

Принцип действия компенсационного акселерометра

Рассмотрим влияние вибрации на акселерометр компенсационного типа с магнитоэлектрической обратной связью и емкостным датчиком угла. На рис. 1 показана конструкция чувствительного элемента указанного акселерометра. Чувствительный элемент содержит маятник 1, выполненный путем анизотропного травления монокристаллического кремния, заключенный при помощи электростатической сварки между двумя обкладками 2 выполненными из боросиликатного стекла. Маятник содержит в себе две катушки обратной связи 3, представляющие собой намотку из медного провода, образующие в паре с магнитными системами 4 датчик момента обратной связи. При действии линейного ускорения маятник пе-

ремещается относительно неподвижных обкладок, содержащих металлизированные полигоны, образующие с маятником датчик угла (ДУ). При перемещении маятника дифференциально изменяются емкости, которые преобразуются электроникой по дифференциально-логоритмическому алгоритму

$$U = k_{yc} \frac{R_1 C_1 - R_2 C_2}{R_1 C_1 + R_2 C_2} \cdot U_{оп} ,$$

где C_1, C_2 – емкости датчика угла; R_1, R_2 – опорные резисторы, через которые заряжаются емкости ДУ; k_{yc} – коэффициент усиления; $U_{оп}$ – опорное напряжение.

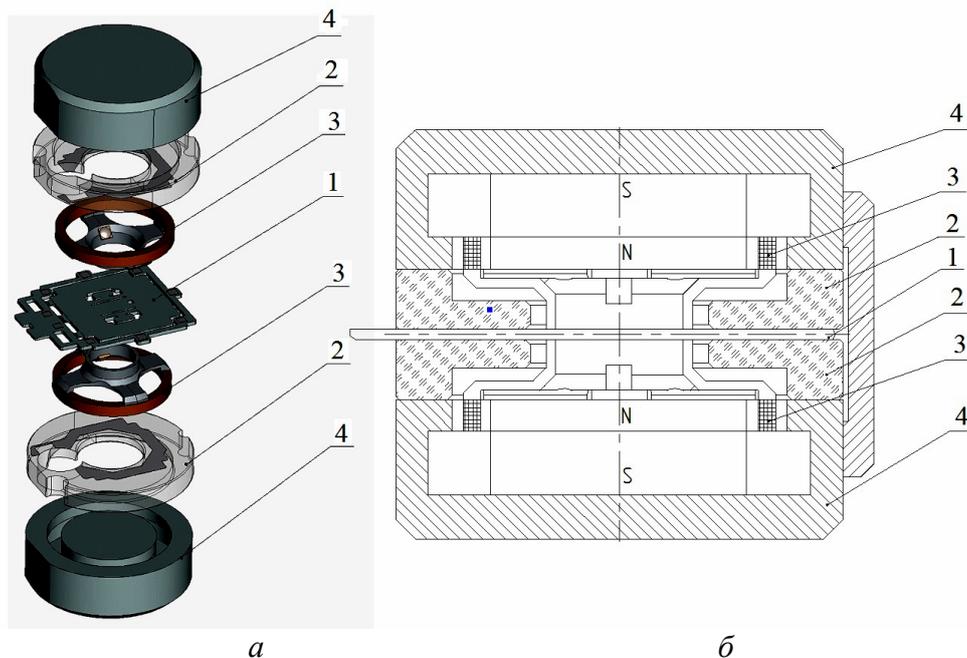


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента акселерометра компенсационного типа: а – трехмерное изображение ЧЭ акселерометра; б – изображение ЧЭ в разрезе

