

УДК 51-74:621, 681.5

Д. А. Кудрявцева, Б. В. Цыпин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ КРЕМНИЕВОГО РЕЗОНАНСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ

D. A. Kudryavtseva, B. V. Tsypin

THE STUDY OF TEMPERATURE INFLUENCE ON THE OUTPUT SIGNAL OF A SILICON RESONANT PRESSURE TRANSDUCER

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Объект исследования – конструкция кремниевого резонансного преобразователя давления. Предмет – температурная погрешность предложенной конструкции преобразователя. Цель работы – исследование влияние изменений температуры на выходной сигнал кремниевого резонансного преобразователя давления. *Материалы и методы.* Приведены и обоснованы преимущества использования резонансного метода преобразования измерительных сигналов датчиков механических величин для создания средств измерений, отличающихся повышенной помехоустойчивостью. Предложена конструкция резонансного преобразователя давления в виде монолитной рамки со струной из монокристаллического кремния, работающей в режиме заданной длины. Рассмотрены преимущество монокристаллического кремния как материала для изготовления колебательного элемента. Приведены механические характеристики сплавов, традиционно применяемых в приборостроении для изготовления чувствительных элементов средств измерений деформационного типа. Исследована модель температурной погрешности резонансного преобразователя давления, полученная методом дифференцирования функции преобразования. *Результаты.* Для исследования влияния температуры на функцию преобразования кремниевого резонансного преобразователя давления получена модель температурной погрешности и проведено математическое моделирование погрешности в диапазоне до 300 °С для вариантов использования технологий классического приборостроения и МЭМС-технологий, предполагающих в первом случае применение прецизионных сплавов, а во втором – монокристаллического кремния. *Выводы.* Результаты проведенных исследований показывают, что предложенная конструкция кремниевого резонансного преобразователя лишена недостатков, присущих традиционным вариантам с металлической струной, и обладает лучшей воспроизводимостью характеристик. Показано, что температурная погрешность предложенной кремниевой конструкции значительно меньше, чем у конструкции со струнами из прецизионных сплавов.

A b s t r a c t. *Background.* The object of research is the design of a silicon resonant pressure transducer. The research is temperature error of the proposed design of the Converter. The aim of this work is to study the effect of temperature on the output signal of a silicon resonant pressure transducer. *Materials and methods.* And given the advantages of using resonant method for conversion of measuring signals of sensors of mechanical quantities for the creation of measuring instruments, characterized by high noise immunity. The design of a resonant pressure transducer in the form of a monolithic frame with wire of single-crystal silicon, operating in the mode defined length. Considered the advantage of monocrystalline silicon as material for the manufacture of vibrating element. The mechanical characteristics of the alloys traditionally used in instrument making for production of sensitive elements of measuring deformation type. It analyses the structure of an expression to calculate the additional temperature error of the

resonant Converter pressure obtained by the differential conversion function. *Results.* To study the effect of temperature on the output signal of a silicon resonant pressure transducer the calculation of an additional temperature error, and mathematical modeling of temperature error in the range up to 300 °C for silicon and a number of common engineering alloys. *Conclusions.* Results of the researches spent in article, show that the offered design of the silicon resonant converter is deprived the lacks inherent in traditional variants with a metal string and possesses the best reproducibility of characteristics. The temperature error of the offered silicon design twice is less, than at a design with a string from metal alloys.

К л ю ч е в ы е с л о в а: резонансный преобразователь давления, дополнительная температурная погрешность, прецизионные сплавы, кремниевая струна.

К e y w o r d s: resonant pressure transducer, additional temperature error, precision alloy, silicon string.

Внедрение в отечественную промышленность новых прогрессивных технологий требуют повышения точности измерений и регулирования параметров технологических процессов [1].

Измерение механических величин осуществляется, как правило, преобразователями различных типов, которые преобразуют механические величины в электрический выходной сигнал. Существует множество принципов преобразования измеряемого параметра в электрический сигнал: емкостный, пьезоэлектрический, индуктивный, тензорезистивный, резонансный и др.

Активное использование цифровой вычислительной техники в информационно-измерительных системах и комплексах повысило интерес к преобразователям механических величин с частотным выходом, отличающихся простотой аналоговых датчиков, а также точностью и помехоустойчивостью цифровых датчиков [2]. В связи с этим использование резонансного метода преобразования давления в электрический сигнал до настоящего времени является актуальным. К другим преимуществам метода следует отнести высокую стабильность метрологических характеристик приборов на его основе, непосредственно зависящую от качества используемых материалов. К недостаткам следует отнести необходимость нормирования индивидуальной характеристики преобразования, значительное время отклика, невозможность проведения измерений в агрессивных средах без потери точности.

