

УДК 629.7

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ БПЛА

©2011 Г. И. Леонович<sup>1</sup>, С. А. Матюнин<sup>1</sup>, А. И. Глушков<sup>1</sup>,  
Н. А. Ливочкина<sup>2</sup>, В. И. Соловьёв<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup>ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ «Прогресс», г. Самара

Трудности оптимизации силовой установки и комплексирования бортовой аппаратуры связаны с габаритами БПЛА и функциональной сложностью комплектующих. В наибольшей степени они проявляются при малых размерах аппарата. Вместе с тем современные технологии позволяют создавать миниатюрные мощные процессоры, сверхлегкие волоконно-оптические датчики и бортовые сети на их основе. Применение сенсорных кондукционных покрытий существенно улучшает чувствительность и расширяет динамический диапазон волоконно-оптических датчиков, в частности, датчиков давления для системы управления силовой установкой.

*Беспилотный летательный аппарат, датчик давления, сенсорное покрытие, оптический волновод.*

В настоящее время одним из перспективных направлений развития авиации и космонавтики, наземных и водных боевых средств является создание автономных мобильных платформ (АМП). К основным критическим проблемам АМП относятся: эффективность и экономичность двигательной установки, обеспечение максимально возможной незаметности как самой платформы, так и внешних признаков её функционирования, устойчивость к внешним силовым и информационным воздействиям [1-3].

Трудности оптимизации силовой установки и комплексирования бортовой аппаратуры во многом связаны с габаритами АМП. Например, для малогабаритных БПЛА с ГТД в наибольшей степени они проявляются для исполнительных и телемеханических устройств и элементов систем автоматического управления (САУ) силовой установкой. Гидромеханические САУ предъявляют высокие требования к точности изготовления элементов (золотники, жиклеры, поршни и др.). Сложность в изготовлении гидромеханических узлов малой размерности приводит к росту по-

грешностей регулирования и снижению надёжности всей системы в целом при достаточно высоких затратах на производство комплектующих. Поэтому на двигателях с расходом воздуха меньше 0,5 кг/с сейчас реализуются электронно-гидравлические и полностью электронные схемы управления [1].

Уменьшение размеров проточной части ГТД требует соответствующей минимизации средств измерения параметров двигателя (приёмники полного и статического давления, термодатчики). Кроме того, стараются уменьшать общее количество точек измерения до 15-20, в том числе для снижения влияния измерительных средств на газодинамику проточной части. С другой стороны, увеличение точек съёма данных способствует реализации более эффективных алгоритмов управления двигателем.

Современные технологии позволяют существенно снижать массогабаритные показатели САУ при увеличении количества исполнительных и измерительных элементов. В частности, миниатюрные волоконно-оптические датчики (ВОД) и микрооптоэлектромеханические исполни-

тельные системы – МОЭМС (Microoptoelectromechanical systems - MOEMS), а также мощные процессоры как ядро системы обеспечивают формирование, передачу по сверхлёгким волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) и адресное использование (реализацию) большого числа данных и команд управления [4-8].

Например, достижения в области опто- и нанотехнологий позволяют реализовать прокладку волокна с радиусом изгиба  $\sim 7$  мм, транспортировать по нему энергетические световые потоки для исполнительных устройств. МОЭМС обеспечивают выполнение различных функций за счёт управления оптическим сигналом или преобразования оптического воздействия с помощью электромеханического устройства. ВОД в полной мере соответствуют требованиям к жёстким условиям эксплуатации, а именно: помехозащищённость, надёжность, точность и пр. Одно из направлений в продвижении ВОД для БПЛА – мультисенсорные волоконно-оптические сети.

Однако многообразии выходных сигналов датчиков различных физических величин существенно ограничивает область практического применения и не позволяет создавать унифицированные сети. В качестве примера можно привести экспериментальные измерительные комплексы FISO Technologies (Канада), Blue Road Research (США), Oregon Department of Transportation (США),

SOFO (Япония), «Дозор» и «Электроника-2000А» (Россия) и др. Перечисленные разработки имеют узкую специализацию и ограниченные возможности по наращиванию и масштабированию. Для передачи сигнала обычно используют одно- и многомодовые световоды (ITU TR G.652 - G.656). В ВОД их используют для ввода в разрыв либо для нанесения на торец или плоский срез волокна сенсорного материала с определёнными оптическими свойствами с целью измерения температуры, давления, газоанализа и т.д. В ряде вариантов используется чувствительность типового волокна к электрическому полю (эффект Керра), магнитному полю (эффект Фарадея), вибрации, температуре, давлению, деформациям (например, к изгибу). Более 20 типов специальных оптических волокон (ОВ) создаются для конкретного применения в системах связи, а также в ВОД, реализующих с большей, чем у типовых ОВ, эффективностью функции преобразования и кодирования физических величин. К ним, например, можно отнести фотонно-кристаллические волокна (PCF) с микроструктурированной оболочкой и полый сердцевинкой для квазираспределённого газоанализа и др.

