

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 531.768.082.14

Е. А. Мокров, канд. техн. наук,
А. А. Папко, канд. техн. наук,
ФГУП НИИ физических измерений (г. Пенза)

АКСЕЛЕРОМЕТРЫ НИИ ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ — ЭЛЕМЕНТЫ МИКРОСИСТЕМОТЕХНИКИ

Представлены результаты исследований, проведенных в процессе создания серийных образцов акселерометров на основе технологий объемной микромеханики. Рассмотрены варианты исключения влияния эффекта прилипания и контактных деформаций на работоспособность и метрологические характеристики акселерометра. Описаны энергетические соотношения, являющиеся основой для математического моделирования характеристик акселерометров в процессе разработки и эксплуатации, а также особенности решения проблемы метрологического обеспечения производства.

Введение

За более чем 40-летний период существования НИИ физических измерений (НИИФИ) его сотрудниками разработано несколько поколений акселерометров различных типов и назначения. Их общей характеристикой являются:

- аналоговый выход в виде напряжения постоянного тока, изменяющегося в пределах $(0-6)$ или (0 ± 3) В;
- широкая номенклатура амплитудных и частотных диапазонов измерений;
- сохранение метрологических характеристик при воздействии мощных вибрационных помех;
- высокая механическая устойчивость, обусловленная особенностью эксплуатации на изделиях РКТ;
- возможность обеспечения питания электронных устройств от напряжения постоянного тока (27_{-4}^{+7}) В.

Акселерометры, разработанные НИИФИ, относятся к средствам измерений с нормируемыми по ГОСТ 8.009 метрологическими характеристиками. В отличие от многих отечественных аналогов они имеют нормированные динамические характеристики. Терминология, используемая в разработках акселерометров НИИФИ, соответствует ГОСТ 18995 и РМГ 29-99, выпущенным взамен ГОСТ 16263.

Методология построения аппаратуры НИИФИ соответствует концепциям, разработанным кафедрой ИИТ СПбГТУ в начале 70-х годов [1, 2] и уточненным в многочисленных публикациях сотрудников предприятия [3—4]. В соответствии с ними датчики НИИФИ представляют собой измерительную цепь прямого или уравнивающего преобразования с чувствительным элементом на ее входе. Наиболее распространенным методом анализа при разработке акселерометров является исследование передаточной функции, составленной на основе математических моделей узлов измерительной цепи, адекватность которых подтверждается экспериментально в процессе разработки каждого датчика.

С середины 70-х годов на предприятии в разработку полупроводниковых датчиков давления и емкостных акселерометров внедрены технологии микроразработки. Необходимость дальнейшего совершенствования чувствительных элементов датчиков на основе кремния потребовала отработки и использования технологий объемной микромеханики. Эти технологии явились базой для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок микромеханических акселерометров, которые обоснованно относят к первой десятке "традиционных" изделий микросистемотехники.

Первая НИР по разработке микромеханических акселерометров была завершена в НИИФИ в 1988 г. От известных ранее эти микромеханические акселерометры отличались простотой конструкции чувствительного элемента, представляющего собой дифференциальный микроконденсатор, подвижная обкладка которого получена анизотропным травлением монокристаллического кремния, а неподвижные — напылением металла на стекле. Соединение пластин между собой осуществлялось методом электростатической сварки. Важным достоинством таких чувствительных элементов является возможность совмещения в дифференциальном конденсаторе функции датчика перемещения и обратного электростатического преобразователя. Впервые результаты НИР докладывались в 1989 г. на семинаре "Вибрационная техника" [5].

При проведении исследований было установлено, что по функциональным возможностям, предусматривающим измерение ускорений в пределах от единиц до десятков тысяч м/с^2 , целесообразно использование сочетания технологий объемной микромеханики с технологиями тонких пленок. В 1989 г. совместно с НИИ вакуумной техники была проведена НИР по разработке микромеханического акселерометра на основе ионно-имплантированных

пленок. К числу недостатков подобного устройства можно отнести сложные методы конструктивного совмещения пленки с опорными элементами и уменьшения напряженного состояния пленки. Последовавшие затем экономические трудности не позволили довести работу до конца, но идея создания подобного устройства успешно реализована позднее фирмой *Analog Devices* на технологиях поверхностной микромеханики.

