ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.2:621.826
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-9-813-822

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО И ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ ВЕТВЛЕНИЕ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ВХОДЕ ВТОРИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Р. А. Борисов[1], И. В. Антонец[2], А. А. Черторийский[3], А. В. Кротов[4]

[1]*Общество с ограниченной ответственностью „Специальный Технологический Центр“, 195220, г. Санкт-Петербург, Россия*
E-mail: ruslanbor82@yandex.ru

[2]*Ульяновский институт гражданской авиации им. главного маршала авиации Б. П. Бугаева, 432071, Ульяновск, Россия*

[3]*Ульяновский филиал Федерального бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 432011, Ульяновск, Россия*

[4]*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, 197376, Санкт-Петербург, Россия*

Датчики давлений используются, в частности, для измерения статического и полного давлений встречного потока воздуха — первичной информации в системах воздушных сигналов (СВС) бортовых систем летательных аппаратов. В СВС по известным алгоритмам происходит автоматический пересчет результатов измерений с целью определения высоты полета, индикаторной скорости, истинной воздушной скорости, числа М и вертикальной скорости. Представлен датчик полного и статического давлений с упругими чувствительными элементами (УЧЭ) в виде упругих мембран. Деформация мембраны измеряется оптической системой, состоящей из закрепленных напротив друг друга источника излучения и позиционно-чувствительного фотоприемника на основе линейки фотоэлектронных приемников (ЛФП), между которыми расположена шторка, прикрепленная к центру мембраны. При деформации мембраны происходит смещение оптических пятен, формируемых на поверхности ЛФП излучением, прошедшим через щели в шторке. Существенной новизной предлагаемого датчика является использование процесса ветвления исходной информации, которое осуществляется применением шторок с *n* щелями, что позволяет сформировать на ЛФП *n* оптических пятен, перемещающихся в зависимости от изменения измеряемого давления. Благодаря этому за один период опроса линейки удается получить *n* независимых значений измеряемого давления и, усреднив результат, повысить точность измерения. Отсутствие на шторках дополнительных элементов (излучателей и ЛФП) улучшает динамические характеристики датчика. Предлагаемое решение позволило свести к минимуму влияние внешних возмущающих факторов (в частности, вибраций летательного аппарата), а также повысить точность и быстродействие работы датчика давлений. Эксперименты на лабораторной установке подтвердили достижение более высокого уровня метрологических характеристик для датчика давлений.

Ключевые слова: *датчик давлений, линейка фотоэлектронных приемников, чувствительный элемент, шторка с прорезями, оптическое пятно*

Введение. Анализ существующих и перспективных [1—5] систем измерения аэрометрических параметров движения воздушных судов, в частности структуры и алгоритма работы каналов измерения высотно-скоростных параметров, выявил высокую эффективность разрабатываемых датчиков давлений [6—9], использующих оптический метод преобразования информации [10—18]. Примером может служить датчик [6], в котором при изменении статического и (или) полного давления деформируются упругие мембраны с закрепленными на них ЛФП. В результате происходит смещение оптических пятен, сформированных на поверхностях ЛФП стационарным источником излучения с установленной перед ним шторкой с прорезью. При последовательном опросе фотоэлектронных приемников (ФП) линейки на ее выходе формируется электрический сигнал, амплитуда напряжения которого отображает распределение оптической мощности вдоль ЛФП. Положению оптического пятна будет соответствовать экстремум в выходном сигнале. Процесс получения информации о давлении (статическом и полном) в этом случае заключается в вычислении номера ФП, соответствующего данному экстремуму.

К недостаткам описанного устройства можно отнести ряд факторов, ограничивающих точность измерения. Так, информация о текущей координате оптического пятна формируется дискретно, с периодом, равным интервалу времени, необходимому для опроса всех ФП линейки. Уменьшение интервала времени ограничивается техническими возможностями ЛФП. Кроме того, установка на жестких центрах мембран ЛФП с подходящими к ним проводами приводит к увеличению массы и габаритных размеров мембран и, как следствие, к снижению их динамической устойчивости.

Нами разработан [9] лишенный перечисленных недостатков датчик давлений, принципиальным отличием которого является наличие щелей в шторках, прикрепленных к жестким центрам мембран, воспринимающих статическое и полное давления.

Для определения координат жесткого центра упругого чувствительного элемента при измерении текущего значения давления нами используется так называемый „центроид-метод“, позволяющий вычислить текущую координату „центра тяжести“ светового (оптического) пятна, расположенного на поверхности ЛФП.

