
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.2:621.826
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-222-227

ДАТЧИК СТАТИЧЕСКОГО И ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙКИ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЕМНИКОВ

И. В. АНТОНЕЦ¹, Р. А. БОРИСОВ²

¹Ульяновский институт гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б. П. Бугаева,
432071, Ульяновск, Россия

²АО „Санкт-Петербургская авиаремонтная компания“, 198206, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: ruslanbor82@yandex.ru

Рассматриваются принципы разработки датчика статического и полного давления, основанные на использовании оптического метода преобразования информации. Существенной особенностью предлагаемого датчика является применение в качестве вторичных преобразователей оптических ПЗС-линеек, с помощью которых возможно осуществлять преобразование пространственного распределения светового потока в электрический сигнал. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процедур обработки информации, представлены математические модели и алгоритмы управления микроконтроллером, который обеспечивает при измерении линейных перемещений центра мембраны и обработку сигналов с выхода оптической линейки при воздействии на нее светового пятна. Предлагаемый датчик давления, по сравнению с аналогами, имеет существенно меньшие массогабаритные параметры, а энергопотребление снижено более чем на порядок.

Ключевые слова: датчик, статическое давление, полное давление, мембрана, математическая модель, алгоритм, оптическая линейка, источник светового потока

Введение. Структурная схема аэрометрических датчиков давления содержит первичный преобразователь давления, в качестве которого, как правило, используется упругий чувствительный элемент (УЧЭ), и схему вторичного преобразования перемещений упругих ЧЭ в электрический сигнал. Вне зависимости от того, какой тип преобразователя сигнала используется, — деформационный (силовой), вибрационный (частотный) или струйно-конвективный, точность регистрации давления упругим чувствительным элементом будет ограничивать и точность датчика [1] в целом, какой бы высокой ни была точность дальнейших преобразований. Известно [2], что погрешность, вызванная нелинейностью характеристики упругого ЧЭ, мультипликативная температурная погрешность, погрешность, обусловленная воздействием линейных ускорений, временная погрешность и другие могут быть уменьшены путем минимизации деформации упругого ЧЭ. Наиболее широкое распространение, например, в цифровых системах воздушных сигналов [3, 4] получили частотные датчики давления, обладающие относительно низким порогом чувствительности и высокой точностью измерений. Вместе с тем в частотных датчиках давления используется относительно сложная схема автогенератора в цепи обратной связи, обеспечивающей контроль температуры резонатора.

К недостаткам следует отнести влияние вибраций на точность измерений, относительно большие массогабаритные параметры и энергопотребление.

Принцип работы датчика. В настоящей статье представлен датчик статического и полного давления, принцип действия которого основан на использовании оптического метода преобразования информации на базе фотоприемных ПЗС-линеек [5, 6]. Принцип измерения деформации упругой мембраны в предлагаемом датчике давления заключается в последовательном преобразовании перемещения светового пятна по поверхности оптической линейки в заряды пикселей, которые хранятся в ячейках ПЗС-структуры и при генерации управляющих импульсов определяют деформацию в виде цифрового кода на выходе линейки.

На рис. 1 представлена схема [7] конструкции аэрометрического датчика давления, в котором в качестве вторичного преобразователя информации используются оптические линейки. В корпусе 1 датчика имеются два отверстия, через которые на внешние поверхности мембран 2 и 3 подается соответственно статическое ($P_{ст}$) и полное ($P_{п}$) давление. К стойке 4 прикреплены источник излучения 5 и две шторки 7 с прорезями 8, а фотоприемные линейки 6 крепятся к внутренним поверхностям мембран 2 и 3. В процессе работы датчика свет от источника излучения 5 через прорези 8 шторок 7 попадает на фотоприемные линейки 6. Деформации мембран, вызванные изменениями статического и полного давления, приводят к смещению оптических линеек, что, в свою очередь, меняет цифровой код на их выходе.