Несмотря на использование, казалось бы, хорошо отработанных технологий и простоту конструкции путь к серийному выпуску микромеханических акселерометров оказался достаточно сложным не только в России, но и у таких известных фирм, как *Endevco*, *Motorola*, *Sagem*, *CSEM* и др. Необходимо было решить следующие проблемы:

- исключение эффекта прилипания;
- уменьшение остаточных напряжений в кремниевых деталях, возникающих в процессе их изготовления;
- уменьшение контактных деформаций, возникающих при сборке чувствительных элементов и установке его в корпус;
- метрологическое обеспечение их производства.

По имеющейся информации в настоящее время серийные образцы объемных микромеханических акселерометров выпускаются фирмами *Endevco* (MSA 100), *Motorola* (XMMAS), *НИИФИ* (АЛЕ 049, АЛЕ 050), *Темп-Авиа* (АТ 1105). Акселерометры MSA 100 и АЛЕ 050 представляют собой приборы уравнивающего преобразования. Параметрический ряд диапазонов измерений акселерометров АЛЕ 049 формируется из приборов уравнивающего и прямого преобразования. Акселерометры фирм *Motorola* и *Темп-Авиа* являются приборами прямого преобразования.

Авторы считают, что серийное производство микромеханических акселерометров в *НИИФИ* стало возможным благодаря наличию совокупности необходимых технологических процессов и оборудования, владению методологией их создания и последовательному решению проблем, возникающих по ходу разработки и изложение сути которых является целью настоящей статьи.

Исключение эффекта прилипания

Эффект прилипания является первым из ряда эффектов, приводящих к потере элементарного функционирования микромеханического акселерометра и исключающего не только возможность эксплуатации прибора, но и проведение его исследований. Эффект прилипания подвижной пластины дифференциального конденсатора к одной из неподвижных возникает при включении напряжения питания или после воздействия ускорения, превышающего диапазон измерений. Простое включение — выключение питающего напряжения и

уменьшение измеряемого ускорения не устраняют эффекта прилипания.

Исследование прочности адгезионной связи, полученной при прилипании, показало, что она значительно выше той, которая определяется гравитационными силами и силами Ван-дер-Ваальса. Подробное исследование соотношений указанных сил для микромеханических акселерометров представлено в работе [6].

До настоящего времени нет единого объяснения физики процесса адгезии, но, с точки зрения авторов статьи, предположение об электростатической природе этого явления позволило определить методы его исключения. Согласно этому предположению, на границе соединения двух поверхностей образуются контактные двойные электрические слои и возникают множественные микроконденсаторы с зазором, значение которого находится в пределах высоты микрошероховатости поверхностей до размеров молекул. Для разрыва полученной связи необходимо совершить работу, затрачиваемую на разделение пластин микроконденсаторов. Сила взаимодействия пластин микроконденсатора на единицу площади

$$F = 2\pi\sigma^2,$$

где σ — плотность заряда обкладки, оцениваемая величиной $\approx 10^4 \text{ г}^{1/2} \text{ см}^{1/2} \text{ с}^{-1}$ [6]. При площади прилипания пластин 3 мм^2 сила адгезии может достигать 200 Н. Для разрыва адгезионной связи необходимо создать между обкладками конденсатора электрическое поле с произведением приложенных к обкладкам потенциалов, равным 200 В, что невыполнимо в акселерометрах, где каждое из них не превышает 12 В. Исследованиями определено, что из известных способов уменьшения прилипания (ионизация зазора между обкладками, подбор материала изоляторов, увеличение жесткости подвеса, схемные решения, обеспечивающие стекание наведенных зарядов) более приемлемым и эффективным оказался метод, основанный на уменьшении площади прилипания. В чувствительных элементах акселерометров АЛЕ 049, АЛЕ 050 для уменьшения площади прилипания и силы адгезии предусмотрены микроребра. При этом адгезионная связь устраняется после снятия перегрузки или при включении питающего напряжения за счет действия электромеханической обратной связи акселерометра. Данное решение защищено патентом РФ в 1993 г. [7]. Результаты исследований по исключению прилипания докладывались авторами на первой международной конференции по микросистемотехнике, проведенной в Санкт-Петербурге в 1993 г. [8].

