

Разработка и исследование микромеханического акселерометра

Алексей Сергеевич Тимошенко²
Степан Александрович Анчутин²
Елена Сергеевна Кочурина²
Александр Сергеевич Мусаткин¹
Максим Сергеевич Головинский¹
Виктор Владимирович Калугин¹
Владислав Валерьевич Пузиков²
Сергей Петрович Тимошенко¹

1. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1
spt111@mail.ru, viktor118@mail.ru, musatkin.a@hotmail.com, maxim1112010@mail.ru
2. Общество с ограниченной ответственностью «Лаборатория Микроприборов», 124527, город Москва, город Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6, пом. XV эт. 3 ком 43
at@mp-lab.ru, step305@mail.ru, ekochurina@mp-lab.ru, vp@mp-lab.ru

Аннотация

В статье приведено описание микромеханических акселерометров серии 202МСУ1Л-1Ц и 203МСУ1Л-1Ц; особенности конструкции микромеханического акселерометра, математическая модель выходного сигнала, представлено описание автоматизированного стенда и разработанного программного обеспечения, даны результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: микромеханический акселерометр; чувствительный элемент; преобразователь емкость-код; автоматизированный стенд; результаты экспериментальных исследований.

Задачи, связанные с измерением кажущегося ускорения, а также вычисление скорости и определение положения объекта в пространстве являются актуальными в современном мире. Во многих отраслях – от потребительской электроники до авиации и военного дела необходим контроль этих характеристик. Для решения данных задач используются микромеханические акселерометры, которые имеют конкурентное преимущество: малые габариты и массу, невысокую стоимость при серийном производстве.

В ООО «Лаборатория Микроприборов» совместно с Институтом НМСТ МИЭТ разработаны и изготовлены микромеханические акселерометры (ММА) серии 202МСУ1Л-1Ц и 203МСУ1Л-1Ц (рисунок 1). ММА серии 203МСУ1Л-1Ц отличается от 202МСУ1Л-1Ц наличием 32-х разрядного микроконтроллера, который позволяет реализовать температурную компенсацию. Более подробная информация о микромеханических акселерометрах серии 202МСУ1Л-1Ц и 203МСУ1Л-1Ц на сайте ООО «ЛМП» www.mp-lab.ru.



Рисунок 1 – Микромеханический акселерометр: а) серия 202МСУ1Л-1Ц; б) серия 203МСУ1Л-1Ц.

Одноосный микромеханический акселерометр состоит из чувствительного элемента (ЧЭ) и платы преобразователя «емкость-код», расположенных в герметичном корпусе, размерами 20×15×13мм (рисунок 2).

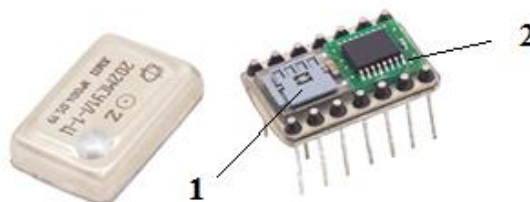


Рисунок 2 - Чувствительный элемент и плата преобразователя в герметичном корпусе: 1 – чувствительный элемент, 2 – плата преобразователя «емкость-код».

Кремниевый ЧЭ маятникового типа состоит из подвижной части (1), закрепленной на стеклянной подложке (2) с помощью анодного сращивания (рисунок 3).

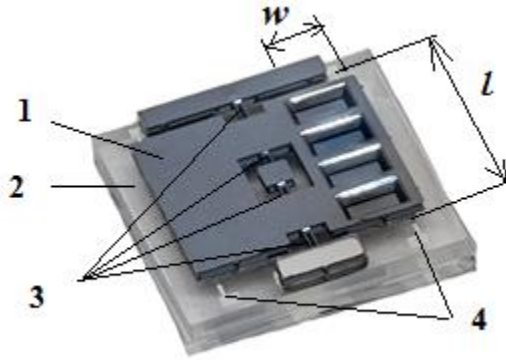


Рисунок 3 – Чувствительный элемент микромеханического акселерометра: 1 – подвижная часть, 2 – стеклянная подложка (неподвижное основание), 3 – упругий подвес, 4 – электроды контактных площадок.

Подвижная часть подвешена к основанию при помощи упругого подвеса (3), работающего на кручение, центр масс подвижной части смещен относительно оси подвеса. На стеклянной подложке нанесены электроды из металла (4), эквивалентная схема ЧЭ показана на рисунке 4.

