

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРЕ «КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ»

С.С. Гаврюшин, П.А. Скворцов

Работа посвящена исследованию нелинейности выходного сигнала датчика давления на структуре «кремний на сапфире» (КНС). Построена математическая модель тензопреобразователя и проведено численное моделирование с использованием программного комплекса ANSYS 12.1. Для сравнительного анализа задача решалась как в физически нелинейной постановке, так и с учетом геометрической и физической нелинейностей. Для учета упругопластических свойств серебряного припоя использовалась диаграмма Прандтля. В результате были определены максимальные напряжения и деформации в кристалле сапфира, припое, титановой мембране, при которых конструкция успешно работает, а также произведена оценка нелинейности выходного сигнала в зависимости от величины прикладываемого давления. Согласно расчетам нелинейность выходного сигнала составляет 11,3 %. Проведенный анализ показал, что полученное значение является неприемлемым для данного типа датчиков, так как такая нелинейность негативно сказывается на точности изделия и его стоимости.

Ключевые слова: двухмембранный тензопреобразователь, упругий элемент, тензорезисторы, структура кремний на сапфире (КНС), расчет, проектирование.

NUMERICAL MODELING OF PRESSURE SENSOR BASED ON «SILICON ON SAPPHIRE» STRUCTURE

S.S. Gavriushin, P.A. Skvortsov

The paper is devoted to the study of the nonlinearity of the output signal of the pressure sensor on the silicon on sapphire structure (SOS). The authors constructed a mathematical model of the strain-gauge and carried out numerical simulation by using the ANSYS 12.1 software. For comparative analysis, the problem was solved both in a geometrically nonlinear and in a geometrically linear formulation. To account for the elastic-plastic properties of the silver solder, the Prandtl diagram was used. As a result, the maximum stresses and deformations in the sapphire crystal, solder, and titanium membrane under which the design successfully works were determined, and also the nonlinearity of the output signal was estimated in depending of the applied pressure. According to calculations, the nonlinearity of the output signal is 11,3 %. The received value is unacceptable for this type of sensor, and requires further tuning, which negatively affects the accuracy of the product and its cost.

Keywords: bi-membrane strain gauge, elastic element, strain gauges, silicon on sapphire structure (SOS), calculation, design.

Введение

Вопрос измерения давления представляет собой сложную и наукоемкую задачу, решением которой занимаются инженеры и ученые уже не один десяток лет. На сегодняшний день отдельную группу устройств, предназначенных для этих целей, представляют полупроводниковые тензодатчики, выполненные на структуре «кремний на сапфире» (КНС) [1–4].

Основными их преимуществами являются: высокая чувствительность; быстроедействие, отсутствие токов утечки; работоспособность в широком диапазоне температур (–55 ... 200 °C); высокая точность; стабильность; химическая и радиационная стойкость.

Описанные выше достоинства делают возможным применение таких датчиков в ответственных направлениях: военная, космическая,

химическая, энергетическая, добывающая отрасли промышленности, атомная энергетика. Чаще всего полупроводниковые тензодатчики используются для измерения давления масел и их паров, топлива, воздуха, а также различных агрессивных жидкостей и газов. Следует подчеркнуть, что структура КНС является объектом исследований уже более 30 лет, а производство тензодатчиков на ее основе активно развивается, о чем свидетельствуют многочисленные отечественные и зарубежные патенты [5–7].

Однако на сегодняшний день в этой области существует ряд нерешенных задач, среди которых следует выделить: построение уточненной математической модели [8, 9], описывающей процесс деформирования упругого элемента тензодатчика; усовершенствование технологического процесса производства датчиков и структуры КНС [10]; оптимизация топологии чувствительного элемента и самой конструкции датчика; минимизация нелинейности и явления гистерезиса [11–13].

Основным недостатком рассматриваемых датчиков является трудоемкий процесс настройки, который необходимо осуществлять для каждого датчика индивидуально, что является прямым следствием следующих факторов: наличие погрешностей при токарной обработке корпуса; возникающие при сварке штуцера и пайки кристалла термические деформации, обуславливающие появление остаточных напряжений; технологические погрешности при шлифовке поверхности и т.д.

