

УДК 629.7.06

Применение оптоволоконных технологий при создании встроенных систем самодиагностики авиационных конструкций*

А.Н. СЕРЬЁЗНОВ¹, А.Б. КУЗНЕЦОВ², А.В. ЛУКЬЯНОВ³, А.А. БРАГИН⁴

¹ 630051, РФ, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21, Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина, профессор, доктор технических наук, научный руководитель института. E-mail: a.serieznov@sibnia.ru

² 630051, РФ, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21, Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина, начальник сектора. E-mail: a.kuznecov@sibnia.ru,

³ 630051, РФ, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21, Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина, инженер-программист. E-mail: barguzin@ngs.ru

⁴ 630051, РФ, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21, Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина, начальник отдела. E-mail: bragina@sibnia.ru

Эксплуатация авиационной техники путем назначения межремонтных сроков службы летательного аппарата, так называемый метод технической эксплуатации по ресурсу, имеет ряд существенных недостатков, сложность накопления и учета параметров эксплуатации, ресурс назначается на все летательные аппараты одного типа, а эксплуатация каждого отдельного образца уникальна и обусловлена своими условиями (неровности аэродромов эксплуатации, уровень подготовки экипажа и обслуживающего персонала, аэродинамические нагрузки на протяжении полетов и т. д.). На смену методу эксплуатации по ресурсу приходит метод технической эксплуатации по состоянию. Метод эксплуатации, при котором замена изделия при всех видах технического обслуживания и ремонта для его восстановления или списания производится только при отказе изделия или достижения им предотказного состояния, ставит основные задачи: выбор определяющих параметров работоспособности летательных аппаратов, диапазона границ параметров и контроль параметров на протяжении эксплуатации.

Решение проблемы эксплуатации по состоянию лежит в области применения систем встроенного мониторинга, позволяющих отслеживать параметры и условия эксплуатации летательного аппарата.

В данной работе рассмотрено применение оптоволоконных технологий при создании встроенных систем самодиагностики авиационных конструкций. Представлены мировые тенденции развития современной авиации на пути снижения затрат на обслуживание и переход к эксплуатации ВС по состоянию. Исследованы направления развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем (систем самодиагностики) и способы обработки информации от них. Развитие современной авиации идет по пути снижения затрат на эксплуатацию и обслуживание воздушного судна, тем самым осуществляется переход к эксплуатации по состоя-

* Статья получена 01 июля 2016 г.

нию ВС. Реализация подхода эксплуатации по состоянию не может быть решена без применения в составе ВС системы самодиагностики.

В качестве примера системы самодиагностики предложено применение распределенных по конструкции оптоволоконных датчиков, позволяющих контролировать такие параметры, как деформация, температура и ускорение. Описан опыт применения датчиков для контроля состояния образцов материалов, используемых в конструкции ВС. Показана регистрация контролируемых параметров для решения задач самодиагностики, что позволит повысить надежность и снизить время обслуживания ВС.

Ключевые слова: оптоволоконные технологии, датчики, самодиагностика, воздушное судно, композитный материал, решетка Брэгга, оптоволоконный сенсор, интеллектуальный композиционный материал, системы встроенного мониторинга, эксплуатация ВС по состоянию, контроль состояния образцов материалов

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-95-105

ВВЕДЕНИЕ

Развитие авиационной промышленности в условиях конкурентной борьбы между производителями идет по пути снижения затрат на производство и обслуживание в эксплуатации авиационной техники. Достижение результатов в этих направлениях возможно за счет повышения параметров надежности и перехода к эксплуатации ВС по состоянию.

Проектирование и производство воздушного судна с оптимизацией по весу приводит к уменьшению металлоемкости, одновременно это приводит к повышению общей и узловой напряженности конструктивных элементов и, как следствие, к снижению запаса прочности. Подобный подход ставит основными задачами надежный расчет порога эксплуатации ВС по состоянию, проектируемых конструкций и задачу диагностики состояния узла и конструкции в целом на всем протяжении эксплуатации.

В последнее время внимание конструкторов направленно к всё большему применению композитного материала в конструкции, позволяющего снизить вес ВС, но в то же время требует более сложной диагностики и выявления скрытых дефектов в эксплуатации.

1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Можно выделить несколько основных подходов к прогнозированию ресурса композитного материала [1].

