

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

©2011 Г. И. Леонович<sup>1</sup>, С. А. Матюнин<sup>1</sup>, Е. Ю. Килейнов<sup>1</sup>, Н. А. Ливочкина<sup>2</sup>, В. И. Соловьев<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ «Прогресс», г. Самара

Трудности оптимизации силовой установки и комплексирования бортовой аппаратуры связаны с габаритами АМП и функциональной сложностью комплектующих. В наибольшей степени они проявляются при малых размерах. Вместе с тем современные технологии позволяют создавать миниатюрные мощные процессоры, сверхлегкие волоконно-оптические линии связи, волоконно-оптические и микрооптоэлектромеханические датчики.

*Датчик давления, управление двигателем, волоконно-оптический датчик.*

В настоящее время одним из перспективных направлений развития авиации и космонавтики, наземных и водных боевых средств является создание автономных мобильных платформ (АМП). В качестве АМП рассматривают, в частности, автономные космические платформы (АКП) - Autonomous Space Platform (ASP) и беспилотные летательные аппараты (БПЛА) – Unmanned Air Vehicles (UAV). Фундаментальные исследования и НИОКР по проектированию АМП активно ведутся во всех технически передовых странах мира. Обилие теоретических и экспериментальных работ указывает на несомненную актуальность тематики. Например, оборонное ведомство США планирует к концу 10-х годов иметь до половины парка подвижных средств воздушного и космического применения в виде сетцентрической структуры АМП. К основным критическим проблемам АМП относятся: эффективность АМП и экономичность двигательной установки, обеспечение максимально возможной незаметности как самой платформы, так и внешних признаков ее функционирования, устойчивость к внешним силовым и информационным воздействиям. Особое внимание уделяется методам, конструкциям и схемотехническим решениям, обеспечивающим низкие уровни электромагнитного, акустического и теплового излучения [1-3].

Трудности оптимизации силовой установки и комплексирования бортовой аппаратуры связаны с габаритами АМП и функциональной сложностью комплектую-

щих. В наибольшей степени они проявляются, начиная с размерности  $\leq 15$  см. Вместе с тем современные технологии позволяют создавать миниатюрные мощные процессоры, сверхлегкие волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), волоконно-оптические датчики (ВОД) и микрооптоэлектромеханические исполнительные системы – МОЭМС (Micro-opto-electromechanical systems - MOEMS) как ядро системы, которое обеспечивает формирование, передачу и адресное использование (реализацию) данных и команд управления, в том числе двигателем [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 счет управления оптическим сигналом или преобразования оптического воздействия с помощью электромеханического устройства. ВОД в полной мере соответствуют требованиям к жестким условиям эксплуатации, а именно: помехозащищенность, надежность, точность и др. 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 (Japan), «Дозор» и «Электроника-2000А» (РФ) 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 определенными 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),

к 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 фотоннокристаллические волокна (PCF) с микроструктурированной оболочкой и полый сердцевинной для квазираспределенного газоанализа и др.

Существенную нишу начинают занимать системы ВОД, основанные на рециркуляции импульсов в измерительном канале (рис. 1). Часть контура рециркуляции (с ОВ) – оптическая, часть – электрическая [9, 10].

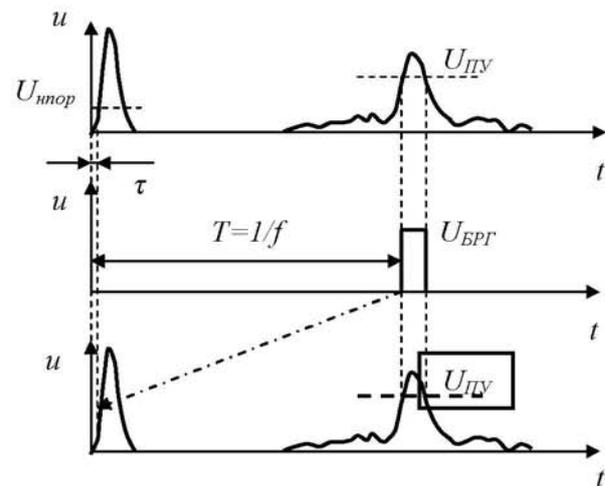
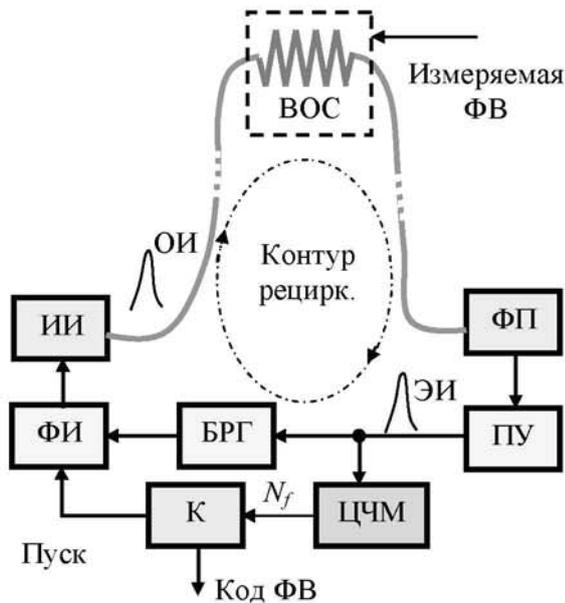