Существенную нишу начинают занимать системы ВОД, основанные на рециркуляции импульсов в измерительном канале (рис.1) [9, 10].

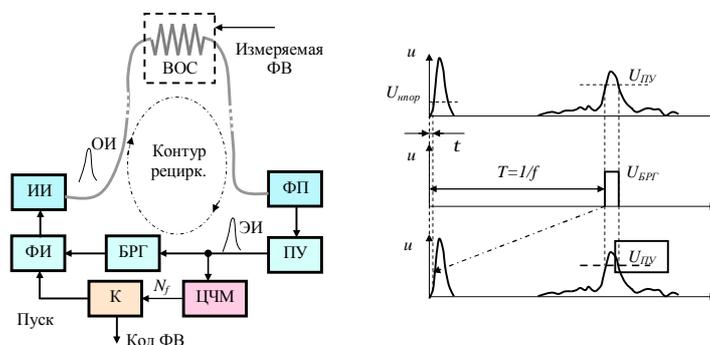


Рис. 1. Волоконно-оптический измерительный преобразователь рециркуляционного типа

Часть контура рециркуляции (с ОВ) – оптическая, часть – электрическая. В

системе используются лавинные фотодиоды или PIN-фотодиоды. Основной

причиной изменения оптического пути, т. е. периода и частоты рециркуляции сигнала, является изменение коэффициента преломления и изменения геометрических параметров сенсорного участка ОВ вследствие воздействия измеряемого параметра на волокно или нанесённое на него кондукционное покрытие. Формирователь импульса (ФИ) по команде от контроллера (К) генерирует начальный импульс и запускает процесс циркуляции. В качестве источника излучения (ИИ) выбирается инжекционный лазер, смещённый в предпороговую область для уменьшения задержки между импульсом тока накачки и излучением. Оптический импульс (ОИ) вводится в ОВ посредством соединительных муфт, а затем после некоторой задержки, определяемой оптической длиной ОВ, поступает на фотоприёмник ФП. В качестве ФП используются лавинные фотодиоды или *pin*-фотодиоды. На выходе ФП формируется электрический импульс (ЭИ), поступающий на пороговое устройство (ПУ), выделяющее измерительный сигнал из шумового фона. Блок регенерации БРГ по сигналу порогового устройства формирует стандартный по амплитуде, длительности и

форме импульс, поступающий на ФИ. Таким образом, цикл рециркуляции замыкается. На каждом цикле проводится восстановление формы, амплитуды и длительности информационного импульса, что позволяет поддерживать процесс рециркуляции со средним периодом  $T$  неограниченно долго. Сигналы с выхода ПУ параллельно направляются на цифровой частотомер (ЦЧМ)  $f=1/T$ . Значения частоты рециркуляции вводятся в микропроцессор контроллера, где их отклонения  $Df$  от начального и среднего значения по соответствующему алгоритму преобразуются в значение измеряемой величины с отображением динамики процесса. Сенсорных участков ОВ, установленных на элементах силовой установки, может быть несколько, что позволяет расширять перечень и диапазон измеряемых величин, существенно повышать точность и достоверность данных. С целью миниатюризации мультисенсорного устройства целесообразно выполнять его на базе планарного световода.

В качестве примера на рис.2 показан один из вариантов структуры сенсорного элемента датчика давления.

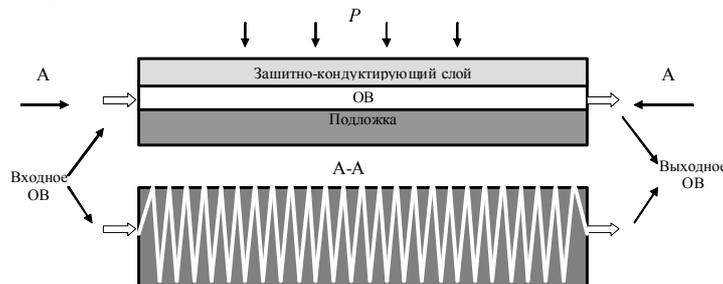


Рис.2. Упрощенная структурная схема сенсорного элемента волоконно-оптического датчика давления

