

МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ДАТЧИКА СТАТИЧЕСКОГО И ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЙ НА БАЗЕ УПРУГИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ОПТИЧЕСКИХ ЛИНЕЕК

Р.А. Борисов¹

ruslanbor82@yandex.ru

И.В. Антоненц²

iv.antonec@yandex.ru

А.В. Кротов³

krotov@gmail.com

¹ ООО «НИЦ Радиотехники», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО УИ ГА, Ульяновск, Российская Федерация

³ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

Информация о параметрах статического атмосферного давления и полного давления набегающего воздушного потока является первичной в системе воздушных сигналов, входящей в комплексную систему управления воздушным судном. Эта информация позволяет вычислить высоту и скорость полета судна для осуществления автоматизированного и автоматического управления. Измерение статического и полного давлений осуществляется с помощью датчиков аэрометрических параметров, технические характеристики которых во многом определяют диапазон и значения точности измерения системы воздушных сигналов. Исходя из требований по безопасности полетов воздушных судов, в соответствии с существующими нормами горизонтального и вертикального эшелонирования к точности измерения воздушных давлений предъявляются достаточно жесткие требования. Инструментальные погрешности измерения статического и полного давлений воздушного потока с вероятностью 0,95 не должны превышать 0,02 и 0,05 % диапазона измерения. Рассмотренный оригинальный аэрометрический датчик давлений на базе оптической линейки, высокая чувствительность которой требует минимальной деформации упругого чувствительного элемента, позволяет осуществить выполнение этих требований. Бесконтактный съем цифровой информации и работа информационной системы в условиях вакуума значительно повысили эффективность процессов измерения. Рассмотрен

Ключевые слова

Датчики давлений, чувствительный элемент, величина деформации, оптическая линейка

алгоритм расчета основных конструктивных параметров упругих чувствительных элементов практически во всем диапазоне их типоразмеров и с учетом технических возможностей вторичного преобразователя. Результаты проведенных экспериментов и экспериментальных исследований подтвердили адекватность теоретических методов расчета параметров упругих элементов для датчиков давлений

Поступила 29.01.2020

Принята 24.08.2020

© Автор(ы), 2021

Введение. Аэрометрические датчики полного и статического давлений являются источниками первичной информации в системе воздушных сигналов (СВС), определяющей высотно-скоростные параметры перемещения воздушного судна. Это предопределяет существенную зависимость метрологических характеристик СВС от точности измерения статического и полного давлений (при воздействии дестабилизирующих факторов) и от сохранения заданной точности во времени. Проведенный анализ метрологических характеристик известных конструкций аэрометрических датчиков давления, упругих чувствительных элементов (УЧЭ) различных типов, форм и материалов [1] для изготовления УЧЭ, а также вторичных датчиков [2], используемых совместно с ними, позволил выявить практические тенденции их совершенствования. Широкое распространение в авиации получили частотные датчики измерения полного и статического давлений, у которых собственная частота колебаний механического резонатора перестраивается в зависимости от измеряемого значения давления. Частотные датчики имеют несколько существенных недостатков, например температурная погрешность, нелинейные искажения и относительно высокое энергопотребление. Вибрационно-частотные датчики давления с использованием кристаллов кремния имеют низкую чувствительность и значительные гистерезисные явления.

Перечисленные недостатки отсутствуют у датчиков давления, в которых деформация упругого элемента за счет пространственного распределения светового поля преобразуется в цифровой сигнал. Указанное преобразование позволяет повысить точность и расширить диапазон измерения аэрометрических датчиков давления. Авторами разработаны оригинальные аэрометрические датчики давлений, использующие фотоприемные линейки и матрицы, на основе приборов с зарядовой связью, высокая чувствительность которых требует минимальной деформации УЧЭ. Минимизация деформации позволяет избавиться от методических погрешностей: остаточной деформации, нелинейности, упругих несовершенств материала, температурных колебаний, от воздействия линейных ускорений, воздей-

ствия вибраций, изменения свойств материала с течением времени и т. п. Бесконтактный съем информации и работа информационной системы в условиях вакуума значительно повысят эффективность процессов измерения. Отметим также значительное уменьшение энергопотребления.

Датчик статического и полного давления, использующий оптический метод преобразования информации. Принцип работы датчика давления, использующего оптический метод преобразования информации [2], поясняется схемой устройства, приведенной на рис. 1. Устройство содержит корпус 1 с двумя отверстиями для измерения статического (P) и полного (P^*) давления. Мембраны 4 и 6 УЧЭ (анероидной коробки) размещены по высоте и герметично по периметру прикреплены к корпусу. В зазоре между мембранами создается вакуумное пространство. Внутри зазора к стойке 3 прикреплен источник излучения 2 и две шторки 7 с прорезями 8. В соответствии с конструкцией к двум мембранам 6, расположенным выше и ниже источника излучения, крепятся две фотоприемные линейки 5.

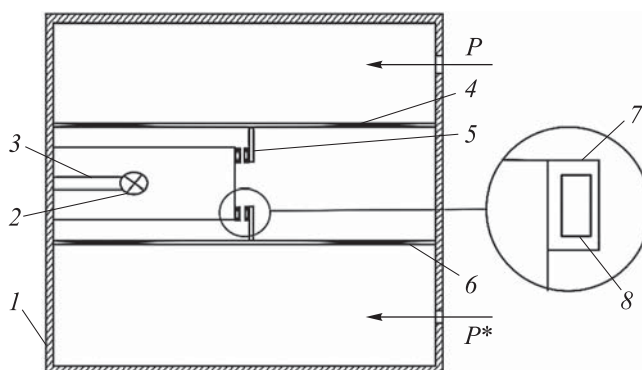


Рис. 1. Датчик давления, использующий оптический метод преобразования информации

Работа устройства осуществляется следующим образом. В исходном состоянии мембраны УЧЭ занимают определенное положение. Световой поток от источника излучения преобразуется вследствие прорезей шторок в оптические пятна. Оптические пятна фокусируются на фотоприемных линейках, прикрепленных к верхней и нижней мембранам.