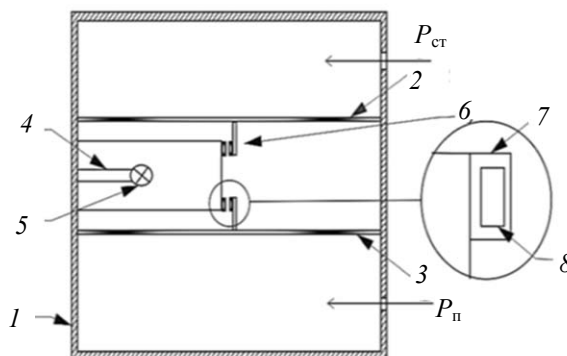


Рис. 1

Использование оптической линейки как вторичного преобразователя во многом предопределило технические характеристики датчика давления и его элементов:

- высокая чувствительность, определяемая микронными зазорами между пикселями, позволяет минимизировать деформацию мембран и, следовательно, уменьшить влияние их неоднородности на точность измерений;

- использование светового пятна для фиксации перемещения упругого ЧЭ позволяет значительно снизить влияние нестабильности источников питания, а также вибрации и ударов на точность измерений;

- бесконтактный способ съема информации и работа информационной системы в условиях вакуума значительно повышают эффективность процессов измерения;

- обеспечивается снижение энергопотребления более чем на порядок и практически двукратное уменьшение массогабаритных параметров датчика.

На базе известной методики приближенного статического расчета мембран [1] авторами разработана [8, 9] методика расчета упругого чувствительного элемента, принципиальным отличием которой является учет технических характеристик вторичного преобразователя, в частности порога чувствительности и прогиба центра мембраны в координаты пикселя оптической линейки. Кроме того, разработаны алгоритм расчета упругого чувствительного элемента и реализующая его программа [10] на языке программирования C++.

Цифровая обработка сигнала. Для измерения деформации упругих чувствительных элементов датчика давления разработана [11] программа управления микроконтроллерами

семейства STM32F4, используемыми в качестве источника информации оптические преобразователи. Программа обеспечивает генерацию управляющих электрических импульсов для оптической линейки типа ILX554B и преобразование поступающих электрических сигналов в цифровой код с последующей его математической обработкой и выводом полученных результатов через интерфейс USART. Использование данной программы позволяет существенно повысить точность измерений деформации мембран датчика давления за счет того, что при опросе одного пиксела оптической линейки аналогово-цифровой преобразователь совершает двойное преобразование. В ходе комплексных экспериментальных исследований работы датчика давления частота опроса состояний пикселов оптической линейки варьировалась от 40 до 200 Гц. В таблице представлены результаты эксперимента по оценке точности измерения перемещения центра мембраны при использовании оптического метода считывания информации.

Частота измерений, Гц	Кратность усреднения выборок	Абсолютная погрешность измерения, мкм	Среднеквадратическое отклонение, мкм
200	Нет	0,84	0,193
100	2	0,46	0,102
66	3	0,41	0,094
50	4	0,21	0,089
40	5	0,20	0,075

На рис. 2 представлены сравнительные результаты по определению прогибов центра мембраны (ω_0), полученные с использованием программного комплекса ANSYS (кривая 1) [12, 13], а также аналитическим и экспериментальными методами (кривые 2 и 3 соответственно). Погрешности определения прогиба, полученные аналитическим и экспериментальными методами, не превышают 15 %, что следует признать удовлетворительным. Проверка сходимости результатов численного моделирования характеристик упругих чувствительных элементов для статического и полного давления осуществлялась с использованием экспериментальных данных, опубликованных в работе [1]. Сравнительная погрешность результатов силового расчета с использованием программного комплекса ANSYS и известных экспериментальных данных не превысила 9 %.