Уменьшение влияния контактных напряжений

В работе [6] показано, что нестабильность смещения нуля акселерометров является функцией

уровня контактных напряжений и степени их передачи на упругий подвес. Контактные напряжения возникают в местах крепления опорных элементов. Известно, что при условии упругих деформаций перемещение поверхности детали связано с площадью контакта S и давлением на контакт формулой Буссинеска:

$$y = \frac{1}{\pi} \frac{1-\nu^2}{E} \int_S \frac{PdS}{r} = k \int_S \frac{PdS}{r}, \quad (1)$$

где y — перемещение поверхности; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; P — давление на контакт; r — расстояние от точки приложения сосредоточенной силы до заданного сечения.

Напряжение в j -месте стыка упругих перемычек и опорных элементов σ_{dj} может быть определено из формулы (1) при условии упругих деформаций и учета того, что деформация $\varepsilon = y/y_0$, где y_0 — толщина опорного элемента, а напряжение $\pi = \varepsilon E$:

$$\sigma_{dj} = \frac{1-\nu^2}{y_0} \int_S \frac{PdS_j}{r}. \quad (2)$$

Из формулы (2) по отношению напряжений в заданных сечениях может быть найден коэффициент ослабления контактных напряжений, который определяется удаленностью места заделки упругого подвеса от силового контакта. Чувствительность конструкции к контактным напряжениям при условии равного давления на контакты можно определить из уравнения (2):

$$\frac{\sigma_{dj}}{P} = \frac{1-\nu^2}{y_0} \int_S \frac{dS_j}{r}. \quad (3)$$

Идеальным решением проблемы ослабления влияния контактных деформаций можно было бы считать прочное соединение деталей в образующих плоскость трех точках, площадь контактов в которых бесконечно мала. Даже в этом случае при уменьшении геометрических размеров сопрягаемых деталей возрастает влияние контактных напряжений на нестабильность метрологических характеристик.

На основании проведенного исследования разработана конструкция чувствительных элементов, в которой влияние контактных напряжений уменьшено за счет выполнения в кремниевом опорном элементе специальных выемок, уменьшающих не только площадь контакта, но и передачу напряжения на упругие перемычки. Решение защищено патентом РФ в 1993 г. [9]. Чувствительный элемент акселерометров АЛЕ 049, АЛЕ 050, разработанный с учетом проведенных исследований, показан на рис. 1. Результаты представленного анализа использованы также при разработке конструкции корпусов и элементов крепления к ним чувствительных элементов.