В фотоприемных линейках отдельные фоточувствительные элементы (пиксели) расположены вдоль одной координаты. Принцип работы таких устройств заключается в формировании внутри каждого пикселя электрического сигнала, пропорционального поглощенной им оптической энергии. Достигается это вследствие фоточувствительного $p-n$ -перехода

(как и в обычном фотодиоде), через который происходит разряд конденсатора фотоприемного элемента [3, 4]. Чем выше оптическая мощность, падающая на пиксель, тем больше ток фотодиода и, следовательно, тем быстрее будет разряжаться конденсатор. В конце цикла измерения происходит считывание остаточных зарядов конденсаторов пикселей.

При изменении статического (P) и (или) полного (P^*) давления мембраны УЧЭ деформируются, при этом фотоприемные линейки, прикрепленные к верхней и нижней мембранам, смещаются, вызывая смещения на них оптических пятен от источника излучения через прорезы шторок. При последовательном опросе пикселей на выходе фотоприемных многоэлементных устройств будет формироваться электрический сигнал, у которого изменение амплитуды во времени отображает распределение оптической мощности в пространстве фотоприемного устройства. Другими словами, на выходе фотоприемных устройств будут формироваться цифровые сигналы, пропорциональные соответственно статическому и полному давлению.

Очевидно, что предлагаемый датчик давления совместно с датчиком температуры позволяет вычислить все перечисленные аэрометрические параметры.

Разработка методики расчета упругого чувствительного элемента с учетом функциональных возможностей вторичного преобразователя и закономерности изменения измеряемой физической величины. Первые работы, представляющие методику расчета гофрированных мембран, опубликованы Д.Ю. Пановым [5] и В.И. Феодосьевым [6, 7]. Уравнения больших статических прогибов мембраны с очень пологой синусоидальной гофрировкой, позволяющие получить статическую характеристику мембраны, выведены в [5]. Однако результаты расчетов статических прогибов мембраны с использованием указанной методики существенно отличались от значений реальных прогибов.

Значительный вклад в развитие методов статического расчета гофрированных мембран внесла Л.Е. Андреева. В ее работах [7–10] определена эффективная методика приближенного статического расчета мембран с гофрировкой произвольной формы и глубины. Основное расчетное выражение [10]:

$$\frac{pR^4}{Eh^4} = \eta a \frac{\omega_0}{h} + \xi b \frac{\omega_0^3}{h^3}, \quad (1)$$

где p — давление при заданном прогибе центра мембраны; R — радиус мембраны (рис. 2); E — модуль упругости первого рода; h — толщина

мембраны; η , ξ — коэффициенты, зависящие от формы профиля и радиуса жесткого центра; ω_0 — прогиб центра мембраны; a , b — коэффициенты, зависящие от формы профиля мембраны и природы материала.

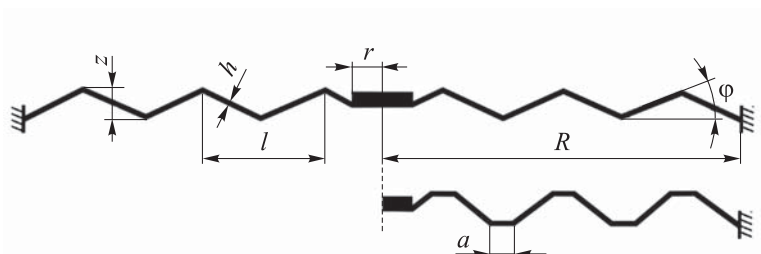


Рис. 2. Геометрические размеры мембраны:

r — радиус жесткого центра; z — глубина гофры; l — длина волны гофры; φ — угол наклона волны; a — ширина трапеции (для трапецеидального профиля мембраны)

Далее приведено предложенное авторами обоснование алгоритма, который позволяет осуществить, с учетом технических характеристик вторичного преобразователя, расчет основных конструктивных параметров УЧЭ во всем диапазоне их типоразмеров. Для учета технических характеристик вторичного преобразователя зададимся порогом чувствительности вторичного преобразователя S , а прогиб центра мембраны представим как

$$\omega_{0i} = Si, \quad (2)$$

где i — шаг измерения, т. е. целочисленные значения от 1 до $i_{\max} \approx \omega_{0\max}/S$.

Под порогом чувствительности датчика понимается минимальное значение прогиба жесткого центра мембраны, регистрируемого при обработке сигнала с фотоприемной линейки.

Преобразуя выражения (1) и (2), получаем

$$P_i = \left(\eta a \frac{Si}{h} + \xi b \frac{(Si)^3}{h^3} \right) \frac{Eh^4}{R^4}, \quad (3)$$

где P_i — измеренное давление на i -м шаге измерения.

Значение высоты при заданном значении статического давления P определяется по формуле

$$H = \left(1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\tau R_0} \right) \frac{T_0}{\tau}. \quad (4)$$

Здесь P_0 — давление на опорной высоте; T_0 — температура на нулевой высоте; τ — температурный градиент; R_0 — газовая постоянная.