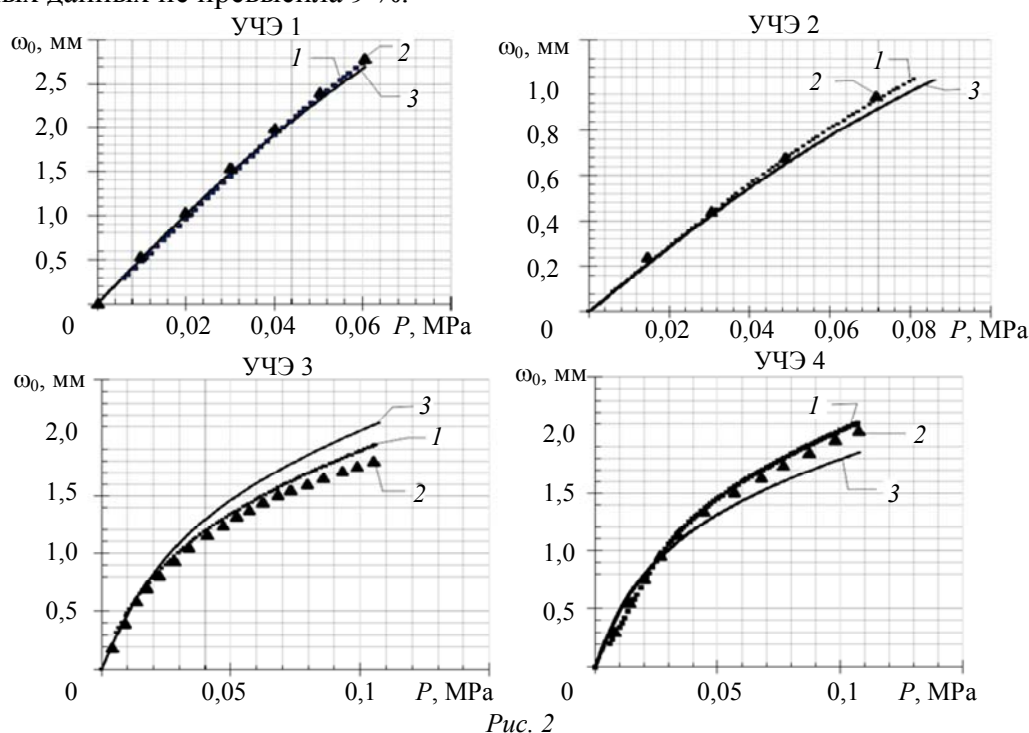


Рис. 2

Конструкция датчика давления. На основе известных рекомендаций [3, 14], проведенных расчетов и исследований разработана конструкция датчика статического и полного давления. Корпус 1 датчика (рис. 3) выполнен в виде цилиндра, причем герметизация его отверстий по периметру осуществляется с помощью крышек 2 и 3. В центре крышек также герметично закреплены штуцера 4 и 5 для подвода статического и полного давления, выполняющие, кроме того, функцию крепежных элементов стоек основания 6, имеющего крепежные отверстия. На боковой стенке корпуса установлен штепсельный разъем 7 для коммутации элементов вторичного преобразователя с внешними устройствами.

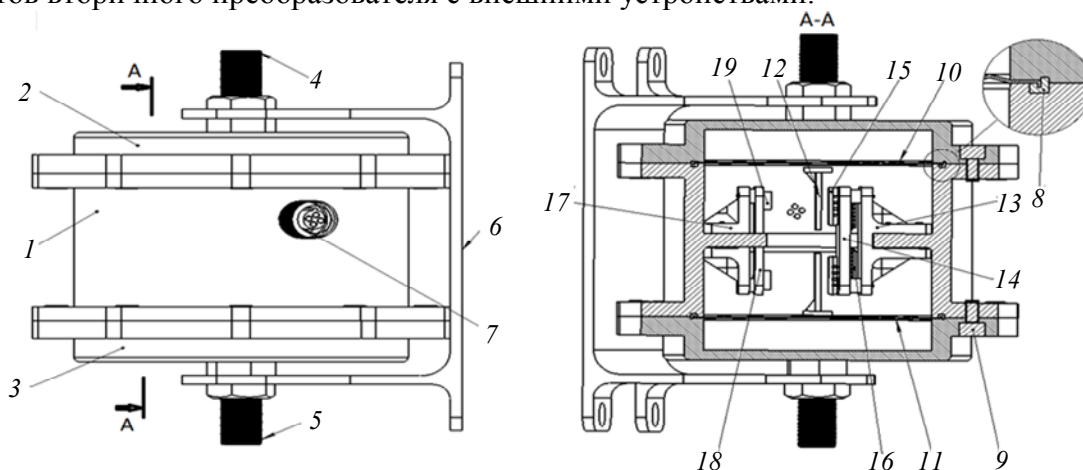


Рис. 3

Корпус датчика имеет кольцевой прилив, повышающий жесткость конструкции и одновременно являющийся базовой поверхностью для установки элементов вторичного преобразователя давления. Кроме того, корпус с двух сторон имеет фланцы крепления, технологические канавки и уплотнительные кольца 8 для фиксации упругих элементов 10 и 11 при герметизации корпуса крышками с помощью стяжных винтов 9. В полости, образованной в корпусе между упругими мембранами, создается вакуум. По аналогии с типовой технологией изготовления anerоидных коробок, в боковой стенке корпуса датчика высверливается отверстие диаметром 0,3 мм; после сборки датчик сушат в термобарокамере при остаточном давлении 6,65 кПа, а отверстие заделывается с помощью специального приспособления. К геометрическим центрам мембран жестко крепятся шторки 12 с прорезями. Между шторками симметрично установлены: с одной стороны — закрепленный на кронштейне 13 электронный модуль 14, основными элементами которого являются оптическая линейка 15 и микроконтроллер 16, а с другой стороны — закрепленная на кронштейне 17 плата 18, включающая в себя источники излучения 19 и элементы стабилизации и коммутации.

