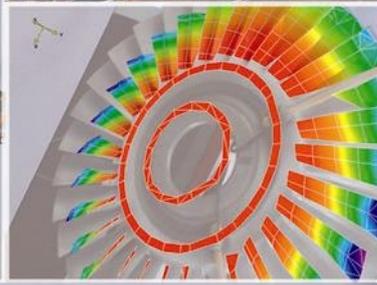
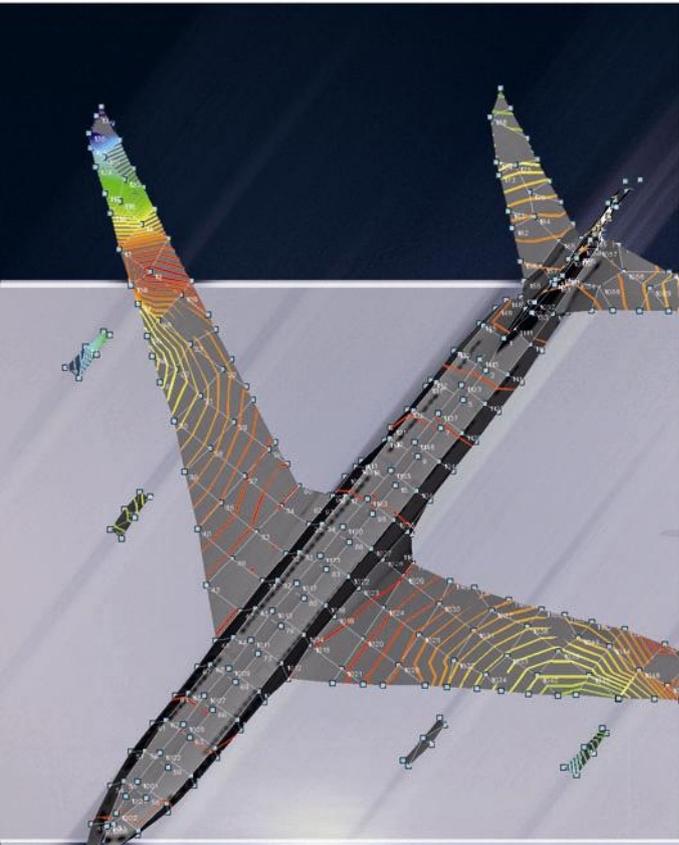


# Вибрационные измерения в аэрокосмической отрасли



*Применение лазерной технологии измерений в аэрокосмической отрасли помогает улучшить характеристики продукции, ускорить ее продвижение на рынок и снизить стоимость разработки*

Наземные виброиспытания  
Шум, вибрация, удар  
Экспериментальный модальный анализ  
Испытания материалов  
Испытания двигателей

# Вибрационные измерения при разработке аэрокосмической техники

*Испытания конструкций – составная часть процесса проектирования и производства аэрокосмической техники.*

*Это основа улучшения характеристик, качества, безопасности и надежности конечного изделия.*



Требования рынка к новой, еще более эффективной аэрокосмической продукции увеличивает число отработываемых вариантов конструкций и усложняет их испытания. Специалистам по проектированию и доводке необходимо проводить более эффективные модальные испытания для повышения производительности и поддержания точности и корреляции с конечно-элементными моделями (например, при анализе действующих нагрузок, акустического излучения и т. д.). Также для этих новых конструкций необходимо изучение характеристик во многих пространственных точках. Сочетание большого количества объектов и точек измерений быстро увеличивает стоимость модальных испытаний, выполняемых традиционными способами, учитывая большие объемы работ по подготовке и препарированию конструкции акселерометрами и многоканальными системами регистрации данных.

## Шум, вибрация и удары

Конкурентные преимущества производителей гражданской авиационной техники сосредоточены в двух областях: топливной экономичности и повышении комфорта пассажиров. В связи с этим, авиационные инженеры еще более заинтересованы в измерениях шума, чем их предшественники.



С повышением акустического качества салона улучшается комфортность, и пассажиры выбирают самолеты следующего поколения. Также самолеты с пониженным уровнем внешнего шума могут приниматься в аэропортах крупных городов с быстрым ростом трафика. Виброметры Polytec – выбор аэрокосмических компаний, стремящихся проводить NVH-исследования своих новейших самолетов.



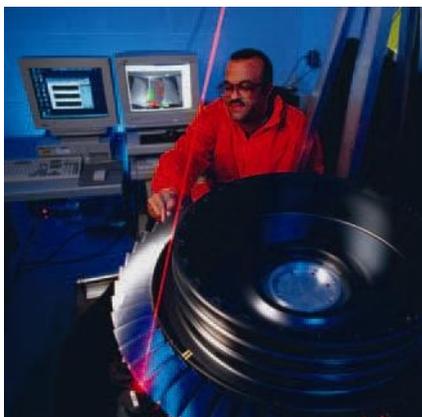
### Испытания на флаттер

В Технологическом институте BBC (AFIT) сканирующий виброметр Polytec PSV-400-3D применяется для исследования вибрационных характеристик беспилотных летательных аппаратов (UAV) и других сложных аэрокосмических и транспортных конструкций. Он позволил улучшить результаты конечно-элементного анализа флаттера и значительно сократить время испытаний и обработки результатов.

### Испытания двигателей

Экологические требования и увеличение тяги выводят проектирование двигателей на новый уровень. Правильное понимание явления вибрационной долговечности – одна из важных задач, которая успешно может быть решена с использованием лазерной виброметрии (см. статью на странице 12)

Измерение вибрации турбинной лопатки  
Фото:  
Greg Roberts, Pratt & Whitney.