Преобразуя выражения (3) и (4), получаем

$$H_i = \left[1 - \left(\frac{\left(\eta a \frac{Si}{h} + \xi b \frac{(Si)^3}{h^3} \right) \frac{Eh^4}{R^4}}{P_0} \right)^{\tau R_0} \right] \frac{T_0}{\tau}, \quad (5)$$

где H_i — измеренное значение высоты на i -м шаге измерения.

Для оценки погрешности измерения датчика давления введем понятие дискретность измерения D_{Hi} на i -м шаге измерения:

$$D_{Hi} = H_{i+1} - H_i. \quad (6)$$

Именно этот параметр далее будет использован как опорный параметр для оценки погрешности измерения датчика давления на стадии разработки УЧЭ.

Закономерность изменения дискретности D_{Hi} в рабочем диапазоне высот зависит от характеристики УЧЭ. Если характеристика УЧЭ близка к линейной по давлению (рис. 3, а), то дискретность D_{Hi} с увеличением высоты значительно возрастает, что приводит к снижению точности измерения. Если характеристика УЧЭ линейна по высоте (рис. 3, б), то $D_{Hi} = \text{const}$. Изменяя геометрические размеры УЧЭ, можно получить такие характеристики элемента, которые обеспечат заданную точность измерения высоты в соответствии с требованиями приложения 8 НЛГС-3. В случае применения высокочувствительных вторичных преобразователей, каковыми являются фотоприемные устройства, появляется возможность увеличить толщину УЧЭ. Это положительно повлияет на его долговечность и динамическую устойчивость, а также позволит избежать упругих последствий.

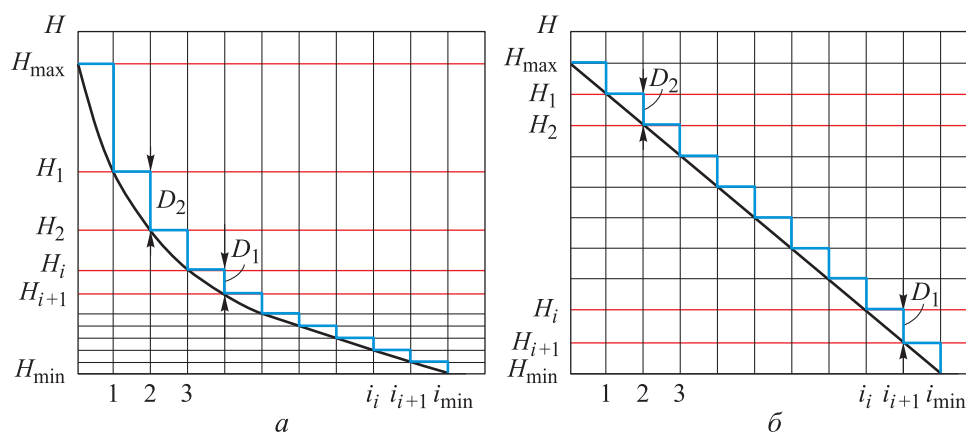


Рис. 3. Линейные по давлению (а) и высоте (б) характеристики УЧЭ

Результаты анализа выражений (5) и (6) показывают, что на дискретность оказывают влияние геометрические размеры УЧЭ, его профиль и материал, а также значение порога чувствительности вторичного преобразователя. Чем меньше порог чувствительности вторичного преобразователя, при прочих равных условиях, тем меньше дискретность и, соответственно, выше точность измерения.

Аналогично определим дискретность измерения для датчика скорости. Известно, что

$$P^* = P + \frac{\rho c^2}{2}; \quad c = \sqrt{\frac{2(P^* - P)}{\rho}}. \quad (7)$$

Поскольку в предлагаемом датчике для измерения статического и полного давления в качестве опорного давления используется нулевое давление вакуума, УЧЭ имеет начальное нагруженное состояние, т. е. мембрана прогнута на $\omega_{0ст}$ под действием статического давления P . Тогда преобразуя (3) и (7), получаем

$$c_i = \sqrt{\frac{2 \left(\left(\eta a \frac{(\omega_{0ст} + Si)}{h} + \xi b \frac{(\omega_{0ст} + Si)^3}{h^3} \right) \frac{Eh^4}{R^4} - P \right)}{\rho}},$$

$$P_{дин i} = \frac{\rho c_i^2}{2},$$

где $P_{дин i}$ — динамическое давление при скорости c_i . Полное давление при скорости c_i : $P_i^* = P + \rho c_i^2 / 2$, дискретность измерений при скорости c_i : $D_{ci} = c_{i+1} - c_i$.

Приведенный алгоритм позволяет рассчитывать основные конструктивные параметры УЧЭ во всем диапазоне их типоразмеров и с учетом технических характеристик вторичного преобразователя при различных значениях и закономерностях изменения измеряемой физической величины.

Разработка обобщенного алгоритма расчета параметров упругих чувствительных элементов для датчиков статического и полного давлений. Алгоритм расчета для программы [12], разработанной на языке программирования C++, приведен ниже.

1. Ввод исходных данных.
 - 1.1. Материал и размеры.
 - 1.1.1. Материал УЧЭ: E , μ (коэффициент Пуассона).

