УДК 681.2

Л.Л. Фирсов, С.А. Юргенсон

Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассматриваются основные принципы построения системы встроенного мониторинга на базе волоконно-оптических датчиков, ультразвуковых волн и акустической эмиссии, а также приводятся общие требования к системе мониторинга технического состояния авиационных конструкций.

Ключевые слова: системы мониторинга технического состояния, композиционные материалы, авиационные конструкции, волоконно-оптические датчики, акустическая эмиссия.

L.L. Firsov, S.A. Iurgenson

Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russian Federation

CONCEPT DESIGN OF MONITORING SYSTEM OF THE MECHANICAL CONDITION OF AIRCRAFT STRUCTURES

The paper presents the main principles of concept development of the system monitoring based on fiber optic sensors, ultrasonic waves and acoustic emission and describes the general requirements to the system of monitoring of technical condition of aircraft structures.

Keywords: system monitoring, composite materials, aircraft structures, fiber optic sensors, acoustic emission.

Создание комплексной системы раннего обнаружения повреждений критических элементов конструкции перспективной авиационной техники находится в общем комплексе современных представлений о необходимости повышения безопасности полетов.

Проблема состоит в том, что эксплуатация воздушного судна (ВС) гражданского и военного назначения до настоящего времени преимущественно основана на традиционных подходах к назначенному

ресурсу и проведению технического обслуживания в форме регламентных работ с заданной периодичностью, при этом фактическое состояние объекта не учитывается. Внедрение в практику более эффективной системы эксплуатации согласно техническому состоянию реализуется крайне медленно, главным образом потому, что достоверная оценка технического состояния ВС и их бортовых систем сама по себе представляет сложную техническую задачу [1]. Поэтому традиционная система жестко фиксированных периодических регламентных работ сохраняет свои позиции благодаря преимуществам ее простоты и возможности прогнозирования. Между тем потребность в переходе к более совершенным системам эксплуатации ВС гражданского и военного назначения становится все более очевидной.

Главным направлением решения этих проблем представляется, в соответствии с системным подходом и возможностями современных информационных технологий, создание комплексных систем контроля и управления техническим состоянием и процессами эксплуатации и обслуживания ВС, основанных на сборе информации о техническом состоянии ВС с многочисленных и разнотипных бортовых датчиков, на автоматизированном анализе этой информации и формировании рекомендаций как по оперативному реагированию, так и по формированию технической политики на всем протяжении жизненного цикла ВС и его систем.

Примером такого подхода является концепция комплексной системы мониторинга состояния ВС IVHM (Integrated Vehicle Health Management) [2]. Концепция системы мониторинга технического состояния конструкции (СМТС) предполагает контроль и планирование процессов эксплуатации ключевых элементов конструкции ВС. Важной проблемой, на решение которой направлена рассматриваемая система, является необходимость обеспечения надежного и безопасного применения в конструкции перспективных ВС полимерных композиционных материалов (ПКМ).

В настоящее время материалы на основе термопластичных связующих широко применяются в изделиях авиационной техники военного и гражданского назначения, в том числе в особо ответственных конструкциях с высокими действующими напряжениями и деформациями. Стоит отметить, что для металлических конструкций используется принцип контролируемого роста трещины. Согласно МОР 25.571

для конструкций с многопутной передачей нагрузок фиксируется начальная трещина, происходит расчёт времени роста трещины до обнаруживаемой трещины и рост трещины до размера критической длины. Далее согласно установленной процедуре и полученным данным назначается период осмотров. Для ПКМ данный подход не применим в силу того, что разброс скорости роста трещины в ПКМ настолько велик, что невозможно зафиксировать и определить скорость роста трещины и получать воспроизводимые результаты. Это приводит к тому, что для ПКМ знание предыдущей истории нагружения конструкции не позволяет спрогнозировать остаточную прочность и ресурс, хотя для металлов методология предсказания остаточной прочности по истории нагружения отработана и применяется в СМТС для металлических конструкций повсеместно. Для конструкций из ПКМ необходимо иметь достоверные методы оценки остаточной прочности в любой момент времени. Это связано с тем, что в процессе эксплуатации может произойти ударное повреждение, которое существенно снизит остаточную прочность конструкции.