Поскольку ширина щелей составляет порядка 0,2—0,5 мм (много больше длины волны излучения), а излучение светодиода является низкокогерентным, дифракционными эффектами при формировании пятна на поверхности ЛФП можно пренебречь. Для исключения эффекта дифракции между соседними щелями в конструкции датчика используется минимальный зазор между шторкой и ЛФП.

Смещение координаты „центра тяжести“ пропорционально изменению измеряемого давления. Координата вычисляется на основании разработанного авторами алгоритма.

На первоначальном этапе находится распределение оптических пятен по поверхности ЛФП. Для этого вычисляются амплитуды значений $N_{\max_n}$ сигнала, которые соответствует локальным максимумам в диапазоне каждого из n пятен на поверхности ЛФП.

На следующем этапе для каждого оптического пятна выделяется область, включающая $M/2$ элементов ЛФП, расположенных до его максимума, и $M/2$ — после него.

Для выделенных областей определяется номер ФП, соответствующего координате максимума сигнала

$$MAX_n = \frac{\sum_{i=N_{\max_n}-M/2}^{N_{\max_n}+M/2} A_i i}{\sum_{i=N_{\max_n}-M/2}^{N_{\max_n}+M/2} A_i}, \qquad (1)$$

где MAX_n — координата максимума n-го оптического пятна на поверхности ЛФП, A_i — амплитуда сигнала с i-го элемента в области n-го пятна, $N_{\max_n}$ — номер элемента, амплитуда сигнала с которого в пределах n-го пятна максимальна.

Число ФП *M/2* выбирается таким образом, чтобы охватить все те ФП линейки вокруг локального максимума, амплитуда сигнала с которых заметно превышает начальный (темновой) уровень.

При изменении давления упругий чувствительный элемент (УЧЭ) деформируется, что способствует перемещению всех пятен. Вычислив последующие координаты световых пятен по формуле (1), можно определить изменение давления по величине деформации УЧЭ.

В предложенном датчике алгоритмы определения статического и полного давлений идентичны, для

$$\Delta P_{\text{ст}n}(t) = k_n(MAX_n(t) - MAX_n(0)), \tag{2}$$

где $\Delta P_{\text{ст}n}(t)$ — изменение статического давления в текущий момент времени t, определенное по изменению „центра тяжести“ n-го пятна; $MAX_n(t)$ — координата максимума n-го оптического пятна на поверхности ЛФП в момент времени t; $MAX_n(0)$ — предыдущее значение координаты n-го пятна; k_n — калибровочный коэффициент, связывающий геометрические размеры ФП и их взаимное расположение при изменении статического давления.

В первом приближении значения калибровочных коэффициентов k_n для всех n пятен можно считать равными, так как расстояние между шторкой и ЛФП пренебрежимо мало по сравнению с расстоянием между шторкой и источником излучения.

С целью более точного определения текущего значения давления можно усреднить результаты измерения для всех n пятен:

$$\Delta P_{\text{ст}n}(t) = \frac{\sum_n P_{\text{ст}n}(t)}{n}. \tag{3}$$

Максимальное число оптических пятен на поверхности ЛФП ограничивается лишь тем, что

— они не должны накладываться друг на друга;

— перемещение пятен по поверхности ЛФП должно быть организовано таким образом, чтобы исключить их выход за пределы ЛФП.

Согласно паспортным данным, ЛФП содержат 1000 и более элементов. Если предположить, что максимальное значение деформации УЧЭ составляет половину длины ЛФП, а область оптического пятна занимает около 20 ФП, становится очевидным, что количество щелей в шторке (оптических пятен) может достигать 20 и более.

Экспериментальные исследования. Для экспериментальной проверки функционирования и оценки метрологических характеристик разработанной конструкции датчика статического и полного давлений по критерию повышения точности и быстродействия спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 1 (*1* — микрометр, *2* — мембрана, *3* — корпус датчика, *4* — источники излучения (светодиоды), *5* — шторка, *6* — щели (прорези), *7* — ЛФП, *8* — корпус источников излучения, *9* — кронштейн крепления ЛФП, *10* — верхнее кольцо фиксации мембраны, *11* — нижнее кольцо фиксации мембраны, *12* — кронштейн крепления микрометра, *13* и *14* — штуцеры), а ее фото — на рис. 2.