1. Назначение минимального срока службы материала и последующее продление его на основе опыта эксплуатации изделий.
2. Установление срока службы материала путем прогнозирования на основе результатов кратковременных испытаний.
3. Установление сроков службы материала на основе результатов ускоренных испытаний при фиксированных режимах.
4. Установление срока службы материала путем ускорения процесса старения.

Выбор того или иного метода прогнозирования сроков службы зависит от длительности времени, на которое должен быть выдан прогноз, от требуе-

мой точности прогноза, от имеющейся информации о данном материале и его аналогах, от условий эксплуатации и от других факторов. Использование нескольких методов прогнозирования повышает уверенность в правильности оценки возможностей материала и характера его поведения в условиях эксплуатации изделия.

Применение композитного материала в авиации затруднено сложностью прогнозирования срока службы за счет необходимости проведения опережающих испытаний. Это приводит к необходимости учета избыточного запаса прочности изделия, и, как следствие, композитный материал теряет свои преимущества по сравнению с изделиями, изготовленными по классической технологии с использованием металлов.

Решение задачи эксплуатации ВС по состоянию лежит в области применения систем встроенного мониторинга, позволяющего отслеживать параметры конструкции и условия эксплуатации изделия, тем самым контролируются конкретные условия эксплуатации именно этого изделия и выдается более точный прогноз на конкретный случай.

Решение проблемы повышения надежности за счет оперативной диагностики ВС возможно путем применения в составе оборудования воздушного судна системы самодиагностики. Большой интерес представляют системы встроенного контроля, реализация которых возможна с помощью применения оптоволоконных технологий. В качестве чувствительных элементов такой системы служат распределенные по конструкции оптоволоконные датчики на основе волоконных решеток Брэгга. Оптоволоконные датчики позволяют контролировать такие параметры, как деформация, температура, вибрация и ускорение, и объединить датчики в сеть на основе оптоволоконной линии связи. Получаемая система встроенного мониторинга обладает рядом преимуществ, таких как малые весовые характеристики, низкое энергопотребление, устойчивость к электромагнитным воздействиям, по сравнению с обычными проводными системами мониторинга. В ходе экспериментальных работ в СибНИА были проведены испытания датчиков физических величин деформации и температуры на основе волоконных решеток Брэгга. Работы показали большую перспективность систем на основе таких датчиков, была разработана типовая структура построения системы встроенного контроля с использованием решеток Брэгга.

2. СИСТЕМА ВСТРОЕННОГО МОНИТОРИНГА

Система встроенного мониторинга на основе волоконно-оптических датчиков позволяет реализовывать на одном волокне до нескольких десятков датчиков. В качестве волоконно-оптического датчика используют оптическое волокно с записанными по длине волокна решетками Брэгга [2]. Используя волоконные решетки Брэгга (ВБР), можно построить систему мониторинга, способную измерять физические величины в реальном масштабе времени. Волоконно-оптический датчик можно интегрировать в структуру композитного материала, тем самым открывается возможность создания интеллектуальных композиционных материалов («умных материалов»).

В процессе производства каждая решетка Брэгга записывается на определенной длине волны. Длина волны является уникальным параметром, соответствующим только этой решетке [3]. Это позволяет обеспечить квазираспределенное зондирование деформации, температуры и других измеряемых величин на одном волокне, связывая каждый участок спектра с конкретной пространственно расположенной ВБР. Верхний предел числа решеток, которые могут быть размещены по длине волокна, в этом случае является функцией ширины входного спектра зондирующего сигнала и рабочей длины волны полосы пропускания, необходимой для каждого элемента (решетки). Таким образом, решетки можно мультиплексировать до нескольких десятков и более датчиков вдоль одного волокна, если наложение спектра сигналов каждой решетки не превышает 0,1 %. Существует большое разнообразие методов опроса решеток Брэгга, но наиболее распространенным является частотное и временное распределение сигнала. Частотное распределение обеспечивается применением нескольких фотодетекторов, охватывающих весь спектр сигнала, отраженного от массива датчиков, а временное сканирование реализуется с помощью перестраиваемого фильтра, обеспечивающего последовательный опрос решеток Брэгга.