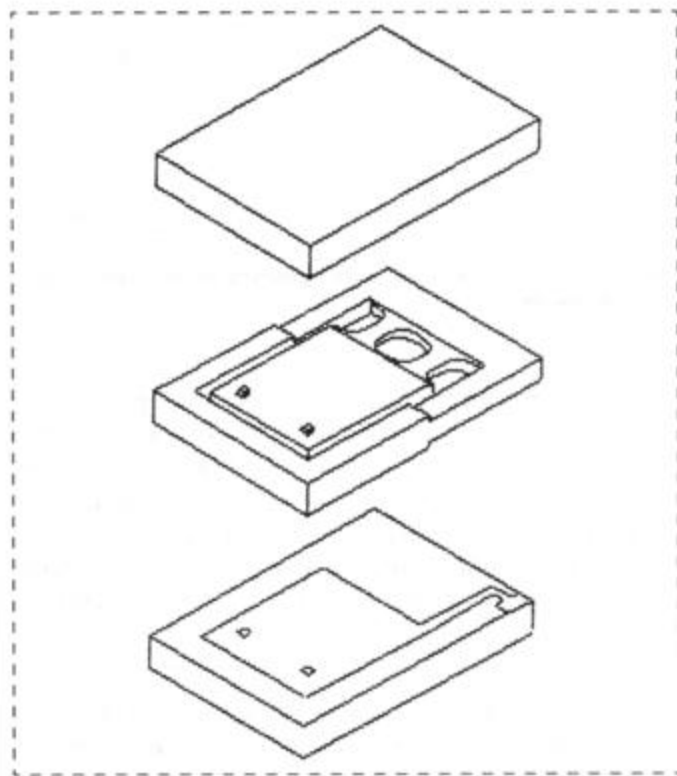


Рис. 1. Чувствительный элемент акселерометров АЛЕ 049, АЛЕ 050

Исследование энергетических соотношений

Взаимодействие механических и электрических параметров акселерометров происходит на основе энергетического обмена между его узлами. Качество процесса обмена энергией влияет на выполнение требований к метрологическим характеристикам, конструкции, а также на согласованную работу электромеханических узлов акселерометра. В этой связи исследование энергетических соотношений является одним из важнейших этапов разработки. Оно предусматривает разработку уравнения связи между измеряемыми и преобразуемыми механическими параметрами с выходными электрическими. Примером такого уравнения связи может служить передаточная функция акселерометров, предполагающая наличие структурной схемы с математическим описанием работы ее отдельных узлов (рис. 2).

Передаточная функция акселерометра $W(p)$, составленная согласно схеме рис. 2 в соответствии с правилами автоматического регулирования, определяется выражением

$$W(p) = \frac{U(p)}{a(p)} = \frac{m}{\beta K_{y\beta}} \frac{1}{\frac{p^2}{\omega_{0\text{эл}}^2} + 2D \frac{p}{\omega_{0\text{эл}}} + \frac{C_{\text{мех}}}{K_c K_{\text{упт}} \beta K_{y\beta}} + 1}, \quad (4)$$

где $U(p)$, $a(p)$ — изображения выходного и входного сигналов соответственно; p — оператор прямого

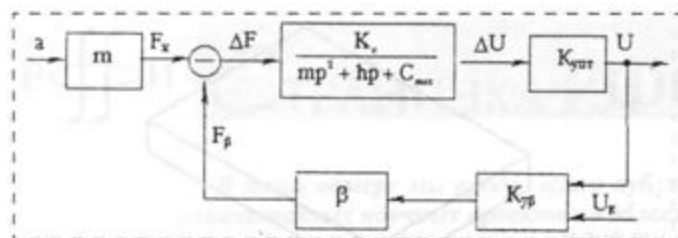


Рис. 2. Структурная схема акселерометра уравнивающего преобразования

преобразования Лапласа; m — масса инерционного элемента; $C_{мех}$ — механическая жесткость упругих кремниевых перемычек; K_c , $K_{упт}$, $K_{γβ}$, $β$ — коэффициенты преобразования датчика перемещения, усилителя постоянного тока, усилителя в цепи отрицательной обратной связи и электростатического обратного преобразователя соответственно;

$\omega_{0эл} = \sqrt{\frac{K_c K_{упт} \beta K_{γβ}}{m}}$ — собственная частота подвеса, обусловленная действием электростатической обратной связи; $D = h/(2m\omega_0)$ — относительный коэффициент газового демпфирования; $\omega_0 = \sqrt{\omega_{0эл}^2 + \omega_{0мех}^2}$ — полное значение собственной частоты; $\omega_{0мех} = \sqrt{C_{мех}/m}$; h — абсолютный коэффициент газового демпфирования.

После стандартных преобразований уравнения (4) получим уравнение, описывающее амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) акселерометра:

$$K(\omega) = \frac{m}{\beta K_{γβ}} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + \frac{\omega_{0мех}^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4D^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}}. \quad (5)$$

С учетом того, что модуляция начальных значений емкостей дифференциального конденсатора под действием измеряемого ускорения не превышает 1 %, уравнение (5) для $\omega = 0$ можно записать в виде

$$\begin{aligned} K(\omega = 0) &= K_0 = \frac{m}{\beta K_{γβ}} \frac{1}{1 + \frac{\omega_{0мех}^2}{\omega_{0эл}^2}} = \\ &= \frac{mx_0}{2\beta C_0 EK_{γβ}} \frac{1}{1 + \frac{\omega_{0мех}^2}{\omega_{0эл}^2}}. \end{aligned} \quad (6)$$

В этом случае предельное значение диапазона измерений, реализуемое микромеханическими ак-