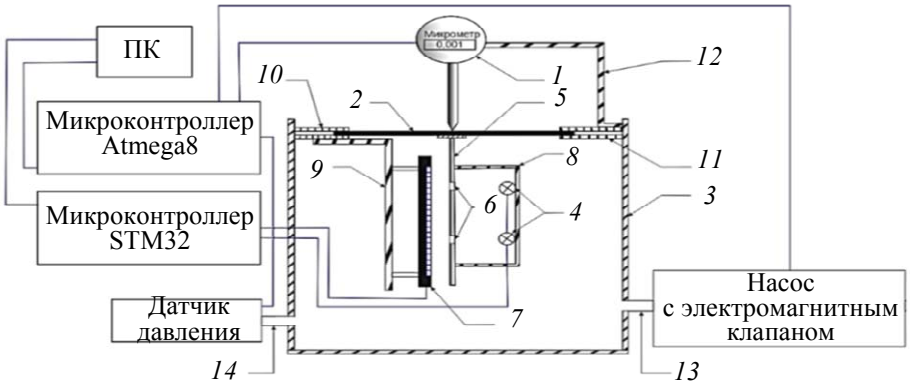

Рис. 1

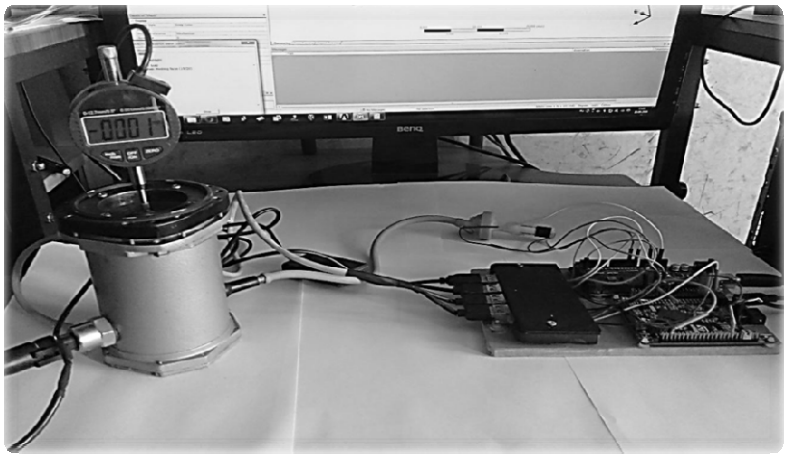

Рис. 2

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

В экспериментальной установке использовалась ЛФП типа ILX554 (рис. 1, *7*). Точность измерений с использованием подобных устройств зависит от геометрических размеров и расстояния между ФП, а также методов управления и обработки сигналов, поступающих с линейки. Чувствительная область ЛФП ILX554 содержит 2048 ФП шириной 14 мкм и высотой 56 мкм. Шаг ФП — 14 мкм. Максимальная частота опроса пикселов — 2 МГц.

Авторами разработана программа для микроконтроллера семейства STM32F4, обеспечивающая измерение линейных перемещений чувствительных элементов датчиков с использованием оптических преобразователей. Для ЛФП типа ILX554 программа обеспечивает генерацию управляющих электрических импульсов CLK и ROG. Схема формирования управляющих импульсов представлена на рис. 3.

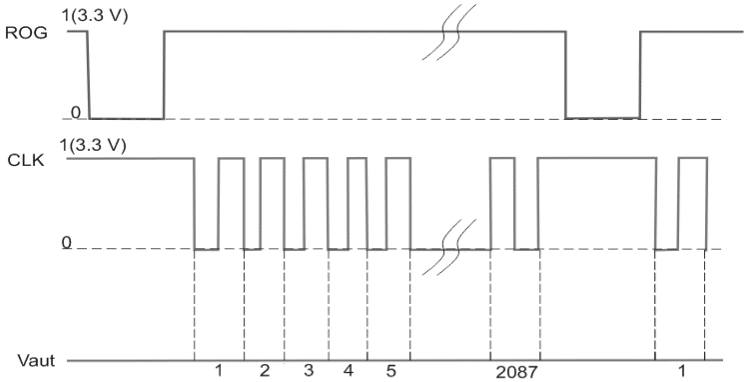

Рис. 3

Преобразование поступающих с выхода ЛФП электрических сигналов V_{aut} в цифровой код производится встроенным в микроконтроллер АЦП, с последующей его математической обработкой и выводом полученных результатов через интерфейс USART на персональный компьютер.

В соответствии с принципом функционирования ЛФП (рис. 3) последовательность управляющих электрических импульсов CLK определяет появление на выходе ЛФП ILX554 сигнала. Следовательно, частота опроса всех пикселов линейки определяется следующим условием: каждый последующий управляющий электрический импульс ROG должен появляться после прохождения 2087 импульсов CLK. Отсюда следует, что быстродействие датчика

* ГОСТ 24026-80. Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1981. 19 с.