В то же время использование ПКМ в критических элементах конструкций сопровождается необходимостью учета ряда факторов, среди которых следует выделить разброс физико-механических характеристик материалов и готового изделия, наличие повреждений внутренней структуры на микроуровне, зависимость свойств компонентов от факторов внешней среды, неоднозначное поведение при многоцикловом нагружении, в основном хрупкий характер разрушения. Для контроля данных особенностей применяется широкий спектр методов неразрушающего контроля на всех стадиях изготовления и эксплуатации, что значительно повышает стоимость жизненного цикла изделия. Таким образом, для конструкций из ПКМ актуальным вопросом является использование современных методов контроля и мониторинга состояния материала изделия для выявления на ранней стадии внутренних повреждений и дефектов конструкции с одновременной оценкой изменения предельно допустимых нагрузок на нее.

Функционал системы встроенного контроля должен обеспечивать решение следующих задач:

- контроль развития повреждений – решение данной задачи обеспечивает переход на эксплуатацию по техническому состоянию при условии возможности прогнозирования развития повреждения;

– контроль внешних воздействий – фиксация случаев ударных воздействий на конструкцию, вызывающих внутренние дефекты.

Необходимость решения второй задачи связан с необходимостью обеспечения для композиционных конструкций возможности определения уровня повреждения и его обнаруживаемости. В соответствии с [3] категории повреждений разделяют на 5 групп, с учетом которых проводят статические и ресурсные испытания авиационной техники. При этом среди самых затратных для эксплуатации выделяются 1-я и 2-я категории, обнаружение которых традиционными средствами затруднено или требует высокой периодичности осмотров, что значительно снижает экономическую эффективность использования самолета.

Применение системы мониторинга значительно сокращает длительность эксплуатации самолета с повреждением категории № 1 (рис. 1), что позволяет сократить объем ресурсных испытаний при подтверждении прочности типовой конструкции при наличии повреждения.

Рис. 1. Уровни нагрузок по времени эксплуатации

Типовые уровни повреждений приведены на рис. 2.

При контроле внешних воздействий возможны 4 уровня реализации функционала системы, при этом на каждом уровне решаются задачи предыдущего:

- Уровень 1 – система определяет, что произошло событие.
- Уровень 2 – система определяет место, где произошло событие.
- Уровень 3 – система оценивает критичность повреждения (размеры дефекта).
- Уровень 4 – система прогнозирует остаточную прочность и ресурс конструкции.

Рис. 2. Блок-схема зависимости между проектными уровнями нагрузок и категориями интенсивности повреждения

Переход на каждый последующий уровень значительно повышает требования к системе в плане расположения и количества датчиков, объемов обрабатываемых данных.

СМТС система строится на основе наличия на борту или у наземных служб следующего базового набора компонентов, которые в совокупности и формируют систему технического контроля:

- диагностические датчики,
- источники сигнала,
- линии передачи информации,
- блоки сбора, армирования и опциональной обработки информации,
- блоки передачи данных наземным службам,
- алгоритмы сбора информации и их обработки.

Весовая эффективность системы во многом определяется идеологией обработки и хранения данных, т.е. разделением функционала обработки, хранения и анализа данных между наземным и бортовым комплексами. Возможны два варианта построения системы (рис. 3), которые отличаются объемом вычислительных мощностей на борту самолета. Каждый вариант построения обладает своими преимуществами и недостатками.

Рис. 3. Построение системы в зависимости от обработки данных:
а – обработка в наземном комплексе; б – обработка на борту

Способы передачи данных также имеют вариативность – это передача данных через спутниковый сигнал, что потребует минимизации объемов передаваемых данных, в том числе частичная или полная обработка данных на борту самолета. Второй вариант – съем данных на земле при прохождении технического обслуживания, что накладывает ряд требований на систему хранения данных на борту и наличие портов для съема данных.

В зависимости от наличия в составе системы излучателей волн или сигналов (рис. 4), которые анализируются, система может быть активной (присутствует источник сигнала, который меняется при изменении конструкции) или пассивной (система фиксирует собственные изменения конструкции).

Для построение активных систем возможно применение следующих вариантов методов неразрушающего контроля:

- ультразвуковые методы на основе направленных волн Релея и Лэмба;
- волоконно-оптические датчики с брегговскими решетками.

Рис. 4. Система с излучателем анализируемого сигнала (а) и система с анализом собственных изменений конструкции (б)

Пассивные системы могут строиться на базе метода акустической эмиссии, которая также может дополнять активные методы анализа состояния конструкции.

Волны Релея и Лэмба

Благодаря своей чувствительности к локализованным изменениям геометрии и/или упругих свойств материала бегущие волны (волны Лэмба и SH-волны) широко применяются в системах ультразвукового неразрушающего контроля и мониторинга состояния инженерных конструкций для диагностики повреждений.