Существующая на предприятиях практика расчета и проектирования подобного рода датчиков осуществляется либо по упрощенным соотношениям, изложенным в работах [14, 15], либо на основе опыта инженеров-конструкторов. Подобный подход к процессу проектирования приводит к появлению дополнительных расчетных погрешностей, что сказывается на точности и надежности приборов. В рамках традиционного подхода затруднительно, а зачастую и просто невозможно оперативно отреагировать на конкретные запросы рынка по созданию новых типов приборов и модернизации имеющихся.

Целью данной работы является оценка напряжений и деформаций, возникающих в конструкции двухмембранного тензопреобразователя на структуре КНС, а также нелинейности его выходного сигнала с использованием конечно-элементного программного комплекса *ANSYS 12.1*.

Конструкция тензодатчика на структуре КНС

На сегодняшний день ведущими российскими производителями тензодатчиков на структуре КНС (рис. 1) являются ПГ «МИДА» (г. Ульяновск), ЭПО «Сигнал» (г. Энгельс), НПК «ВИП» (г. Екатеринбург), ООО «Метроник» (г. Москва). Несмотря на различия в технологическом процессе производства, внешнем виде и некоторых технических характеристиках тензодатчиков, принцип работы подобных приборов является общим для большинства из них, независимо от производителя.

В тензодатчиках на структуре КНС давление преобразуется в деформацию упругой мембраны (рис. 2), что в свою очередь влияет на изменение выходного сигнала. Для того чтобы обеспечить близкую к линейной зависимость прогиба мембраны от давления, центр мембраны «омертвляют», изготавливая его более массивным по сравнению с рабочей поверхностью мембраны (рис. 3).

Деформация активной поверхности мембраны преобразуется в электрический сигнал с помощью тензорезисторов, соединенных



Рис. 1. Тензодатчик на структуре КНС

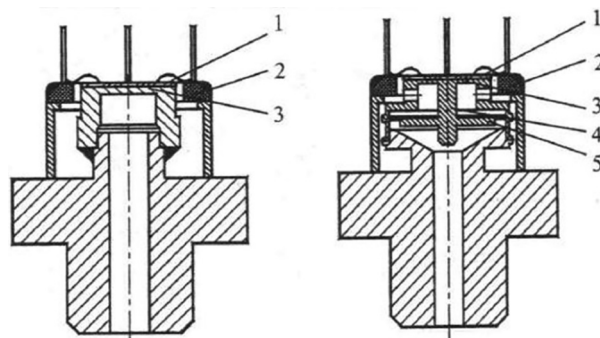


Рис. 2. Одномембранный (а) и двухмембранный (б) тензопреобразователи давления, разработанные ПГ «МИДА»:

- 1 – сапфировый чувствительный элемент с кремниевой тензочувствительной схемой;
- 2 – коллектор; 3 – упругая титановая мембрана;
- 4 – соединительный шток; 5 – приемная мембрана

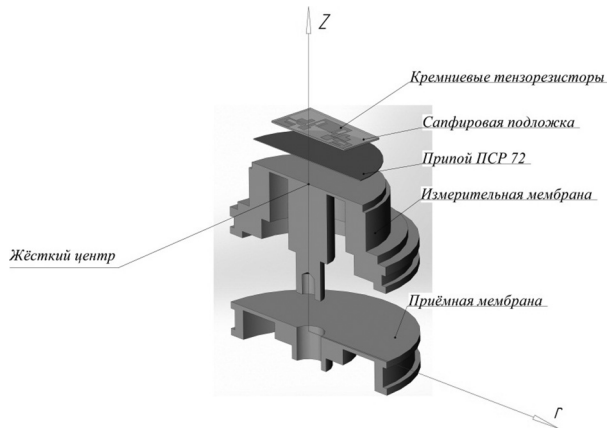


Рис. 3. Двухмембранный тензопреобразователь давления, разработанный ЭПО «Сигнал».
Толщина слоя кремния 1 мкм, сапфировой подложки 130 мкм, припоя 50 мкм

в мостовую схему. Изменение электрического сопротивления тензорезисторов приводит к разбалансу моста, что в свою очередь изменяет электрический выходной сигнал пропорционально давлению. Двухмембранная конструкция позволяет расширить диапазон измерения в сторону низких давлений, а также создавать тензопреобразователи с открытой мембраной для измерения давления в различных агрессивных средах [13]. На рисунке 4 представлен чувствительный элемент тензопреобразователя на структуре КНС, разработанный ЭПО «Сигнал» [1].