статического и полного давлений определяется частотой следования управляющих электрических импульсов ROG. Максимальная частота обновления информации на ее выходе рассматриваемой ЛФП составляет около 950 Гц.

Оптическое излучение от источников *4* (рис. 1) падает на шторку *5*. Пройдя через *две* щели в шторке *6*, излучение формирует на ЛФП *7 два* пятна размером в несколько элементов (ФП) линейки. Результат воздействия двух пятен на поверхность линейки представлен на рис. 4 (в данном случае большему уровню оптической мощности соответствует более низкий уровень выходного сигнала).

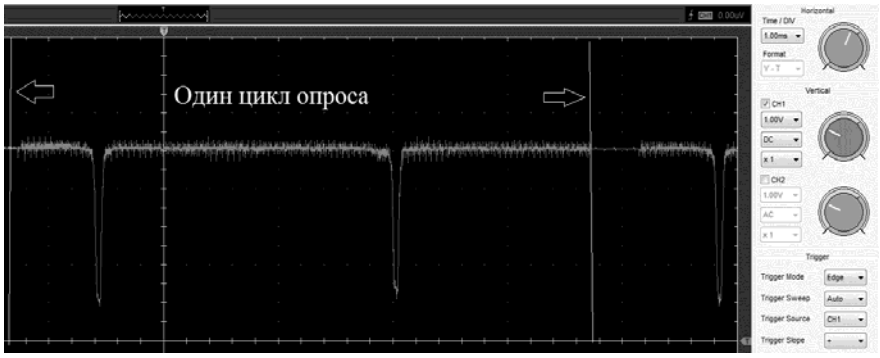

Рис. 4

В алгоритме работы микроконтроллера STM32 [20] можно условно выделить два бесконечных параллельных цикла.

1. Цикл

1.1. Запуск регулярного канала АЦП по триггеру от таймера с сохранением значений в массиве данных и использованием прямого доступа к памяти (DMA).

1.2. После каждого преобразования обработчик прерываний АЦП изменяет уровень CLK на противоположный. (Именно такой поход формирования импульсов CLK для линейки, состоящей из 2087 пикселов, позволяет получить массив данных из 4174 значений.)

1.3. После заполнения половины массива данных в обработчике прерываний DMA выставляется „флаг“ готовности результатов опроса первой половины ФП линейки.

1.4. После заполнения всего массива данных в обработчике прерываний DMA выставляется „флаг“ готовности результатов опроса второй половины ФП линейки и формируется сигнал сброса ROG.

2. Цикл

2.1. Отслеживание состояния опроса первой половины ФП линейки. Если выставлен „флаг“ готовности массива данных, то данные копируются в другую область памяти и выполняется их математическая обработка.

2.2. Если не выполняется усреднение, то осуществляется вывод полученного результата через интерфейс USART.

2.3. Отслеживание состояния опроса всех ФП линейки. Если выставлен „флаг“ готовности всего массива, то данные копируются в другую область памяти и осуществляется их математическая обработка.

2.4. Если не выполняется усреднение, то осуществляется вывод полученного результата через интерфейс USART.

2.5. Если используется усреднение результатов, то вычисляется либо среднее значение результатов, полученных после математической обработки первой и второй половины массива данных, либо усреднение результатов нескольких циклов опроса линейки.

2.6. Вывод полученного результата через интерфейс USART.

Важно отметить, что при таком подходе к обработке сигнала необходимо обеспечить перемещение оптических пятен только на своей половине ЛФП.

Математическая обработка состоит в:

1) применении (1)—(3). Перемещение жесткого центра мембраны находится как

$$\Delta\omega_0 = k_x(MAX_n(t) - MAX_n(0)), \tag{4}$$

где k_x — коэффициент, значение которого зависит от геометрических размеров ЛФП и их взаимного расположения в линейке. Так, для ЛФП типа ILX554B с размерами пиксела 14×56 мкм $k_x = 0{,}007$;

2) нахождении значения

$$x_i = \frac{\Delta\omega_0(t)}{n}. \tag{5}$$

В качестве выборки при обработке результатов эксперимента принимались значения деформации жесткого центра мембраны ω_0, полученные за один опрос ЛФП. Координаты прогиба мембраны вычислялись сразу после оцифровки и математической обработки половины опрошенных пикселов ФП, за измеренное значение x принимался сигнал, переданный через интерфейс USART на ПК.