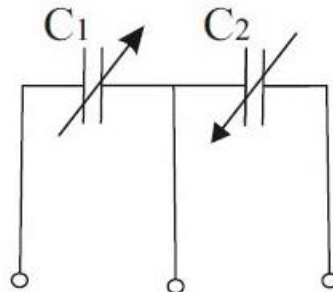


Рисунок 4 – Эквивалентная схема чувствительного элемента.

При действии кажущегося ускорения возникающий момент приводит к деформации упругого подвеса. При этом изменяются значения емкостей, образованных электродами на стекле и поверхностью кремния.

Уравнение движения подвижной части чувствительного элемента можно записать в виде:

$$\ddot{\alpha}(t) + \xi \cdot \dot{\alpha}(t) + \omega_0^2 \cdot \alpha(t) = \frac{m \cdot L \cdot a}{J}, \quad (1)$$

$$C_{1,2}(t) = \int_0^l \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot w}{h_0 \pm x \cdot \sin \alpha} \cdot dx \quad (2)$$

Здесь: $\alpha(t)$ — угол отклонения подвижной части чувствительного элемента от положения равновесия, ω_0 — резонансная частота подвижной части чувствительного элемента, a — проекция линейного (кажущегося) ускорения на измерительную ось микромеханического акселерометра, ε — коэффициент демпфирования среды заполнения, m — масса подвижной части ЧЭ, L — расстояние от оси упругого подвеса до центра масс подвижной части ЧЭ, J — момент инерции подвижной части ЧЭ вокруг оси подвеса, $\varepsilon = 1$ — диэлектрическая проницаемость среды заполнения чувствительного элемента, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - диэлектрическая проницаемость вакуума, h_0 - номинальный зазор (в положении равновесия), w — ширина электрода системы съема сигнала чувствительного элемента, l — длина электрода системы съема сигнала чувствительного элемента, $C_{1,2}(t)$ — емкость датчика системы съема сигнала чувствительного элемента.

Максимальное значение полосы пропускания микромеханического акселерометра достигается коэффициенте демпфирования ε равном 0,707. Коэффициент демпфирования регулируется путем изменения степени разрядки среды в чувствительном элементе.

Решение модели чувствительного элемента микромеханического акселерометра (1,2) для установившегося режима и случая малых значений угла $\alpha(t)$ запишем в виде:

$$\alpha(t) = \frac{m \cdot L \cdot a}{J \cdot \omega_0^2} \quad (3)$$

$$C_{1,2}(t) = \begin{cases} \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot w}{\alpha} \cdot (\ln(h_0) - \ln(h_0 - \alpha \cdot l)) \\ \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot w}{\alpha} \cdot (-\ln(h_0) + \ln(h_0 + \alpha \cdot l)) \end{cases} \quad (4)$$

С учетом малости угла $\alpha(t)$ решение (4) можно разложить в ряд:

$$C_1(t) \cong \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot w \cdot l}{h_0} + \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot w \cdot l^2}{2h_0^2} \cdot \alpha + \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot w \cdot l^3}{3h_0^3} \cdot \alpha^2 + \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot w \cdot l^4}{4h_0^4} \cdot \alpha^3$$

$$C_2(t) \cong \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot w \cdot l}{h_0} - \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot w \cdot l^2}{2h_0^2} \cdot \alpha + \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot w \cdot l^3}{3h_0^3} \cdot \alpha^2 - \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot w \cdot l^4}{4h_0^4} \cdot \alpha^3$$
(5)

В ММА 202МСУ1Л-1Ц и 203МСУ1Л-1Ц разность емкостей преобразуется в выходной сигнал при помощи преобразователя емкость-код, который построен с использованием сигма-дельта модулятора, схема модулятора изображена на рисунке 5.

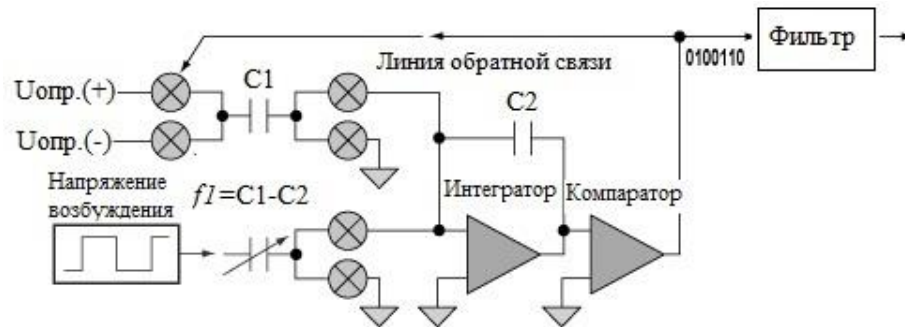


Рисунок 5 – Упрощенная схема сигма-дельта модулятора [1, 2]