3. ПРИНЦИП РАБОТЫ

Устройство регистрации, опрашивающее волоконно-оптические датчики (интеррогатор) [2], в упрощенном виде состоит из широкополосного источника света, направленного ответвителя и фотодетектора, фиксирующего длину волны отраженного решеткой света, как показано на рис. 1.

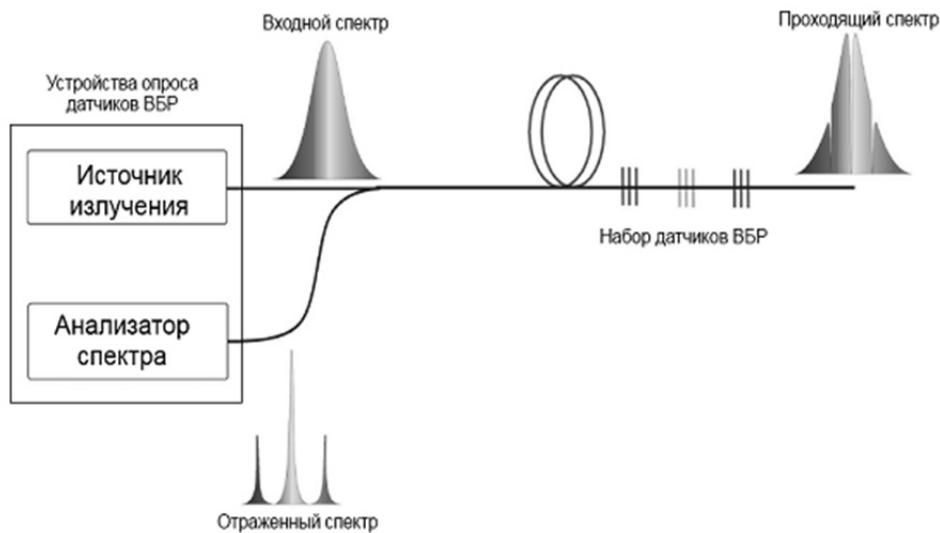


Рис. 1. Упрощенная схема интеррогатора

Ширина полосы отраженного сигнала в большинстве датчиков зависит от шага решетки, обычно это от 0,05 до 0,3 нм. Воздействие на решетку деформации температуры или ускорения приводит к смещению длины волны

Брэгга, которое может быть обнаружено в отраженном спектре сигнала. Так, для регистрации изменения температуры в $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ необходимо фиксировать изменение длины волны Брэгга в $0,001\text{ нм}$. Это разрешение длины волны достижимо с помощью использования лабораторного оборудования, такого как оптический интеррогатор с перестраиваемой частотой.

Создание компактного интеррогатора, подходящего для эксплуатации в условиях полета ВС и обеспечивающего такое разрешение, затруднено необходимостью обеспечить работоспособность в широком температурном диапазоне и воздействием вибраций на борту ВС. Решением задачи создания такого интеррогатора в настоящее время занимаются многие коллективы разработчиков как за рубежом, так и в России, и это находится в центре внимания значительного количества научно-исследовательских работ.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА

На базе СибНИА проведен ряд экспериментов по определению характеристик и возможностей применения волоконно-оптического датчика деформации и температуры на основе решетки Брэгга. Так, один из экспериментов заключался в сравнении показаний определяемой деформации проволочными тензорезисторами в количестве восьми единиц и ВБР – четырех единиц. Датчики были установлены на балке с равномерным изгибу сопротивлением (рис. 2).