При наличии препятствий различных типов диагностирующий волновой сигнал, взаимодействуя с ними, генерирует рассеянные волновые поля. Возникающий при этом динамический отклик конструкции, регистрируемый набором интегрированных или внешних по отношению к исследуемому объекту сенсоров, содержит информацию об имеющихся дефектах и может быть использован для их обнаружения.

Рис. 5. Распределение волн внутри конструкции

Имеющиеся методы идентификации повреждений на основе измеряемых нестационарных волновых полей можно разделить на две

группы по тому признаку, используется или нет при решении данной обратной задачи информация о волновых полях в неповрежденной структуре. В первом случае анализируется разница между измеряемым сигналом и исходным (эталонным), что в случае статистически значимых отличий позволяет судить о наличии дефектов и после дальнейшей обработки определять их положение, используя время прихода отраженного ими волнового поля. В то же время применение подходов такого типа ограничено в основном лабораторными исследованиями, поскольку получение эталонного сигнала для уже эксплуатируемой конструкции зачастую не представляется возможным. Кроме того, в случае изменения внешних условий (например, температуры) использование базового эталонного сигнала может приводить к неправильным результатам.

Альтернативным подходом являются безэталонные методики идентификации повреждений. Для их реализации используют как преобразователи специальной конструкции, так и современные математические методы, например, метод обращения времени (МОВ), получивший широкое распространение для решения обратных задач волновой динамики в геофизике, акустике океана, неразрушающем контроле. Основой данной методики является обратимость волнового оператора по временной переменной в случае среды без диссипации, что позволяет сфокусировать волновое поле в окрестности локализованного источника колебаний, переизлучая в обратном направлении принятые от него сигналы с предварительным изменением знака времени. При этом источниками колебаний могут являться пленочный пьезоактивный элемент, некоторое ударное воздействие или локализованный дефект, рассматриваемый в качестве переотражателя. Реализация переизлучения может осуществляться как на физическом уровне с использованием системы активных сенсоров, установленных на исследуемой конструкции (активный МОВ), так и виртуально в рамках компьютерного моделирования (пассивный МОВ) [4].

Пример изменения сигнала при наличии и отсутствии повреждения при компьютерном моделировании представлен на рис. 6. На рис. 7 представлено изменение перемещений в заданной точке (моделирующей сенсор) при наличии и отсутствии дефекта.

Рис. 6. Результаты моделирования прохождения волны: *а* – без дефекта; *б* – при наличии эллиптического дефекта

Рис. 7. Изменение перемещения по времени при наличии и отсутствии дефекта

Волоконно-оптические датчики

Перспективным направлением в развитии технологии непрерывного мониторинга изделий из ПКМ является применение волоконно-оптических датчиков (ВОД) деформации, встроенных в состав конструкции, с помощью которых можно осуществлять непрерывный мониторинг изделий из ПКМ, а также выявлять и идентифицировать по-

вреждения внутренней структуры материала, что даёт возможность проводить оценку влияния дефектов на прочностные характеристики изделия. Создание системы непрерывного мониторинга на основе таких измерительных сетей позволит контролировать состояние конструкций в эксплуатации, не допускать выхода на режимы недопустимых уровней внешних нагрузок, своевременно выявлять повреждения критических элементов конструкции, что в целом приведет к повышению безопасности полетов и увеличению вероятности выполнения техникой поставленной задачи.

Система представляет собой набор волоконно-оптических датчиков (ВОД), внедренных в конструкцию (если речь идет о ПКМ) или расположенных на поверхности изделия (ПКМ и металл), которые за счет деформации решетки на оптоволокне измеряют деформацию в месте расположения. За счет информации от бортовой системы регистрации полетной информации возможно восстановить нагрузки, возникающие в элементе конструкции, и сопоставить их с зафиксированными деформациями от ВОД, что позволит сопоставить фактические данные замера и расчетные значения. Расхождение в этих значениях выше определенной (системной) погрешности позволяет говорить о наличии дефекта в конструкции.

Типовая схема построения системы приема-передачи данных на исследуемом агрегате представлена на рис. 8.

Рис. 8. Упрощенная схема интеррогатора

Сопоставление результатов замеров ВОД с моделью затрудняет влияние различных компонентов напряжений и внешних условий замеров (например, температура) на деформацию сенсора. Минимизация влияния данных ограничений требует дополнения системы датчиками температуры и расположения датчиков деформаций в различных направлениях в конструкции.