селерометрами и определяемое из формулы (6) с учетом $a = U/K_0$, равно

$$\begin{aligned} a &= \frac{2C_0}{mx_0} UEK_{γβ} \frac{1}{1 + \frac{\omega_{0мех}^2}{\omega_{0эл}^2}} = \\ &= \frac{2\varepsilon}{\gamma(h - 2x_0)x_0} UEK_{γβ} \frac{K\beta + 1}{K\beta}, \end{aligned} \quad (7)$$

где C_0 , x_0 — начальные емкость и зазор между обкладками дифференциального конденсатора соответственно; E — опорные напряжения, подключаемые к неподвижным обкладкам; U — напряжение, пропорциональное измеряемому ускорению и подключаемое к подвижной обкладке через усилитель цепи отрицательной обратной связи акселерометра; ε — диэлектрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; γ , h — плотность и толщина исходной пластины кремния; $K\beta$ — глубина отрицательной обратной связи, равная произведению коэффициентов преобразования узлов цепи уравнивания.

Первый множитель формулы (7) отражает конструктивно-технологические возможности акселерометра, второй — схемные, зависящие от напряжения питания.

Для внедренных в НИИФИ технологий объемной микромеханики минимальные значения h и x_0 составляют 200 и 5 мкм соответственно. При этом для напряжения питания ± 5 В предельное значение диапазона измерений составит 30–90 м/с², а для ± 12 В — 100–200 м/с². Для оценки ожидаемых значений нелинейности функции преобразования значения C_0 и x_0 заменяются в формуле (7) на их текущие значения $C = C_0 \pm \Delta C$, $x = x_0 \pm \Delta x$. При этом максимальное значение нелинейности γ_n может быть определено согласно [6] по формуле

$$\gamma_n = \frac{U_{\max}^2}{x_0 EK_c K_{упт}}.$$

Измерительная цепь микромеханических акселерометров прямого преобразования, как правило, реализуется на дискретно-аналоговых схемах.

Их выбор обусловлен необходимостью совместности с чувствительным элементом по массогабаритным и метрологическим характеристикам. В данном случае измерительная цепь содержит усилитель заряда и дискретный интегратор с последовательным ПК-эквивалентом резистора. Емкостный дифференциальный преобразователь питается от источников постоянного опорного напряжения $\pm E$, подключаемых к его конденсаторам с частотой дискретизации $1/T_0$, что снимает проблемы создания высокочастотного стабильного генератора.

Усилитель и интегратор охвачены глубокой отрицательной обратной связью, обеспечивающей высо-

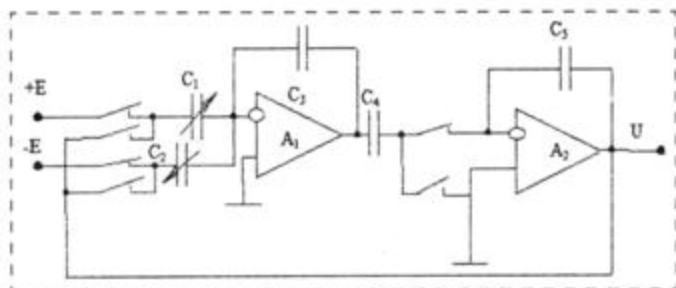


Рис. 3. Измерительная цепь акселерометра на ПК-схемах

кие метрологические характеристики схемы (рис. 3). Отличительной особенностью ПК-схем являются также их хорошие шумовые характеристики.

Коэффициент преобразования ПК-схемы, определяемый из условия равновесия зарядов, вычисляется по формуле

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{\gamma_x} = E_0 \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}, \quad (8)$$

где γ_x — относительное изменение емкостей C_1 , C_2 дифференциального микроконденсатора под действием измеряемого ускорения.

Уравнение (8) показывает, что ПК-схемой реализован алгоритм работы мостовой измерительной цепи с присущими ей высокими линейностью и стабильностью. Структурная схема акселерометра на ПК-схемах представлена на рис. 4.

Передаточная функция акселерометра на ПК-схемах описывается в z -форме методом анализа, основанном на законе сохранения зарядов. Исследование передаточной функции акселерометра $W(z)$ возможно только на основе эквивалентной передаточной функции $W(p)$. Для этого оператор z заменяется оператором p по методам билинейного преобразования, инвариантных характеристик, прямой или обратной разности. Оценка адекватности z и p -моделей показала, что наиболее приемлемой является аппроксимация по методу прямой разности, где $z \approx (1 + pT_0)$.