### Наземные виброиспытания

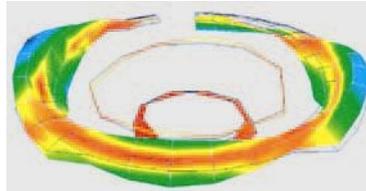
Наземные виброиспытания (GVT) – необходимое требование для новых самолетов и аэрокосмических конструкций. Полученные данные могут быть использованы для модального анализа и корреляции с конечно-элементной моделью, анализа нагрузок с целью предотвращения разрушения и проверки отсутствия флаттера.

### Испытания деталей и узлов

При вибрационном анализе деталей и узлов самолета описывается динамика конструкции, определяются собственные частоты и полная модальная модель.

Например, шасси самолета – критический узел, который должен соответствовать высочайшим стандартам качества. Дополнительно, на странице 9 читайте статью об экспериментальном исследовании колеса шасси самолета A320 с применением трехкомпонентного сканирующего лазерного виброметра.

Рабочие формы колебаний колеса шасси самолета.



Подробная статья о наземном динамическом испытании солнечного паруса в NASA на странице 4.



### Испытание микроэлектромеханических устройств и печатных плат

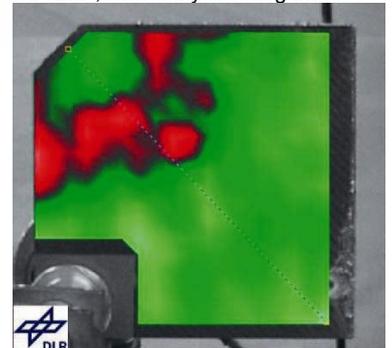
Лазерная виброметрия – наилучший выбор для испытаний печатных плат и микроэлектромеханических сенсоров и приводов. ([www.mems-analysis.com](http://www.mems-analysis.com)).

### Испытания материалов

Расслоение и растрескивание – основные дефекты, значительно снижающие эксплуатационные свойства аэрокосмической продукции. Для поиска локализованных дефектов в качестве методов неразрушающего контроля успешно применяются нелинейная лазерная виброметрия ([www.polytec.com/usa/aerospace](http://www.polytec.com/usa/aerospace)) и волны Лэмба (статья на странице 9).

Определение расслоения материала с использованием лазерной виброметрии.

Фото:  
IKP-ZFP, University of Stuttgart.



### Высокий полет

Сканирующая лазерная виброметрия дает возможность быстрых, бесконтактных (без дополнительного нагружения объекта) измерений вибрации всей поверхности с высоким пространственным и частотным разрешением. Используя сканирующие виброметры Polytec, авиационные инженеры-разработчики и ученые могут значительно сократить время и объемы вибрационных испытаний. Виброметры Polytec – золотой стандарт в области аэрокосмических разработок, управления качеством и мониторинге технического состояния. Более подробная информация на странице 15. Посетите сайт [www.polytec.com/usa/aerospace](http://www.polytec.com/usa/aerospace).

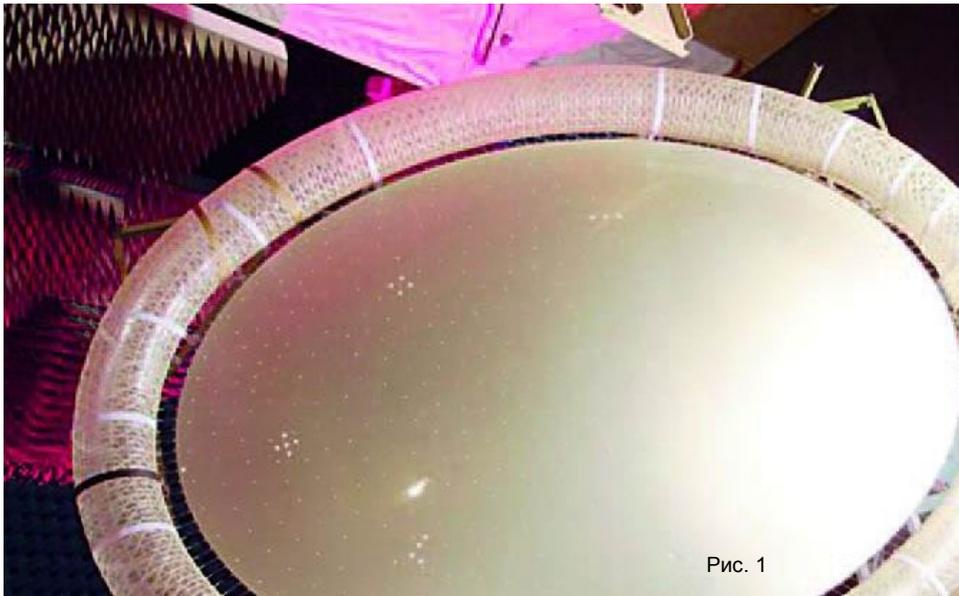


Рис. 1

## Введение

NASA разработало космическую систему Gossamer для снижения стоимости запуска и использования уникальных возможностей новых концепций.

Например, в настоящее время зеркальные антенны (Рис. 1) могут быть развернуты в космосе до 30 м. и устойчиво обеспечивать высокую скорость передачи данных. Другой пример системы Gossamer – солнечный парус, который представляет собой эффективный движитель. Солнечные паруса, занимая очень большую площадь, захватывают энергию протонов и служат движителями космического объекта. Тяга солнечного паруса, хотя она и невелика, действует в течении всей миссии, исключая необходимость в топливе. Последние достижения материаловедения и ультралегкая конструкция системы Gossamer позволили использовать солнечный парус при космическом исследовании.