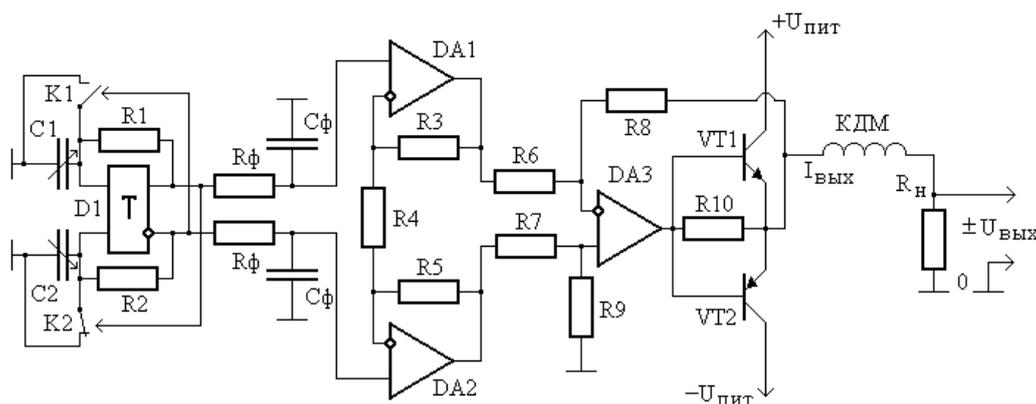


Рис. 2. Дифференциально-логоритмическая схема микроакселерометра: C_1-C_2 – измерительная схема; $T (D1)$ – RS -триггер; $K1, K2$ – КМОП-ключи; КДМ – катушка датчика момента обратной связи; R_n – внешнее сопротивление нагрузки

Дифференциально-логоритмический алгоритм электронного преобразователя устроен следующим образом. С помощью ключей и асинхронного RS -триггера опрашиваются дифференциальные измерительные ёмкости ЧЭ: заряжается и разряжается C_1 и C_2 по двум вход-

ным каналам с помощью пилообразного напряжения и выдаются на парафазный выход прямоугольные импульсы одинаковой частоты, но разной длительности, соответствующей величинам C_1 и C_2 . Причём, когда одна емкость разряжается, другая заряжается через резистор R_1 (R_2) положительной обратной связи ШИМ преобразователя $D1$ (рис. 2). Таким образом, за счет положительной обратной связи происходит циклическая зарядка-разрядка емкостной измерительной схемы. Разностный сигнал усиливается и подается в виде тока в катушки обратной связи датчика момента, который компенсирует измеряемую величину с помощью главной отрицательной обратной связи.

Датчик момента стремится выровнять рассогласование рабочих емкостей с заданным контурным коэффициентом обратной связи. В акселерометрах с интегратором в контуре (астатизмом) датчик момента перемещает маятник до тех пор, пока выходное напряжение датчика угла не будет равно 0 [2].

Механизм образования вибропогрешности

Рассмотрим поведение датчика угла при максимальном перемещении маятника.

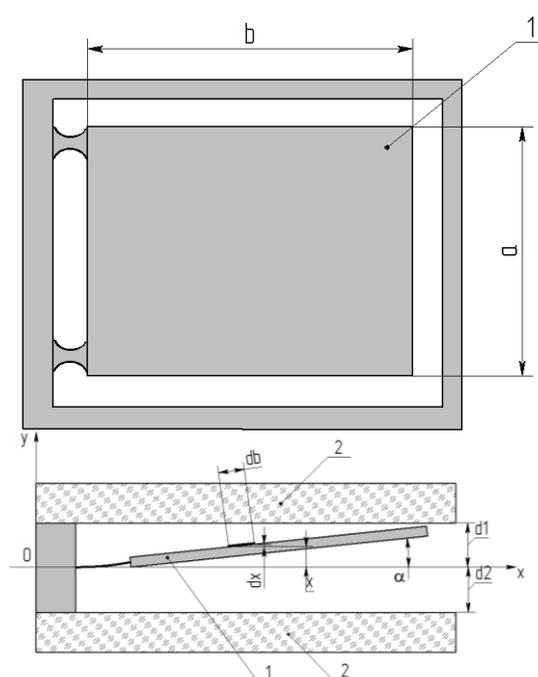


Рис. 3. Геометрические размеры чувствительного элемента:

