

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 629.7.067.8

doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-1

КАНАЛ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО МЕМБРАННОГО ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ БПЛА

Б. В. Чувькин¹, Е. А. Рыблова², В. С. Волков³, А. А. Трофимов⁴

^{1,3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

² СКБ АО «Электромеханика», Пенза, Россия

¹ chuvukin_bv@mail.ru, ² Elizaveta.ryblova@mail.ru, ³ vadimv_1978@mail.ru, ⁴ alex.t1978@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается актуальность применения беспилотных летательных аппаратов для решения задач в различных отраслях техники. Анализируются особенности построения высотомеров различного типа. Целью работы является улучшение характеристик барометрических высотомеров на основе датчиков давления, применяемых в системах управления беспилотных аппаратов. *Материалы и методы.* Исследование проводится методом имитационного моделирования чувствительных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics и определения чувствительности преобразования и погрешности нелинейности каждого из них. *Результаты.* Определены геометрические параметры чувствительного элемента, рассчитана чувствительность преобразования и погрешность нелинейности выходного сигнала. *Выводы.* Профилированная мембрана с определенными геометрическими параметрами позволяет добиться улучшенных технических характеристик в сравнении с плоскими мембранами по критериям чувствительности преобразования и погрешности нелинейности выходного сигнала.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, информационно-управляющая система, высота полета, полупроводниковый чувствительный элемент, погрешность нелинейности, чувствительность преобразования, профилированная мембрана

Для цитирования: Чувькин Б. В., Рыблова Е. А., Волков В. С., Трофимов А. А. Канал измерения давления на основе полупроводникового мембранного тензопреобразователя для информационно-управляющей системы БПЛА // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 5–15. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-1

PRESSURE MEASUREMENT CHANNEL BASED ON A SEMICONDUCTOR MEMBRANE STRAIN GAUGE FOR THE UAV INFORMATION AND CONTROL SYSTEM

B.V. Chuvykin¹, E.A. Ryblova², V.S. Volkov³, A.A. Trofimov⁴

^{1,3,4} Penza State University, Penza, Russia

² SKB JSC "Electromechanika", Penza, Russia

¹ chuvukin_bv@mail.ru, ² Elizaveta.ryblova@mail.ru, ³ vadimv_1978@mail.ru, ⁴ alex.t1978@mail.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the use of unmanned aerial vehicles for solving problems in various branches of technology is considered. The features of constructing altimeters of various types are analyzed. The aim of the work is to improve the characteristics of barometric altimeters based on pressure sensors used in control systems of unmanned

vehicles used in UAVs. *Materials and methods.* The study is carried out by the method of simulation of sensitive elements in the COMSOL Multiphysics software package and determination of the sensitivity of the transformation and the linearity error of each of them. *Results.* The geometric parameters of the sensing element are determined, the sensitivity of the conversion and the linearity error of the output signal are calculated. *Conclusions.* A profiled membrane with certain geometric parameters allows you to achieve the best technical characteristics in comparison with flat membranes in terms of conversion sensitivity and linearity error of the output signal.

Keywords: unmanned aerial vehicle, information and control system, flight altitude, semiconductor sensing element, linearity error, conversion sensitivity, profiled membrane

For citation: Chuvykin B.V., Ryblova E.A., Volkov V.S., Trofimov A.A. Pressure measurement channel based on a semiconductor membrane strain gauge for the uav information and control system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):5–15. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-1

Введение

В настоящее время как за рубежом, так и в России стремительно развивается новое научно-техническое направление – беспилотные летательные аппараты (БПЛА), в том числе малоразмерные БПЛА (МБПЛА) [1].

Одним из главных достоинств МБПЛА является независимость от взлетных полос и посадка на неподготовленную поверхность. Вместе с уменьшением взлетной массы БПЛА ужесточаются требования к информационно-измерительным системам по массе, габаритам, энергопотреблению и др. [1].

Распределение количества БПЛА по категориям показано на рис. 1 [2].