Команда специалистов ATK Space Systems, SRS Technologies и исследовательского центра NASA в Лэнгли под руководством NASA In-Space Propulsion Office (ISP) разработала и проанализировала масштабную модель солнечного паруса (Рис. 2) для будущего применения при космических исследованиях. Наземные испытания солнечного паруса ставили перед инженерами три основные задачи:

- Измерения на поверхности большой площади и толщиной меньше, чем лист бумаги

- Значительно влияние внешних условий в виде нагрузки воздушной массой, поэтому необходимо проводить испытания в вакууме
- Высокая модальная плотность требует разбиения поверхности на регионы.

В статье приведено описание уникального исследования – динамического испытания в вакуумной камере модели 20-метрового солнечного паруса, которое проводилось в NASA Glenn Plum Brook Facility (Рис. 3).

## Вакуумная установка

Основной прибор для исследования форм колебаний - сканирующий лазерный виброметр Polytec (PSV-400). Для защиты лазерного сканера от вакуума он был помещен в камеру, находящуюся под давлением (Рис. 4). В камере имелись окно, через которое излучался лазер, и система усиленного воздушного охлаждения, предотвращающая перегрев оборудования. Система сканирующих зеркал (SMS) разработана и изготовлена так, чтобы выполнять измерения на всей поверхности паруса в вакуумной камере с расстояния свыше 60 м. SMS (Рис. 5) устанавливалась вблизи верхней поверхности вакуумной установки и центрировалась относительно объекта испытания, а виброметр крепился над рамой одной из больших дверей камеры. В составе SMS имелось стационарное зеркало, которое отражало лазерный луч Polytec к системе двух ортогональных активных зеркал.

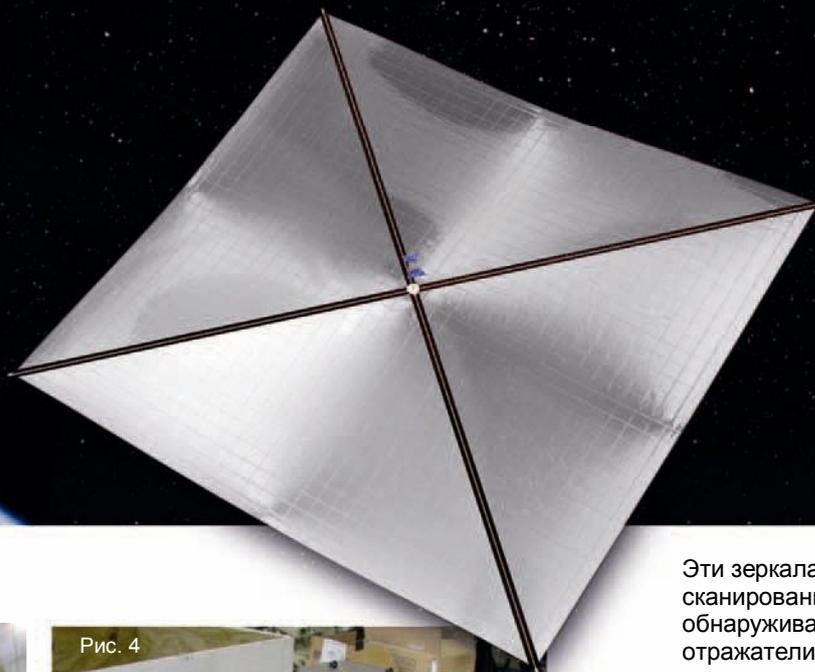


Рис. 2

# Под парусом

## Лазерная виброметрия помогает исследовать космические объекты проекта Gossamer

*NASA занято разработкой крупных ультра легких конструкций, относящихся к проекту Gossamer. Большие площади этих объектов и их малая плотность значительно усложняют испытания, так как земные условия и гравитация могут оказывать серьезное влияние. Лазерная виброметрия представляет собой критическую технологию для исследования динамических характеристик конструкций Gossamer благодаря своей точности, широкому диапазону применения и бесконтактным (без дополнительной нагрузки) измерениям.*



Эти зеркала использовались для сканирования поверхности паруса, обнаруживая закрепленные на ней отражатели. В основном, отражатели служили для получения хорошего сигнала и компенсации зеркального эффекта самой поверхности паруса.

**Полностью автоматизированная процедура испытания**

Специально разработанный алгоритм слежения давал возможность автоматического центрирования лазерного луча на каждом отражателе. Начальное выравнивание лазерной системы,



Рис. 3



Рис. 4

процесс слежения, и собственно процедура регистрации данных, были автоматизированы с помощью языка программирования Microsoft Visual Basic (VB).

Среда VB Engine и PolyFileAccess позволили программно управлять всеми функциональными возможностями системы Polytec. Выравнивание лазера виброметра с регулируемыми SMS зеркалами было полностью выполнено программой, которая использовала сканирующие зеркала для слежения по квадратной сетке отражателей. В процессе сканирования измерялся уровень отраженного сигнала. Программа определяла угловое положение по центру отражателя расчетом центраида по выборке значений уровней силы сигнала и соответствующим углам зеркал. После того, как лазер был выровнен по SMS, вторая программа выравнивала лазер по отражателям на солнечном парусе с помощью зеркал, регулируемых SMS. Когда все отражатели были идентифицированы, третья программа пошагово считывала их координаты из файла и запускала процедуру регистрации и сохранения данных. Для каждой точки замера программа могла повторить сканирование и центрировать лазерный луч, чтобы гарантировать наилучшее качество данных.