Возможность косвенного измерения давления по оценке частоты рециркуляции импульса, полученной прямым способом, обусловлена изменением геометрической длины (продольная деформация) и показателя преломления сердцевины ОВ при изменении давления. То есть одновременно происходят продольная и поперечная деформации. Это вызывает эффект

фотоупругости, который также приводит к изменению показателя преломления. С учётом перечисленных факторов связь между относительным изменением давления  $dP$  и соответствующим ему изменением геометрических параметров ОВ можно записать как [9]

$$dP = \frac{P - P_0}{P_0} \approx \frac{[n(P) - n_0] a L_0^p}{\left\{ 1 - \left[ \left( 1 - \frac{n^2(P)}{2} \cdot (p_{12} - v(r_{11} + r_{12})) \right) \cdot a + \frac{P}{n(P)} \cdot \frac{dn}{dP} \right] \right\} n_0 L_0^p} =$$

$$= \frac{dn(P) \cdot a}{1 - \left[ \left( 1 - \frac{n^2(P)}{2} \cdot (p_{12} - v(r_{11} + r_{12})) \right) \cdot a + \frac{P}{n(P)} \cdot \frac{dn}{dP} \right]}, \quad (1)$$

где  $L_0^p$  - длина части ОВ, подвергающейся и изменяющейся при воздействии давления;  $P_0$  - давление (например, минимальное), при котором фиксируются исходные геометрические параметры ОВ;  $n(P)$  - показатель преломления сердцевины ОВ при изменении давления;  $n_0$  - исходное значение коэффициента преломления, привязанное к  $P_0$ ;  $a$  - коэффициент линейного расширения материала ОВ под воздействием давления;  $r_{11}=0,121$  и  $r_{12}=0,270$  - коэффициенты Погкельса (для кварцевого ОВ).

В свою очередь, частота рециркуляции импульсов описывается выражением:

$$f \approx \frac{c}{L(P)n(P)}, \quad (2)$$

где  $L(P)$  - общая длина контура, включая часть  $L^p(P) = L_0^p[1 + a(P)]$ , зависящую от давления;  $c$  - скорость света в вакууме.

Как видно из рис.2, одним из компонентов интегрального оптического датчика давления является защитный слой. В традиционной интерпретации такой слой формирует оболочку волновода или зазор между связанными волноводами. Защитные слои используются для предохранения элементов интегрально-оптического устройства от внешних воздействий, например, от окисления материалов кислородом воздуха. К функциям защитных слоев относятся также защита элементов от внешней паразитной засветки, электрическая изоляция.

Они должны отвечать следующим требованиям [11]:

- высокие механическая прочность и адгезионная способность;
- химическая инертность;
- технологичность;

- заданный показатель преломления;

- в ряде случаев - специальные оптические свойства, например, высокий коэффициент поглощения, наличие электрооптического эффекта, нелинейно-оптические свойства, а также электроизолирующие свойства.

В представленной конструкции дополнительный защитный слой отвечает за увеличение значения коэффициента деформации связки «защитный слой - ОВ» при изменении давления внешней среды. В результате механического взаимодействия полимерного защитного слоя и волновода чувствительность сенсора, т. е. крутизна характеристик  $L^p(P)$  и  $n(P)$ , может увеличиться на порядок и более в зависимости от материала и толщины пленки [12]. Корректность математической модели такого взаимодействия определяется рядом факторов, большинство из которых требует экспериментальных исследований для получения конкретных эмпирических зависимостей.

Исследования разработанной конструкции предполагают оценку кондуктирующих свойств различных полимерных покрытий, в том числе тонких. В современной микросистемной технике тонкие слои и покрытия (10–1000 нм) являются рабочими элементами многих устройств. В связи с этим при определении реакции кондукционных слоев малой толщины на давление и температуру (для введения коррекции) предполагается однородность механических свойств исследуемого образца по глубине и расчёт модуля упругости материала средствами континуальной механики. Для корректной оценки упругих характеристик тонких покрытий необходимо использование теории контактного деформирования слоистых систем,

учитывающей влияние подложки (в данном случае волновода), свойства которой значительно отличаются от свойств исследуемого слоя [13].