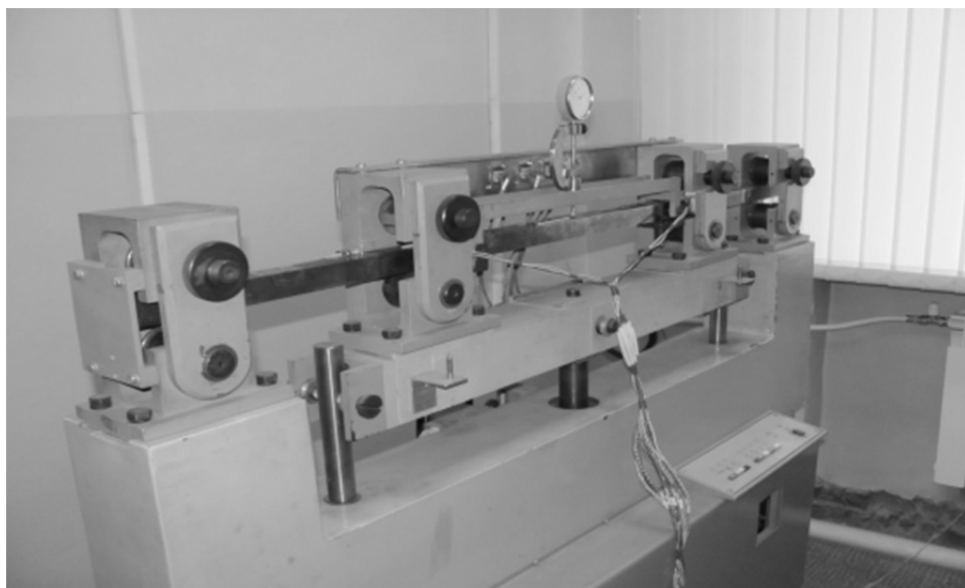


Рис. 2. Общий вид балки с равномерным изгибу сопротивлением с установленными тензорезисторами и волоконно-оптическими датчиками

Затем на аттестованном стенде проводились циклические нагружения балки равного сопротивления (рис. 3). ВБР были установлены с помощью эпоксидной смолы и клея Z70 фирмы НВМ. В результате испытаний было определено некоторое отличие в показаниях волоконно-оптических датчиков деформации в моменты нагружения и разгружения балки, это обусловлено эластичностью эпоксидной смолы и клея Z70. В сигнале от тензорезисторов

заметить столь малых изменений не удалось ввиду зашумленности сигналов, связанных с разогревом тензорезисторов и с воздействием электрических помех. Волоконно-оптические датчики в полной мере продемонстрировали более высокую чувствительность в сравнении с тензорезисторами, а также простоту монтажа, так как были расположены в одном оптоволокне, а включение тензорезисторов требовало реализации мостовых схем с большим количеством соединительных проводов.

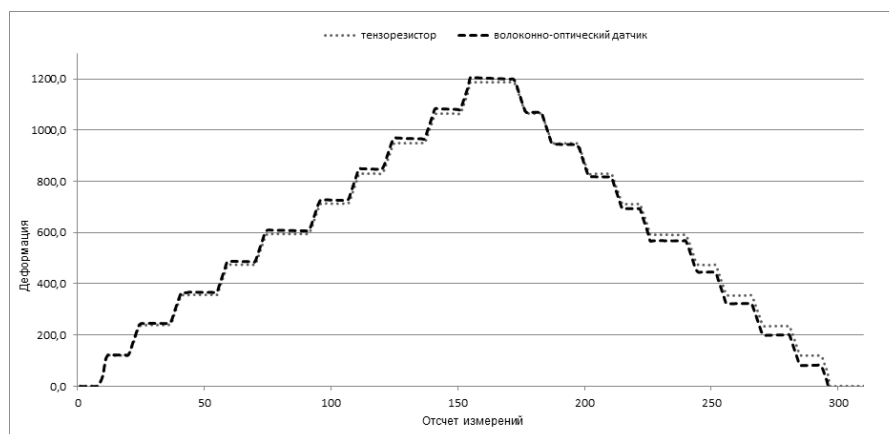


Рис. 3. График нагружения деформации

Эксперимент по определению возможностей использования волоконно-оптических датчиков для контроля температур заключался в установке ВБР в количестве трех единиц на образец композитной пластины совместно с платиновыми термопарами (2 шт.) (рис. 4) и в проведении циклического воздействия температуры в диапазоне $-40...+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 5). Эксперимент показал большой потенциал в применении волоконно-оптических датчиков для регистрации температуры.