- 1.1.2. Геометрические размеры и профиль УЧЭ: R, h, r_0, z , число гофр n .
- 1.2. Порог чувствительности вторичного преобразователя S .
2. Выбор расчетной схемы.
 - 2.2.1. Датчик статического давления.
 - 2.2.2. Датчик полного давления.
3. Внешние условия при измерении.
 - 3.1. Если выбран п. 2.2.1, то ввод $P_0, R_0, T_0, \tau, H_{\min}$ или P_{\max} .
 - 3.2. Если выбран п. 2.2.2, то ввод P_0, ρ, c_{\max} или $P_{\text{дин max}}$.
4. Решение.
 - 4.1. Вычисление коэффициентов: k_1, k_2, α, a, b [9, с. 258–266], η, ξ [7, с. 291].
 - 4.2. Если выбран п. 2.2.1, то вычисление с сохранением значений P_i, ω_{0i}, H_i и D_{Hi} в массиве данных при i от 1 до $i_{\max} = \omega_{0\max} / S$, где $\omega_{0\max} = f(P_{\max})$.
 - 4.3. Если выбран п. 2.2.2, то вычисление с сохранением значений P_i, ω_{0i}, c_i и D_{ci} в массиве данных при i от 1 до $i_{\max} = \omega_{\max} / S$, $\omega_{\max} = f(P_{\text{дин max}})$.
5. Выходные данные.
 - 5.1. Получение графических зависимостей.
 - 5.1.1. Если выбран п. 2.1, $\omega_0 = f(P), \omega_0 = f(H), D_H = f(H)$.
 - 5.1.2. Если выбран п. 4.2, $\omega_0 = f(P_{\text{дин}}), \omega_0 = f(c), D_c = f(c)$.
 - 5.2. Вывод значений в таблицу.
 - 5.2.1. Если выбран п. 4.1, то таблица содержит $i, P_i, \omega_{0i}, H_i, D_{Hi}$.
 - 5.2.2. Если выбран п. 4.2, то таблица содержит $i, P_i, \omega_{0i}, c_i, D_{ci}$.
6. Анализ полученных результатов.
 - 6.1. Если $D_{Hi} (D_{ci})$ не обеспечивает требуемую точность измерения (в соответствии с требованиями НЛГС-3), то переход к п. 2.
7. Сохранение результатов в текстовый файл.

Далее следует расчет максимальных напряжений σ_{\max} при максимальной рабочей нагрузке и коэффициента запаса прочности k [13, 14]. Проверка условия обеспечения оптимальных рабочих напряжений $\sigma_{\max} \leq [\sigma_{0,005}]$ и коэффициента запаса прочности $k > [k]$ ($[k]$ — нормативный коэффициент прочности) методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. Если $\sigma_{\max} \geq [\sigma_{0,005}]$ или $k < [k]$, переход к п. 1.1 алгоритма.

Нормативный коэффициент запаса прочности $[k]$ назначается на основании имеющегося опыта эксплуатации УЧЭ. В изделиях общего машиностроения $[k] = 1,3-2,2$.

Результаты численного моделирования статических характеристик упругого чувствительного элемента. Используемые материалы и геометрические размеры исследуемых образцов УЧЭ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Материалы и геометрические размеры УЧЭ

Номер УЧЭ	Бронза	Профиль	R, мм	h, мм	H, мм	n, шт.
1	БрБНТ 1.9	Трапецеидальный	35,98	0,13	1,088	4
2	БрБ2	Синусоидальный	25	0,22	0,75	3
3	БрБ2		23,25	0,145	0,26	6
4	БрБНТ 1.9		24,75	0,135	0,4	12
5	БрБ2	Пильчатый	27,74	0,15	0,54	5
6	БрБ2	Синусоидальный	24,92	0,13	0,42	8

При расчетах УЧЭ для датчика статического давления рассматривался диапазон значений высоты 500...20 000 м. Значение порога чувствительности датчика $S = 0,001$. Значения дискретности измерения по высоте, а также минимальное измеренное давление P_1 и максимальный прогиб мембраны ω_{0max} приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения дискретности измерения по высоте, минимальное измеренное давление P_1 и максимальный прогиб ω_{0max} мембраны

Номер УЧЭ	Дискретность измерения по высоте, м								P_1 , Па	ω_{0max} , мм
	-500-0	0-600	600-3000	3000-6000	6000-9000	9000-12 000	12 000-15 000	15 000-20 000		
2	10	10	12	14	18	24	35	62	66,48	1,024
3	18	18	18	19	19	19	20	22	16,83	1,245
5	9	9	9	9	9	10	11	16	20,53	2,085

Согласно данным, приведенным в табл. 2, УЧЭ № 2 и № 5 при указанной дискретности измерения обеспечивают требуемую точность измерения, соответствующую требованиям НЛГС-3.

При расчетах УЧЭ для датчика полного давления рассматривался диапазон значений скорости 0...800 км/ч. Значение порога чувствительности датчика $S = 0,001$. Значения дискретности измерения по скорости полета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения дискретности измерения по скорости полета

Номер УЧЭ	Дискретность измерения воздушной скорости												
	50	80	100	150–200	250	300	350–450	500	550–600	650	700	750	800
1	7,4	4,8	3,8	2	1,62	1,36	1,17	0,87	0,73	0,69	0,65	0,62	0,59
4	25	16	13	7,6	6	5	3,6	3,2	2,8	2,7	2,5	2,4	2,3
6	22	17	12	6	5,6	4,7	4,1	3,5	2,6	2,47	2,33	2,2	2,1

Лучшие образцы датчиков имеют погрешность, не превышающую 0,01...0,02 % диапазона измерения. Такая высокая точность к датчикам предъявляется в связи с необходимостью вычислений параметров движения на уровне, который соответствует международным требованиям.