Передаточная функция преобразователя емкость-код имеет вид:

$$D = C_1 - C_2. \quad (6)$$

Модель выходного сигнала микромеханического акселерометра с учетом (5,6) будет иметь вид:

$$D(t) = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot w \cdot l^2 \cdot m \cdot L}{\omega_0^2 \cdot h_0^2 \cdot J} \cdot \alpha + \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot w \cdot l^4 \cdot (m \cdot L)^3}{2 \cdot \omega_0^6 \cdot h_0^4 \cdot J^3} \cdot \alpha^3 \quad (7)$$

Выходной сигнал ММА нелинейно зависит от измеряемого ускорения. Коэффициент кубической нелинейности имеет вид:

$$\delta = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot w \cdot l^4 \cdot (m \cdot L)^3}{2 \cdot \omega_0^6 \cdot h_0^4 \cdot J^3}. \quad (8)$$

Для экспериментального исследования ММА модель выходного сигнала можно переписать в виде:

$$D = K \cdot (a + a_0) + \delta \quad (9)$$

При этом масштабный коэффициент (K) и смещение нуля (a_0) зависят от температуры окружающей среды T : $K = K(t)$, $a_0 = a_0(t)$.

Для определения параметров ММА был собран автоматизированный стенд и разработано программное обеспечение (ПО). Функциональная схема автоматизированного стенда приведена на рисунке 6.



Рисунок 6 – Структурная схема разработанного автоматизированного стенда

Поворотный стол с установленным испытуемым образцом расположен в камере тепла холода. Ось поворотного стола расположена горизонтально. Это позволяет определить характеристики ММА методом наклонов в поле силы тяжести Земли. Стенд позволяет определить основные параметры ММА: масштабный коэффициент, смещение нуля, нелинейность и отклонение измерительной оси. Кроме того, эти параметры могут быть определены в диапазоне рабочих температур.

Разработанное программное обеспечение позволяет визуализировать и обработать выходной сигнал (рисунок 7). В ПО реализовано управление поворотным столом и камерой тепла-холода для обеспечения автоматического процесса проведения испытаний.

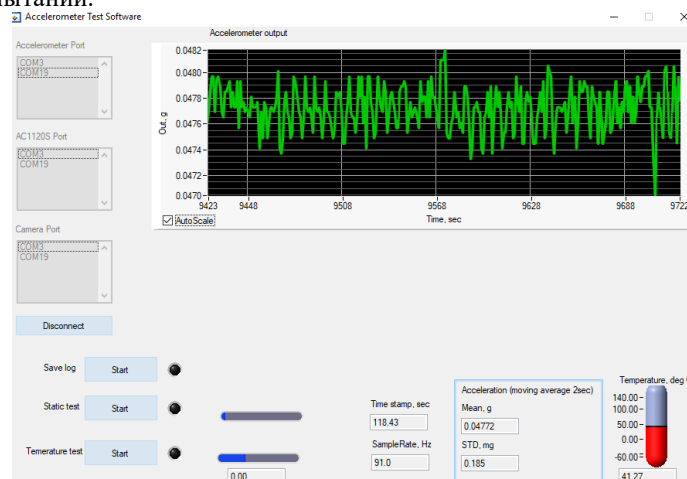


Рисунок 7 – Интерфейс программного обеспечения автоматизированного стенда.

Результаты проведенных исследований сведены в сравнительную таблицу 1 (данные для аналогов взяты из открытых источников).

Таблица 1 – Результаты испытаний опытных образцов микромеханических акселерометров серии 202МСУ1Л-1Ц и 203МСУ1Л-1Ц и сравнение с аналогами других производителей [3-8]