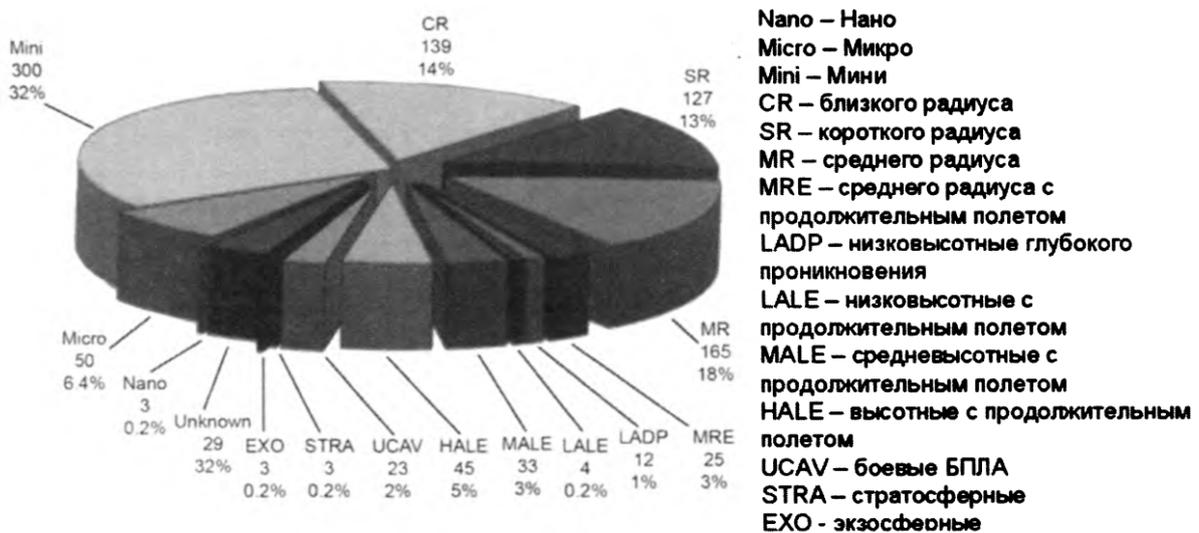


Рис. 1. Распределение количества БПЛА по категориям

Характеристики БПЛА приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики БПЛА

Категория	Префикс	Дальность действия, км	Высота, м	Время полета, ч	Масса, кг	Используется в настоящее время
1	2	3	4	5	6	7
Тактические						
Нано	η	<1	100	<1	<0,025	Да
Микро	μ	<10	250	1	<5	Да
Мини	Mini	<10	150–300	<2	<30	Да
Ограниченной дальности	CR	10–30	3000	2–4	150	Да
Ближней дальности	SR	30–70	3000	3–6	200	Да
Средней дальности	MR	70–200	5000	6–10	1250	Да
Износостойчивые средней дальности	MRE	>500	8000	10–18	1250	Да

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Низковысотные глубокого проникновения	LADP	>250	50–9000	0,5–1	350	Да
Низковысотные особо износостойчивые	LALE	>500	3000	>24	<30	Да
Средневысотные особоизносостойчивые	MALE	>500	14000	24–48	1500	Да
Стратегические						
Высотные особо износостойчивые	HALE	>2000	20000	24–48	(4500) 12000	Да
Спецназначения						
Боевые	UCAV	1500	10000	2	10000	Да
Одноразовые	LETH	300	4000	3–4	250	Да
Ложные цели	DEC	0–500	5000	<4	250	Да
Стратосферные	STRATO	>2000	>20000 и <30000	>48	TBD	Нет

Из рис. 1 видно, что МБПЛА массой до нескольких килограммов составляют порядка 40 % от общего количества БПЛА всех категорий.

В гражданских целях МБПЛА могут решать следующие задачи: аэрофотосъемка; контроль экологической обстановки; контроль морского судоходства; океанология; обеспечение сельскохозяйственных работ и геологоразведки [1, 2].

В задачи, решаемые БПЛА в военных целях, входят: ведение разведывательных полетов; разведка и обнаружение малоразмерных целей; корректировка артиллерийского огня; радиотехническая разведка; поражение наземных целей в зонах с сильной ПВО.

Размеры МБПЛА накладывают серьезные ограничения на бортовую аппаратуру управления. Основные требования, предъявляемые к авионике МБПЛА: высокая точность, качество и производительность; малые размеры и простая схемотехника; низкое энергопотребление; высокая надежность и отказоустойчивость; низкая цена [1].

На рис. 2 представлен один из возможных вариантов функциональной схемы информационно-управляющей системы БПЛА [3].



Рис. 2. Функциональная схема информационно-управляющей системы БПЛА

Здесь БУ ЭО, БУ ОЭС, БУ РЭО, БУ ЦО – блоки управления энергетическим, оптико- и радиоэлектронным, а также целевым оборудованием. Системы СБИ и СППК означают системы бортовых измерений и предполетного контроля. Вычислительный комплекс (ВК) реализует все алгоритмы управления полетом. Для получения необходимой информации используется набор соответствующих устройств:

- система воздушных сигналов (СВС);
- бесплатформенная инерциальная система (БИНС);
- датчики угловых скоростей (ДУС);
- высотомер;
- информационно-командный радиоканал (ИКРК);
- приемники сигналов системы спутниковой навигации;
- аналого-цифровые преобразователи (АЦП);
- цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) [3].

Проведенный анализ показывает, что одним из важнейших параметров, подлежащим изменению в полете, является высота [4]. Важнейшей частью канала измерения давления является высотомер, так как его параметры во многом определяют точность измерения высоты, что особенно актуально для БПЛА, функционирующих на малых и сверхмалых высотах, где точность должна составлять доли метра. Это позволяет БПЛА совершать автономные полеты без радара по цифровой карте высоты поверхности, находящейся в памяти блока управления, ориентируясь на показания высотомера, который откалиброван в момент старта по реперной точке высоты [4].