1 – маятник ЧЭ; 2 – неподвижные обкладки ДУ

В соответствии с рис. 3 начальные емкости ДУ равны:

$$C_1 = \frac{\epsilon\epsilon_0 \cdot S}{d_1}, \quad C_2 = \frac{\epsilon\epsilon_0 \cdot S}{d_2} \quad (1)$$

где S – площадь обкладки ($S=a \times b$, где a – ширина обкладки, b – ее длина); ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; ϵ – диэлектрическая проницаемость; d_1 , d_2 – начальные расстояния между обкладками.

Под действием линейного ускорения маятник прогибается на некоторый угол α , изменяя при этом рабочие емкости. Емкость элементарного участка db будет:

$$dC_1 = \frac{\epsilon\epsilon_0 \cdot db \cdot a}{d_1 - x}, \quad dC_2 = \frac{\epsilon\epsilon_0 \cdot db \cdot a}{d_2 + x},$$

где $db = dx \cdot \sin(\alpha)$, поэтому

$$dC_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot a}{\sin(\alpha)} \cdot \frac{dx}{d_1 - x}, \tag{2}$$

$$dC_2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot a}{\sin(\alpha)} \cdot \frac{dx}{d_2 + x}, \tag{3}$$

Обозначая $\frac{dx}{d_1 - x} = \frac{dX_1}{X_1}$, $\frac{dx}{d_2 + x} = \frac{dX_2}{X_2}$, проинтегрировав формулы (1) и (2) по всей площади рабочей емкости, получим:

$$C_1 = \int_0^{x_{\max}} \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot a}{\sin(\alpha)} \cdot \frac{dX_1}{X_1} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot a}{\sin(\alpha)} \cdot \ln\left(\frac{d_1}{d_1 - x_{\max}}\right), \tag{4}$$

$$C_2 = \int_0^{x_{\max}} \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot a}{\sin(\alpha)} \cdot \frac{dX_2}{X_2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot a}{\sin(\alpha)} \cdot \ln\left(\frac{d_2 + x_{\max}}{d_2}\right), \tag{5}$$

где $x_{\max} = b \cdot \sin(\alpha)$,

Выходное напряжение датчика угла при равных опорных резисторах $R_1 = R_2 = R$ определится, подставляя выражения (4), (5) в формулу (1):

$$U = k_{\text{yc}} \cdot \frac{\ln(d_1 - b \cdot \sin(\alpha)) - \ln(d_1) + \ln(d_2 + b \cdot \sin(\alpha)) - \ln(d_2)}{\ln(d_1 - b \cdot \sin(\alpha)) - \ln(d_1) - \ln(d_2 + b \cdot \sin(\alpha)) + \ln(d_2)} \cdot U_{\text{оп}}. \tag{6}$$

Рассмотрим частный случай, когда начальные емкости равны, т. е. $d_1 = d_2 = d$, тогда

$$U = k_{\text{yc}} \cdot \frac{\ln(d - b \cdot \sin(\alpha)) - 2 \ln(d) + \ln(d + b \cdot \sin(\alpha))}{\ln(d - b \cdot \sin(\alpha)) - \ln(d + b \cdot \sin(\alpha))} \cdot U_{\text{оп}}. \tag{7}$$

Максимальный угол, на который может отклониться маятник при действии ускорения изменяется от $-\alpha = \arctg\left(\frac{d}{b}\right)$ до $\alpha = \arctg\left(\frac{d}{b}\right)$. Принимая условные граничные условия начальных параметров рабочих емкостей получим графическую зависимость выходного напряжения датчика угла от действующего ускорения, изображенную на рис. 4.