Эта полностью автоматизированная испытательная процедура была чрезвычайно важной, множество тестов выполнялись в течение 5 часов. Перед испытанием виброметр и SMS были проверены на установочном расстоянии 85 м (хотя возможно использование на больших расстояниях), далеко за пределами требуемого 60-и метрового расстояния для данного теста.

### Возбуждение колебаний паруса

Основной способ возбуждения колебаний при динамических испытаниях солнечного паруса заключается в использовании 8 электромагнитов, закрепленных у каждого сектора мембраны паруса (2 магнита в каждом секторе) вблизи концов мачт. Вид системы крепления показан на Рис. 6. Магнит установлен на вертикальном перемещающемся столе с линейным приводом для прецизионного дистанционного позиционирования в вакууме. Чтобы обеспечить работу должным образом, необходимо переместить магнит до паруса на расстояние 5 мм. Для этого небольшие камеры помещены рядом с каждым магнитом и тщательно выровнены, чтобы гарантировать достижение требуемого зазора.

Чтобы уменьшить перемещения паруса, при выключении вакуумного насоса наконечники мачт защищены электромагнитами, которые предотвращают вертикальное и боковое движение. В вакууме напряжение с электромагнита снимается, позволяя пружине отвести магнит от объекта испытания. Теперь наконечники мачт могут свободно перемещаться на мягкой подвеске, обеспечивая гравитационную разгрузку системы. Главные усилия при динамических испытаниях направлены на получение наилучшего качества данных на отдельном секторе в вакууме.

Выбирался наиболее качественный сектор мембраны паруса с наименьшим количеством дефектов. При его испытании для возбуждения использовались только магниты необходимого сектора. Испытание сектора сопровождалось возбуждением всей системы паруса, при котором одновременно работали по одному магниту в каждом секторе. Такая технология позволила выполнить адекватное возбуждение всей системы паруса и идентифицировать главные формы колебаний. Для сокращения времени испытания измерения на парусе выполнялись только на 5 мембранах в каждом секторе, по два измерения на концах каждой мачты.