Рис. 1. Волоконно-оптический измерительный преобразователь рециркуляционного типа

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 нанесенное на него редуцирующее (кондуктирующее) покрытие. Формирователь импульса (ФИ) по команде от контроллера (К) генерирует начальный импульс и запускает процесс циркуляции. В качестве источника излучения (ИИ) выбирается инжекционный

лазер, смещенный 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 фотоприемник ФП. Сенсорная часть ОВ (чувствительный элемент, ЧЭ) вводит дополнительную задержку ОИ, зависящую от параметров волоконно-оптического сенсора (ВОС) и физической величины (ФВ). В качестве ФП используются лавинные фотодиоды или *pin*-фотодиоды. На выходе ФП формируется электрический им-

пульс (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 контро-

лера, где их отклонения  $\Delta f$  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 расширить перечень и диапазон измеряемых величин, существенно повысить точность и достоверность данных. С целью миниатюризации мультисенсора целесообразно выполнять его на базе планарного световода. В качестве примера на рис. 2 показан один из вариантов структуры сенсора датчика давления.

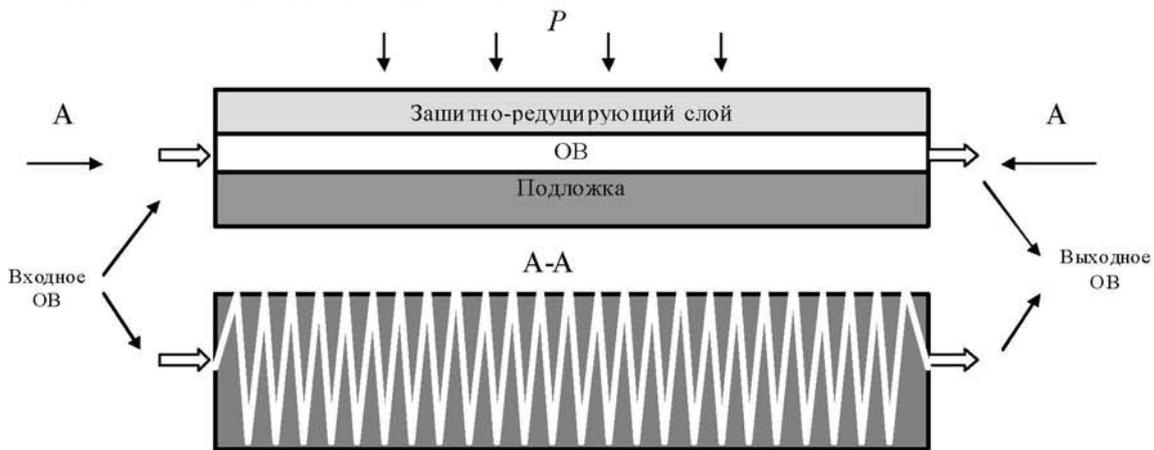


Рис. 2. Упрощенная структурная схема сенсора волоконно-оптического датчика давления

Возможность косвенного измерения давления по частоте рециркуляции импульса, измеренной прямым способом, обусловлена изменением геометрической длины (продольная деформация) и изменением показателя преломления сердцевины ОВ при изменении давления. Т.е. одновременно происходят продольная и поперечная деформация. Это вызывает эффект фотоупругости, который также

приводит к изменению показателя преломления.