В соответствии со схемой рис. 4 эквивалентная передаточная функция акселерометра (в p -форме) описывается уравнением

$$W(p)_{\text{экв}} = \frac{U(p)}{a(p)} = \frac{m E_0 A}{x_0} \frac{1 + pT_0}{(mp^2 + hp + C_{\text{мех}})(A + pT_0)}, \quad (9)$$

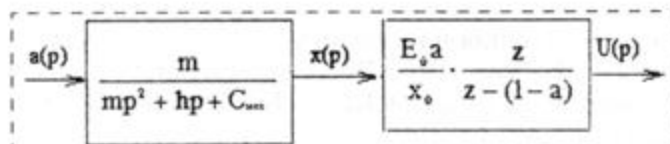


Рис. 4. Структурная схема акселерометра на ПК-схемах

$$\text{где } A = \frac{C_3}{C_1 + C_2} \frac{C_4}{C_5}.$$

Согласно формуле (9), диапазон измерений и коэффициент преобразования зависят от соотношения величин m , E_0 , x_0 , A , $C_{\text{мех}}$ и практически не ограничиваются "сверху", что позволяет строить на ПК-схемах акселерометры прямого преобразования с диапазонами измерений значительно больше $\pm 100 \text{ м/с}^2$ при значениях параметров $\omega_{0 \text{ мех}} = (6-20)10^3$, $T_0 = 0,0002 \text{ с}$ и $x_0 = (5-15)10^{-6} \text{ м}$. Динамические характеристики акселерометров определяются такими параметрами чувствительного элемента, как начальный емкостный зазор, масса инерционного элемента и жесткость подвеса.

Измерительные цепи акселерометров выполнены по гибридно-пленочной технологии и помещены вместе с чувствительным элементом (ЧЭ) в герметичный корпус. Электрически и конструктивно акселерометры совмещаются с сопрягаемыми устройствами посредством разъемов и резьбовых соединений.

Разрешающая способность

Микромеханические акселерометры значительно уступают прецизионным акселерометрам по шумовым характеристикам, которые косвенно могут характеризоваться предельно достижимым значением разрешающей способности как функции тепловых шумов. Согласно [6], это значение определяется по формуле

$$a_{\min} = 3,74 \cdot 10^{-10} \sqrt{\frac{C_{\text{мех}} K \beta}{m}} \left(\frac{1}{A_{f_{\max}}} \right),$$

где $A_{f_{\max}}$ — экстремум АЧХ акселерометра.

Вследствие миниатюризации механического подвеса микромеханических акселерометров значения собственных частот оказываются на два порядка выше, чем у прецизионных типа QA, MA, АЛЕ, масса инерционного элемента меньше на два-три порядка. Кроме этого возрастает влияние контактных напряжений на шумовые характеристики. Это приводит к ухудшению разрешающей способности, увеличению порога чувствительности и собственных шумов, а также к значительной погрешности оценки нелинейности функции преобразования и температурных характеристик микромеханического акселерометра. Влияние шумов особенно заметно у акселерометров с широкими частотными диапазонами измерений. По результатам, полученным в НИИФИ, и публикациям фирмы CSEM [10] определено, что из-за неудовлетворительного соотношения "сигнал-шум" акселерометры с частотным диапазоном измерений 0—256 Гц имеют нелинейность функции преобразования до 3 % на начальных участках шкалы, в то время как на участках свыше 1/3 шкалы она составляет 0,05 %.

Качество процесса измерений с применением микромеханических акселерометров может быть улучшено за счет дальнейшей обработки сигнала, например, с применением сигма-дельта-модуляции.

Метрологическое обеспечение производства и испытаний

Серийное производство линейных акселерометров в НИИФИ обеспечено необходимым градуировочным и испытательным оборудованием. В достаточном количестве имеются поворотные платформы на основе оптических делительных головок отечественного и зарубежного производства, ротационные установки (центрифуги) ТЕМП-2, ДЦ-1, электродинамические вибростенды, стандартизованные электронные средства измерений.