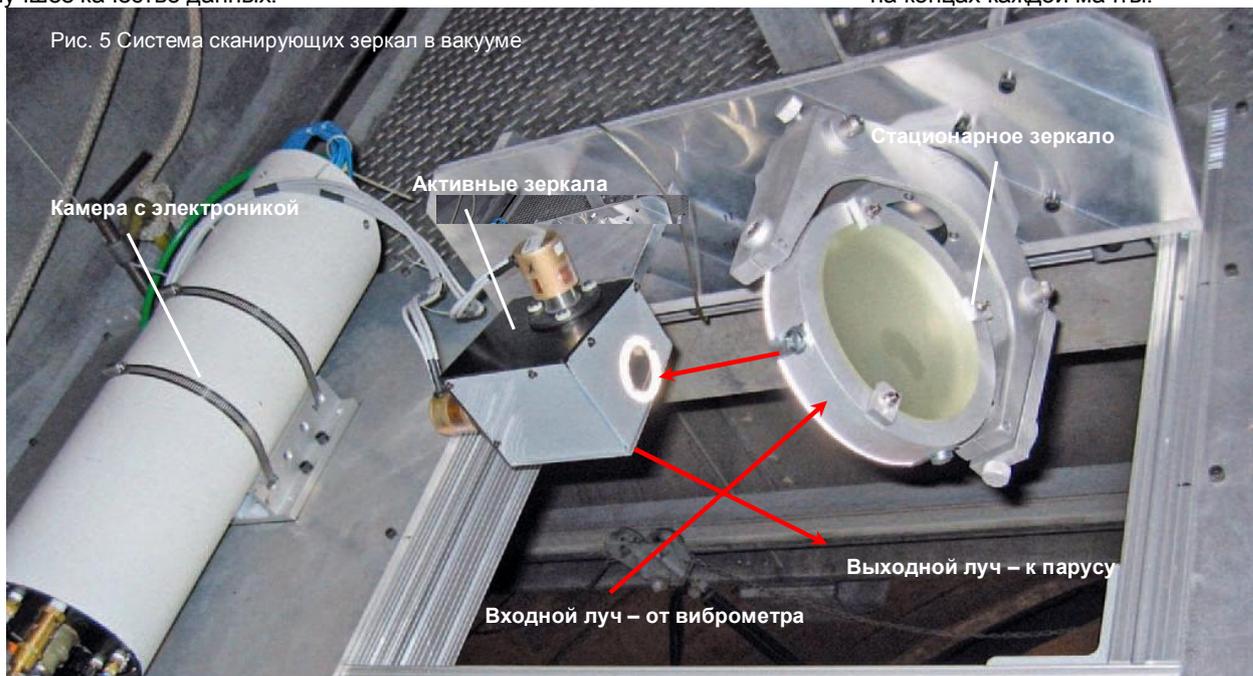


Рис. 5 Система сканирующих зеркал в вакууме

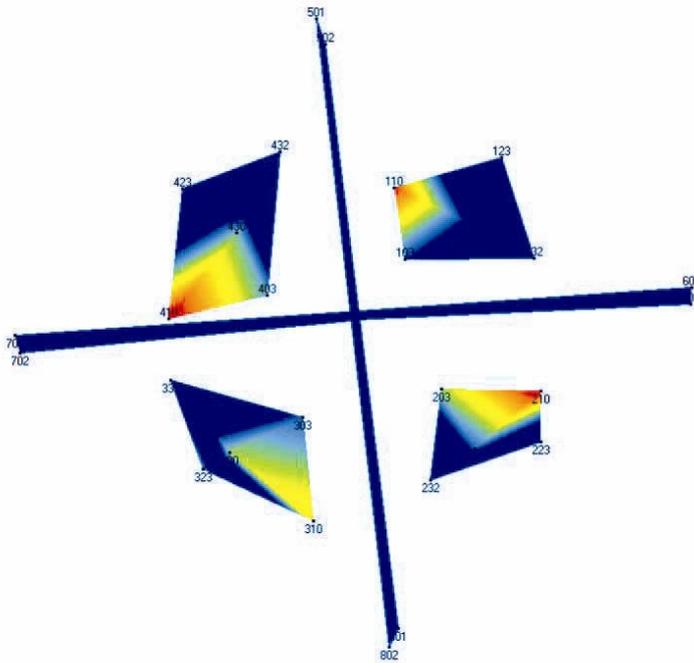


Рис. 7 Первая собственная частота колебаний системы солнечного паруса (0,5 Гц).

Так как конфигурация не изменялась между испытанием сектора и испытанием всей системы паруса, высокое пространственное разрешение результатов на секторе (44 измерения) можно сравнить с меньшим разрешением результатов, полученных при исследовании всей системы – всего 5 измерений на сектор.

### Динамика солнечного паруса

Первая основная форма колебаний системы солнечного паруса идентифицирована как “Pin Wheel”-форма со всеми секторами, колеблющимися в одной фазе (Рис. 7) с частотой 0,5 Гц. По этой форме все мачты поворачиваются в одной фазе, движение секторов – колебания с поворотом вокруг центральной оси сектора.

Первая мембранная форма, при которой вклад мачт меньше, проявляется на частоте 0,69 Гц. При колебаниях по этой форме сектор паруса изгибается по первой форме около своей центральной линии. Также были обнаружены другие преобладающие формы высших порядков, при которых длинная граница сектора колебалась по первой изгибной форме, но центральная линия – по 2-й или 3-й изгибной. Данные результаты важны для модификации аналитической модели конструкции, которая может быть использована для прогнозирования характеристик свободного от гравитации солнечного паруса на орбите при дальнейших итерациях проектирования.

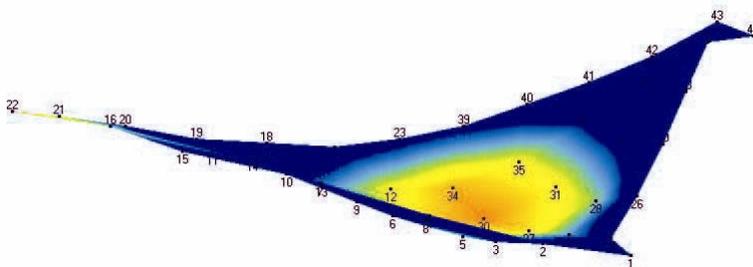


Рис. 8 Первая мембранная форма колебания паруса (0,69 Гц)

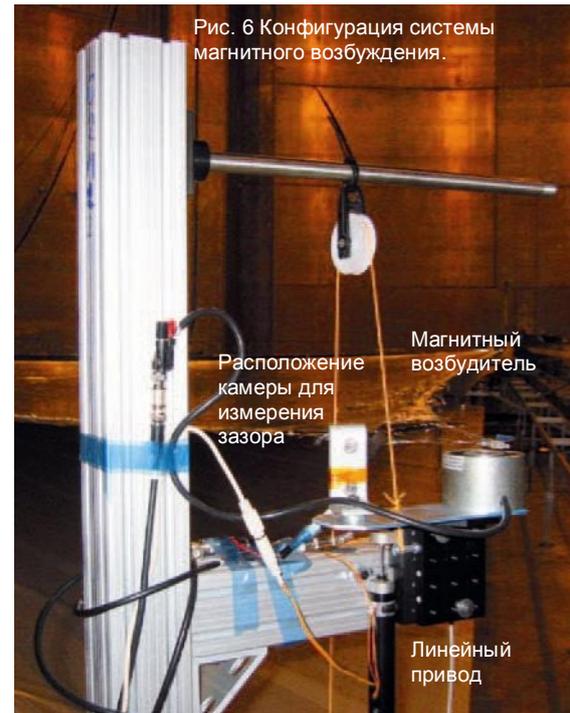


Рис. 6 Конфигурация системы магнитного возбуждения.

### Выводы

Лазерная виброметрия была успешно использована для идентификации основных форм колебаний солнечного паруса для корреляции со структурной моделью. Также идентифицированы высшие формы при проведении нескольких испытаний на каждом секторе. Методология, описываемая в данной статье, в дальнейшем будет применяться в других исследовательских проектах Gossamer, таких как программа разработки больших космических антенн.

Мы хотели бы поблагодарить NASA за разрешение опубликовать эту статью.

### Автор

James L. Gaspar  
Research Engineer  
Structural Dynamics Branch  
NASA Langley Research Center  
Hampton, Virginia, 23681  
James.L.Gaspar@NASA.GOV

# Шасси касается ПОЛОСЫ...

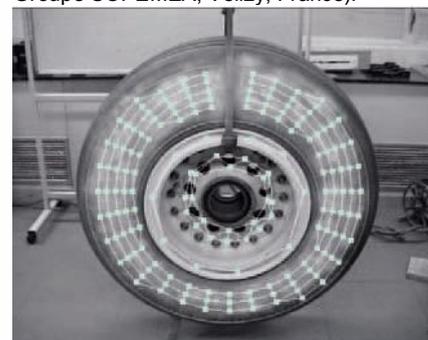
*Экспериментальное исследование колеса шасси самолета A320 с помощью трехкомпонентного сканирующего лазерного виброметра*



Измерения выполнялись с большой плотностью точек – более 100 на шине, ободу и ступице (Рис. 1). В связи с неперiodичностью возбуждения белым шумом использовалось окно Ханнинга с перекрытием 66%.