Результат моделирования упругопластичных деформаций мембран методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. Для определения максимальных напряжений σ_{\max} и коэффициентов запаса прочности k в программном комплексе *ANSYS Design Modeler* разработаны 2D-модели УЧЭ, геометрические размеры которых приведены в табл. 1.

Далее следует передача геометрических моделей в модуль *ANSYS Mechanical* и создание сеточной модели.

Задание граничных условий: жесткая заделка (*Fixed Support*) по краям гофрированной мембраны (ось Z), сверху (ось Y) действует равномерно распределенное давление (*Pressure*) величиной 0,107 МПа (для датчика статического давления) и 0,131 МПа (для датчика полного давления) с шагом приложения нагрузки 0,005 МПа.

Решение. В результате работы программы получен отклик системы в виде полей деформации и распределения напряжений, а также значения коэффициентов запаса прочности.

Результаты решения упругопластичных задач методом конечных элементов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты решения упругопластичных задач методом конечных элементов

Номер УЧЭ	<i>Total deformation</i> ($\omega_{0\max}$, мм)	<i>Equivalent stress</i> (эквивалентное напряжение), МПа	<i>Safety factor</i> (коэффициент запаса прочности)
1	4,7407	1185,2	1,01
2	1,037	705,75	1,7
3	1,58	614,52	1,95

Номер УЧЭ	Total deformation (ω_{0max} , мм)	Equivalent stress (эквивалентное напряжение), МПа	Safety factor (коэффициент запаса прочности)
4	2,16	716,12	1,68
5	1,364	544	2,2
6	1,676	790,36	1,52

Экспериментальная проверка полученных результатов. При оценке достоверности результатов использованы экспериментальные данные, приведенные в [8–10], и данные, полученные авторами при проведении экспериментов с использованием оригинального датчика давлений на основе оптического метода преобразования информации (рис. 4).

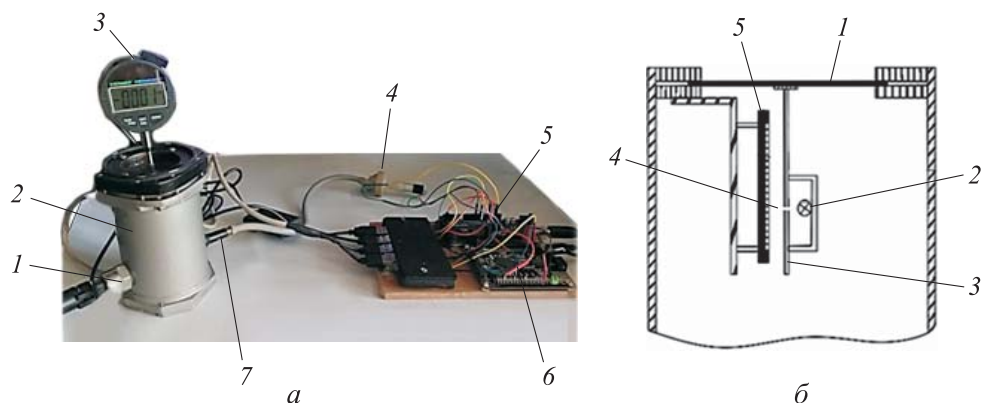


Рис. 4. Экспериментальная установка:

a — фото установки (1 — датчик давления; 2 — корпус датчика; 3 — микрометр; 4 — насос с электромагнитным клапаном; 5 — микроконтроллер *Atmega*; 6 — микроконтроллер *STM32*; 7 — зарядный штуцер); *б* — конструкция датчика установки (1 — УЧЭ; 2 — источник оптического излучения; 3 — шторка; 4 — прорезь; 5 — фотоприемное устройство)

Экспериментальные исследования проведены в соответствии с типовой методикой сбора и обработки результатов экспериментов.

Основой рассматриваемого датчика (рис. 4, б) является фотоприемное устройство. Точность измерений с использованием подобных конструкций зависит от геометрических размеров и расстояния между пикселями фотоприемного устройства, а также методов управления и обработки сигналов, поступающих с фотоприемного устройства. Существенное влияние на точность измерений оказывает расстояние между пикселями фотоприемного устройства.

Разработана программа управления микроконтроллерами семейства *STM32F4*, обеспечивающая измерение линейных перемещений чувствительных элементов датчиков, использующих оптические преобразователи [18]. Работа программы обеспечивает генерацию управляющих электрических импульсов для фотоприемного устройства типа *ILX554B* и преобразование поступающих электрических сигналов с них в цифровой код с последующей его математической обработкой и выводом полученных результатов через интерфейс *USART*.

Применение программы позволяет существенно повысить точность измерений линейных перемещений УЧЭ датчиков, использующих оптические преобразователи за счет того, что при опросе одного пикселя аналого-цифровой преобразователь совершает двойное преобразование.

Предлагаемая конструкция датчика, разработанный алгоритм управления и обработки данных обеспечивают измерение прогиба центра мембраны с абсолютной погрешностью $\Delta = \pm 0,00036$ мм (рис. 5).