В сферу распространения метрологического обеспечения в НИИФИ входят не только задачи подтверждения метрологических характеристик готовых изделий, но и процессы производства, начиная с самых ранних стадий изготовления. При этом контроль параметров всех узлов акселерометров, кроме чувствительного элемента, не вызывает особых трудностей. Сложность оценки качества чувствительного элемента объясняется невозможностью контроля геометрических размеров деталей и сборок. Косвенная оценка параметров чувствительного элемента по значению электрических емкостей невозможна из-за существенного влияния паразитной электростатической силы, возникающей между обкладками конденсатора при измерении. Например, эта сила при $m = 3 \cdot 10^{-6}$ кг, $x_0 = 5$ мкм, $C_0 = 10$ пФ и амплитуде напряжения, прикладываемого к обкладкам конденсатора при измерении

его емкости $U = 10$ В, составляет $F_n = \frac{C_0 U^2}{4x_0} = 25 \cdot 10^{-6}$ Н. Инерционная сила, измеряемая акселерометром при воздействии ускорения 10 м/с², составляет $10m = 30 \cdot 10^{-6}$ Н. При таком измерении чувствительный элемент теряет работоспособность из-за поджатия подвижной обкладки к одной из неподвижных. Влияние паразитной силы F_n может быть уменьшено при одновременном измерении емкостей дифференциального конденсатора, но и в этом случае в схемах прямого преобразования эффект не устраняется при различии параметров плеч дифференциального конденсатора.

В связи с изложенным в НИИФИ для решения задачи метрологического обеспечения используется метод оценки качества чувствительного элемента по совокупности параметров $\frac{mx_0}{C_0}$ с использованием измерительной цепи уравнивающего

преобразования, в которой влияние паразитных сил уменьшено за счет действия отрицательной обратной связи (см. рис. 2). В этом случае выходное напряжение цепи с контролируемым чувствительным элементом в статическом режиме согласно уравнению (7) может быть записано в виде

$$U = \frac{a}{D} \frac{mx_0}{C_0} \frac{K\beta}{1 + K\beta}, \quad (10)$$

где D — параметр цепи, устанавливаемый при регулировке схемы и не зависящий от характеристик чувствительного элемента.

Искомые параметры чувствительного элемента могут быть определены из формулы (10) в виде

$$\frac{mx_0}{C_0} = D \frac{U}{a} \frac{K\beta + 1}{K\beta} = \frac{DK_0}{K_k}. \quad (11)$$

Процесс оценки параметров x_0 , C_0 , m с использованием формулы (11) можно считать достоверным при известном значении третьего множителя. Анализ структурной схемы (см. рис. 2) показывает, что его величина есть не что иное, как характеристика, обратная чувствительности акселерометра K_k к сигналу калибровки U_k , вводимому на вход усилителя отрицательной обратной связи от внешнего источника сигнала.

Результаты проведенных исследований используются при разработке устройства для контроля параметров чувствительного элемента акселерометров АЛЕ 049 и АЛЕ 050 на всех стадиях его производства, а также применяются при разработке методик выполнения измерений.

Степень подтверждения результатов исследований

Результаты исследований, проводимых в процессе создания микромеханических акселерометров, отражены в научно-технических отчетах, диссертационных работах авторов, 25 публикациях. Результаты работ докладывались на различных научно-технических конференциях, в том числе на двух международных, трех с международным участием, а также в Институте проблем механики РАН. Технические решения, используемые в акселерометрах, защищены пятью авторскими свидетельствами и патентами.

С 1997 г. предприятие серийно выпускает микромеханические акселерометры АЛЕ 049, АЛЕ 050, прошедшие предварительные испытания и натурные испытания на изделиях предприятий ГРЦ им. В. П. Макеева, РКК "Энергия", ГКНПЦ им. М. В. Хруничева, ГРКЦ "ЦСКБ — Прогресс", КБСМ и др.

Конструкторская документация акселерометров имеет литеру "01".