Резонансный преобразователь давления состоит из вибрационного частотного элемента, который может быть выполнен как в форме миниатюрных силочувствительных балочных резонаторов, так и представлять собой колебательную струну, монокристаллическую кремниевую нить, натяжение которой зависит от прогиба диафрагмы, переключенную, опирающуюся на диафрагму, вакуумную полость с кремниевой оболочкой. Наконец, сама мембрана может играть роль резонатора. Чаще всего в качестве чувствительного элемента (ЧЭ) в резонансном преобразователе давления используется диафрагма – мембрана с отверстием в центре, по диаметру которого расположена колебательная струна или балка, играющая роль резонатора (рис. 1).

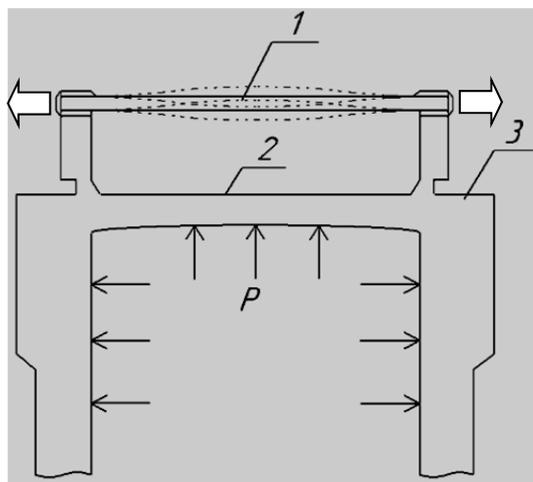


Рис. 1. Схема ЧЭ вибрационного микроэлектронного датчика давления:
1 – колебательный элемент (струна); 2 – упругая диафрагма (мембрана); 3 – корпус

Принцип работы резонансных преобразователей различных физических величин заключается в том, что с помощью первичного преобразователя измеряемая физическая величина преобразуется в приращение силы продольного натяжения струны ΔF , что приводит к изменению частоты колебаний в пределах $(f_0 \pm \Delta f)$. Механические колебания в струне возбуждаются, как правило, магнитоэлектрическим способом. Приращение частоты колебаний Δf описывается следующим выражением:

$$\Delta f = f_0 \left(\sqrt{1 \pm \frac{\Delta F}{F_0}} - 1 \right), \quad (1)$$

где F_0 – предварительное или начальное натяжение струны.

Для определения функции преобразования резонансного преобразователя давления необходима информация о силе натяжения струны резонатора, возникающей под воздействием давления, а также параметры, определяющие размеры струны и свойства материала. Сила натяжения пропорциональна напряжениям в точках крепления струны, которое, в соответствии с законом Гука, зависит от деформаций диафрагмы. Для определения силы натяжения струны необходимо знать механические напряжения на поверхности плоской диафрагмы, возникающие под воздействием давления, в точках крепления струны [3].

К параметрам, зависящим от размеров струны и свойств материала, предъявляются следующие требования:

- высокая прочность при воздействии вибраций и заданное значение температурного коэффициента линейного расширения (либо малое, либо равное температурному коэффициенту конструкционного материала преобразователя в зависимости от его устройства);
- температурная стабильность и температурная независимость упругих свойств, малость упругого последействия и внутренних потерь колебательной энергии;
- возможность получения максимальной чувствительности преобразователя при малых погрешностях [4]. В резонансных преобразователях применяют как ферромагнитные, так и неферромагнитные струны. Колебания первых возбуждаются, как правило, электромагнитным способом, вторых – магнитоэлектрическим. Таким образом, выбор материала струны определяет и выбор системы возбуждения.

Традиционные конструкции резонансных преобразователей давления используют в качестве резонатора стальную струну, закрепленную в опорах контактными методами, следствием такого закрепления является возникновение контактных деформаций, негативно влияющих на стабильность метрологических характеристик резонансного преобразователя давления. Кроме этого, несовершенство технологий изготовления металлических струн приводит к погрешностям формы струны в виде неоднородности сечения по ее длине и снижению добротности резонансного преобразователя давления. Указанные недостатки могут быть устранены при выполнении резонансного преобразователя давления из монокристаллического кремния с использованием МЭМС-технологий (рис. 2).