в сочетании с несложной процедурой настройки и высокой плотностью точек измерения. Получены качественные рабочие формы колебаний без вмешательства в конструкцию. Данное исследование показывает пример нарастающих тенденций применения трехмерных испытаний узлов аэрокосмической техники.

Рис. 1 Экспериментальная установка и сетка на колесе самолета A320 (предоставлено Groupe SOPEMEA, Vélizy, France).



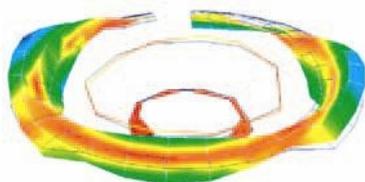
Автор

M. Jean-Marc Guilbault  
Groupe SOPEMEA  
Velizy, France  
guilbault@sopemea.fr

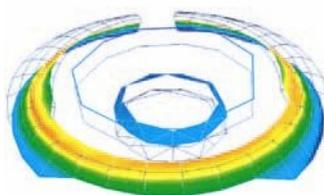
Авиационные шины – критические компоненты, которые должны соответствовать высочайшим стандартам качества. Низкочастотные колебания шин могут повлиять на управление самолетом при его движении по взлетно-посадочной полосе и способны вызывать нежелательные вибрации шасси. Анализ вибрации может описать динамику шины, определить основные частоты и построить полную модальную модель шины. По этой модели инженеры могут объективно оценить их предположения о вибрации смежных узлов самолета. Эти предположения имеют весьма большое значение, так как повышенные вибрации могут привести к преждевременной усталости и разрушению узла.

## Экспериментальная установка

Полноразмерное колесо самолета A320 с наклеенной отражающей пленкой установлено на вибростенде и возбуждается белым шумом. Вибрационный отклик измеряется в радиальном, тангенциальном и осевом направлениях трехкомпонентным сканирующим виброметром, расположенным на расстоянии 2,5 м. от колеса.



a)



b)

Рис. 2 Рабочие формы колебаний на частотах 37 Гц (a) и 353 Гц (b).

## Результаты

Основные резонансные частоты наблюдались на 37, 69 и 353 Гц. Форма колебаний на частоте 37 Гц - изгибная (Рис. 2 а). На частоте 353 Гц изгибные колебания ступицы сочетаются с высшими изгибными формами шины. (Рис. 2 б). АЧХ (Рис. 3) имеет плавный характер, формы колебаний хорошо пространственно различимы. Когерентность снижалась на частотах пиков она имеет величины, достаточные для верификации модального анализа форм колебаний.

## Резюме

Трехкомпонентная лазерная сканирующая виброметрия совершенствует качество экспериментального модального анализа авиационных шин

Вся испытательная установка (включая вибростенд и систему управления) предоставлена SOPEMEA. Колесо самолета получено от Messier-Bugatti.

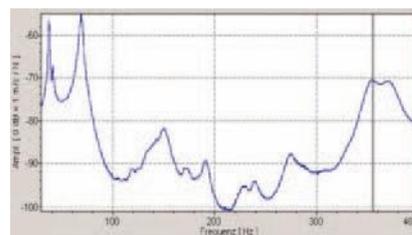
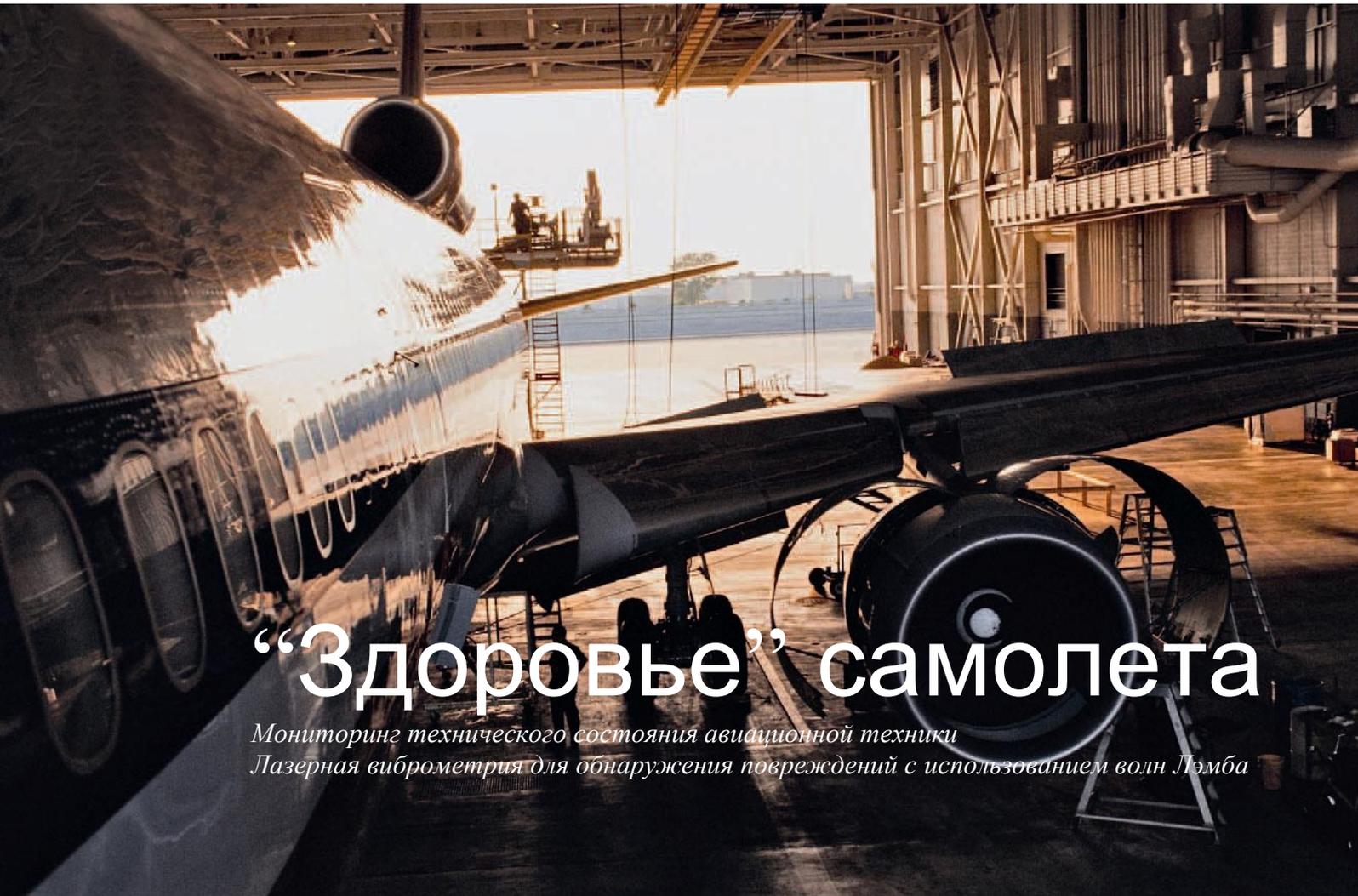