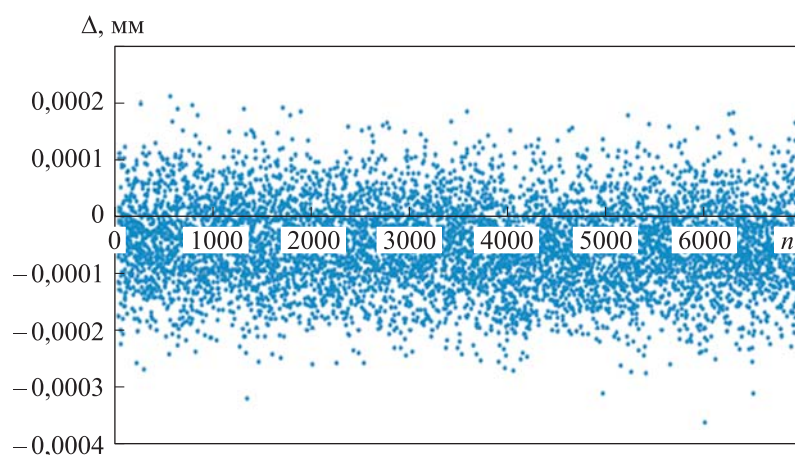


Рис. 5. Зависимость абсолютной погрешности оптического преобразователя перемещения жесткого центра УЧЭ от числа измерений

При проведении эксперимента использованы два УЧЭ № 5 и № 6 (рис. 6).

Сравнительные результаты прогибов мембраны, полученные аналитическим методом с использованием программного комплекса *ANSYS*, и экспериментальные данные приведены на рис. 7.

Расхождение результатов численного моделирования статической характеристики УЧЭ от экспериментальных данных составляет не более 15 % рабочего прогиба жесткого центра мембраны; при использовании программного комплекса *ANSYS* — не более 9 %.

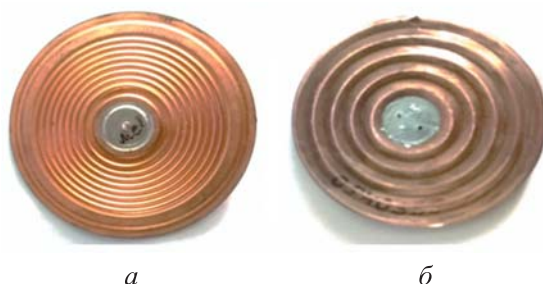


Рис. 6. Фото УЧЭ № 5 (а) и № 6 (б)

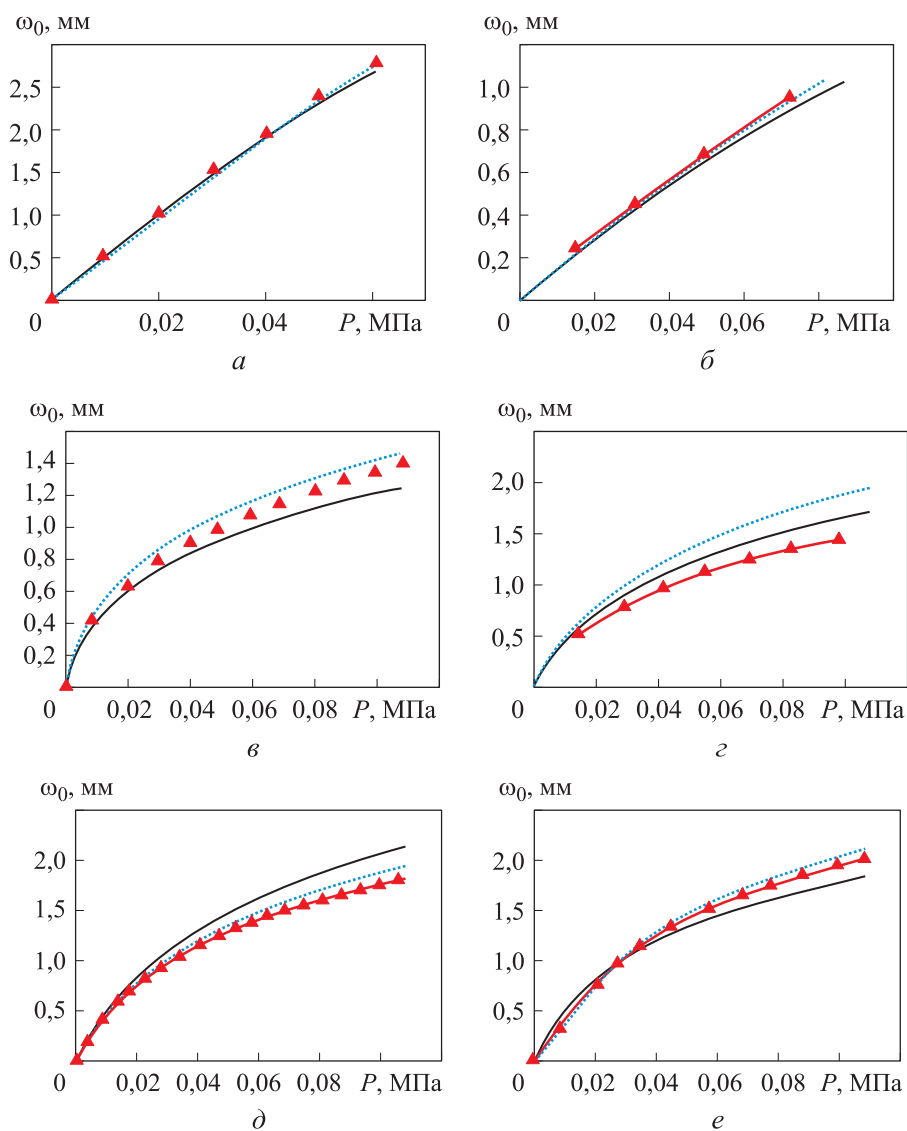


Рис. 7. Результаты моделирования статической характеристики УЧЭ № 1 (а), № 2 (б), № 3 (в), № 4 (з), № 5 (д) и № 6 (е)