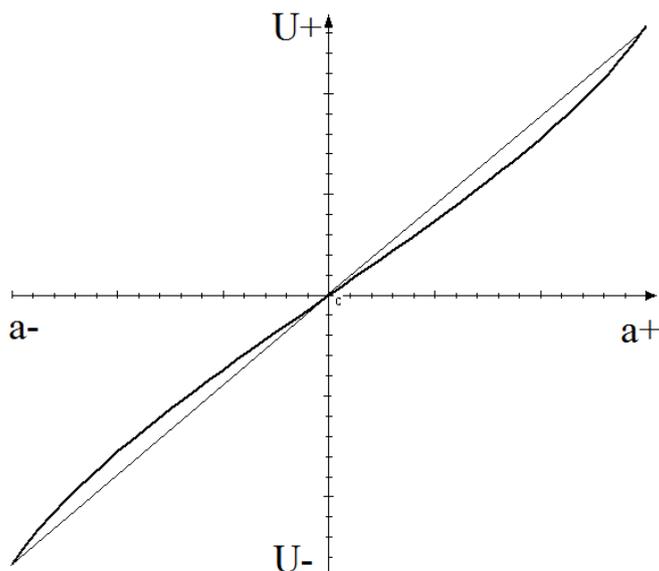


Рис. 4. Зависимость выходного сигнала ДУ от ускорения при равных начальных зазорах рабочих емкостей:
 $U+$, $U-$ – максимальное, минимальное выходные напряжения датчика угла при изменении ускорения от $a-$ до $a+$

Из рис. 4 следует, что датчик угла имеет нелинейную выходную характеристику, при этом погрешность от нелинейности при действии отрицательного ускорения равна погрешности при действии положительного ускорения.

Для определения численного значения нелинейности датчика угла, а также вибропогрешности в формулу (7) подставим реальные значения параметров рабочих емкостей акселерометра (табл. 1).

Таблица 1

Номинальные параметры рабочих емкостей

Наименование параметра	Численное значение
Ширина маятника	$a=10 \cdot 10^{-3}$ м
Длина маятника	$b=10 \cdot 10^{-3}$ м
Начальный зазор	$d_1=d_2=d=30 \cdot 10^{-6}$ м
Максимальное отклонение маятника	$\alpha=\arctg(d/b)=0,17^\circ$

В акселерометрах компенсационного типа за счет контурного коэффициента обратной связи датчик момента не дает отклоняться маятнику до упора, а в обратной связи с астатизмом перемещение маятника вовсе отсутствует, поэтому нелинейность датчика угла проявляется после отключения астатизма и резкого уменьшения контурного коэффициента с частоты 150 Гц, где перемещение маятника составляет 20–30% от максимально возможного его отклонения.

При равных начальных зазорах выходное напряжение ДУ при максимальном отклонении угла будет $U_1 = 0,1536 \cdot k_{yc} \cdot U_{оп}$

При действии ускорения амплитудой в два раза меньше перемещение маятника должно быть $\frac{1}{2} b \cdot \sin(\alpha)$. Тогда выходное напряжение ДУ будет $U_2 = 0,0758 \cdot k_{yc} \cdot U_{оп}$. Нелинейность ДУ будет составлять $\frac{U_1 - 2 \cdot U_2}{U_1} = 1,3\%$.

Для определения вибропогрешности при такой нелинейности датчика угла предположим, что ускорение, а вследствие чего и угол отклонения маятника, изменяются по синусоидальному закону: $\alpha = \sin(\omega \cdot t)$, где ω – частота изменения угла α .

Зависимость выходного сигнала датчика угла от гармонического ускорения показана на рис. 5.