Современные барометрические высотомеры на основе датчиков абсолютного давления позволяют измерить высоту с точностью не хуже 1–2 м. [4]. Например, датчик абсолютного давления тензорезистивного типа компании BOSCH BMP 280 Digital Pressure sensor, который представляет собой кремниевую мембрану, выполненную с использованием МЭМС-технологии с расположенным на ее поверхности измерительным мостом из четырех кремневых тензорезисторов [5], имеет следующие параметры:

- диапазон давлений – 300...1100 гПа (экв. к +9000...–500 м выше/ниже уровня моря);
- абсолютная погрешность – $\pm 0,12$ гПа (± 1 м);
- температурный коэффициент смещения – 1,5 Па/К (12 см/К);
- диапазон температур – $-40 \dots +85$ °С .

Традиционные барометрические приборы, основанные на измерении абсолютного давления, имеют в своем составе мембранные анероидные коробки, размеры которых составляют не менее нескольких сантиметров в диаметре, а также передаточный механизм достаточно больших размеров. Применение МЭМС-датчиков абсолютного давления позволяет использовать чувствительные элементы в виде кремниевых мембран размером до 5 мм, на которых сформирована тензосхема из полупроводниковых тензорезисторов, преобразующая деформацию мембраны в электрический сигнал [6].

Для повышения точности измерения высоты необходимо вносить поправку в выходной сигнал, вызванную влиянием температуры окружающего воздуха на высоте полета БПЛА. Это можно сделать, используя в качестве датчика температуры полупроводниковый терморезистор, размещенный на чувствительном элементе МЭМС-датчика в зоне, свободной от деформации мембраны. Такое техническое решение позволит отслеживать колебание температуры в реальном времени, при этом терморезистор так же, как и тензорезисторы, может быть изготовлен интегральным способом в едином технологическом цикле, что не приведет к существенному увеличению себестоимости чувствительного элемента, а применение групповой микромеханической технологии изготовления позволит получить высокую воспроизводимость его метрологических характеристик. Это делает конструкцию барометрического высотомера на основе полупроводникового чувствительного элемента датчика абсолютного давления максимально пригодной к изготовлению в условиях серийного и массового производства.

Для снижения энергопотребления с целью увеличения дальности полета БПЛА необходимо увеличивать чувствительность мембран датчиков давления. Наиболее распространенные круглые и квадратные мембраны постоянной толщины при увеличении чувствительности за счет уменьшения толщины характеризуются значительной погрешностью нелинейности. По этой причине перспективным направлением совершенствования чувствительных элементов датчиков давления является использование профилированных мембран с сечением сложной геометрической формы [7].

Цель работы – определение геометрических параметров ЧЭ с повышенной чувствительностью преобразования и сниженной погрешностью нелинейности для канала измерения давления информационно-управляющих систем БПЛА.

Материалы и методы

Для определения наилучших размеров сечения ЧЭ, при которых будет наблюдаться максимальное значение выходного сигнала и минимальная погрешность нелинейности, было выполнено имитационное моделирование в программном пакете COMSOL Multiphysics.

Результаты

Преимуществами конструкции прототипа, используемого в данной работе, являются повышенная чувствительность и низкая погрешность нелинейности выходного сигнала [8, 9].

Однако данная мембрана имеет практически такую же чувствительность 1170 отн. ед., что и плоская мембрана такого же диаметра 1,5 мм и толщиной 30 мкм – 1129 отн. ед. Поэтому было принято решение исследовать конструкцию профилированной мембраны с целью повышения чувствительности, так как во многих случаях чувствительность является одной из основных технических характеристик.

Для исследования были предложены четыре интегральных преобразователя с мембранами различной конструкции. На рис. 3–6 ниже представлены эскизы исследуемых ЧЭ, причем показана половина сечения каждой из мембран (мембрана 1 – это мембрана, описанная в прототипе [8], мембраны 2–4 были спроектированы на основе мембраны 1).

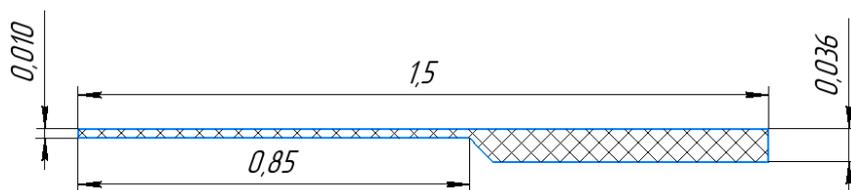


Рис. 3. Профилированная мембрана (мембрана 1)