| Наименование параметра | 202МСУ1Л-1Ц ООО «ЛМП» (г. Зеленоград) | 203МСУ1Л-1Ц ООО «ЛМП» (г. Зеленоград) | АЛЕ 049М ЗАО «НИИФИ» (г. Пенза) | АТ1105-1 ОАО «АНПП»ТЕМ П-АВИА» (г. Арзамас) | MS90002 Safran Colibrys SA (Швейцария) | ADX103 (3 оси) Analog Devices (США) | ADIS16210 (3 оси) Analog Devices (США) |
|--------------------------------|---|---|---------------------------------------|--|---|---|--|
| Диапазон измеряемых ускорений, | ±1g | ±1g | ±1,1g (±11м/с ²) | ±1g | ±2g | ±1,7g | ±1,7g |
| Масштабный коэффициент | 1 g ⁻¹ | 0,5 g ⁻¹ | 2 В/г | 5В/г | 1В/г | 1В/г | - |
| Смещение нуля, | 60mg | 8mg | ±150mg | ±5mg | - | ±100mg | ±1mg |
| Нелинейность | 0,08% | 0,08% | ±0,2% | ±0,5% | <0,8% | ±0,2...1,25% | 0,1% |
| Потребление | 1 мА | 4 мА | 65мА | 20мА | <0,4мА | 1,1мА | 18мА |
| Напряжение питания | 3,3В или 5В | 3,3В | 27В | ±12В | 5В | 5В | 3,3В |
| СКО шума выходного | 0,2mg | 0,2mg | - | - | 0,18mg | 1mg | 1.3mg |

| Наименование параметра | 202МСУ1Л-1Ц ООО «ЛМП» (г. Зеленоград) | 203МСУ1Л-1Ц ООО «ЛМП» (г. Зеленоград) | АЛЕ 049М ЗАО «НИИФИ» (г. Пенза) | АТ1105-1 ОАО «АНПП»ТЕМ П-АВИА» (г. Арзамас) | MS90002 Safran Colibrys SA (Швейцария) | ADXL103 (3 оси) Analog Devices (США) | ADIS16210 (3 оси) Analog Devices (США) |
|---|---|---|---------------------------------------|--|---|--|--|
| сигнала | | | | | | | |
| Частота выдачи данных | 91Гц | 91Гц | - | - | - | - | - |
| Полоса частот | - | - | 0-16Гц | 200Гц | 0-100Гц | 500Гц | 50Гц |
| Погрешность масштабного коэффициента в диапазоне рабочих температур | 5% | 1,7% | ±5% | 0,5% (СКО, -50...+15°C) | 1,8% | ±0,3% | ±0,025% |
| Погрешность смещения нуля в диапазоне рабочих температур | ±150mg | ±10mg | ±197mg | ±10mg (-50...+15°C) | <18mg | ±16,5...±132 mg | - |
| Диапазон рабочих температур | -50...+85 °С | -50...+85 °С | ±65 °С | -55...+85 °С | -55...+125 °С | -40...+125 °С | -40...+85 °С (+125) |
| Габаритные размеры | 19,5×14,5×5 мм ³ | 25×21,5×10 мм ³ | 35×35×24 мм ³ | 29,5×28,5×16 мм ³ | 8,9×8,9×3,23 мм ³ | 4,5×4,5×1,8 мм ³ | 24×15×15 мм ³ |

Выводы:

Опытные образцы микромеханических акселерометров серии 202МСУ1Л-1Ц и 203МСУ1Л-1Ц по характеристикам сопоставимы с аналогами. Они могут успешно использоваться для построения инклинометров, систем ориентации, охранных комплексов.

Новизна результатов

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- 1) разработана конструкция ММА и его чувствительного элемента;
- 2) разработана математическая модель выходного сигнала ММА;
- 3) собран автоматизированный стенд и разработано программное обеспечение, позволяющие определять характеристики ММА в автоматическом режиме;
- 4) изготовлены опытные образцы ММА серий 202МСУ1Л-1Ц и 203МСУ1Л-1Ц;
- 5) проведены исследования опытных образцов ММА серий 202МСУ1Л-1Ц и 203МСУ1Л-1Ц, результаты сведены в сравнительную таблицу.

Список использованной литературы

- 1) Брихта М. Преобразование емкости в цифровой код на основе сигма-дельта модулятора // Компоненты и технологии. – 2006. URL: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/06_01/stat_cdc.htm (дата обращения: 06.08.2019).
Brikhta M. Preobrazovanie emkosti v tsifrovoi kod na osnove sigma-del'ta modulyatora // Komponenty i tekhnologii. 2006. URL: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/06_01/stat_cdc.htm (06.08.2019). (In Russian).
- 2) Шахнович И. Сигма-дельта АЦП // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2006. - №4. - с.18-22.
Shakhnovich I. Sigma-del'ta ATsP // Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes, 2006. №4. p. 18-22. (In Russian).
- 3) www.analog.com
- 4) <https://www.mp-lab.ru/products>
- 5) <https://all-pribors.ru/opisanie/62710-15-ale-049m-69201>
- 6) http://www.niifi.ru/production/development/new-datchiki-uskoreniy/ALE_049M.pdf
- 7) <https://all-pribors.ru/opisanie/69419-17-at1105-78879>
- 8) <https://www.colibrys.com/product/ms9000-mems-accelerometer/>