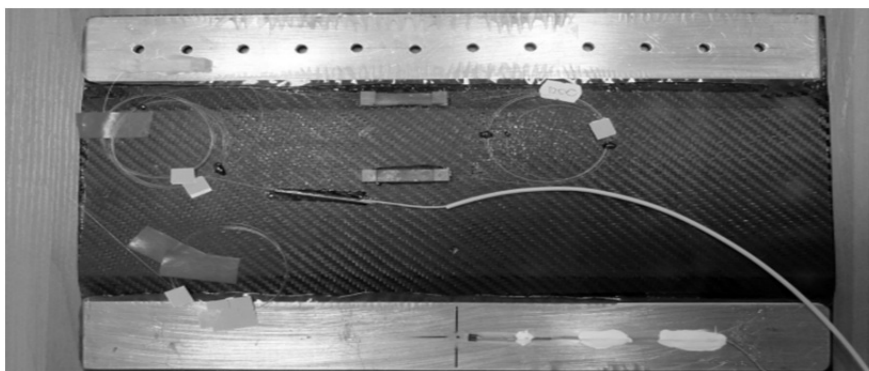


Рис. 4. Образец композитной пластины с установленными датчиками ВБР

Другой важной задачей является отработка механизма встраивания волоконно-оптического датчика в конструкцию воздушного судна и объединение их в сеть. В настоящее время большинство публикуемых статей посвящено интеграции волоконно-оптических датчиков в структуру композитного материала и проведению испытаний образцов материалов. Обзор при-

кладных задач, таких как вывод оптоволоконна из композитного элемента конструкции и защита от механического повреждения на протяжении технологического цикла от формирования слоев до установки узлов в конструкцию ВС, представлен незначительно. Авторы проводили работы по выбору метода спекания композитного материала с интегрированными волоконно-оптическими датчиками с обеспечением защиты оптоволоконных выводов от механических повреждений. На рис. 4 представлен образец композитного материала с интегрированным оптическим волокном.

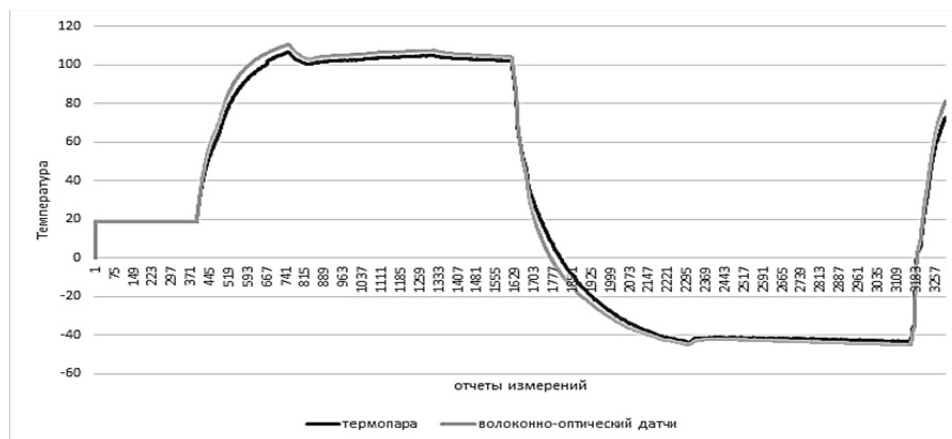


Рис. 5. График изменения температуры



Рис. 6. Образец композитной пластины с интегрированным волоконно-оптическим датчиком

ВЫВОДЫ

Переход к эксплуатации ВС по состоянию требует создания систем встроенного мониторинга, обеспечивающих оперативный контроль конструкции и узлов ВС в эксплуатации. Наиболее оптимальным считается ис-

пользование комбинированной системы, состоящей из различных волоконно-оптических датчиков деформации, ускорения и температуры, распределенных по конструкции ВС и объединенных в вычислительную сеть, позволяющую полностью охватить критические узлы самолета и оценить состояние конструкции ВС.

Можно выделить несколько задач, стоящих на пути создания системы встроенного мониторинга с использованием оптоволоконных технологий:

- создание бортового интеррогатора, обеспечивающего непрерывность измерения данных, поступающих с волоконно-оптических датчиков, в процессе эксплуатации ВС;
- разработка серийной методики установки волоконно-оптических датчиков в элементы и узлы конструкции ВС;
- разработка алгоритмов прогнозирования надежности и состояния конструкции ВС по накапливаемым данным от системы встроенного мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой / Е.К. Каблов, Д.В. Сиваков, И.Н. Гуляев, К.В. Сорокин, М.Ю. Федотов, В.А. Гончаров // *Авиационные материалы и технологии*. – 2010. – № 4. – С. 17–20.
2. Гуляев И.Н., Гуняев Г.М., Раскутин А.Е. Полимерные композиционные материалы с функциями адаптации и диагностики состояния // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 8. – С. 242–253.
3. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах / Е.К. Каблов, Д.В. Сиваков, И.Н. Гуляев, К.В. Сорокин, М.Ю. Федотов, Е.М. Дианов, С.А. Васильев, О.И. Медведков // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. – 2010. – № 3. – С. 10–15.
4. К вопросу о методике проведения натуральных климатических испытаний полимерных композиционных материалов / В.А. Ефимов, В.Н. Кириллов, О.А. Добрянская, Е.В. Николаев, А.К. Шведкова, Т.Г. Коренькова, И.С. Деев // *Сборник докладов VIII научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2010»*. – М., 2010. – С. 102–106.
5. Механические свойства полимерных композиционных материалов с интегрированными оптическим волокном / В.В. Махсидов, М.Ю. Федотов, В.А. Гончаров, К.В. Сорокин // *Деформация и разрушение материалов*. – 2014. – № 9. – С. 2–7.
6. Grattan K.T.V., Sun T. Fiber optic sensor technology: an overview // *Sensors and Actuators: A. Physical*. – 2000. – Vol. 82, iss. 1–3. – P. 40–61.
7. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом / Е.А. Бадеева, А.В. Гориш, А.Н. Котов, Т.И. Мурашкина, А.Г. Пивкин. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та леса, 2004. – 246 с.
8. Томышев К.А., Баган В.А., Астапенко В.А. Распределенные волоконно-оптические датчики давления для применения в нефтегазовой промышленности // *Труды МФТИ*. – 2012. – Т. 4, № 2. – С. 64–72.
9. Fiber grating sensors / A.D. Kersey, M.A. Davis, H.J. Patrick, M. Leblanc, K.P. Koo, C.G. Askins, M.A. Putnam, E.J. Friebele // *Journal of Lightwave Technology*. – 1997. – Vol. 15, iss. 8. – P. 1442–1463.
10. Kashyar R. Fiber Bragg grating. – San Diego: Academic Press, 1999. – 458 p.
11. An interrogator for a fiber Bragg sensors array based on a tunable erbium fiber laser / S.A. Babin, S.I. Kablukov, I.S. Shelemba, A.A. Vlasov // *Laser Physics*. – 2007. – Vol. 17, N 11. – P. 1340–1344.
12. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В.Б. Гармаш, Ф.А. Егоров, Л.Н. Коломиец, А.П. Неугодников, В.И. Поспелов // *Фотон-Экспресс*. – 2005. – Т. 46, № 6. – С. 128–132.

13. Бабин С.А., Кузнецов А.Г., Шелемба И.С. Сравнение методов измерения распределения температуры с помощью брэгговских решеток и комбинационного рассеяния света в оптических волокнах // Автометрия. – 2010. – Т. 46, № 4. – С. 70–77.

14. Соколов А.Н. Яцев В.А. Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы // Lightwave. Russian edition. – 2006. – № 4. – С. 44–46.

15. Волоконные решетки показателя преломления и их применения / С.А. Васильев, О.И. Медведков, И.Г. Королев, А.С. Божков // Квантовая электроника. – 2005. – № 12. – С. 1085–1103.

16. Медведков О.И., Королев И.Г., Васильев С.А. Запись волоконных брэгговских решеток в схеме с интерферометром Лойда и моделирование их спектральных свойств. – М.: [б. и.], 2004. – С. 12–39. – (Препринт № 6 / Рос. акад. наук, Науч. центр волокон. оптики при Ин-те общ. физики им. А.М. Прохорова).

Серьёзов Алексей Николаевич, доктор технических наук, профессор, научный руководитель СибНИА им С.А. Чаплыгина. Основное направление научных исследований – системы измерений и переработки информации. E-mail: a.serieznov@sibnia.ru

Кузнецов Александр Борисович, аспирант СибНИА, начальник сектора ЛИБ. Основное направления научных исследований: системы встроенной диагностики ВС, надежность конструкции и систем ВС. E-mail: infogot@mail.ru; a.kuznecov@sibnia.ru

Брагин Александр Анатольевич, аспирант СибНИА, начальник отдела НИО-3. Основное направление научных исследований – системы бортовых измерений. E-mail: bragina@sibnia.ru

Лукьянов Артем Валерьевич, инженер-программист НИО-3. Основное направление научных исследований – системы автоматического управления. E-mail: lav@sibnia.ru