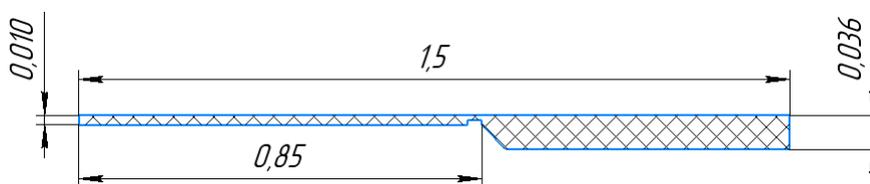


Рис. 4. Профилированная мембрана с выемкой в области ступеньки (мембрана 2)

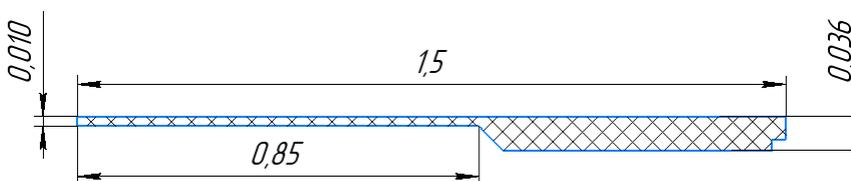


Рис. 5. Профилированная мембрана с выемкой в области жесткой заделки (мембрана 3)

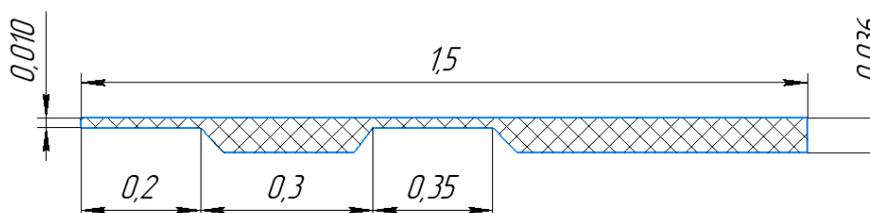


Рис. 6. Профилированная мембрана с двумя жесткими центрами (мембрана 4)

На каждую из мембран подавалось давление 0,2 МПа и было смоделировано деформированное состояние. Для определения, выдержит ли каждая из мембран заданную нагрузку, были построены графики распределения напряжения по Мизесу. Максимальное значение напряжения

по Мизесу для мембраны 1 составило 320 МПа, для мембраны 2 – 255 МПа, для мембраны 3 – 370 МПа и для мембраны 4 – 32 МПа.

Таким образом, напряжение по Мизесу каждой из мембран не превышает 400 МПа (допускаемого напряжения для кремния).

Для определения чувствительности каждой из мембран были построены графики зависимости разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления (рис. 7–10).

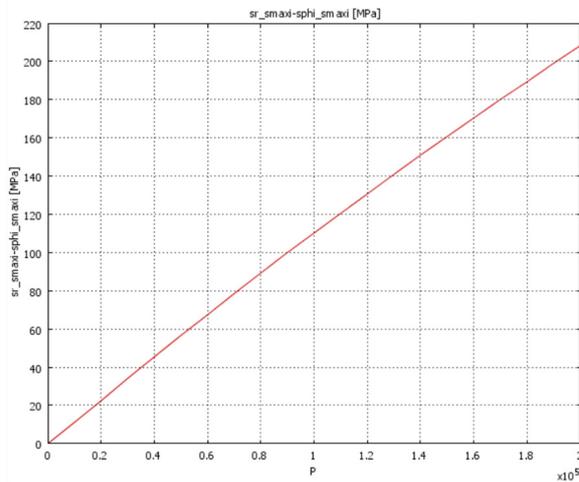


Рис. 7. Зависимость разности σ_r и σ_t от P (мембрана 1)

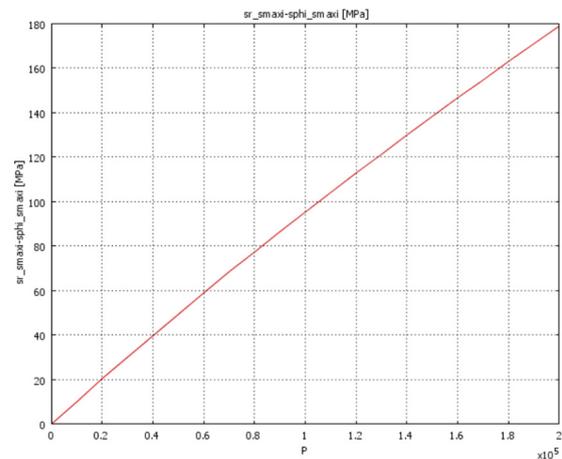


Рис. 8. Зависимость разности σ_r и σ_t от P (мембрана 2)