Расчет двухмембранного тензопреобразователя

При создании тензопреобразователей на структуре КНС для обеспечения наилучших метрологических характеристик необходимо выбрать рациональную позицию на поверхности чувствительного элемента для размещения тензорезисторов. Для достижения максимума чувствительности тензорезисторы в смежных плечах моста должны располагаться в обла-

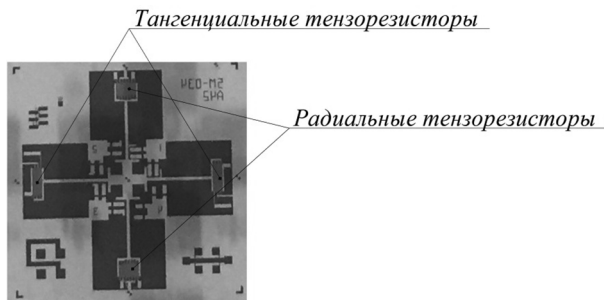


Рис. 4. Чувствительный элемент, представляющий собой сапфировую подложку, на которой размещены тензорезисторы, соединенные в мостовую схему

стях максимальной деформации и иметь разные знаки изменения сопротивления при приложении давления [16]. Кроме того, при выборе места расположения тензорезисторов актуальной остается задача минимизации нелинейности упругой характеристики прибора. В большинстве случаев при выборе позиции для размещения тензорезисторов исходят из классической модели распределения деформаций в плоской мембране, жестко зажатой по контуру. Такая модель достаточно хорошо описывает свойства кремниевых мембранных тензопреобразователей давления, полученных анизотропным травлением. Вместе с тем в работах [13, 17] показано, что реальное распределение деформации на поверхности упругого элемента тензопреобразователя на КНС отличается от теоретического распределения, полученного традиционным расчетным методом. Аналитическая оценка распределения деформаций, возникающих на поверхности трехслойной (титан–припой–сапфир) мембраны сложной формы полупроводникового чувствительного элемента, весьма затруднительна.

По этой причине для исследования напряженно-деформированного состояния тензопреобразователя численное моделирование проводилось с использованием конечно-элементного программного комплекса *ANSYS 12.1*. С помощью программного комплекса удастся обеспечить высокую степень дискретизации расчетной области, реалистично задать граничные условия, а также использовать при расчетах реальные физико-механические свойства материалов.

Для проведения прочностного расчета на основе конструкторской документации была построена модель конструкции, заданы свойства материалов (табл. 1). На рисунке 5 изображена расчетная схема объекта в двумерной системе координат (r, z). Направление осей r и z показано на рис. 3.

На практике соединение сапфира с металлом осуществляется посредством пайки, которая обеспечивает надежное соединение полупроводникового чувствительного элемента с материалом мембраны. В настоящее время для пайки обычно используется припой Пср72. Механические свойства слоя припоя практически не изучены, поэтому при расчетах сделано допущение, что свойства припоя эквивалентны свойствам чистого серебра. В работе [18] для серебра приведены такие данные: $E = 72\text{--}83$ ГПа; $\mu = 0,37$; $\sigma_{02} = 20\text{--}30$ МПа; $\sigma_b = 140\text{--}180$ МПа.

Таблица 1

Свойства материалов, входящих в конструкцию тензопреобразователя

Материал	Модуль упругости, E , ГПа	Коэффициент Пуассона, μ	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности, σ_b , МПа
Титан (BT9)	118	0,34	980	1150
Серебро (Ag)	80	0,37	30	160
Сапфир (Al_2O_3)	382	0,27	—	895