Экспериментальные исследования показали, что разработанная конструкция датчика статического и полного давления обеспечивает его функционирование с требуемыми техническими характеристиками не только при воздействии климатических, механических и других факторов, характерных при эксплуатации авиационных приборов, но и в более жестких условиях.

Заключение. Использование оптических линеек в качестве вторичных преобразователей разработанного датчика давления позволяет минимизировать амплитуду деформаций упругих элементов и исключить целый ряд погрешностей, таких как остаточная деформация, нелинейность, температурные колебания, а также избежать воздействия линейных ускорений, вибраций, изменения свойств материала с течением времени и т.п. Бесконтактный способ съема информации и работа информационной системы в условиях вакуума позволяют значительно повысить эффективность процедур измерения статического и полного давления в условиях воздействия внешних и внутренних помех при решении задач определения высотно-скоростных параметров в навигационных системах подвижных объектов. Перечисленные

характеристики выгодно отличают разработанный датчик давления от известных датчиков аналогичного назначения, что позволяет говорить о положительных перспективах его промышленной реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1980. 230 с.
2. Феликсон Е. И. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1977. 311 с.
3. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
4. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов: Учеб. пособие / Г. И. Клюев, Н. Н. Макаров, В. М. Солдаткин, И. П. Ефимов. Ульяновск: УлГТУ, 2005. 509 с.
5. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника: Учеб. пособие. СПб: БХВ-Петербург, 2004. 800 с.
6. Справочник конструктора оптико-механических приборов / В. А. Панов, М. Я. Кругер, В. В. Кулагин и др.; Под общ. ред. В. А. Панова. Л.: Машиностроение, 1980. 742 с.
7. Пат. 2653596 РФ, МПК G01L 7/00. Датчик аэрометрических давлений / И. В. Антонец, Г. М. Горшков, Р. А. Борисов. Заявл. 04.04.2017, опубл. 11.05.2018. Бюл. № 14.
8. Антонец И. В., Борисов Р. А. Разработка и исследование датчика аэрометрических давлений на основе упругой мембраны и фотоприемной линейки // История, современность, перспективы развития: Сб. материалов II Междунар. заочной науч.-практ. конф. БГАА, 9—10 ноября 2017 г., Минск. С. 119—120.
9. Антонец И. В., Борисов Р. А. Определение характеристики упругого чувствительного элемента для аэрометрического датчика полного давления // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: Сб. тез. докл. М.: ИД Академии Жуковского, 2018. С. 188.
10. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ, № 2019663045. Программа для расчета упругих чувствительных элементов датчиков аэрометрических давлений / Р. А. Борисов, И. В. Антонец. Дата регистрации 09.10.2019 г.
11. Свид. 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. Дата регистрации 11.02.2019 г.
12. Денисов М. А. Компьютерное проектирование. ANSYS: Учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2014. 77 с.
13. Иванов Д. В., Доль А. В. Введение в ANSYS Workbench: Учеб.-метод. пособие. Саратов: Амирит, 2016. 56 с.
14. Тайманов Р. Е., Сапожникова К. В. Проблемы создания нового поколения интеллектуальных датчиков // Датчики и системы. 2004. № 11. С. 50—58.

Сведения об авторах

Иван Васильевич Антонец

— д-р техн. наук, профессор; Ульяновский институт гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, кафедра авиационной техники; E-mail: iv.antonec@yandex.ru

Руслан Андреевич Борисов

— АО „Санкт-Петербургская авиаремонтная компания“, отдел модернизации и переоборудования вертолетов; начальник конструкторского бюро; E-mail: ruslanbor82@yandex.ru

Поступила в редакцию
24.01.2020 г.

Ссылка для цитирования: Антонец И. В., Борисов Р. А. Датчик статического и полного давления на основе линейки фотоэлектронных приемников // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 3. С. 222—227.