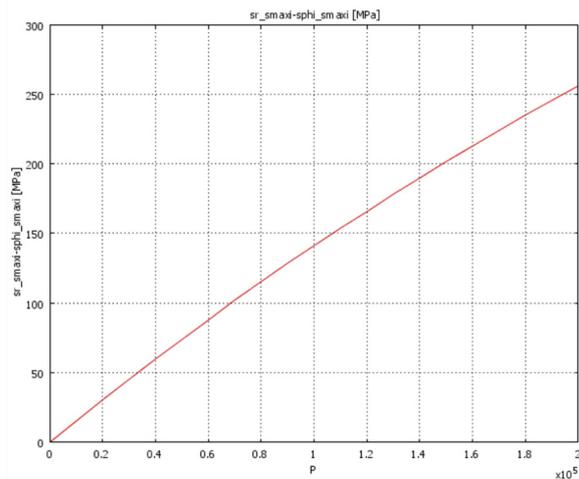


Рис. 9. Зависимость разности σ_r и σ_t от P (мембрана 3)

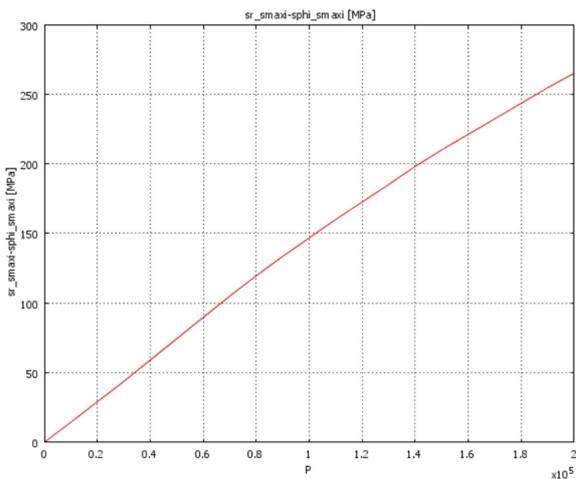


Рис. 10. Зависимость разности σ_r и σ_t от P (мембрана 4)

Мембрана 3, которая имеет концентратор напряжений в области жесткой заделки, и мембрана 4, которая имеет два жестких центра, обладают наибольшей чувствительностью. Однако жесткие центры мембраны 4 могут вести себя подобно инерционной массе. Для дальнейшего исследования выбрана мембрана 3 с выемкой, прилегающей к области жесткой заделки.

Сведения о чувствительности каждой из мембран сведены в табл. 2

Таблица 2

Номер мембраны	Чувствительность
1	1170
2	892
3	1275
4	1305

Для определения геометрических характеристик сечения мембраны 3, обеспечивающих наибольшую чувствительность преобразования, изменялась глубина концентратора напряжений от 2 до 10 мкм с шагом 2 мкм, при этом ширина выемки (концентратора напряжений)

оставалась неизменной и равной 20 мкм. Для каждого случая была построена зависимость разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления (0,2 МПа). Кроме того, была построена зависимость разности радиального и тангенциального напряжения от глубины концентратора напряжений (рис. 11).

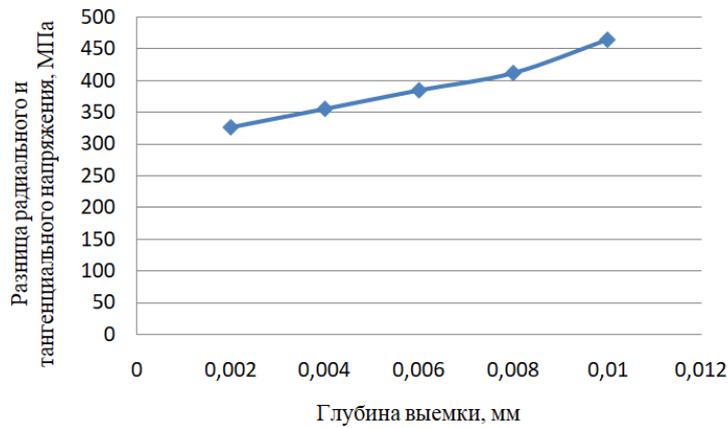


Рис. 11. Зависимость разности σ_r и σ_t от глубины выемки (концентратора напряжений)

Для каждого случая было рассчитано значение чувствительности, данные сведены в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость чувствительности тензопреобразователя от глубины выемки (концентратора напряжений)

Глубина выемки, мм	Чувствительность
0,002	1626
0,004	1772
0,006	1919
0,008	2043
0,01	2318

Из полученных значений видно, что наилучшая чувствительность соответствует мембране с глубиной выемки (концентратора напряжений) 10 мкм и составляет 2318. Для определения соответствия предложенной конструкции критерию прочности был построен график распределения напряжения по Мизесу (рис. 12).