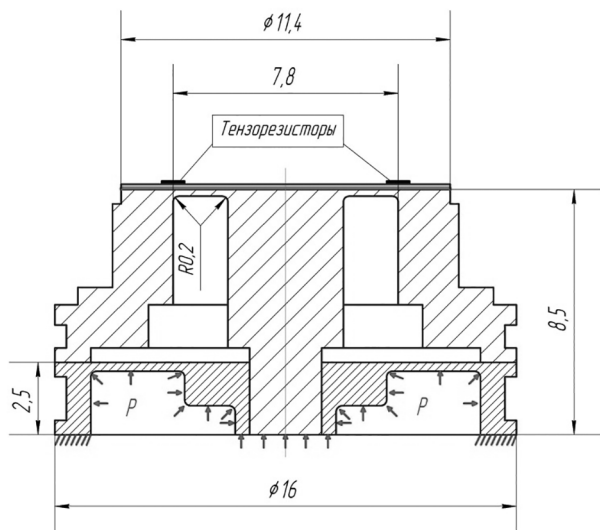


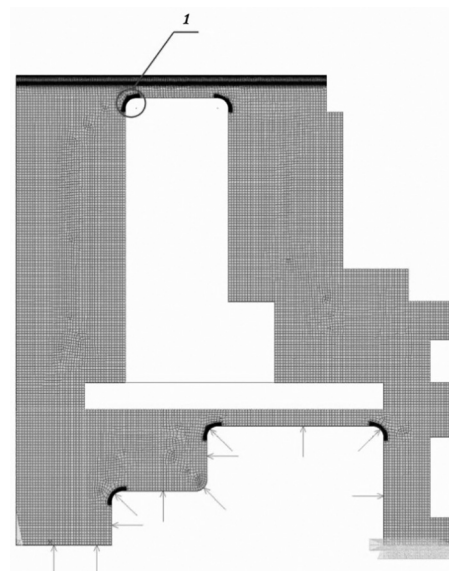
Рис. 5. Расчетная схема двухмембранного тензопреобразователя на структуре КНС

Для расчетного анализа примем $E = 80$ ГПа и $\mu = 0,37$. Свойства сапфира были взяты из работ [19, 20].

Применяемая конечно-элементная дискретизация конструкции с помощью восьмиугольного осесимметричного элемента *Plane 183* представлена на рис. 6, а. Для решения данной задачи использовалась опция осесимметричной двухмерной задачи. Слой кремния, в силу малой толщины (1 мкм), в расчете не учитывался.

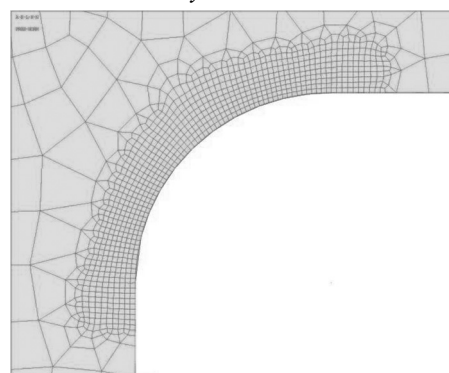
В процессе дискретизации было применено локальное сгущение сетки вблизи концентраторов напряжений (см. рис. 6, б). Качество разбиения оценивалось известным эмпирическим правилом двукратного сгущения сетки. Решение проводилось как в физически нелинейной постановке, так и с учетом физической и геометрической нелинейностей. Предварительный расчет показал, что в слое припоя могут возникнуть пластические деформации. В связи с этим для слоя припоя применялась модель идеального упругопластического тела.

При расчете конечно-элементной модели, использованной в этой работе, определялась



а

1 увеличено



б

Рис. 6. Конечно-элементное моделирование тензопреобразователя:

а – конечно-элементная модель; б – локальное сгущение сетки вблизи концентраторов напряжений

радиальная деформация ϵ_r и тангенциальная деформация ϵ_t на поверхности сапфира. Сравнение результатов расчета для радиальных и окружных деформаций в центре базы тензорезистора при расчете в физически нелинейной постановке и с учетом двойной нелинейности приведено в табл. 2. Ввиду малой разницы

Таблица 2

**Сравнение радиальной ε_r и тангенциальной ε_t деформаций
при расчете в нелинейной постановке**

P , МПа	Расчет в физически и геометрически нелинейной постановке		Расчет в физически нелинейной постановке	
	ε_r	ε_t	ε_r	ε_t
0	0	0	0	0
0,5	-0,00014861	0,00003225	-0,00014872	0,00003234
1,0	-0,00029702	0,00006432	-0,00029744	0,00006469
1,5	-0,00044745	0,00009436	-0,00044895	0,00009555
2,0	-0,00071378	0,00012377	-0,00071790	0,00012750
2,5	-0,00096119	0,00015274	-0,00096932	0,00016065
3,0	-0,00120030	0,00017982	-0,00121400	0,00019353

между полученными данными, авторы считают учет геометрической нелинейности не оправданным. Основным фактором, влияющим на нелинейность выходного сигнала, является пластическая деформация слоя припоя.