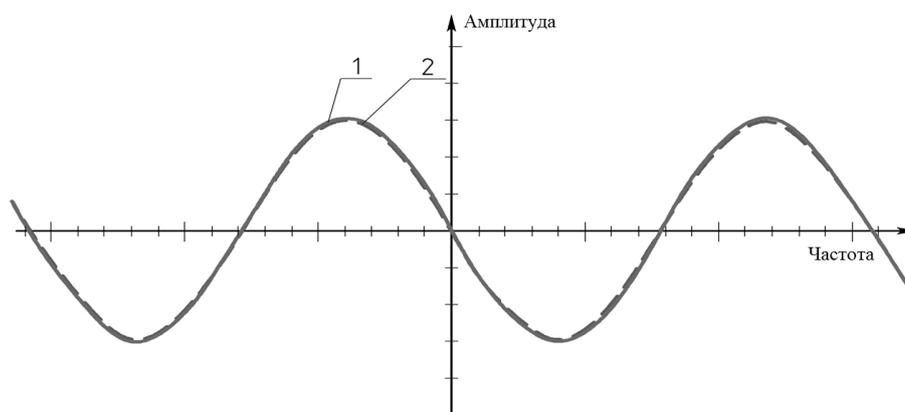


Рис. 5. Выходной сигнал ДУ при равных начальных зазорах рабочих емкостей при действии ускорения гармонического характера:
1 – выходной сигнал ДУ; 2 – действующее ускорение

Из рис. 5 видно, что датчик угла за счет своей нелинейности измеряет действующее

синусоидальное ускорение с некоторыми искажениями, но при этом не выделяет постоянной составляющей выходного сигнала, т.е. вибропогрешность отсутствует, что легко доказуемо при сравнении выходных сигналов ДУ при действии линейных ускорений одинаковой амплитуды, но противоположных по направлению. Подставляя в формулу (7) значения углов отклонения маятника при указанных ускорениях, получим

$$U_+ = 0,152 \cdot k_{yc} \cdot U_{оп},$$

$$U_- = -0,152 \cdot k_{yc} \cdot U_{оп},$$

где U_+ , U_- - выходные напряжения датчика угла при углах отклонения маятника, вызванных действием положительного и отрицательного ускорения соответственно.

$$U_{cp} = \frac{U_+ + U_-}{2} = 0.$$

Из формул следует, что среднее значение выходного сигнала ДУ, т.е. постоянная составляющая выходного сигнала при действии гармонического ускорения равна 0. Поскольку при равных начальных зазорах нулевой сигнал датчика угла также равен 0, то вибропогрешности не наблюдается.

Рассмотрим случай, когда начальные расстояния между обкладками рабочих емкостей не равны. Неравенство ёмкостных зазоров может быть обусловлено несколькими факторами:

- технологическим процессом изготовления кремниевого маятника, когда скорости травления с двух сторон маятника различны, поэтому высоты площадок, посредством которых кремниевый элемент соединяется со стеклянными обкладками, а в результате и рабочие зазоры будут не одинаковыми;

- соединением пакета стекло - кремний - стекло при электростатической сварке, при которой происходит деформация кремниевого маятника;

- неидеальностью электронного преобразователя, когда резисторы R_1 и R_2 , через которые заряжаются – разряжаются рабочие емкости, имеют разный номинал. Кроме основной функции резисторов, посредством которых опрашиваются рабочие емкости, они служат для регулировки начального нулевого сигнала акселерометра. Большой начальный нулевой сигнал, требующий регулировки, может быть вызван нулевыми сигналами электронных компонентов электрической схемы, паразитными емкостями по входам ШИМ, параллельных рабочим емкостям C_1 и C_2 , образующихся при соединении чувствительного элемента с электронным преобразователем.

Допуск на начальное значение нулевого сигнала в акселерометрах средней точности составляет 0,04% от диапазона измерения, а при действии максимального ускорения за счет обратной связи изменение зазора рабочих емкостей составляет 30% от начального зазора. На рис. 6 наблюдается нелинейность датчика угла при разных начальных рабочих зазорах, несимметричная и значительно большая, чем при равных начальных рабочих зазорах, составляющая 1,8%.

