

УДК 621.372

С.Р. ИГНАТОВИЧ¹, Н.И. БУРАУ², И.М. ЗАКИЕВ¹, А.Д. КОГАН¹¹ *Национальный авиационный университет, Киев, Украина*² *Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев, Украина*

ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассматриваются особенности применения виброакустических методов диагностирования начальных трещиноподобных повреждений неметаллических элементов конструкций авиационной техники на примере изделия из стеклопластика. Представлена измерительная система и методика виброакустической диагностики. Даны рекомендации по использованию методов обработки диагностической информации для раннего обнаружения трещиноподобных повреждений элементов конструкций из стеклопластика.

виброакустическая диагностика, композитные материалы, трещиноподобные повреждения, измерительная система, методика измерений, обработка информации

Введение

Элементы конструкций авиационной техники (АТ) в процессе эксплуатации подвергаются комплексу воздействий статического и динамического нагружения, температуры и агрессивной среды, что зачастую является причиной возникновения и развития различного рода повреждений. По данным [1] к наиболее общим и распространенным повреждениям металлических элементов конструкций АТ относятся усталостные трещины, коррозия, нарушение соединений, растрескивание вследствие коррозии под напряжением. Для неметаллических элементов конструкций АТ (из композитных материалов) практически в равных пропорциях встречаются повреждения типа забоины, расслоение материала и нарушение соединений, которые можно классифицировать как трещиноподобные. Указанные повреждения могут привести к разрушению элементов конструкций летательного аппарата в эксплуатации и стать причиной непоправимых катастрофических последствий.

Для поддержания требуемого уровня безопасности полетов и повышения эффективности эксплуатации АТ необходимо обеспечить неразрушающее обнаружение повреждений докритических размеров. Такая задача является весьма сложной для неметал-

лических элементов конструкций вследствие особенностей физических свойств композитных материалов, которые ограничивают применение многих классических (невибрационных) методов неразрушающего контроля. Вибрационные и виброакустические методы имеют ряд значительных преимуществ по сравнению с невибрационными методами. В частности, это возможность контроля неметаллических элементов из материалов с малыми значениями модуля упругости и значительными коэффициентами затухания упругих колебаний (резины, пластиков, многослойных композитных материалов), эффективность обнаружения начальных, в том числе скрытых (до 30 мм в пластиках), дефектов расслоения и нарушения соединений [2]. Указанные возможности данных методов позволяют создать информационно-диагностический комплекс для мониторинга состояния неметаллических элементов конструкций АТ.

Формулирование проблемы. На сегодняшний день для диагностики неметаллических элементов конструкций наибольшее распространение получили акустические импедансные дефектоскопы, например, типа ИАД-3 [2]. Особенность использования таких дефектоскопов состоит в необходимости перемещения преобразователя по всей поверхности

контролируемого объекта со скоростью не более 1,5 мм/с. Акустический импедансный метод, который положен в основу данных приборов, состоит в определении разности механических импедансов (это отношение возмущающего усилия к скорости колебаний частичек среды в месте приложения силы) бездефектной и дефектной областей контролируемого объекта. Но как указывалось выше, композитные материалы, как правило, характеризуются малыми модулями упругости, что ограничивает использование подобных приборов. Кроме этого, пьезоэлектрический возмущающий элемент (излучатель) и приемник колебаний дефектоскопов смонтированы в одном корпусе и требуют постоянного контакта с поверхностью контролируемого объекта.

Для решения данной задачи предлагается использовать метод свободных колебаний (МСК), в соответствии с которым возмущающий элемент (ударник) кратковременно контактирует с контролируемым объектом, и после возбуждения не оказывает влияние на параметры и характеристики свободных колебаний объекта [3]. Целью данной статьи является разработка на основе использования МСК измерительной системы и методики виброакустической диагностики трещиноподобных дефектов элементов конструкций АТ из композитных материалов.

Решение проблемы

Измерительная система разработана на базе ПК и преобразователя сигналов дефектоскопа ИАД-3. В ПК был встроен генератор сигналов, с которым соединен преобразователь дефектоскопа, а также установлено специальное программное обеспечение (ПО) для обеспечения возможности возбуждения в преобразователе электрических сигналов произвольной формы и записи в реальном масштабе времени сигналов приемника (пьезоэлектрического типа) виброакустических колебаний контролируемого объекта для их дальнейшей обработки и анали-

за. Приемник устанавливается в произвольно выбранных точках поверхности объекта, регистрация и запись диагностической информации в ПК осуществлялись с использованием звуковой карты.