На заключительном этапе была осуществлена постпроцессорная обработка результатов и анализ полученных данных. Относительное изменение сопротивления тензорезисторов рассчитывалось по известным формулам [16].

Анализ результатов численного моделирования

В результате численного моделирования двухмембранного тензопреобразователя давления были получены напряжения, возникающие в конструкции (рис. 7). Выявлено, что при максимальном давлении $P = 3$ МПа, на которое рассчитан тензопреобразователь, в слое припоя возникают пластические деформации, которые также являются одной из причин нелинейности выходного сигнала. Максимальное эквивалент-

ное напряжение по Мизесу (интенсивность напряжений) в слое сапфира $\sigma_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 560$ МПа, что свидетельствует о достаточном запасе прочности (см. табл. 1).

Величина нелинейности выходного сигнала является важным параметром качества полупроводникового тензодатчика на КНС. Как известно, на выходной сигнал тензопреобразователя влияет ряд факторов: исходный разбаланс моста; температурный дрейф нуля и др. Точно оценить влияние данных факторов на выходной сигнал на этапе проектирования весьма затруднительно. Наличие отмеченных выше факторов приводит к необходимости проведения индивидуальной тарировки каждого тензопреобразователя.

Учитывая вышеизложенное, в работе проведена оценка нелинейности выходного сигнала на основе полученной деформационной картины поверхности чувствительного элемента и, как следствие, деформации тензорезисторов.

В наиболее распространенном исполнении тензорезистивной мостовой схемы полупрово-

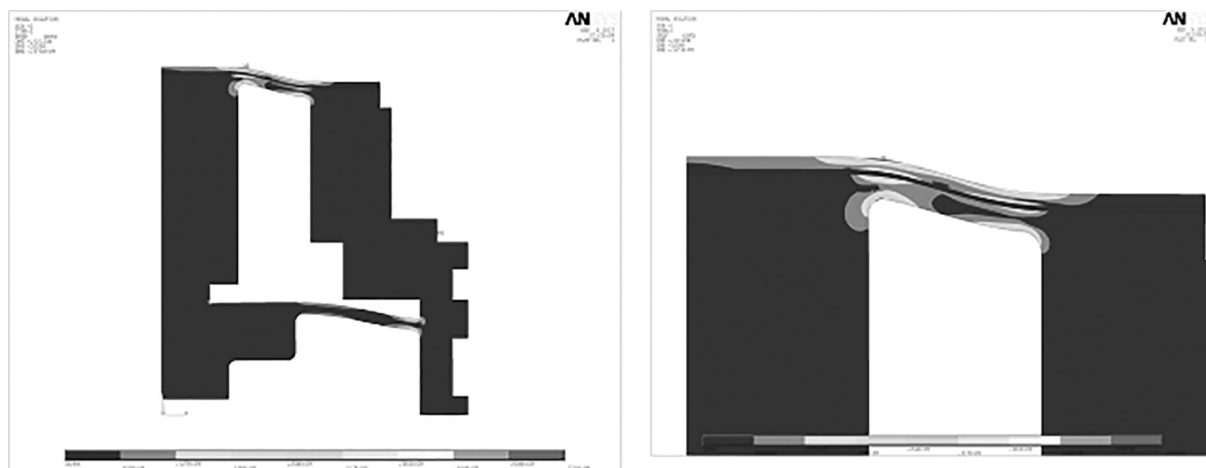


Рис. 7. Распределение интенсивности напряжений в тензопреобразователе

дниковых чувствительных элементов в смежных плечах находятся радиальные и тангенциальные тензорезисторы, ориентированные по кристаллографическим направлениям $\langle 110 \rangle$ кремния и расположенные вблизи края мембраны. В нашем случае середина базы тензорезистора находится на расстоянии 3,7 мм от центра мембраны. Для такой тензосхемы с одинаковыми начальными значениями сопротивлений радиальных R_r и тангенциальных R_t тензорезисторов ($R_r = R_t = R$) изменение выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ под действием давления при питании моста постоянным напряжением $U_{\text{пит}}$ равно [17]:

$$\Delta U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}} \frac{(\Delta R_t - \Delta R_r)}{(2R + \Delta R_t + \Delta R_r)} \approx \approx U_{\text{пит}} \frac{(\Delta R_t - \Delta R_r)}{2R}, \quad (1)$$

где ΔR_t – изменение сопротивления тангенциальных тензорезисторов; ΔR_r – изменение сопротивления радиальных тензорезисторов под действием давления.