При измерении синусоидального ускорения (рис. 7) одна из рабочих емкостей датчика угла насыщается, что приводит к неполному повторению амплитуды измеряемого сигнала, тем самым вызывая погрешность измерения, за счет которой и появляется вибропогрешность акселерометра.

Подставляя в формулу (6) значения максимальных углов отклонения маятника при действии ускорений, противоположных по направлению, получим:

$$U_+ = 0,078138 \cdot k_{yc} \cdot U_{оп} \quad (8)$$

$$U_- = -0,077893 \cdot k_{yc} \cdot U_{оп} \quad (9)$$

$$U_{cp} = \frac{U_+ + U_-}{2} = 0,122 \cdot 10^{-3} \cdot k_{yc} \cdot U_{оп}.$$

Начальный нулевой сигнал ДУ при неравенстве начальных рабочих зазоров определится:

$$U_0 = k_{yc} \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \cdot U_{оп} = 0,119 \cdot 10^{-3} \cdot k_{yc} \cdot U_{оп}.$$

Отклонение выходного сигнала от начального нулевого сигнала датчика угла при действии гармонического ускорения и будет определять искомую вибропогрешность:

$$\Delta = U_0 - U_{cp} = 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot k_{yc} \cdot U_{on} \quad (10)$$

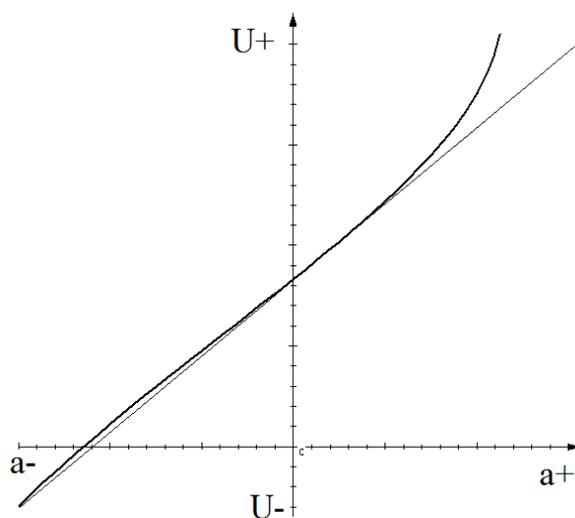


Рис. 6. Зависимость выходного сигнала ДУ от ускорения при разных начальных зазорах рабочих емкостей

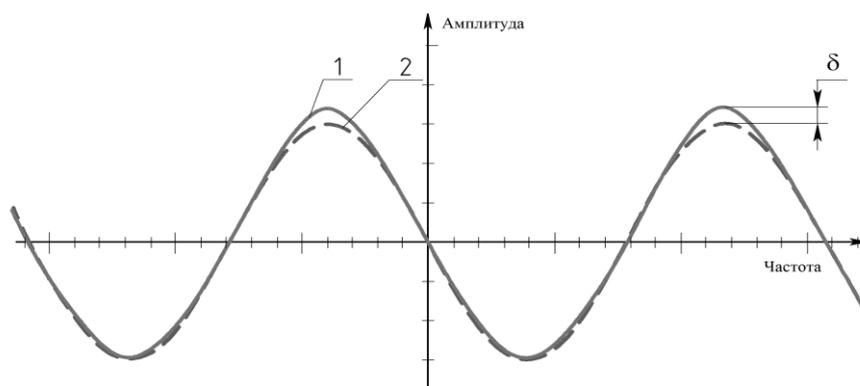


Рис. 7. Выходной сигнал ДУ при разных начальных зазорах рабочих емкостей при действии ускорения гармонического характера:

1 — выходной сигнал ДУ; 2 — действующее ускорение;