Заключение. Рассмотрен оригинальный аэрометрический датчик давлений на базе оптической линейки, высокая чувствительность которой требует минимальной деформации УЧЭ, а бесконтактный съем цифровой информации и работа информационной системы в условиях вакуума значительно повысили эффективность процессов измерения. Предложен алгоритм расчета основных конструктивных параметров УЧЭ практически во всем диапазоне их типоразмеров и с учетом технических возможностей вторичного преобразователя. Результаты проведенных авторами экспериментов и результаты экспериментальных исследований подтверждают адекватность теоретических методов расчета параметров упругих элементов для датчиков давления.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Philippe J., de Paolis N.V., Arenas-Buendia C., et. al. Passive and chipless packaged transducer for wireless pressure measurement. *Sens. Actuator A: Phys.*, 2018, vol. 279, pp. 753–762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.06.024>
- [2] Антонец И.В., Горшков Г.М., Борисов Р.А. Аэрометрический датчик давления, использующий оптический метод преобразования информации. Патент РФ 2653596. Заявл. 04.04.2017, опубл. 11.05.2018.
- [3] Лебедько Е.Г., Зверева Е.Н., Нгуен В.Т. Высокоточное определение углового положения точечного источника излучения с ПЗС-линейками. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2015, т. 15, № 3, с. 398–404. DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-3-398-404>
- [4] Билиженко И.В., Волхонский В.В., Воробьев П.А. и др. Формирования диаграмм направленности оптико-электронных извещателей на основе многоэлементных приемников ИК-излучения. *Известия вузов. Приборостроение*, 2017, т. 60, № 1, с. 96–99. DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-1-96-99>
- [5] Панов Д.Ю. О больших прогибах круглых мембран со слабым гофром. *Прикладная математика и механика*, 1941, т. 5, № 2, с. 303–318.
- [6] Феодосьев В.И. О больших прогибах и устойчивости круглой мембраны с мелкой гофрировкой. *Прикладная математика и механика*, 1945, т. 9, № 5, с. 389–412.
- [7] Феодосьев В.И. Упругие элементы точного приборостроения. М., Оборонгиз, 1949.
- [8] Андреева Л.Е. Расчет характеристик гофрированных мембран. *Приборостроение*, 1956, № 3, с. 11–17.
- [9] Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М., Машиностроение, 1980.
- [10] Андреева Л.Е. Расчет гофрированных мембран. В: Расчеты на прочность в машиностроении. М., Машгиз, 1955, с. 55–67.
- [11] Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М., Машиностроение, 1980.

- [12] Борисов Р.А., Антонец И.В. Программа для расчета упругих чувствительных элементов датчиков аэрометрических давлений. Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2019663045. Зарег. 18.07.2019, опубл. 09.10.2019.
- [13] Явленский К.Н., Тимофеев Б.Л. Справочник конструктора точного приборостроения. Л., Машиностроение, 1989.
- [14] Литвин Ф.Л., ред. Справочник конструктора точного приборостроения. М., Машиностроение, 1964.
- [15] Феликсон Е.И. Упругие элементы приборов. М., Машиностроение, 1977.
- [16] Asch G. Les captures en instrumentation industrielle. Lyon, 1991.
- [17] Barber J.R. Elasticity. Kluwer, 2004.
- [18] Борисов Р.А., Антонец И.В. Программа управления микроконтроллерами семейства STM32F4, обеспечивающая измерение линейных перемещений чувствительных элементов датчиков, использующих оптические преобразователи. Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2019612079. Зарег. 03.10.2018, опубл. 11.02.2019.

Борисов Руслан Андреевич — ведущий инженер-конструктор инженерного отдела ООО «НИЦ Радиотехники» (Российская Федерация, 194223, Санкт-Петербург, Светлановский пр-т, д. 2).

Антонец Иван Васильевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Авиационная техника» ФГБОУ ВО УИ ГА (Российская Федерация, 432071, Ульяновск, ул. Можайского, д. 8/8).

Кротов Александр Викторович — аспирант кафедры «Фотоника» СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Российская Федерация, 197376, Санкт-Петербург, ул. профессора Попова, д. 5).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Борисов Р.А., Антонец И.В., Кротов А.В. Методология разработки датчика статического и полного давлений на базе упругих чувствительных элементов и оптических линеек. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2021, № 1 (134), с. 33–50. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-1-33-50>

**STATIC AND TOTAL PRESSURE SENSOR DEVELOPMENT
METHODOLOGY BASED ON ELASTIC SENSING ELEMENTS
AND OPTICAL RULES**

R.A. Borisov¹

ruslanbor82@yandex.ru

I.V. Antonets²

iv.antonets@yandex.ru

A.V. Krotov¹

krotov@gmail.com

¹ Research Center for Radio Engineering, St. Petersburg, Russian Federation

² Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russian Federation

³ Saint Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract

Information on the parameters of static atmospheric pressure and total pressure of the incoming air flow is the primary information in the air signal system, which is part of the integrated aircraft control system. This information makes it possible to calculate the altitude and speed of the aircraft for automated and automatic control. Static and total pressures are measured by aerometric parameter sensors, whose technical characteristics largely determine the range and values of the measurement accuracy of the air signal system. Relying on the requirements for aircraft flight safety and in accordance with the existing standards for horizontal and vertical separation, rather stringent requirements are imposed on the accuracy of air pressure measurement. Instrumental errors in measuring static and total air flow pressures with a probability of 0.95 should not exceed 0.02 and 0.05 % of the measurement range. The considered original aerometric pressure sensor based on an optical rule, whose high sensitivity requires minimal deformation of the elastic sensitive element, makes it possible to fulfill these requirements. The non-contact digital information retrieval and the operation of the information system under vacuum conditions significantly increased the efficiency of measurement processes. The paper focuses on an algorithm for calculating the main design parameters of elastic sensitive elements in almost the entire range of their standard sizes taking into account the technical capabilities of the secondary converter. The results of the experiments and experimental studies confirmed the sufficiency of theoretical methods for calculating the parameters of elastic elements for pressure sensors