STATIC AND TOTAL PRESSURE SENSOR BASED ON THE LINE OF PHOTOELECTRONIC RECEIVERS

I. V. Antonets¹, R. A. Borisov²¹Ulyanovsk Civil Aviation Institute, 432071, Ulyanovsk, Russia² St. Petersburg Aircraft Repair Company JSC, 198206, St. Petersburg, Russia
E-mail: ruslanbor82@yandex.ru

Principles of development of static and full pressure sensor based on the use of an optical method of information conversion, is considered. A significant novelty of the proposed sensor is the use of optical CCD arrays as secondary converters, with which it is possible to convert the spatial distribution of the light flux into an electric signal. Results of theoretical and experimental studies of information processing procedures are presented, mathematical models and algorithms for microcontroller that provides for measuring linear displacements of the membranes center and processing signals from the output of the photodetector line when exposed to a light spot are presented. The proposed pressure sensor, in comparison with its analogues, has significantly smaller mass and size parameters, and energy consumption is reduced by more than an order of magnitude.

Keywords: sensor, static pressure, total pressure, membrane, mathematical model, algorithm, optical ruler, light flux source

REFERENCES

1. Andreeva L.E. *Uprugiy elementy priborov* (Elastic Elements of Devices), Moscow, 1980, 230 p. (in Russ.)
2. Felikson E.I. *Uprugiy elementy priborov* (Elastic Elements of Devices), Moscow, 1977, 311 p. (in Russ.)
3. Fraden J. *Handbook of Modern Sensors*, Springer, 2015, 758 p.
4. Klyuyev G.I., Makarov N.N., Soldatkin V.M., Efimov I.P. *Izmeriteli aerodinamicheskikh parametrov letatel'nykh apparatov* (Meters of Aerodynamic Parameters of Aircraft), Ulyanovsk, 2005, 509 p. (in Russ.)
5. Ugryumov E.P. *Tsifrovaya skhemotekhnika* (Digital Circuitry), St. Petersburg, 2004, 800 p. (in Russ.)
6. Panov V.A., Kruger M.Ya., Kulagin V.V. et al. *Spravochnik konstruktora optiko-mekhanicheskikh priborov* (Handbook of the Designer of Optical-Mechanical Devices), Leningrad, 1980, 742 p. (in Russ.)
7. Patent RU 2653596, G01L 7/00, *Datchik aerometricheskikh davleniy* (Air Pressure Sensor), I.V. Antonets, G.M. Gorshkov, R.A. Borisov, Priority 04.04.2017, Published 11.05.2018, Bulletin 14. (in Russ.)
8. Antonets I.V., Borisov R.A. *Istoriya, sovremennost', perspektivy razvitiya* (History, Modernity, Development Prospects), Materials of the II Intern. correspondence scientific and practical conf. BGAA, 9–10 November 2017, Minsk, pp. 119–120. (in Russ.)
9. Antonets I.V., Borisov R.A. *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva* (Civil Aviation at the Present Stage of the Development of Science, Technology and Society), Collection of Abstracts, Moscow, 2018, pp. 188.
10. Certificate on the state registration of the computer programs 2019663045, *Programma dlya rascheta uprugikh chuvstvitel'nykh elementov datchikov aerometricheskikh davleniy* (The Program for Calculating the Elastic Sensitive Elements of Air Pressure Sensors), Borisov R.A., Antonets I.V., Priority 09.10.2019. (in Russ.)
11. 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* (The STM32F4 Family Microcontroller Control Program, which Measures the Linear Displacements of Sensitive Sensors Using Optical Converters), Borisov R.A., Antonets I.V., Priority 11.02.2019. (in Russ.)
12. Denisov M.A. *Komp'yuternoye proyektirovaniye. ANSYS* (Computer Design. ANSYS), Ekaterinburg, 2014, 77 p. (in Russ.)
13. Ivanov D.V., Dol' A.V. *Vvedeniye v ANSYS Workbench* (Introduction to ANSYS Workbench), Saratov, 2016, 56 p. (in Russ.)
14. Taimanov R.E., Sapozhnikova K.V. *Datchiki & Systemi* (Sensors & Systems), 2004, no. 11, pp. 50–58. (in Russ.)

Data on authors

- Ivan V. Antonets** — Dr. Sci., Professor; Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Department of Aviation Technique, E-mail: iv.antonec@yandex.ru
- Ruslan A. Borisov** — St. Petersburg Aircraft Repair Company JSC, Department of Helicopters Modernization and Re-equipment, Head of the Design Bureau; E-mail: ruslanbor82@yandex.ru

For citation: Antonets I. V., Borisov R. A. Static and total pressure sensor based on the line of photoelectronic receivers. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 3. P. 222–227 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-222-227