δ — погрешность ДУ при измерении ускорения

При диапазоне измерения акселерометра $\pm 50g$ и действии на него возмущающего воздействия в виде широкополосной вибрации стандартного спектра амплитудой $13,6g$ при нормальном законе распределения вероятность проявления ускорения амплитудой $40,8g$ составит $31,74\%$. Принимая во внимание, что воздействующая вибрация сравнима с диапазоном измерения, вибропогрешность акселерометра будет определяться как отношение отклонения по формуле 10 к выходному напряжению датчика угла, полученному при действии максимального ускорения из формул (8), (9):

$$\delta = \frac{\Delta}{|U_+| + |U_-|} \cdot 100\% = 4,7 \cdot 10^{-3}\%$$

Относительно воздействующего ускорения вибропогрешность определится

$$\delta = 4,7 \cdot 10^{-3}\% \cdot 40,8g = 1,91mg$$

В современных акселерометрах компенсационного типа допуск на погрешность от действия ШСВ или синусоидальной вибрации составляет 4,0–6,0 mg.

Метод уменьшения вибропогрешности

Уменьшить вибропогрешность акселерометра можно за счет сведения постоянной составляющей выходного сигнала акселерометра при действии вибрации к нулевому сигналу в отсутствие вредных воздействующих факторов путем подгонки регулировочных резисторов электронного преобразователя акселерометра. При рассогласовании резисторов происходит рассогласование рабочих емкостей за счет работы датчика момента обратной связи акселерометра, который, перемещая кремниевый маятник, изменяет зазоры в рабочих емкостях датчика.

Осуществление регулировки непосредственно при действии вибрации не представляется возможным. Поэтому для имитации вибрации необходимо с помощью звукового генератора подавать переменное напряжение определенной амплитуды и частоты в катушку датчика момента обратной связи акселерометра, которое будет перемещать маятник чувствительного элемента по синусоидальному закону. Фиксируя постоянную составляющую выходного сигнала акселерометра, необходимо найти максимальное ее отклонение от нулевого сигнала акселерометра, изменяя на генераторе частоту выходного напряжения, без изменения при этом его амплитуды. Найдя максимальное отклонение, т.е. максимальную вибропогрешность акселерометра, необходимо свести ее к минимуму, изменяя нулевой сигнал акселерометра путем изменения номинала того или иного регулировочного резистора.

Единственным недостатком указанного метода уменьшения вибропогрешности является вероятность того, что начальный нулевой сигнал акселерометра после регулировки будет не соответствовать предъявляемым техническим требованиям, т.е. выйдет за допускаемую величину. Поскольку при применении акселерометров и датчиковой аппаратуры в целом потребители стараются осуществлять в своих системах алгоритмическую компенсацию систематических погрешностей, то указанный недостаток не актуален.

Библиографический список

1. ГОСТ 24346-80. ВИБРАЦИЯ. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1980.
2. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов. – Н. Новгород.: НГТУ, 2003. – 503 с.

*Дата поступления
в редакцию 10.07.2013*

A.A. Gavrilo¹, A.N. Shipunov²

VIBRATION STABILITY OF MEMS ACCELEROMETER

Arzamas polytechnic institute (branch) Nizhny Novgorod state
technical university n.a. R.E. Alexeev¹
JSC ARPE «TEMP-AVIA», Arzamas²

Purpose: Detection of source of vibration errors in MEMS accelerometer, having capacitive-type angle sensor.

Findings: Principle of operation for accelerometer, including magneto-electric force-rebalance and capacitive angle sensor, is considered. An electrical circuit of electric unit is presented. Translation algorithm for angle sensor signals is given. An estimation of vibration error is obtained for accelerometer within a measuring range of $\pm 50g$ under sinusoidal vibration conditions.

Research: Zero offset of accelerometer because of capacitive angle sensor nonlinearity with initial capacitance difference is investigated.

Originally/value: A method of improving vibration stability for force-rebalance accelerometers is developed.

Topic: Vibration stability of MEMS accelerometer.

Key words: vibration, vibration stability, vibration error, accelerometer, angle sensor, momentum sensor, nonlinearity, vibration error reduction.