Для обработки диагностической информации в системе предусматривается использование стандартного ПО на основе спектрального анализа, а также применение более эффективных современных методов цифровой обработки сигналов.

На рис. 1 приведено окно стандартизированного ПО, с помощью кнопок управления которого можно управлять процессами записи излучаемых колебаний, их обработки и визуализации результатов анализа. Общее окно состоит из четырех составляющих окон с соответствующими панелями управления. В правом нижнем углу в реальном масштабе времени отображается сигнал излучаемых объектом свободных затухающих колебаний. Интерактивное управление позволяет изменять масштаб представления сигнала. Остальные три окна представляют результат определения спектральной плотности измеренных сигналов в традиционном виде амплитудного спектра (левое нижнее окно), в виде изменяющегося во времени спектра (правое верхнее окно), и трехмерное представление спектральной плотности во времени в течение проведения эксперимента (левое верхнее окно). В последнем представлении каждая кривая отвечает спектральной плотности отдельного отклика объекта на одно ударное возбуждение, в верхней части представленного семейства кривых изменения в графиках соответствуют попаданию ударного устройства в дефектную область контролируемого объекта.

Использование стандартизированного ПО с анализом обобщенных энергетических характеристик является целесообразным и эффективным при диагностике трещиноподобных повреждений элементов конструкций из композитных материалов, которые по своим размерам можно отнести к визуально контролируемым.

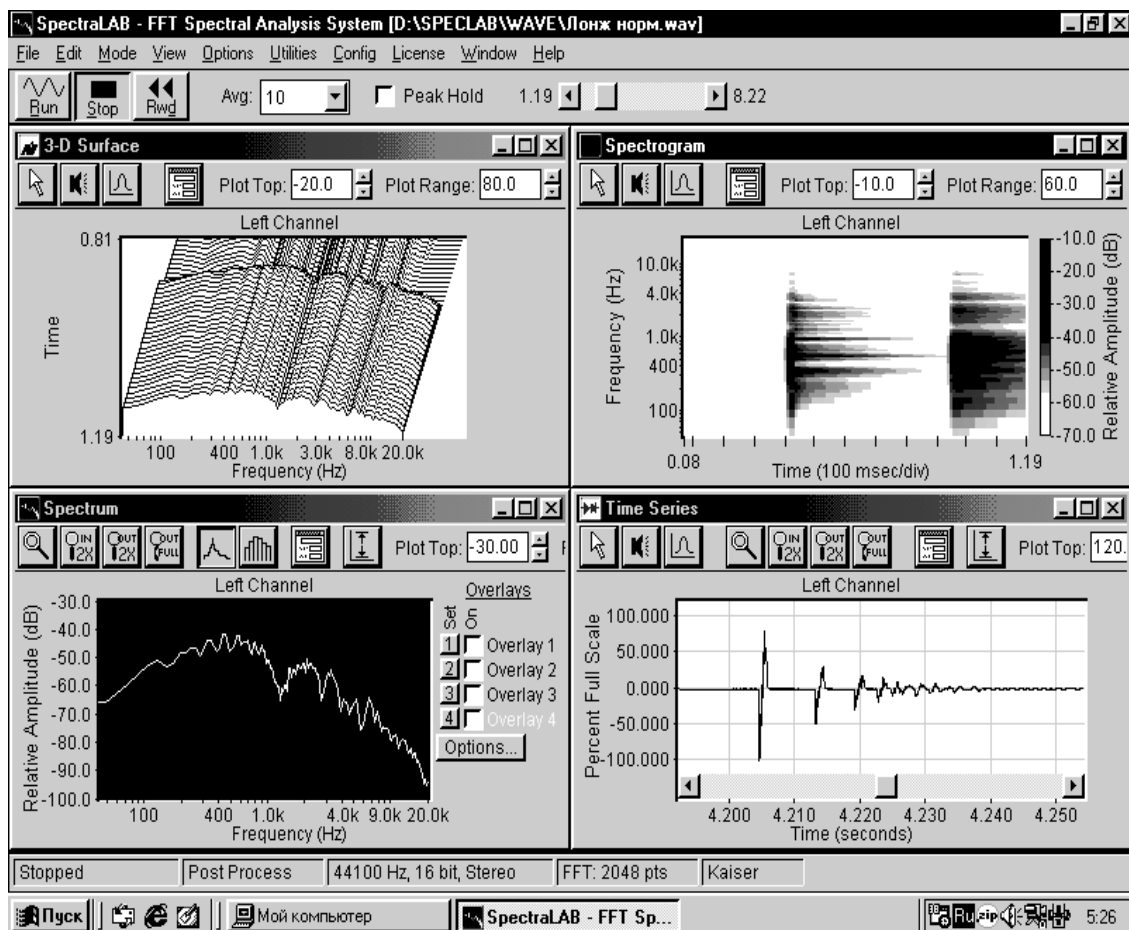


Рис. 1. Окно стандартизированного программного обеспечения ПК измерительной системы