Из соотношения (1) следует, что при фиксированном напряжении питания для получения максимального изменения выходного сигнала тензодатчика необходимо, чтобы разность относительных изменений сопротивлений тензорезисторов, находящихся в смежных плечах мостовой схемы, была максимальной [17]:

$$\frac{\Delta R_t}{R} - \frac{\Delta R_r}{R} \rightarrow \max. \quad (2)$$

В работе [10] показано, что относительные изменения сопротивлений $\frac{\Delta R_r}{R}$ и $\frac{\Delta R_t}{R}$ для полупроводниковых кремниевых тензорезисторов зависят от основного коэффициента эластосопротивления m_{44} и описываются выражением:

$$\left| \frac{\Delta R_t}{R} - \frac{\Delta R_r}{R} \right| \approx m_{44} |\varepsilon_t - \varepsilon_r| = m_{44} |\Delta \varepsilon|. \quad (3)$$

Используя данные работы [22], примем значение коэффициента $m_{44} = 62$. Подставляя выражение (3) в (1), получаем зависимость между выходным сигналом и деформацией упругого элемента:

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{пит}}} = \frac{1}{2} m_{44} |\Delta \varepsilon|. \quad (4)$$

В результате численного моделирования исследуемого тензопреобразователя было получено распределение тангенциальных и радиальных деформаций на поверхности чувстви-

тельного элемента (рис. 8), а также модуля их разности $|\Delta \varepsilon|$ (рис. 9).

Результаты численного моделирования, представленные на рис. 9, свидетельствуют о том, что позиция тензорезистора на поверхности чувствительного элемента выбрана разработчиками правильно. Однако малейшая неточность позиционирования чувствительного элемента приведет к уменьшению изменения выходного сигнала.

Производители измерительной аппаратуры, как правило, стремятся к тому, чтобы зависимость выходного сигнала от действующей нагрузки была линейной. Однако на практике ввиду многих причин (несовершенство упругих свойств материала, явление гистерезиса, влияние температуры и несовершенства технологического процесса) реальная характеристика отлична от линейной.

Нелинейностью η характеристики называется наибольшее отклонение Δ_{max} действительной характеристики от линейной (рис. 10), отнесенное к наибольшему значению оцениваемой величины (в нашем случае $\Delta U_{\text{вых max}}$). Таким образом, для оценки нелинейности выходного сигнала будет служить следующее выражение:

$$\eta = \frac{\Delta_{\text{max}}}{\Delta U_{\text{вых max}}} \cdot 100 \%. \quad (5)$$

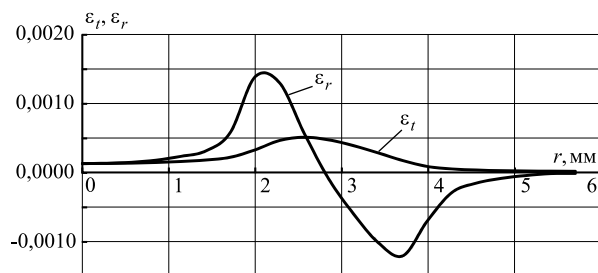


Рис. 8. Распределение радиальной (ε_r) и тангенциальной (ε_t) деформаций в радиальном направлении (r) на поверхности чувствительного элемента

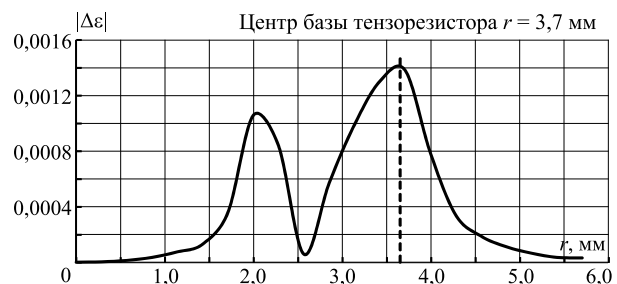


Рис. 9. Изменение разности деформаций $|\Delta \varepsilon|$ на поверхности чувствительного элемента