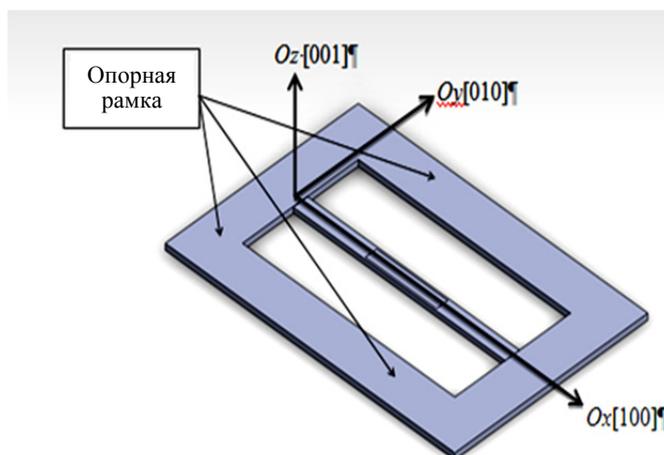


Рис. 2. Конструкция резонансного преобразователя давления

Как видно из рис. 2, резонансный преобразователь давления из кремния представляет собой монокристаллическую конструкцию, в которой опорные рамки и струны выполняются в едином технологическом процессе из одного куска кремния. Реализация представленной конструкции обладает значительными потенциальными возможностями по совершенствованию стабильности метрологических характеристик, уменьшению габаритных размеров и температурной погрешности.

Монокристаллический кремний, выбранный в качестве материала для изготовления резонансного преобразователя, обладает рядом достоинств по сравнению с традиционно применяемыми сплавами:

- минимальное число структурных дефектов по сравнению с аморфным или поликристаллическим веществами; монокристаллическая структура позволяет существенно снизить или вообще исключить влияние таких механических свойств поликристаллических материалов на метрологические характеристики измерительных преобразователей;

- снижение влияния на метрологические характеристики упругого и неупругого механического последствие, ползучести вследствие уменьшения числа структурных дефектов;

- возможность использования анизотропии свойств (механических, электрических и т.д.) для повышения симметрии колебательных движений; анизотропия (кристаллическая симметрия) механических свойств материала при совпадении с симметрией колебательной системы (струны) обеспечивает более высокую стабильность колебательной формы и, следовательно, уменьшает влияние паразитных форм колебаний струны на измерительный сигнал [5, 6];

- возможность применения стандартных технологических методов микроэлектроники для изготовления конструкции преобразователя групповым методом при значительном уменьшении массы и габаритов.

При этом следует иметь в виду, что при использовании анизотропного травления кремния геометрическая форма струны и мест ее сопряжения с опорной рамкой будут отличаться от прямоугольной. В них вместо вертикальных стенок будут сформированы ребра с углами наклона $55,7^\circ$, которые могут быть концентраторами напряжений, негативно влияющих на метрологические характеристики. В этой связи в дальнейшем необходимо исследовать возможности изотропного травления.

Для подтверждения эффективности реализации предложенного профиля из кремния проведен сравнительный анализ влияния наиболее значительного эксплуатационного фактора – изменений температуры окружающей среды, на параметры функции преобразования [7–9].

Для сравнения выбраны сплавы 36НХТЮ, 37НВКТЮ, 70НХБМЮ, 29Н26КХТБЮ, 36НКВХБТЮ (ВУС-22), используемые для изготовления струн, и предложенная монокристаллическая конструкция с кремниевой струной. Учитывая то, что наиболее значимый и трудно компенсируемой составляющей датчиков является нестабильность смещения нуля, целесообразно провести анализ при равенстве измеряемой величины нулю.

Резонансные измерительные преобразователи традиционно могут функционировать в двух режимах.

1. Преобразователь, работающий в режиме заданной силы

В этом режиме функция преобразования, связывающая между собой выходной сигнал – частоту f_0 и входной – измеряемую силу F_0 , может быть представлена в виде

$$f_0 = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{F_0}{m_c l_0}}, \quad (2)$$

где n – номер гармоники, на которой возбуждается струна; m_c – масса струны; l_0 – длина струны; F_0 – сила натяжения струны.