Для диагностики зарождающихся поверхностных или скрытых дефектов используются более эффективные методы обработки сигналов и выделения характерных составляющих диагностической информации [4, 5]:

- Алгоритм множественной классификации сигналов MUSIC (multiple signal classification) с высокой разрешающей способностью для спектральной обработки многокомпонентных сигналов и выделения узкополосных информативных составляющих на фоне широкополосного измерительного шума.
- Оценивание показателей затухания узкополосных информативных составляющих измеренных сигналов с использованием метода Прони (при аппроксимации N -точечной выборки множества данных q -членной моделью комплексных экспонент).

• Оценивание относительных характеристик измеренных виброакустических сигналов (коэффициентов формы, вероятности, импульсности и фона), инвариантных к интенсивности ударного возбуждения контролируемого объекта.

- Полиспектральный анализ, состоящий в использовании и анализе спектральных характеристик высших порядков (биспектров, триспектров) для выделения связанной с появлением повреждения нелинейности контролируемого объекта и уменьшения зависимости диагностических признаков повреждения от влияния аддитивных помех в измерительном канале.

• Частотно-временной анализ на основе преобразований Вигнера – Вилля и Чои – Вильямса.

- Масштабно-временной анализ на основе Вэйвлет – преобразования.

В качестве объекта контроля использовались элементы конструкций переменного профиля из высокопрочного стеклопластика, изготовленного на основе стеклоткани с эпоксидно-фенольным наполнением. Экспериментальные исследования проведены для бездефектного состояния контролируемых образцов и при искусственно внесенных трещиноподобных повреждениях (расслоение стеклопластика). Относительные размеры внесенных повреждений – от 0,005 до 0,01. Для каждого состояния контролируемого образца было получено по 10 выборок, характеризующих импульсные отклики образца при ударном возбуждении. Анализировались импульсные отклики эффективной длины 2048 точек (период дискретизации 10^{-4} с).

Как показали результаты анализа диагностической информации, все использованные методы обработки позволили идентифицировать повреждения. Наиболее эффективным оказалось использование полиспектрального анализа, частотно-временных преобразований, метода Прони и двухуровневой обработки сигналов с использованием Вэйвлет-преобразования и последующего спектрального оценивания элементов разложения.

Заключение

Проведенные исследования показали, что начальные поверхностные и скрытые трещиноподобные повреждения (например, типа расслоения) элементов конструкций АТ из композитных материалов могут быть обнаружены в процессе вибрационной и виброакустической диагностики по методу свободных колебаний.

Для виброакустической диагностики разработана измерительная система, позволяющая в реальном масштабе времени регистрировать, записывать, визуализировать импульсные отклики объекта контро-

ля и проводить их спектральную обработку с отображением результата в одномерном, контурном и трехмерном представлениях.

Результаты обработки диагностической информации с использованием современных методов анализа позволяют сделать вывод о возможности проведения контроля состояния неметаллических элементов конструкции летательных аппаратов в реальных условиях эксплуатации.

Литература

1. Staszewski W. Monitoring on-line integrated technologies for operation reliability // Air & Space Europe. – 2000. – Vol. 2, № 4. – P. 67-72.
2. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
3. Игнатюк С.Р., Бурау Н.И., Тяпченко А.Н. Результаты экспериментальных исследований виброакустического метода свободных колебаний для диагностики роторных элементов авиационных двигателей // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – Х.: ХАІ, 2003. – Вип. 40/5. – С. 79-81.
4. Бурау Н.И., Марчук П.И., Тяпченко А.Н. Анализ современных методов обработки акустических сигналов для их использования в задачах виброакустической диагностики // *Акустичний вісник*. – 2001. – 4, № 4. – С. 3-10.
5. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

Поступила в редакцию 4.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Г. Кучер, Национальный авиационный университет, Киев.