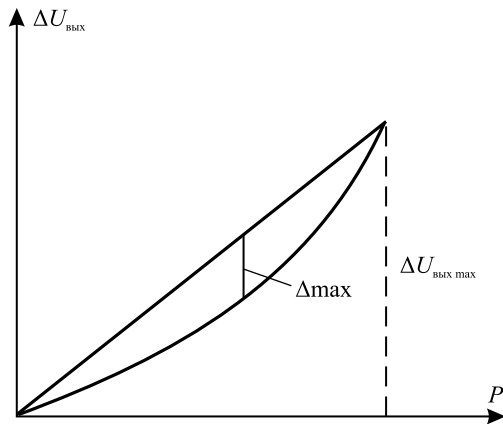


Рис. 10. Отклонение реальной характеристики от линейной

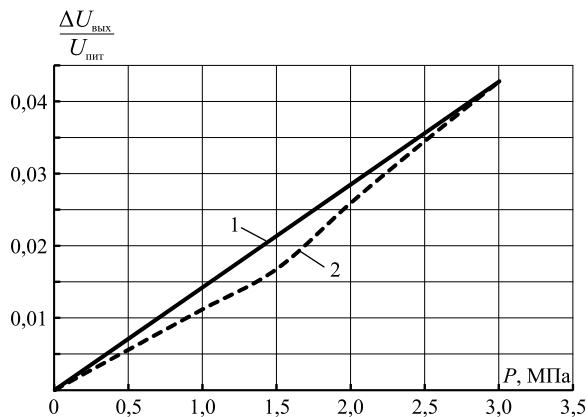


Рис. 11. Нелинейность выходного сигнала исследуемого тензодатчика на КНС:
1 — линейная зависимость $\Delta U_{\text{вых}} / U_{\text{пит}}$;
2 — зависимость $\Delta U_{\text{вых}} / U_{\text{пит}}$, полученная в результате расчета

В нашем случае зависимость $\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{пит}}}(P)$ приведена на рис. 11. Результаты расчета свидетельствуют, что полученная нелинейность равна $\eta = 11,3\%$. Для подобного рода устройств данное значение нелинейности является весьма большим. Это приводит к необходимости дополнительной настройки датчиков, что негативно сказывается как на точности приборов, так и на его конечной стоимости.

Заключение

В работе представлена численная методика анализа функциональных характеристик тензопреобразователя давления на структуре КНС. Методика позволяет рассчитать максимальные значения напряжений в слое припоя и в чувствительном элементе и определить нелинейность выходного сигнала.

Расчетная нелинейность выходного сигнала составила $11,3\%$, что показывает значительное отличие от величины нелинейности,

указанной в технических характеристиках [1]. На основании большой разницы между полученной нелинейностью выходного сигнала и нелинейностью выходного сигнала реального тензодатчика на КНС можно сделать вывод, что все факторы, приводящие к нелинейности выходного сигнала, компенсируются путем введения дополнительных «компенсационных» сопротивлений. Авторы считают, что также возможно уменьшение нелинейности выходного сигнала путем усовершенствования конструкции тензодатчика давления на структуре КНС.

Разработанная методика может служить основой для решения задач оптимизации с целью увеличения точности и надежности тензопреобразователей на структуре КНС.