Application of fiber-optic technologies for the creation of embedded systems for self-diagnosis of aerostructures

A.N. SERYOZNOV¹, A.B. KUZNETSOV², A.V. LUK'YANOV³, A.A. BRAGIN⁴

¹ 630051, Russia, Novosibirsk, 21 Polzunov St., Siberian Research Institute of Aviation named after S.A. Chaplygin, D. Sc. (Eng.), professor, Scientific Supervisor. E-mail: a.serieznov@sibnia.ru

² 630051, Russia, Novosibirsk, 21 Polzunov St., Siberian Research Institute of Aviation named after S.A. Chaplygin, head of department. E-mail: a.kuznecov@sibnia.ru

³ 630051, Russia, Novosibirsk, 21 Polzunov St., Siberian Research Institute of Aviation named after S.A. Chaplygin, programming engineer. E-mail: barguzin@ngs.ru

⁴ 630051, Russia, Novosibirsk, 21 Polzunov St., Siberian Research Institute of Aviation named after S.A. Chaplygin, chief of department. E-mail: bragina@sibnia.ru

The operation of aircraft equipment by imposing reserve maintenance periods of aircraft service (the so-called method of resource technical operation) has a number of significant disadvantages e.g. the complexity of storage and recording operating parameters. The service life is the same for all aircraft of a similar type, but the operation of each individual unit is unique and depends on their conditions such as irregularities of operation aerodrome, the level of crew and maintenance personnel training, aerodynamic loads during flights, etc. The operation method based on the aircraft resource is replaced by the technical operation method based on the aircraft state. This approach involves an operation method in which equipment is replaced only in the case of its failure or before it reaches a failure situation for all types of maintenance and repair which are used to recondition or discard it. This method sets the main tasks: choosing the parameters determining the efficiency of aircraft, determining the boundaries of the parameter range and the task of monitoring parameters during operation.

* Received 01 July 2016.

Problems of aircraft operation based on their state are solved by using built-in monitoring systems to track the parameters and operating conditions of the aircraft.

In this paper, we consider the use of fiber-optic technology to create built-in self-diagnosis systems of aircraft structures. We present global trends of modern aviation development aimed at reducing maintenance costs and transition to aircraft operation based on their state. The trends in the development of distributed optical fiber sensor systems (systems of self-diagnosis) and methods of processing their information are studied. The development of modern aviation is moving towards reducing the cost of operation and maintenance of aircraft, thereby proceeds to operation as of aircraft. The implementation of the approach operation as cannot be solved without the use of a self-diagnosis system as a part of an aircraft.

As an example of a self-diagnosis system distributed fiber optic sensors to control such parameters as strain, temperature and acceleration are provided. The experience of the use of sensors to monitor the state of samples of materials used in the construction of aircraft is described. Recording of controlled parameters to solve problems of self-diagnosis, which will increase the reliability and reduce the aircraft maintenance downtime, is shown.

Keywords: Fiber-optic technology, sensors, self-test, aircraft, composite material, the Bragg grating, fiber-optic sensor, smart composite material, built-in monitoring systems, condition monitored maintenance, control of the sample material state