Далее последовательность значений $x_1, x_2, ..., x_m$, полученных в результате эксперимента (рис. 5), будем рассматривать как совокупность распределенных независимых случайных величин, представляющих собой m экземпляров одного и того же признака X.

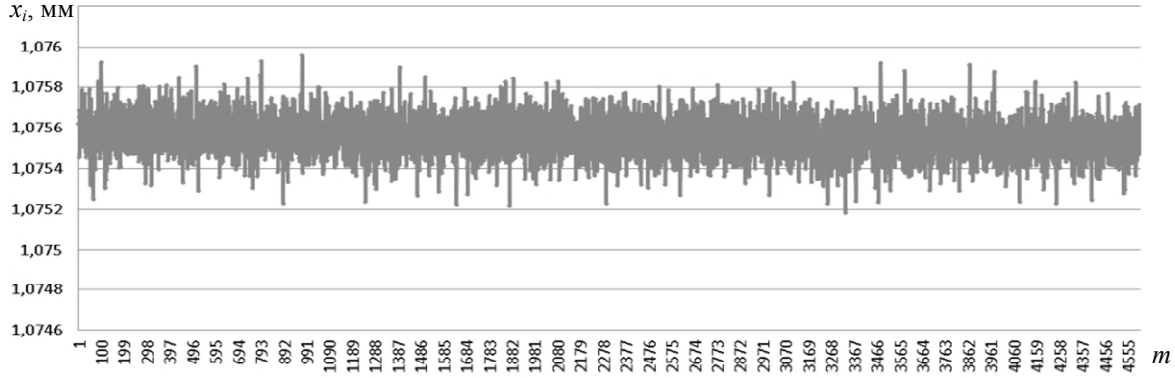

Рис. 5

Статистический анализ выполнен с использованием программного комплекса MATLAB [21] в соответствии с рекомендациями действующих стандартов*.

В таблице представлены результаты экспериментов, которые отражают картину рассеивания значений случайной величины x относительно ее математического ожидания.

Параметр	Эксперимент			
	1	2	3	4
Усреднение выборок/ частота измерений	1/400	2/200	4/100	8/50
Минимальное значение, мкм	600,021	799,701	399,815	99,906
Максимальное значение, мкм	601,399	800,330	400,175	100,160
Размах выборок, мкм	1,378	0,629	0,360	0,254
Математическое ожидание, мкм	600,637	799,987	399,992	100,027
Среднеквадратическое отклонение, мкм	0,19	0,089	0,051	0,036

Для подтверждения статистической устойчивости результатов измерений выполнена проверка принадлежности их к нормальному закону распределения. Так как $m > 50$, для проверки использован критерий χ^2 К. Пирсона. В результате анализа полученных результатов принимается нулевая гипотеза о нормальном распределении для всех четырех экспериментов.

* ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2013. 23 с.

На рис. 6 представлена гистограмма плотности вероятности с наложением теоретической функции нормального распределения.

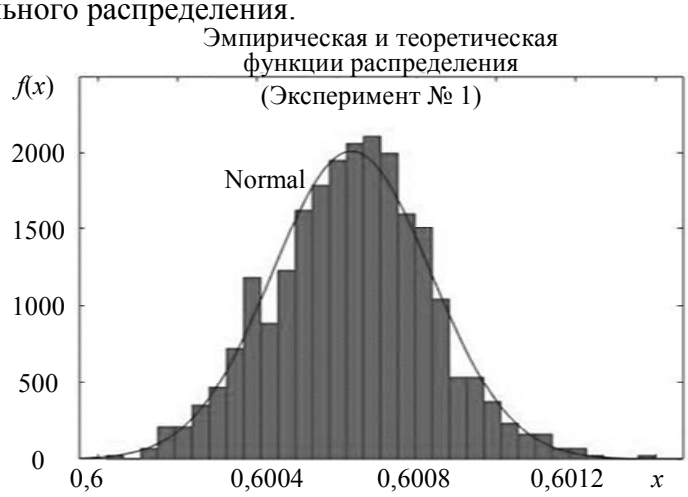

Рис. 6

Анализ полученных результатов позволяет сделать выводы:

— предлагаемая конструкция датчика аэрометрических давлений обеспечивает высокую точность определения величины деформации (диапазон изменения которой сведен к минимуму) упругого чувствительного элемента. Высокое быстродействие измерительной системы в дальнейшем позволит применять алгоритмы, обеспечивающие учет и компенсацию различного рода дестабилизирующих факторов (помех, вибраций, ударных воздействий и т.п.), возникающих в процессе эксплуатации летательных аппаратов (ЛА);

— малые энергопотребление, габариты и масса предлагаемой конструкции позволяют использовать датчик в составе интегральных систем резервных приборов ЛА;

— согласно тенденции развития беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с электрической силовой установкой, применение датчиков давлений на основе ЛФП для вычисления высотно-скоростных параметров полета повысит энергетическую живучесть, уменьшит габаритные размеры и массу БПЛА.