При F_0 и m_c , являющихся постоянными величинами, производная от уравнения (2) будет равна

$$\frac{df_0}{dl} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{F_0}{m}} \frac{1}{\sqrt{l_0}} = -\frac{n}{4} \sqrt{\frac{F_0}{n}} \frac{1}{l_0 \sqrt{l}}.$$

Полученное значение производной, приведенное к значению начальной частоты f_0 , будет равно

$$\frac{df_0}{dl} \frac{1}{f_0} = \frac{1}{l},$$

отсюда

$$\frac{df_0}{f_0} = -\frac{dl}{2l_0},$$

а для конечных приращений можно записать

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta l}{l_0}.$$

С учетом этого температурная нестабильность частоты колебаний струны в режиме заданной силы составит

$$\gamma_{ff} = \left(\frac{\Delta f}{f} \right)_t = \frac{\alpha \Delta t}{2}.$$

Более точное выражение, учитывающее температурное изменение модуля упругости материала струны, имеет вид [6]:

$$\left(\frac{\Delta f}{f} \right)_1 = \frac{\alpha \Delta t}{2} + \frac{\alpha_E \Delta t}{2} \frac{\sigma}{E}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости; α_E – температурный коэффициент модуля упругости материала струны.

2. Преобразователь, работающий в режиме заданной длины

Оба конца струны жестко заделаны в корпусе, и изменение температуры приводит к изменению начальной упругой деформации струны. На основании закона Гука частота собственных поперечных колебаний струны может быть выражена через ее начальную упругую деформацию и значение модуля упругости материала струны E_0 и плотности материала ρ , т.е.

$$f_0 = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E_0 \delta_0}{l_0 \rho}} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{E_0 S_0 \delta_0}{l_0^2 m_c}}. \quad (4)$$

Если найти полный дифференциал частоты и перейти к конечным приращениям, можно получить связь между относительным изменением частоты и относительными приращениями параметров, ее определяющими

$$\left(\frac{\Delta f}{f} \right) = \frac{\Delta \delta_0}{2\delta_0} + \frac{\Delta E}{2E_0} + \frac{\Delta S}{2S_0} + \frac{\Delta l}{l}. \quad (5)$$

Определяя приращения параметров, обусловленные изменением температуры на величину Δt и полагая массу струны постоянной в силу жесткости заделок, получим

$$\left(\frac{\Delta f}{f} \right) = \frac{(\alpha_k - \alpha) \Delta t E_0}{2\delta_0} + \frac{\alpha_E \Delta t}{2} + \alpha \Delta t + \alpha_k \Delta t, \quad (6)$$

где δ_0 – механическое напряжение в струне; α_E – температурный коэффициент модуля упругости материала струны [6].

Конструкция преобразователя давления на основе монокристаллического кремния формируется в едином технологическом цикле с жесткой заделкой струны в опорной рамке с двух сторон, что обеспечивает реализацию режима заданной длины.

Для расчета температурной погрешности преобразователей давления по формулам (3) и (6) использованы данные, приведенные в табл. 1. В ней учтено также, что коэффициент мо-

дуля упругости кремния, зависящий от кристаллографического направления, приведен для ориентации 100.

Таблица 1

Параметр / материал	Сталь 36НХТЮ	Кремний		37НВКТЮ	70НХБМЮ	29Н26КХТБЮ	36НКВХБТЮ (ВУС-22)
		<i>n</i> -типа	<i>p</i> -типа				
Температурный коэффициент линейного расширения, α , °C ⁻¹	13,3 · 10 ⁻⁶	63,6 · 10 ⁻⁶	64,73 · 10 ⁻⁶	8,3 · 10 ⁻⁶	11,4 · 10 ⁻⁶	8,5 · 10 ⁻⁶	8,6 · 10 ⁻⁶
Модуль упругости, E , Па	1,8 · 10 ¹¹	1,9 · 10 ¹¹	1,9 · 10 ¹¹	158 · 10 ⁹	215 · 10 ⁹	160 · 10 ⁹	190 · 10 ⁹
Температурный коэффициент модуля упругости материала струны, α_E , °C ⁻¹	-0,30 · 10 ⁻⁶	60,5 · 10 ⁻⁶	61,19 · 10 ⁻⁶	80 · 10 ⁻⁶	260 · 10 ⁻⁶	30 · 10 ⁻⁶	5 · 10 ⁻⁶
Температурный коэффициент линейного расширения корпуса преобразователя, α_K , °C ⁻¹	13,3 · 10 ⁻⁶	63,6 · 10 ⁻⁶	64,73 · 10 ⁻⁶	8,3 · 10 ⁻⁶	11,4 · 10 ⁻⁶	8,5 · 10 ⁻⁶	8,6 · 10 ⁻⁶
Температурный диапазон, °C	0–300						
Температурная погрешность, %/°C	0,79	0,31	4,53	1,69	0,96	0,59	

Для сравнения на рис. 3 представлены результаты расчета температурной погрешности в зависимости от материала, используемого при их изготовлении (36НХТЮ, 37НВКТЮ, 70НХБМЮ, 29Н26КХТБЮ, 36НКВХБТЮ). Из рис. 3 видно, что использование монолитной кремниевой конструкции резонатора обеспечивает возможность уменьшения температурной погрешности не менее чем вдвое по сравнению с использованием сплава ВУС 22 и не менее чем на порядок по сравнению с 37НВКТЮ.