Поскольку все элементы планера имеют сложно-напряженное состояние, то наибольшую точность сопоставления результатов можно получить при внедрении системы на этапе, как минимум, статических испытаний конструктивно-подобных образцов. Это позволит однозначно сформировать ограничения и базовые параметры, применяемые в дальнейшем анализе.

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 °С необходимо фиксировать изменение длины волны Брэгга в 0,001 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 [5].

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.

Возможность сопоставления данных замера ВОД и расчетных значений сталкивается с двумя основными на сегодня нерешенными задачами – необходимостью нанесения на конструкцию слишком плотной сетки датчиков при построении системы и созданием точной математической модели, обеспечивающей возможность сопоставления данных с ВОД и различных процессов внутри конструкции. С затруднениями также связано получение точной информации о самой конструкции, так как изделия из композиционных материалов имеют разброс как по укладке, так и по результирующим толщинам, которые могут влиять на результаты расчетов.

Система с применением ВОД обладает высокой скоростью съема информации, что может значительно затруднить работу как наземной службы при обработке всего массива информации, так и бортовых вычислительных мощностей. Исходя из этого, система должна работать в импульсном режиме с определенными временными интервалами, а информация должна иметь еще больший шаг обработки с возможностью быстрого предоставления ее летному персоналу для минимизации затрат бортовых вычислителей.

В качестве расширения функционала системы и снижения требований по ее резервированию возможно применять акустическую эмиссию, которая позволит верифицировать и дополнять отдельные данные от ВОД.

Метод акустической эмиссии

Метод акустической эмиссии (АЭ) основан на анализе упругих волн, возникающих в результате локальной динамической перестройки внутренней структуры материала. Данный метод позволяет, в частности, определять параметры процесса дефектообразования – момент возникновения, положение, скорость и направление развития дефектов.

Характер сигналов АЭ весьма разнообразен. В зависимости от типа источника АЭ могут излучаться как импульсные, так и непрерывные сигналы. Наиболее характерным примером импульсной АЭ являются сигналы, генерируемые развивающейся трещиной. Примером непрерывного сигнала является АЭ, возникающая в процессе пластической деформации металлов.

Позволяя выявить изменения структуры, метод акустической эмиссии во многих случаях дает возможность предвидеть изменение эксплуатационных свойств материала. Однако существующие аппаратура и методики АЭ контроля в основном разрабатываются применительно к испытаниям металлических материалов.

Контроль ПКМ методом АЭ встречает ряд затруднений. Известно, что активность и интенсивности АЭ в процессе разрушения образца ПКМ возрастают, однако эти параметры слабо связаны с общим числом дефектов в материале. Более того, описаны случаи, когда увеличение числа макроскопических дефектов в ПКМ сопровождалось снижением активности АЭ. Акустико-эмиссионное исследование подобных ПКМ возможно только в том случае, если развитие микродефектов в них стимулировано не механическими нагрузками, а специальными воздействиями, такими как микроволновое или инфракрасное излучение.

Типовое изменение количества сигналов АЭ на единицу времени представлено на рис. 9. Как видно по графику, значительный рост уровня сигналов наступает в момент разрушения конструкции или незадолго до этого, что не позволяет напрямую применить АЭ для анализа роста повреждения.

Рис. 9. Рост количества импульсов при развитии дефектов

Таким образом, использование метода АЭ в процессе оптимизации таких материалов оказывается возможным только при условии использования специализированных аппаратурных решений и методик

анализа, разработанных применительно к исследованию ПКМ. Разработка подобных средств и методик должна быть выполнена на основании анализа существующих аппаратных и программных решений и в то же время учитывать специфические черты объекта контроля – характерные амплитуды и частоты (длительности импульсов) сигналов АЭ [6].

Одним из вариантов работы методики анализа конструкции может быть учет всех импульсов в конструкции на протяжении длительного времени и их суммирование, что позволяет получить интегральную характеристику (рис. 10). Для различных конструкций определение предельного «накопления» импульсов может быть только экспериментальным и должно быть связано с историей нагружения конструкции.

Рис. 10. Накопление импульсов АЭ в конструкции и их суммирование в процессе наработки изделия

В общем виде система мониторинга должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- Система должна быть спроектирована с учетом всех нормативных документов, которые применяются к электрическим, пилотажно-навигационным и другим системам самолета. Все элементы системы должны сопровождаться паспортом на этот элемент и быть аттестованы.
- Система в целом и ее отдельные элементы должны иметь сертификаты или получить одобрение сертификационных или других органов, регулирующих приемку или сертификацию ВС.