Рис. 3 Осредненная АЧХ



# “Здоровье” самолета

*Мониторинг технического состояния авиационной техники*

*Лазерная виброметрия для обнаружения повреждений с использованием волн Лэмба*

Для обнаружения повреждений конструкции с помощью волн Лэмба применяются направленные ультразвуковые колебания. В настоящее время срок коммерческой эксплуатации изделий ограничен из-за несовершенства существующих технологий обнаружения. Применение новой технологии - трехкомпонентной сканирующей лазерной виброметрии дает возможность точной идентификации повреждения по возрастанию вибраций в плоскости и вне нее. Простой, быстрый и надежный метод исключает сложные исследования распространения волн Лэмба, основывается на измерении и обработке сигнала.

## **Введение**

Разработчики, производители авиационной техники и эксплуатирующие организации в недалеком будущем столкнутся со сложными испытательными задачами.

В новых гражданских самолетах большой вместимости широко применяются композиционные материалы, и их использование будет расти. Улучшение характеристик военных самолетов также основывается на повышении их сложности. Пользователи новой авиационной техники предъявляют требования снижения стоимости жизненного цикла и высокой эксплуатационной готовности. Требуемые показатели могут быть достигнуты с использованием новых материалов, концепций проектирования изделий, устойчивых к повреждениям, что приводит к созданию облегченных конструкций и улучшению их характеристик. Пока такие новые самолеты находятся в стадии разработки, необходимо поддерживать летную годность существующего стареющего парка техники.

В последние годы предложено и реализовано большое количество программ продления жизненного цикла; гражданские самолеты перепрофилируются в грузовые и военные, а военная техника оснащается вооружением с новыми возможностями. Эти проекты представляют собой сложную задачу в применении существующих методов инспекций и эксплуатации.