Список литературы

1. Энгельское приборостроительное объединение «Сигнал». Каталог продукции. Режим доступа: <http://www.eposignal.ru/products/catalog/228/1500/> (дата обращения 20.03.2017).
2. ЗАО «Научно-производственный комплекс «ВИП». Каталог продукции. Режим доступа: http://www.zaovip.ru/products/pressure_transducers (дата обращения 17.04.2017).
3. ЗАО «МИДАУС». Каталог продукции. Режим доступа: <http://www.midaus.com/katalog/preobrazovateli-davleniya.html> (дата обращения 17.04.2017).
4. Sonnetics. Downhole products. URL. http://www.sonnetics.com/downhole_products.html (дата обращения 17.04.2017).
5. Пат. 2392592 Российская федерация, МПК G01L9/04. Датчик давления / В.А. Стефанович, Г.Б. Лебедев, С.Н. Нелина; опубл. 20.06.2010. Бюл. № 17.
6. Пат. 3436440 Германия, МПК G01L9/00, G01L9/06, H01L23/12. Semiconductor measuring instrument: / M. Poppinger, K.G. Ehrler, H. Hagen, K. Heimer, B. Krisch; опубл. 10.04.1986.
7. Пат. 2016289061 США, МПК B81B3/00, B81C1/00. Silicon-on-sapphire device with minimal thermal strain preload and enhanced stability at high temperature: / G.Brown; опубл. 06.10.2016.
8. Гаврюшин С.С. Численное моделирование процессов нелинейного деформирования тонких упругих оболочек// Математическое моделирование и численные методы. 2014. Т. 1. № 1. С. 115–130.

9. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. Численный анализ элементов конструкций машин и приборов. М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 479 с.
10. Влияние дефектов на механические свойства эпитаксиальных слоев кремния на сапфире / Н.О. Кривулин, Д.А. Павлов, П.А. Шилиев, Е.В. Коротков, В.А. Гладышева, А.И. Бобров // Вестник нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2012. № 3(1). С. 30–33.
11. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Моделирование двухмембранного преобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» // Материалы XXII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Вятчи, 15–19 февраля 2016 г.): тезисы докладов. 2016. С. 80–81.
12. Валишвили Н.В., Гаврюшин С.С. Сопротивление материалов и конструкций. М.: Изд-во Юрайт, 2017. – 420 с.
13. Козлов А.И., Пирогов А.В., Стучебников В.М. Моделирование тензопреобразователей давления на основе структур КНС. Двухмембранные преобразователи // Датчики и системы. 2009. № 8. С. 50–53.
14. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1981. – 392 с.
15. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 543 с.
16. Козлов А.И. Исследование и разработка мембранных тензопреобразователей давления: дисс. ... канд. техн. наук. Ульяновск, 2014. – 113 с.
17. Козлов А.И. Стучебников В.М. Экспериментальное определение распределения деформаций в круглой упругой мембране тензопреобразователя давления // Приборы. 2014. № 7. С. 41–44.
18. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.: под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
19. Dobrovinskaya E.R., Lytvynov L.A., Pishchik V. Sapphire: Material, Manufacturing, Applications. New York: Springer, 2009. – 481 p.
20. Най Дж. Физические свойства кристаллов. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 382 с.
21. ГОСТ 22520-85 Датчики давления, разряжения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП. Общие технические условия. Введ. 01.07.86. М.: Изд-во стандартов, 1986. – 25 с.
22. Стучебников В.М. Структуры «кремний на сапфире» как материал для тензопреобразователей механических величин // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 6. С. 678–696.
23. Hoffmann K. Applying the Wheatstone Bridge Circuit. Germany, Darmstadt: HBM Company, 2001. – 36 p.
24. Kreuzer M. Wheatstone Bridge Circuits Show Almost No Nonlinearity and Sensitivity Errors When Used for Single Strain Gage Measurements <https://www.hbm.com/en/3196/tips-and-tricks-wheatstone-bridge-circuits-show-almost-no-nonlinearity-and-sensitivity-errors-when-used-for-single-strain-gage-measurements/> (accessed March 20, 2017).
25. САЕ-система ANSYS [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ansys.com/> (дата обращения: 30.08.2017).

Материал поступил в редакцию 24.04.2017

ГАВРЮШИН Сергей Сергеевич

E-mail: gss@bmstu.ru
Тел.: (495) 223-05-23, доб. 1457

Доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: вычислительная механика, робототехника, биомеханика, цифровое проектирование, автоматизация технологических процессов. Автор четырех монографий, более 250 научных статей, 8 патентов.

СКВОРЦОВ Павел Аркадьевич

E-mail: skvortsovpa@yandex.ru
Тел.: (985) 176-30-34

Аспирант кафедры «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов» Московского политехнического университета. Сфера научных интересов: механика деформированного твердого тела, полупроводниковые тензодатчики, компьютерное моделирование. Автор четырех научных статей.