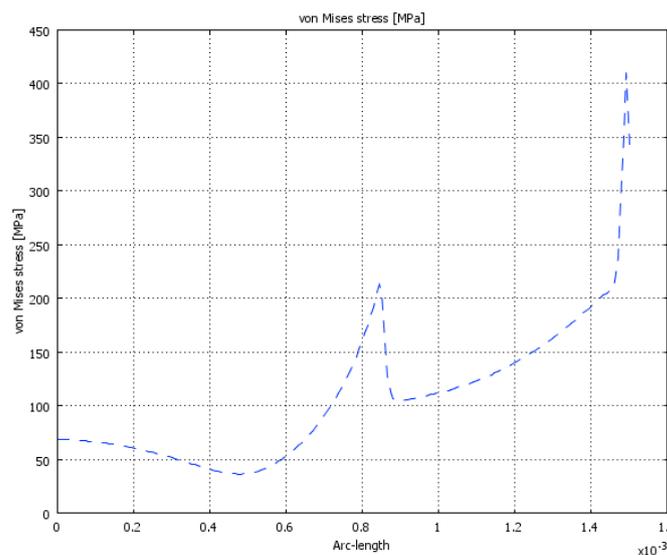


Рис. 12. Распределение напряжения по Мизесу для мембраны 3 с выемкой глубиной 10 мкм

Из графика, представленного на рис. 12, видно, что напряжение по Мизесу превышает 400 МПа, следовательно, такую конструкцию применять нельзя. Поэтому был построен график распределения напряжения по Мизесу для мембраны 3 с глубиной выемки 8 мкм (рис. 13).

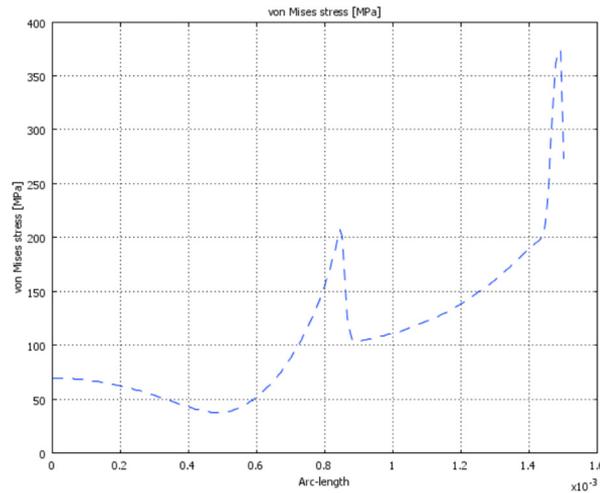


Рис. 13. Распределение напряжения по Мизесу для мембраны 3 с выемкой глубиной 8 мкм

Из данного графика видно, что напряжение по Мизесу не превышает 400 МПа, т.е. мембрана 3 выдержит приложенное давление 0,2 МПа без разрушения. Чувствительность преобразования мембраны 3 с глубиной выемки 8 мкм составляет 2043 отн. ед., при этом погрешность нелинейности выходного сигнала равна 2,44 %, что на 1 % выше, чем у мембраны 1, однако чувствительность значительно выше, практически в 2 раза, так как у мембраны 1 чувствительность составляет 1170 отн. ед.

Для определения наименьшей погрешности нелинейности выходного сигнала изменялась ширина выемки (концентратора напряжений) от 10 до 90 мкм, с шагом 10 мкм, при этом глубина выемки оставалась неизменной 8 мкм, для каждого случая рассчитывалась чувствительность преобразования и погрешность нелинейности выходного сигнала. Полученные данные сведены в табл. 4.

Таблица 4

Зависимость характеристик тензопреобразователя от ширины выемки

Ширина выемки	Чувствительность	Погрешность нелинейности
0,1	2113	2,32
0,2	2043	2,44
0,3	1999	2,56
0,4	1897	2,68
0,5	1891	2,81
0,6	1804	2,93
0,7	1782	3,05
0,8	1763	3,15
0,9	1721	3,25

На основе полученных данных были построены зависимости чувствительности преобразования от ширины выемки (рис. 14) и погрешности нелинейности от ширины выемки (рис. 15).

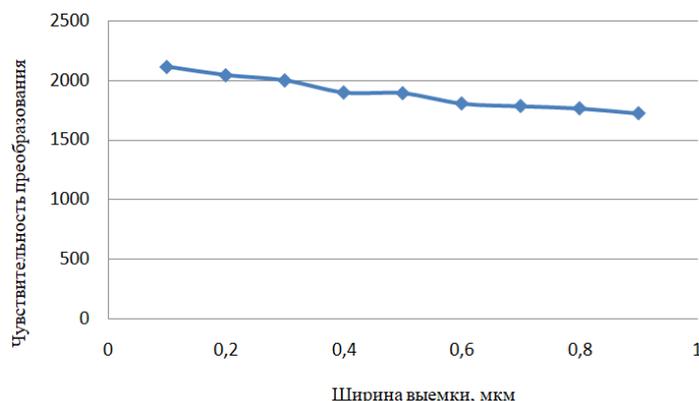


Рис. 14. Зависимость чувствительности преобразования от ширины выемки (концентратора напряжений)