Keywords

Pressure sensors, sensing element, deformation value, optical rule

Received 29.01.2020

Accepted 24.08.2020

© Author(s), 2021

REFERENCES

- [1] Philippe J., de Paolis N.V., Arenas-Buendia C., et. al. Passive and chipless packaged transducer for wireless pressure measurement. *Sens. Actuator A: Phys.*, 2018, vol. 279, pp. 753–762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.06.024>
- [2] Antonets I.V., Gorashkov G.M., Borisov R.A. Aerometricheskij datchik davleniya, ispol'zuyushchiy opticheskiy metod preobrazovaniya informatsii [Aerometric pressure sensor based on optical information conversion method]. Patent RU 2653596. Appl. 04.04.2017, publ. 11.05.2018 (in Russ.).

- [3] Lebedko E.G., Zvereva E.N., Nguen V.T. High-precision determination of the angular position for point light source with CCD-arrays. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2015, vol. 15, no. 3, pp. 398–404 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-3-398-404>
- [4] Bilizhenko I.V., Volkhonskiy V.V., Vorobyov P.A., et al. Formation of directional diagrams of passive infrared detectors based on multi-element receivers of IR radiation. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2017, vol. 60, no. 1, pp. 96–99 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-1-96-99>
- [5] Panov D.Yu. On large deflections of round membranes with a weak corrugation. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 1941, vol. 5, no. 2, pp. 303–318 (in Russ.).
- [6] Feodosyev V.I. On large deflections and stability of a round membrane with fine corrugation. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 1945, vol. 9, no. 5, pp. 389–412 (in Russ.).
- [7] Feodosyev V.I. *Uprugie elementy tochnogo priborostroeniya* [Elastic elements of precision instrument making]. Moscow, Oborongiz Publ., 1949.
- [8] Andreeva L.E. Calculation of corrugated membranes characteristics. *Priborostroenie*, 1956, no. 3, pp. 11–17 (in Russ.).
- [9] Andreeva L.E. *Uprugie elementy priborov* [Elastic elements of devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980.
- [10] Andreeva L.E. Raschet gofrirovannykh membrane. V: Raschety na prochnost' v mashinostroenii [Calculation of corrugated membranes. In: Strength Calculations in Mechanical Engineering]. Moscow, Mashgiz Publ., 1955, pp. 55–67 (in Russ.).
- [11] Ponomarev S.D., Andreeva L.E. Raschet uprugikh elementov mashin i priborov [Calculation of the elastic elements of machines and devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980.
- [12] Borisov R.A., Antonets I.V. Programma dlya rascheta uprugikh chuvstvitel'nykh elementov datchikov aerometricheskikh davleniy [Program for calculating elastic elements of air pressure sensors]. Software registration certificate no. 2019663045. Reg. 18.07.2019, publ. 09.10.2019 (in Russ.).
- [13] Yavlenskiy K.N., Timofeev B.L. *Spravochnik konstruktora tochnogo priborostroeniya* [Handbook of precision instrumentation designer]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989.
- [14] Litvin F.L., ed. *Spravochnik konstruktora tochnogo priborostroeniya* [Handbook of precision instrumentation designer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964.
- [15] Felikson E.I. *Uprugie elementy priborov* [Elastic elements of devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977.
- [16] Asch G. *Les captures en instrumentation industrielle*. Lyon, 1991.
- [17] Barber J.R. *Elasticity*. Kluwer, 2004.
- [18] Borisov R.A., Antonets I.V. Programma upravleniya mikrokontrollerami semeystva STM32F4, obespechivayushchaya izmerenie lineynykh peremeshcheniy chuvstvitel'nykh elementov datchikov, ispol'zuyushchikh opticheskie preobrazovateli [Control program

for microcontrollers of STM32F4 family, measuring linear displacements of sensitive elements with the use of optical converters]. Software registration certificate no. 2019612079. Reg. 03.10.2018, publ. 11.02.2019 (in Russ.).

Borisov R.A. — Lead Design Engineer, Engineering Department, Research Center for Radio Engineering (Svetlanovsky prospekt 2, St. Petersburg, 194223 Russian Federation).

Antonets I.V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aeronautical Engineering, Ulyanovsk Civil Aviation Institute (Mozhayskaya ul. 8/8, Ulyanovsk, 432071 Russian Federation).

Krotov A.V. — Post-Graduate Student, Department of Photonics, Saint Petersburg Electrotechnical University (Professora Popova ul. 5, St. Petersburg, 197376 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Borisov R.A., Antonets I.V., Krotov A.V. Static and total pressure sensor development methodology based on elastic sensing elements and optical rules. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2021, no. 1 (134), pp. 33–50 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-1-33-50>