С учетом перечисленных факторов связь между относительным изменением давления  $\delta P$  и соответствующим ему изменением геометрических параметров ОВ можно записать как [9]:

$$\delta P = \frac{P - P_0}{P_0} \approx \frac{[n(P) - n_0] \alpha L_0^P}{\left\{ 1 - \left[ \left( 1 - \frac{n^2(P)}{2} \cdot (p_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})) \right) \cdot \alpha + \frac{P}{n(P)} \cdot \frac{dn}{dP} \right] \right\} n_0 L_0^P} = \frac{\delta n(P) \cdot \alpha}{1 - \left[ \left( 1 - \frac{n^2(P)}{2} \cdot (p_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})) \right) \cdot \alpha + \frac{P}{n(P)} \cdot \frac{dn}{dP} \right]}, \quad (1)$$

где  $L_0^P$  - длина части ОВ, подвергающейся и изменяющейся при воздействии давления;  $P_0$  - давление (например минимальное), при ко-

тором фиксируются исходные геометрические параметры ОВ;  $n(P)$  - показатель преломления сердцевины ОВ при изменении

давления;  $n_0$  - исходное значение коэффициента преломления, привязанное к  $P_0$ ;  $\alpha$  - коэффициент линейного расширения материала ОВ под воздействием давления;  $p_{11} = 0,121$  и  $p_{12} = 0,27$  - коэффициенты Поккельса (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  $L^p(P) = L_0^p [1 + \alpha(P)]$ , 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 связи «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 экспе-

риментальных исследований для получения конкретных эмпирических зависимостей.

Исследования разработанной конструкции предполагают оценку редуцирующих 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 редуцирующих слоев малой толщины на давление и температуру (для введения коррекции) предполагается однородность механических свойств исследуемого образца по глубине и расчет 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>
2. <http://bp-la.ru>
3. <http://www.kipinfo.ru>
4. Портнов, Э.Л. Оптические кабели связи и пассивные компоненты волоконно – оптических линий связи [Текст] / Э.Л. Портнов. - М.: Горячая линия – телеком, 2007.
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. 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.
7. Majeed, Y., Al-Bassiyouni, M., Dasgupta, A., “Design Optimization of Fiber Optic Sensors”, Optical Society of America, 2009.
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 // Приборы и системы управ-

ления, 2007. №3,

10. Леонович, Г.И. 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», 2007.

11. Игнатьев, А.И. Материалы и технологии интегральной и волоконной оптики

[Текст] / А.И. Игнатьев [и др.] -СПб: СПбГУ ИТМО, 2009.

12. Vobra, S.T. High Sensitivity Pressure Sensors Utilizing Advanced Polymer Coatings [Text] / S.T. Vobra, A. Dandridge, C.C. Chang [et al.] // U.S. Naval Research Laboratory, Code 5670 Washington, DC 20375, 1999.

13. Макушкин, А.П. Трение и износ [Текст] / А.П. Макушкин – 1990. – Т.11, №3.

## THE FIBER-OPTICAL GAUGE OF PRESSURE FOR THE CONTROL SYSTEM OF ENGINE BPLA

©2011 G. I. Leonovich<sup>1</sup>, С. А. Matjunin<sup>1</sup>, Ye. U. Kilejnov<sup>1</sup>, Н. А. Livochkina<sup>2</sup>, V. I. Solovjov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

<sup>2</sup>Samara space centre “TsKB-Progress”

Difficulties of optimization of a power-plant and complexind onboard equipment are connected with dimensions АМП and functional complexity of accessories. To the greatest degree they are shown at the small sizes. At the same time modern technologies allow to create tiny powerful processors.

*Extralight fiber-optical communication lines, fiber-optical gages and mikro-opto-electromechanical.*

### Информация об авторах

**Леонович Георгий Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Тел.: (846) 335-18-12. Область научных интересов: тепломассообмен, термодинамика.

**Матюнин Сергей Александрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Микроэлектроника», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: волоконно-оптические системы.

**Килейнов Евгений Юрьевич**, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: полупроводниковые приборы.

**Ливочкина Наталья Александровна**, инженер научно-производственного ракетно-космического центра «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: волоконно-оптические системы.

**Leonovich George Ivanovich**, Doctor of Engineering science, professor of the thermotecnics and heat engines department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Phone: (846) 335-18-12. Area of research: heat-and-mass transfer, thermodynamics.

**Matjunin Sergey Aleksandrovich**, Doctor of Engineering science, the professor managing chair "Microelectronics", Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: fiber-optical systems.

**Kilejnov Evgenie Jurevich**, engineer, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: semi-conductor devices.

**Livochkina Natalia Aleksandrovna**, engineer of Samara space centre "TsKB-Progress". Area of research: heat-technics measurements.

**Solovjov Vyacheslav Ivanovich**, the senior teacher, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: fiber-optical systems.