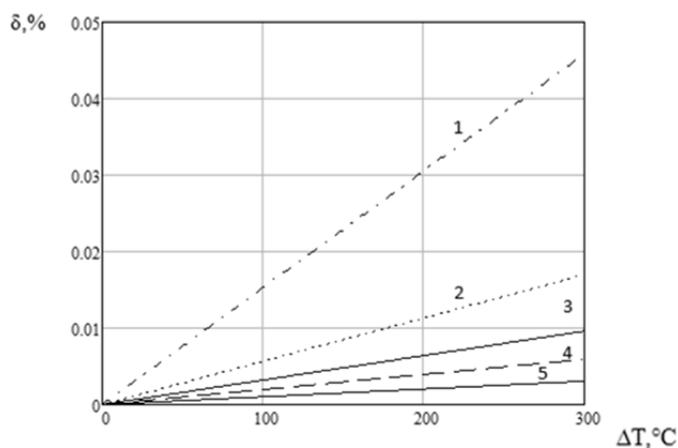


Рис. 3. График дополнительной температурной погрешности для прецизионных сплавов: 1 – 37НВКТЮ; 2 – 70НХБМЮ; 3 – 29Н26КХТБЮ; 4 – 36НКВХБТЮ (ВУС-22); 5 – Si

Таким образом, использование МЭМС-технологий для изготовления резонансного преобразователя давления из единого куска кремния в виде монолитной конструкции позволяет существенно снизить температурную погрешность по сравнению с традиционно применяемыми конструкциями, содержащими струны из прецизионных сплавов. Наряду с этим сформулированы задачи дальнейшего исследования влияния формы закрепления концов кремниевой струны на характеристики резонансного преобразователя.

Список литературы

1. Карцев, Е. А. Датчики неэлектрических величин на основе унифицированного микро-механического резонатора / Е. А. Карцев // Приборы и системы управления. – 1966. – № 4.
2. Частотные датчики систем автоконтроля и управления: Библиотека по автоматике / Н. Т. Милохин. – Вып. 310. – М. : Книга по требованию, 2013. – 131 с.
3. Шиккульский, М. И. Математическое моделирование микроэлектронных частотных датчиков давления / М. И. Шиккульский // Исследовано в России. – 2005. – № 8. – С. 1810–1814.
4. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчего. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.
5. Лабутин, С. А. Анализ сигналов и зависимостей : учеб. пособие / С. А. Лабутин, М. В. Пугин. – Н. Новгород : Изд-во НГТУ, 2001. – 158 с.
6. Новицкий, П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками. / П. В. Новицкий, В. Г. Кнорринг, В. С. Гутников. – Л. : Энергия, 1970. – 424 с.
7. Кучумов, Е. В. Струнный автогенераторный измерительный преобразователь на основе пьезоструктуры / Е. В. Кучумов, И. Н. Баринов, В. С. Волков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2 (8). – С. 58–65.
8. Клементьев, А. В. Вторичный прибор для струнных датчиков. / А. В. Клементьев, А. Ю. Петров, В. Н. Дурчева, И. И. Загрядский // Датчики и системы. – 2004. – № 6.
9. Седалищев, В. Н. Физические основы использования в измерительных устройствах колебательных и волновых процессов : учеб. пособие. / В. Н. Седалищев. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2008. – 175 с.

Кудрявцева Дарья Александровна

аспирант,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: dashuliy2308@yandex.ru

Kudryavtseva Dar'ya Aleksandrovna

postgraduate student,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Цыпин Борис Вульфович

доктор технических наук, профессор,
кафедра ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: cypin@yandex.ru

Tsypin Boris Vul'fovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of rocket-space
and aviation instrument,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 51-74:621, 681.5

Кудрявцева, Д. А.

Исследование влияния температуры на выходной сигнал кремниевого резонансного преобразователя давления / Д. А. Кудрявцева, Б. В. Цыпин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 3 (17). – С. 40–46.