Заключение. Представлен оригинальный аэрометрический датчик давлений на базе ЛФП, который может быть использован в системе воздушных сигналов летательного аппарата. Высокая чувствительность ЛФП позволяет минимизировать рабочий ход упругого чувствительного элемента (мембраны), что, в свою очередь, существенно уменьшает значения упругих несовершенств материала мембраны. Предложен способ ветвления исходной информации при определении статического и полного давлений в датчиках, использующих оптический метод преобразования информации.

Экспериментальные данные подтверждают высокие точность определения величины деформации упругого чувствительного элемента и быстродействие системы измерения давления. Таким образом, предлагаемые решения обеспечивают получение минимальных значений погрешности при вычислении высотно-скоростных параметров полета летательного аппарата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фрайден Дж.* Современные конструкции. Справочник. М.: Техносфера, 2006. 592 с.

2. *Auersvald J., Draxler K., Sipo M.* A low-cost aerometric sensor system for sport aviation // J. of Electrical engineering. 2019. Vol. 70, N 4. P. 295—302.

3. *Auersvald J., Draxler K.* Aerometric system for general aviation // Intern. Conf. on Military Technologies (ICMT). Brno, Czech Republic, 2015. P. 1—6.

4. *Алмазов В. В., Макаров Н. Н., Сорокин М. Ю.* Оценка характеристик аэрометрических систем // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2017. Т. 19, № 1(2). С. 385—390.

5. *Philippe J., de Paolis M. V., Arenas-Buendia C.* et al. Passive and Chipless Packaged Transducer for Wireless Pressure Measurement // Sensors and Actuators A: Physical. Elsevier, 2018. P. 753—762.

6. Пат. РФ 2653596, МПК G01L Датчик аэрометрических давлений / *И. В. Антонец, Г. М. Горшков, Р. А. Борисов.* Заяв. 2017111362, 04.04.2017, опубл. 11.05.2018, бюл. № 14.

7. Пат. РФ 2702808, МПК G017/08, G0111/02. Датчик аэрометрических давлений / *И. В. Антонец, Р. А. Борисов, Г. М. Горшков.* Заяв. 2018131388, 30.08.2018, опубл. 11.10.2019, бюл. № 29.

8. Пат. РФ 2684683, МПК G017/08, G0111/02. Датчик аэрометрических давлений / *И. В. Антонец, Р. А. Борисов, Г. М. Горшков, А. А. Черторийский*. Заяв. 2017139645, 14.11.2017, опубл. 11.04.2019, бюл. № 11.

9. Пат. РФ 2712777, МПК G01L7/02, G01L11/02. Датчик аэрометрических давлений / *И. В. Антонец, Р. А. Борисов, А. А. Черторийский*. Заяв. 2019114581, 13.05.2019, опубл. 31.01.2020, бюл. № 4.

10. *Лебедько Е. Г., Зверева Е. Н., Нгуен Ву Тунг*. Высокоточное определение углового положения точечного источника излучения с ПЗС-линейками // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15, № 3. С. 398—404.

11. *Зверева Е. Н., Лебедько Е. Г.* Анализ точности определения временного положения сигнала для систем с многоэлементными фотоприемниками // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 7. С. 555—560.

12. *Зверева Е. Н., Лебедько Е. Г., Тунг Ф. Х.* Потери информации при преобразовании поля в оптическом тракте оптико-электронного прибора с многоэлементными приемниками // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 11. С. 7—10.

13. *Dereniak E. L., Crow D. G.* Optical radiation detectors. NY: Wiley, 1984.

14. *Соломатин В. А.* Дискретизация пространства в оптико-электронных системах с мозаичным угловым полем. // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 5. С. 57—61.

15. *Воронин А. А., Герасимов В. А., Кострин Д. К.* Модернизация приборов и методики спектральной идентификации пород древесины // Биотехносфера. 2013. Т. 57, № 3. С. 16—20.

16. *Кострин Д. К., Ухов А. А.* Метод контроля пространственного распределения световых и цветовых характеристик излучения светодиодов // Контроль. Диагностика. 2014. № 2. С. 65—68.