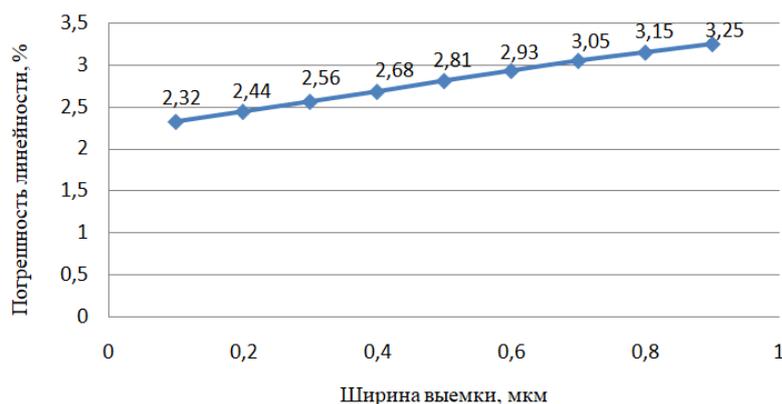


Рис. 15. Зависимость погрешности нелинейности от ширины выемки (концентратора напряжений)

Таким образом, из рис. 14 и 15 видно, что наилучшее соотношение чувствительности и погрешности нелинейности соответствует мембране с выемкой глубиной 8 мкм и шириной 10 мкм. При такой конструкции максимальная чувствительность 2113 и погрешность нелинейности 2,32 %

Таблица 5

Сравнение мембран различного типа

Тип мембраны	Погрешность нелинейности	Чувствительность
Профилированная (мембрана 1)	1,46 %	1170,1
Профилированная с выемкой (мембрана 3)	2,32 %	2113

Из данных табл. 5 видно, что наилучшая чувствительность соответствует профилированной мембране с выемкой (мембрана 3), однако погрешность нелинейности выходного сигнала выше, чем у профилированной мембраны (мембрана 1).

Следует отметить, что все расчеты погрешности нелинейности делались для максимального давления 0,2 МПа. Современные БПЛА летают в основном на относительно небольшой высоте, поэтому целесообразно исследовать характеристики мембран при заданных геометрических размерах и давлении, соответствующем 1 атмосфере (0,1 МПа). Поэтому была рассчитана погрешность нелинейности мембраны 3, при подаваемом на нее давлении 0,1 МПа, при различной ширине выемки (от 10 до 90 мкм, с шагом 10 мкм, при этом глубина выемки оставалась неизменной 8 мкм), полученные данные представлены на рис. 16.

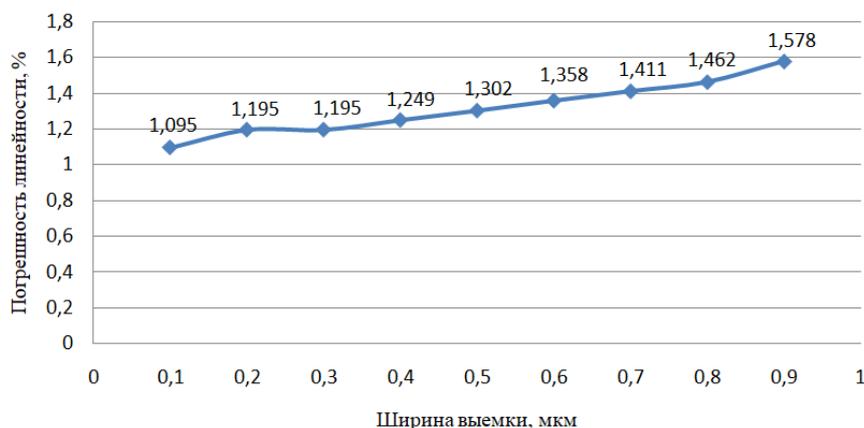


Рис. 16. Зависимость погрешности нелинейности от ширины выемки

Таким образом, из графика видно, что наименьшая погрешность нелинейности выходного сигнала соответствует ширине выемки 10 мкм и составляет 1,1 %, а максимальная погрешность нелинейности выходного сигнала соответствует ширине выемки 90 мкм и составляет 1,58 % [7].

Для сравнения была рассчитана чувствительность и погрешность нелинейности выходного сигнала мембраны 1, данные сведены в табл. 6

Таблица 6

Сравнение профилированных мембран с плоской мембраной

Тип мембраны	Чувствительность	Погрешность нелинейности, %
Мембрана 1	1120	1,46
Мембрана 4	1480	1,09
Плоская мембрана	1118	2,88

Результаты моделирования показывают, что при погрешности нелинейности, равной фактически 1 %, чувствительность предложенной конструкции (мембраны 4) превышает чувствительность обычной плоской мембраны более чем на 30 %, а погрешность нелинейности мембраны 4 на 34 % ниже, чем у мембраны 1, и более чем в 2 раза меньше, чем у плоской мембраны аналогичного диаметра.