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-95-105

REFERENCES

1. Kablov E.K., Sivakov D.V., Guliaev I.N., Sorokin K.V., Fedotov M.Yu., Goncharov V.A. Metody issledovaniya konstruktsionnykh kompozitsionnykh materialov s integrirovannoi elektromekhanicheskoi sistemoi [Test methods of structural composites with the integrated electromechanical system]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii – Aviation Materials and Technologies*, 2010, no. 4, pp. 17–20.
2. Gulyaev I.N., Gulyaev G.M., Raskutin A.E. Polimernye kompozitsionnye materialy s funktsiyami adaptatsii i diagnostiki sostoyaniya [Polymeric composites with the functions of adaptation and diagnostics of the condition]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii – Aviation Materials and Technologies*, 2012, no. 8, pp. 242–253.
3. Kablov E.K., Sivakov D.V., Gulyaev I.N., Sorokin K.V., Fedotov M.Yu., Dianov E.M., Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I. Primenenie opticheskogo volokna v kachestve datchikov deformatsii v polimernykh kompozitsionnykh materialakh [Application of optical fiber as sensor of deformation in polymer composite materials]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*, 2010, no. 3, pp. 10–15.
4. Efimov V.A., Kirillov V.N., Dobryanskaya O.A., Nikolaev E.V., Shvedkova A.K., Koren'kova T.G., Deev I.S. [On the question of how to conduct full-scale climatic testing of polymeric composite materials]. *Sbornik dokladov VIII nauchnoi konferentsii po gidroaviatsii "Gidroaviatsalon-2010"* [Proceedings of the VIII Scientific conference on hydroaviation "Gidroaviatsalon-2010"]. Moscow, 2010, pp. 102–106.
5. Makhsidov V.V., Fedotov M.Yu., Goncharov V.A., Sorokin K.V. Mekhanicheskie svoystva polimernykh kompozitsionnykh materialov s integrirovannymi opticheskimi voloknom [The mechanical properties of polymer composites with integrated optical fiber]. *Deformatsiya i razrushenie materialov – Russian Metallurgy (Metally)*, 2014, no. 9, pp. 2–7. (In Russian)
6. Grattan K.T.V., Sun T. Fiber optic sensor technology: an overview. *Sensors and Actuators: A. Physical*, 2000, vol. 82, iss. 1–3, pp. 40–61.
7. Badeeva E.A., Gorish A.V., Kotov A.N., Murashkina T.I., Pivkin A.G. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya volokonno-opticheskikh datchikov davleniya s otkrytym opticheskim kanalom* [Theoretical bases of designing of peak fiber optic pressure sensors with open optical channel]. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2004. 246 p.
8. Tomyshev K.A., Bagan V.A., Astapenko V.A. Raspredelemnnye volokonno-opticheskie datchiki davleniya dlya primeneniya v neftegazovoi promyshlennosti [Distributed fiber-optic pressure sensors for application in oil and gas industry]. *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta – Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 64–72.

9. Kersey A.D., Davis M.A., Patrick H.J., Leblanc M., Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebele E.J. Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, vol. 15, iss. 8, pp. 1442–1463.
10. Kashyar R. *Fiber Bragg grating*. San Diego, Academic Press, 1999. 458 p.
11. Babin S.A., Kablukov S.I., Shelemba I.S., Vlasov A.A. An interrogator for a fiber Bragg sensors array based on a tunable erbium fiber laser. *Laser Physics*, 2007, vol. 17, no. 11, pp. 1340–1344.
12. Garmash V.B., Egorov F.A., Kolomiets L.N., Neugodnikov A.P., Pospelov V.I. Vozmozhnosti, zadachi i perspektivy volokonno-opticheskikh izmeritel'nykh sistem v sovremennoy priborostroenii [Fiber-optic measuring systems in modern industry possibilities, aims and perspectives]. *Foton-Ekspress*, 2005, vol. 46, no. 6, pp. 128–132.
13. Babin S.A., Kuznetsov A.G., Shelemba I.S. Sravnenie metodov izmereniya raspredeleniya temperatury s pomoshch'yu breggovskikh reshetok i kombinatsionnogo rasseyan'ya sveta v opticheskikh voloknakh [Comparison of temperature distribution measurement methods with the use of the Bragg gratings and raman scattering of light in optical fibers]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2010, vol. 46, no. 4, pp. 70–77. (In Russian)
14. Sokolov A.N., Yatsev V.A. Volokonno-opticheskie datchiki i sistemy: printsipy postroeniya, vozmozhnosti i perspektivy [Fiber-optic sensors and systems: design principles, opportunities and prospects]. *Lightwave. Russian edition – Lightwave*, 2006, no. 4, pp. 44–46. (In Russian)
15. Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I., Korolev I.G., Bozhkov A.S. Volokonnye reshetki pokazatelya prelomleniya i ikh primeneniya [Fiber gratings and their applications]. *Kvantovaya elektronika – Quantum Electronics*, 2005, no. 12, pp. 1085–1103. (In Russian)
16. Medvedkov O.I., Korolev I.G., Vasil'ev S.A. *Zapis' volokonnykh breggovskikh reshetok v skheme s interferometrom Loida i modelirovanie ikh spektral'nykh svoystv* [Record of fiber Bragg gratings in the scheme of interferometer Lloyd and modeling of their spectral properties]. Preprint no. 6. Fiber optics research center of the Russian academy of sciences. Moscow, 2004, pp. 12–39.