17. *Ухов А. А., Кострин Д. К.* Оптимизация системы регистрации многоканального оптического спектрометра // Изв. СПбГЭТУ „ЛЭТИ“. 2013. № 4. С. 8—12.

18. *Кострин Д. К., Ухов А. А.* Интерференция в поверхностном слое и метрологические параметры спектрометров с ПЗС-фотоприемниками // Датчики и системы. 2013. № 5. С. 13—15.

19. *Налимов В. В., Голикова Т. И.* Логические основы планирования эксперимента. М.: Металлургия, 1980. 152 с.

20. Св. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2019612079. Программа управления микроконтроллерами семейства STM32F4, обеспечивающая измерение линейных перемещений чувствительных элементов датчиков, использующих оптические преобразователи / *Р. А. Борисов, И. В. Антонец*. 09.10.2019.

21. *Ахметова Ф. Х., Ласковая Т. А., Чигирева О. Ю.* Методика обработки результатов эксперимента с помощью системы Matlab в курсе „Математическая статистика“ // Инженерный вестник. 2016. № 4. С. 1001—1011.

Сведения об авторах

Руслан Андреевич Борисов — ООО „СТЦ“, летно-испытательный комплекс по инженерно-авиационному обеспечению; заместитель начальника; Email: ruslanbor82@yandex.ru

Иван Васильевич Антонец — д-р техн. наук, профессор; Ульяновский институт гражданской авиации им. главного маршала авиации Б. П. Бугаева, кафедра авиационной техники

Алексей Аркадьевич Черторийский — канд. техн. наук; УФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН; заместитель директора по научной работе

Александр Викторович Кротов — аспирант; Санкт-Петербургский электротехнический университет, кафедра фотоники

Поступила в редакцию
03.06.2020 г.

Ссылка для цитирования: *Борисов Р. А., Антонец И. В., Черторийский А. А., Кротов А. В.* Система измерения статического и полного давлений, использующая ветвление исходной информации на входе вторичного преобразователя // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 9. С. 813—822.

STATIC AND FULL PRESSURE MEASUREMENT SYSTEM USING INITIAL SIGNAL SPLITTING AT THE SECONDARY CONVERTER INPUT

R. A. Borisov[1], I. V. Antonec[2], A. A. Chertoriyskiy[3], A. V. Krotov[4]

[1]*Special Technological Center LLC, 195220, г. St. Petersburg, Russia*
E-mail: ruslanbor82@yandex.ru

[2]*Ulyanovsk Institute of Civil Aviation, 432071, Ulyanovsk, Russia*

[3]*V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Ulyanovsk Branch, 432011, Ulyanovsk, Russia*

[4]*St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197376, St. Petersburg, Russia*

Pressure sensors are widely used in aircraft to measure the static and full pressure of the oncoming air flow as a primary information in on-board air signal systems. In the data system, the measurement results are recalculation automatically to determine the flight altitude, speed, true air speed, Mach number, and vertical speed, according to well-known algorithms. A sensor of the full and static pressure with elastic membrane sensing element is presented. The membrane deformation is measured by an optical system, consisting of radiation source and position-sensitive photodetector based on the photo-detector line, installed opposite each other, with a curtain attached to the membrane center and placed between them. The membrane deformation displaces the optical spots formed on the photodetector surface by the passed through slits in the curtain. A novelty of the proposed sensor consists in the use of splitting of the initial information achieved by application of shutter with n slits forming n light spots on the photodetector, and these spots are displaced depending on the change in the measured pressure. Thanks to this innovation, it is possible to obtain n independent values of the measured pressure for one cycle of sensor line polling and to increase the measurement accuracy by averaging the results. The absence of additional elements on the curtains (emitters and light detector) improves the dynamic characteristics of the sensor. The proposed solution made it possible to minimize the influence of external disturbing factors (in particular, the aircraft vibrations) and to increase the accuracy and speed of the pressure sensor. Experiments carried out using a laboratory facility have confirmed the high level of the pressure sensor metrological performance.