### Библиографический список

1. <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/14514/1/> [Электронный ресурс].
2. <http://bp-la.ru> [Электронный ресурс].
3. <http://www.kipinfo.ru> [Электронный ресурс].
4. Портнов, Э.Л. Оптические кабели связи и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи [Текст] / Э.Л. Портнов. - М.: Горячая линия – телеком, 2007. – 107 с.
5. <http://www.sintef.no> /Information-and-Communication-Technology-ICT/ Microsystems-and-Nanotechnology / Competence-and-services- / Micro-electro-mechanical-systems-MEMS / Micro-opto-electro-mechanical-systems-MOEMS/.
6. Bae T. Fiber Optic Sensing Technology for Measuring in-cylinder Pressure in Automotive Engines [Text] / T. Bae // Diss. by Subm. to the Of. of Grad. St. of Texas A&M Univers. in part. I fulfill. of the requi. for the deg. of d. of ph., 2006. – 145 p.
7. Majeed, Y. “Design Optimization of Fiber Optic Sensors” [Text] / Y. Majeed,

M. Al-Bassiyouni, A. Dasgupta // Optical Society of America, 2009. – 123 p.

8. Multimaterial piezoelectric fibres.- <http://www.nature.com/nmat/journal/v9/n8/abs/nmat2792.html>
9. Поляков, А.В. Частотная волоконно-оптическая измерительная система [Текст] / А.В. Поляков // Датчики и системы. - М., 2008. - № 1. – С.29–32.
10. Мультисенсорные волоконно-оптические преобразователи транспортных систем [Текст] / Г.И. Леонович, В.М. Гречишников, А.С. Лукин [и др.] // Изв. Самар. науч. центра РАН, спец. вып.: Перспективы и направления развития транспортной системы.- Самара, 2007. - С.125-130.
11. Игнатъев, А.И. Материалы и технологии интегральной и волоконной оптики [Текст] / А.И. Игнатъев - СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 122 с.
12. Vohra, S.T. High Sensitivity Pressure Sensors Utilizing Advanced Polymer Coatings [Text] / S.T. Vohra, A. Dandridge, C.C. Chang [et al] // U.S. Naval Research Laboratory, Code 5670 Washington, DC 20375, 1999. – 235 p.
13. Макушкин, А. П. Напряжённо-деформированное состояние упругого слоя при внедрении в него сферического индентора: Определение контактного давления [Текст]/ А. П. Макушкин // Трение и износ. - 1990. - Т.11. - № 3. - С.423-434.

## FIBER-OPTICAL PRESSURE TRANSDUCER FOR THE UA ENGINE CONTROL SYSTEM

©2011 G. I. Leonovich<sup>1</sup>, C. A. Matyunin<sup>1</sup>, A. I. Glushkov<sup>1</sup>,  
H. A. Livochkina<sup>2</sup>, V. I. Solovyov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University  
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)  
<sup>2</sup>SRPSRC “TsSKB-Progress”

The difficulties of power plant optimization and airborne equipment complexing are related to UA dimensions and functional complexity of its accessories. They are exhibited to the greatest extent in aircraft with small dimensions. At the same time, up-to-date technologies make it possible to produce powerful miniature processors, superlight fiber-optical transducers and onboard networks on their basis. The use of sensor conduction coatings substantially increases the sensitivity of fiber-optical transducers and expands their dynamic range. In particular, this is true of pressure transducers for power plant control systems.

*Unmanned aircraft, pressure transducer, sensor coating, optical waveguide.*

### **Информация об авторах**

**Леонович Георгий Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), e-mail: [teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:teplotex_ssau@bk.ru). Область научных интересов: теплообмен, термодинамика, измерительная техника.

**Матюнин Сергей Александрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: системы управления, волоконно-оптические информационно-измерительные устройства и системы.

**Глушков Артем Иванович**, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: термодинамика, измерительная техника.

**Ливочкина Наталья Александровна**, инженер, ЦСКБ «Прогресс». Область научных интересов: теплотехнические измерения.

**Соловьёв Вячеслав Иванович**, старший преподаватель, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: системы управления двигателей летательных аппаратов.

**Leonovich Georgiy Ivanovich**, Dr. Sci. Tech., professor of the department “Heat engineering and thermal engines”, Samara State Aerospace University, [teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:teplotex_ssau@bk.ru), area of research: heat and mass transfer, thermodynamics, measuring facilities.

**Matyunin Sergey Aleksandrovich**, Dr. Sci. Tech., professor, head of the department of electronic systems and devices, Samara State Aerospace University, area of research: control systems, fiber-optic information-measuring devices and systems.

**Glushkov Artem Ivanovich**, student, Samara State Aerospace University, area of research: thermodynamics, measuring facilities.

**Livochkina Natalia Aleksandrovna**, engineer, SRPSRC “TsSKB-Progress”, area of research: firing measurement.

**Solovyov Vyacheslav Ivanovich**, senior teacher, Samara State Aerospace University, area of research: control systems of aircraft engines.