Заключение

Из полученных данных табл. 6 видно, что мембрана 4 превосходит мембрану 1 и плоскую мембрану по критериям чувствительности и линейности. При использовании преобразователя давления в конструкции барометрического высотомера БПЛА предложенной конструкции (мембрана 4) можно добиться снижения энергопотребления, так как выходной сигнал тензомоста, сформированного на мембране, пропорционален напряжению питания. Следовательно, повышение чувствительности на 30 % означает возможность пропорционального снижения напряжения питания тензомоста и тем самым увеличения автономности полета БПЛА за счет снижения энергопотребления датчиковой аппаратуры.

Список литературы

1. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / под ред. В. Я. Распопова. М. : Машиностроение, 2011. 184 с.
2. UAS. The Global Perspective 2008/2009. URL: <http://www.uvs-info.com/>
3. Моисеев В. С. Комплексы бортового оборудования перспективных беспилотных вертолетов. Казань : Ред.-изд. центр «Школа», 2021. 248 с.
4. Искендеров И. А., Мурад Р. Г. Особенности современных барометрических датчиков и возможности их применения на летательных аппаратах // International Scientific and Practical Conference World science. 2016. Т. 1, № 5 (9). С. 55–59.
5. BOSCH sensortec, BMP280 "Digital Pressure Sensor" datasheet, BST-BMP280-DS001-11. 2015. 50 p.
6. Искандеров И. А., Гюндюз М. Р. Особенности современных барометрических датчиков и возможности их применения на летательных аппаратах // World Science. 2016. Vol. 1, № 5 (9).
7. Рыблова Е. А., Волков В. С. Оптимизация параметров полупроводникового чувствительного элемента в виде круглой мембраны с целью повышения чувствительности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 39–46.
8. Пат. RU 2732839 С1. Полупроводниковый преобразователь давления с повышенной точностью и чувствительностью / Волков В. С., Рыблова Е. А. № 2019121377 ; заявл. 09.07.2019 ; опубл. 23.09.2020.
9. Пат. RU 224032 U1. Полупроводниковый преобразователь давления с повышенной чувствительностью / В. С. Волков, Е. А. Рыблова. № 2023132858 ; заявл. 06.12.2023 ; опубл. 13.03.2024.

References

1. Raspopov V.Ya. (ed.). *Mikrosistemy orientatsii bespilotnykh letatel'nykh apparatov = Microsystems of orientation of unmanned aerial vehicles*. Moscow: Mashinostroenie, 2011:184. (In Russ.)
2. UAS. *The Global Perspective 2008/2009*. Available at: <http://www.uvs-info.com/>
3. Moiseev V.S. *Kompleksy bortovogo oborudovaniya perspektivnykh bespilotnykh vertoletov = Avionics complexes for advanced unmanned helicopters*. Kazan': Red.-izd. tsentr «Shkola», 2021:248. (In Russ.)
4. Iskenderov I.A., Murad R.G. Features of modern barometric sensors and the possibility of their use on aircraft. *International Scientific and Practical Conference World science*. 2016;1(5):55–59. (In Russ.)
5. BOSCH sensortec, BMP280 "Digital Pressure Sensor" datasheet, BST-BMP280-DS001-11. 2015:50.
6. Iskanderov I.A., Gyundyuz M.R. Features of modern barometric sensors and their application on aircraft. *World Science*. 2016;1(5). (In Russ.)
7. Ryblova E.A., Volkov V.S. Optimization of parameters of a semiconductor sensing element in the form of a circular membrane in order to increase sensitivity. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(2):39–46. (In Russ.)

8. Patent RU 2732839 C1. *Poluprovodnikovyy preobrazovatel' davleniya s povyshennoy tochnost'yu i chuvstvitel'nost'yu = Semiconductor pressure converter with increased accuracy and sensitivity*. V.S. Volkov, E.A. Ryblova. № 2019121377; appl. 09.07.2019; publ. 23.09.2020. (In Russ.)
9. Patent RU 224032 U1. *Poluprovodnikovyy preobrazovatel' davleniya s povyshennoy chuvstvitel'nost'yu = Semiconductor pressure transducer with increased sensitivity*. V.S. Volkov, E.A. Ryblova. № 2023132858; appl. 06.12.2023; publ. 13.03.2024. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Борис Викторович Чувькин

доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: chuvukin_bv@mail.ru

Boris V. Chuvykin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Елизавета Анатольевна Рыблова

инженер-конструктор,
СКБ АО «Электромеханика»
(Россия, г. Пенза, ул. Гоголя, 51/53)
E-mail: Elizaveta.ryblova@mail.ru

Elizaveta A. Ryblova

Design engineer,
SKB JSC "Electromechanika"
(51/53 Gogol street, Penza, Russia)

Вадим Сергеевич Волков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vadimv_1978@mail.ru

Vadim S. Volkov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alex.t1978@mail.ru

Aleksei A. Trofimov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 04.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 04.04.2025

Принята к публикации / Accepted 21.04.2025