Данные для сравнения технических характеристик серийных образцов объемных микромеханических акселерометров

Параметр	Тип акселерометра				
	АЛЕ 049	АЛЕ 050	АТ 1105	MSA 100	XMMAS
Диапазон измерений, м/с ²	±5,6—±1400	±5,6—±100	±5—±1000	±500	±400—±5000
Частотный диапазон измерений, Гц	0—32, 0—64, 0—128, 0—256, 0—512, 0—1024	0—8, 0—16, 0—32, 0—64, 0—128	Полоса пропускания по уровню 3 дБ от 0—100 до 0—2000	0—500	Полоса пропускания по уровню 3 дБ от 0—400 до 0—700
Выходное напряжение, В	0—6	(0—6), (0 ± 3)	±5	±10	±1,6
Нелинейность функции преобразования, %	0,1	0,1	от 0,5 до 1,5	0,1	0,5
Коэффициенты влияния температуры на:					
смещение нуля, мВ/°C	3—1	3—1	1—2	0,1	3—4
чувствительность, %/°C	0,01	0,01	—	0,01	0,1
Напряжение питания, В	±(15 ± 0,5)	23—34	10,8—13,2	±(13—18)	±5
Ток потребления, мА	20	Меньше 10 от каждого источника	20	25	5
Температура окружающей среды, °C	От -60 до +85	От -60 до +85	От -50 до +60	±50	От -40 до +85
Габаритные размеры, мм	35 × 29 × 15,5	35 × 35 × 22	29,5 × 28,5 × 16	∅33,5 × 15	—

По результатам эксплуатации отмечается, что указанные микромеханические акселерометры превосходят известные прецизионные акселерометры с магнитоэлектрическим уравниванием по механической прочности, массогабаритным и энергетическим характеристикам, уступая им по разрешающей способности и температурной нестабильности нуля.

Технические характеристики

Технические характеристики акселерометров АЛЕ 049, АЛЕ 050 приведены в таблице.

Их сравнение с зарубежными аналогами показывает, что они уступают им по массогабаритным и энергетическим характеристикам из-за отсутствия отечественной бескорпусной микромощной элементной базы, а также из-за привычки отечественного потребителя к использованию механических и электрических подсоединений акселерометра посредством винтов и разъемов.

Радикально улучшить ситуацию сможет возможность реализации КМОП-исполнения измерительной цепи. Поскольку в России в ближайшие годы не ожидается реального скачка в сфере интеграции кремниевой микромеханики и технологии устройств обработки информации на кремнии (КМОП-схемы), использование гибридных интегральных микросборок остается актуальным, а

массогабаритные характеристики микромеханических устройств будут изменяться незначительно.

Список литературы

1. Электрические измерения неэлектрических величин / Под ред. П. В. Новицкого. Л.: Энергия, Ленинградское отд., 1975. 576 с.
2. Левшина Е. С. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отд. 1983. 320 с.
3. Тихонов А. И., Тихоненков В. А., Мокров Е. А. Упругие элементы датчиков механических величин: Учебно-методические пос. Ульяновск.: УГТУ, 1998. 120 с.
4. Алавердов В. В., Гориш А. В., Мокров Е. А., Папко А. А. Проектирование низкочастотных акселерометров с нормируемыми динамическими характеристиками: Учеб. пос. М.: Московская академия рынка труда и информационных технологий, 2001. 76 с.
5. Любезнов А. Н., Колганов В. Н., Папко А. А., Малкин Ю. М. Микромеханические акселерометры // Датчики на основе технологии микроэлектроники: Материалы конф. М., 1989. С. 96—99.
6. Папко А. А. Акселерометры уравнивающего преобразования с нормируемыми динамическими характеристиками Дисс. ... канд. техн. наук., Куйбышев, 1990. 210 с.
7. Патент РФ № 1811611, G01p 15/12. Электростатический акселерометр. 1993 г., Бюл. № 15 / В. Н. Колганов, А. А. Папко, Ю. М. Малкин и др.
8. Мокров Е. А., Колганов В. Н., Папко А. А. Микромеханические акселерометры. Тез. докл. междунар. конф. "Сенсор/Техно-93", "МСТ-93", "Акусто-Электро-93", Санкт-Петербург, 1993.
9. Патент РФ № 1811612, G01p 15/12. Электростатический акселерометр. 1993 г., Бюл. № 15 / А. А. Папко, В. Н. Колганов, Ю. М. Малкин и др.
10. Low Power Precision Microaccelerometer. T. Smith, Y. de Coulon, J. Rudolf. CSEM, Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique S. A.