– Ресурс системы должен соответствовать проектному сроку службу самолета. На начальных этапах целесообразно применение системы в тестовом режиме с максимальным сбором информации, что позволит получить необходимый объем информации как для дальнейшего совершенствования системы, так и для разработчиков ВС.

– Все датчики системы при установке на борт должны иметь номера, обеспечивающие их идентификацию в процессе снятия данных, аналогичные номера должны быть записаны в паспорт изделия и системы.

– Параметры эксплуатации системы должны соответствовать эксплуатационным ограничениям самолета.

– Бортовая система должна быть согласована с бортовым вычислительным комплексом и использовать схожие алгоритмы и интерфейсы работы.

– Бортовая система должна обеспечивать минимальное энергопотребление и комплектоваться, исходя из требований минимального веса системы на борту.

– Бортовая система должна обеспечивать самодиагностику и выявление отказов в датчиках или других элементах.

– Расположение датчиков на планере должно обеспечивать резервирование информации и возможность проводить анализ, как минимум, по трем датчикам, для каждой контролируемой точки конструкции.

– Наземная часть системы не должна требовать высокой квалификации обслуживающего персонала и обладать высокой мобильностью. Модуль снятия данных должен быть мобилен или использовать существующие средства получения информации от бортовых систем ВС. Обработка полученной информации должна происходить с минимальным участием оператора.

– Регламентные работы по системе определяются на этапе ее проектирования и не должны значительно влиять на трудоемкость технического обслуживания.

– Модуль производственного контроля должен иметь минимальные габаритные размеры и формироваться в виде мобильного блока.

При анализе необходимых мест расположения датчиков системы мониторинга одним из ключевых моментов является анализ самой конструкции планера для выявления наиболее нагруженных мест.

Данный подход позволяет значительно сократить потребное количество датчиков в конструкции и снизить вес системы.

На рис. 11 представлен пример зон для детального контроля конструкции. Наиболее нагруженная зона кессона расположена в районе пилона двигателя. Также целесообразно проводить контроль мест навески механизации и шасси.

Рис. 11. Нагруженные зоны кессона крыла

Заключение

В работе приведены основные аспекты построения системы мониторинга технического состояния воздушного судна из металлов и ПКМ. Показано, что для металлических конструкций СМТС строится на основе знания фактической нагруженности экземпляра конструкции и при сравнении с лабораторным образцом. При этом производится расчёт остаточного ресурса по сравнению с базовым лабораторным образцом.

Для конструкций из ПКМ данный подход не применим, и системы СМТС должны строиться на принципе определения остаточной прочности конструкции в каждый момент времени. Данная необходимость диктуется спецификой накопления повреждений в ПКМ и зависимостью остаточной прочности от ударных воздействий. Для решения этой задачи доступны следующие подходы: акустическая эмиссия и ультразвуковое исследование ПКМ. Эти методы, применённые раздельно или совместно, позволяют выделять прекурсоры повреждений, прогнозировать остаточную прочность конструкций из ПКМ.

Следует отметить, что при использовании СМТС в качестве системы для обоснования ресурса и допустимых интервалов инспекций требования по дублированию и резервированию критических систем самолёта, от которых зависит безопасность, полностью распространяются на СМТС. Эти требования дополнительно усложняют реализацию СМТС для ПКМ в авиационных конструкциях.

Список литературы

1. NASA-CR-192656. Research and technology goals and objectives for integrated vehicle health management (IVHM) – NASA. – USA. – 1992.
2. ОСТ 1.02776–2001. Эксплуатация технической авиационной техники по состоянию. (Введ. 29.05.2001). – М.: Изд-во НИИСУ, 2001. – 6 с.
3. Advisory Circular № 20-107B Composite aircraft structure. – USA, FAA, 2009.
4. Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Еремин А.А. Локализация повреждений и источников колебаний в упругих слоистых волноводах пассивным методом обращения времени // Труды XXVI Междунар. инновационно-ориентированная конф. молодых ученых и студ. – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2015.
5. Применение оптоволоконных технологий при создании встроенных систем самодиагностики авиационных конструкций / А.Н. Серьёзов, А.Б. Кузнецов, А.В. Лукьянов, А.А. Брагин // Научный вестник НГТУ. – 2016. – Т. 64, № 3. – С. 95–105.
6. Игнатьева Е.А., Круглова А.Н. Метод акустической эмиссии при исследовании полимерных композитов // Новый университет. – 2014. – № 02(24).

Получено 06.11.17