Keywords: pressure sensor, line of photoelectronic receivers, sensor element, curtain with slits, optical spot

REFERENCES

1. Fraden J. *Handbook of Modern Sensors*, NY, Springer, 2003.
2. Auersvald J., Draxler K., Sipo M. *Journal of Electrical engineering*, 2019, no. 4(70), pp. 295–302.
3. Auersvald J., Draxler K. *International Conference on Military Technologies (ICMT)*, Brno, Czech Republic, 2015, pp. 1–6.
4. Almazov V.V., Makarov N.N., Sorokin M.Yu. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2017, no. 1(19), pp. 385–390. (in Russ.)
5. Philippe J., de Paolis M.V., Arenas-Buendia C. et al. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, 2018, pp. 753–762.
6. Patent RU 2653596, G01L7/00, *Datchik aerometricheskikh davleniy* (Aerometric Pressure Sensor), Antonets I.V. Gorshkov G.M., Borisov R.A., Patent application no. 2017111362, Priority 04.04.2017. Published 11.05.2018, Bulletin 14. (in Russ.)
7. Patent RU 2702808, G01L7/08, G01L11/02, *Datchik aerometricheskikh davleniy* (Aerometric Pressure Sensor), Antonets I.V., Borisov R.A., Gorshkov G.M., Patent application no. 2018131388, Priority 30.08.2018, Published 11.10.2019, Bulletin 29. (in Russ.)
8. Patent RU 2684683, G01L7/08, G01L11/02, *Datchik aerometricheskikh davleniy* (Aerometric Pressure Sensor), Antonets I.V., Borisov R.A., Gorshkov G.M., Chertoriyskiy A.A., Patent application no. 2017139645, Priority 14.11.2017, Published 11.04.2019, Bulletin 11. (in Russ.)
9. Patent RU 2712777, G01L7/02, G01L11/02, *Datchik aerometricheskikh davleniy* (Aerometric Pressure Sensor), Antonets I.V., Borisov R.A., Chertoriyskiy A.A., Patent application no. 2019114581, Priority 13.05.2019, Published 31.01.2020, Bulletin 4. (in Russ.)
10. Lebedko E.G., Zvereva E.N., Nguyen Vu Tung, *Scientific and Technical Journal of Information Tech-*

nologies, Mechanics and Optics, 2015, no. 3(15), pp. 398–404. (in Russ.)
11. Zvereva E.N., Lebedko E.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 7(58), pp. 555–560. (in Russ.)
12. Zvereva E.N., Lebedko E.G., Tung V.T. *Journal of Instrument Engineering*, 2013, no. 11(56), pp. 7–10.
13. Dereniak E.L., Crow D.G. *Optical Radiation Detectors*, NY, Wiley, 1984.
14. Solomatin V.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2010, no. 5(53), pp. 57–61. (in Russ.)
15. Voronin A.A., Gerasimov V.A., Kostrin D.K. *Biotechnosfera*, 2013, no. 3(57), pp. 16–20. (in Russ.)
16. Kostrin D.K., Ukhov A.A. *Kontrol'. Diagnostika* (Testing. Diagnostics), 2014, no. 2, pp. 65–68. (in Russ.)
17. Ukhov A.A., Kostrin D.K. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2013, no. 4, pp. 8–12.
18. Kostrin D.K., Ukhov A.A. *Datchiki & Systemi* (Sensors & Systems), 2013, no. 5, pp. 13–15. (in Russ.)
19. Nalimov V.V, Golikova T.I. *Logicheskiye osnovy planirovaniya eksperimenta* (Logical Foundations of Experiment Design), Moscow, 1980, 152 p. (in Russ.)
20. Certificate on the state registration of the computer programs 2019612079, *Programma upravleniya mikrokontrollerami semeystva STM32F4, obespechivayushchaya izmereniye lineynykh peremeshcheniy chuvstvitel'nykh elementov datchikov, ispol'zuyushchikh opticheskiye preobrazovateli* (Control Program for Microcontrollers of the STM32F4 Family, Providing Measurement of Linear Displacements of Sensitive Elements of Sensors Using Optical Converters), Borisov R.A., Antonets I.V., Published 09.10.2019. (in Russ.)
21. Akhmetova F.Kh., Laskovaya T.A., Chigirova O.Yu. *Inzhenernyy vestnik*, 2016, no. 4, pp. 1001–1011. (in Russ.)

Data on authors

Ruslan A. Borisov — Special Technological Center LLC, Flight Test Complex for Aviation Engineering; Deputy Chief;
Email: ruslanbor82@yandex.ru

Ivan B. Antonets — Dr, Sci., Professor; Ulyanovsk Institute of Civil Aviation, Department of Aviation Technology

Alexey A. Chertoriyskiy — PhD; V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Ulyanovsk Branch; Deputy Director for Research

Alexander V. Krotov — Post-Graduate Student; St. Petersburg Electrotechnical University, Department of Photonics

For citation: Borisov R. A., Antonets I. V., Chertoriyskiy A. A., Krotov A. V. Static and full pressure measurement system using initial signal splitting at the secondary converter input. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 9. P. 813—822 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-9-813-822