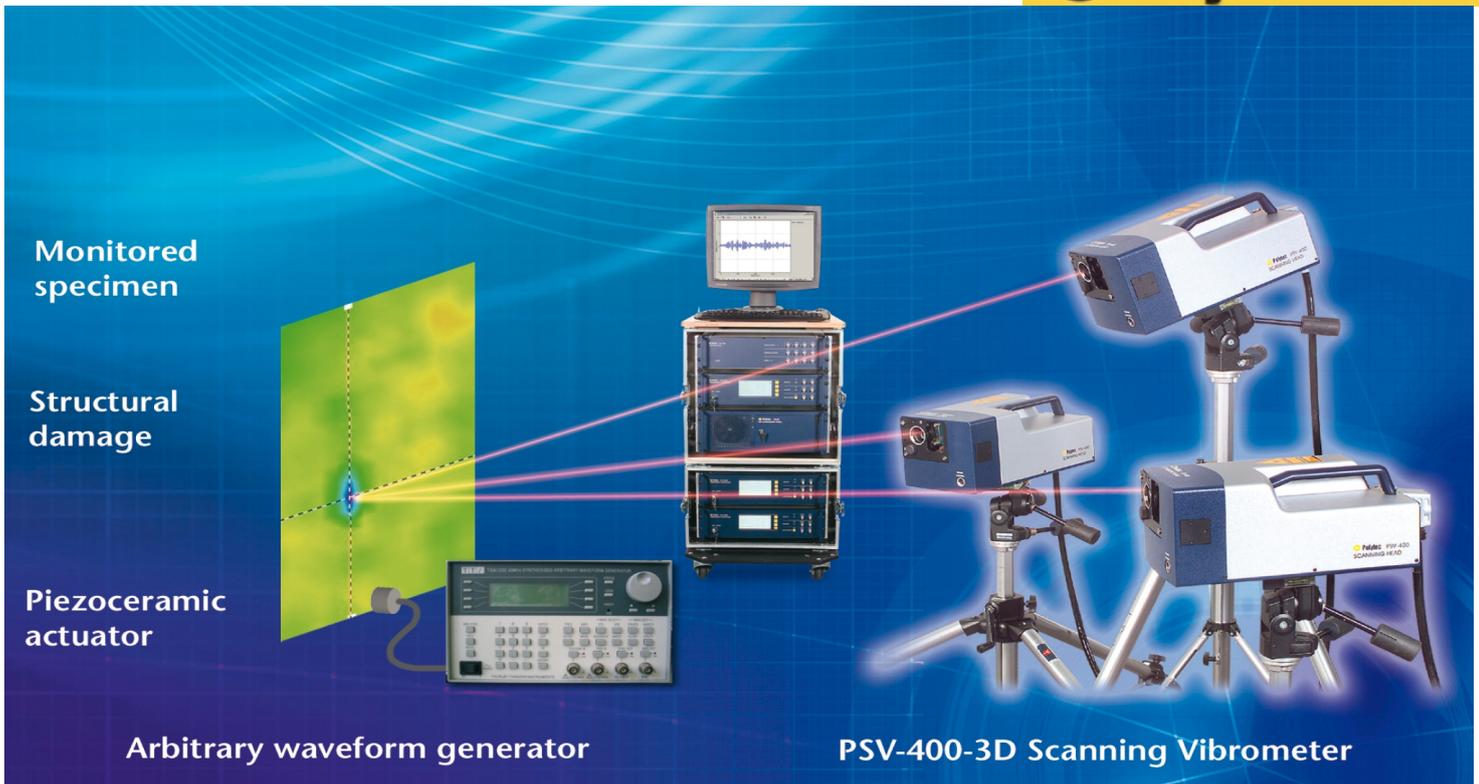


Рис. 1 Экспериментальная установка для поиска повреждений методом волн Лэмба с трехкомпонентным сканирующим лазерным виброметром в качестве приемника.

Стареющий парк самолетов требует значительных эксплуатационных затрат. Применение новых материалов и концепций повреждаемости в самолетах следующего поколения также вызывает необходимость модернизированного и надежного мониторинга технического состояния с периодическими инспекциями для обеспечения безопасности и продления ресурса.

### Обнаружение повреждений с применением волн Лэмба

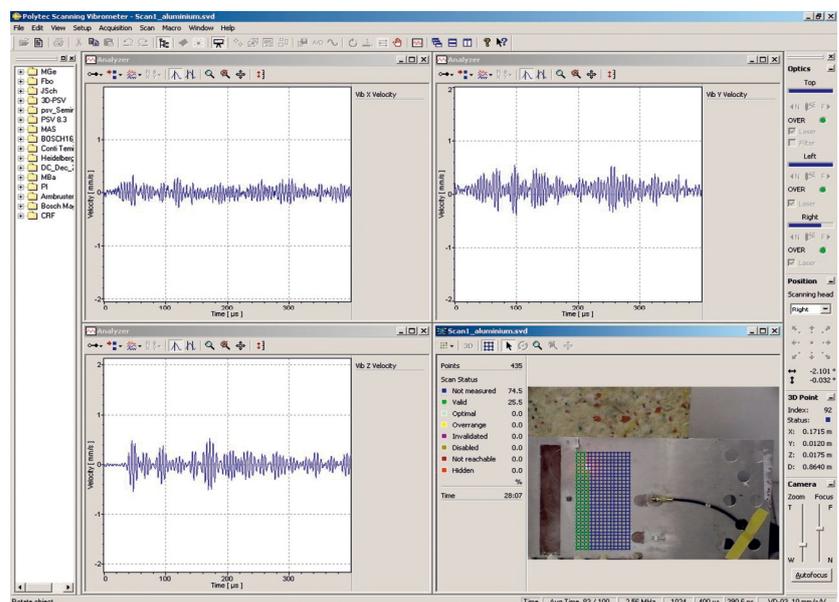
Для обнаружения дефектов в аэрокосмических конструкциях разработано большое число методов с возможностью их автоматизации. Одна из предлагаемых технологий – инспекции с использованием волн Лэмба. Методика широко используется и основывается на применении направленных волн ультразвука, т.е. ультразвуковых импульсов, распространяющихся в ограниченной среде. Хотя попытки применения волн Лэмба продолжаются более 20 лет, на практике их коммерческое использование было весьма ограничено. Основные препятствия, связанные с этим:

1. Для мониторинга крупных объектов необходимо значительное количество возбудителей и сенсоров. Это усложняет работу, увеличивает необходимое время и затраты. Кроме того, весьма непрактично покрывать самолет тысячами закрепленных и встроенных датчиков.

2. Стратегия применения волн Лэмба часто ассоциируется со сложностями интерпретации данных высококвалифицированными техническими специалистами по неразрушающему контролю, выполняющими измерения в каждой точке. Следовательно, развертывание и подготовка системы требует крупных затрат и подготовленных техников.

3. Существующие методы обработки и интерпретации сигнала пользуются параметрами сигнала, для которых опорными являются данные объекта “без повреждений”. На эти параметры могут влиять другие явления, такие как изменения температуры или плохой контакт преобразователя с объектом.

Рис. 2 Плоский и пространственный отклик на волну Лэмба, построенный при помощи программного обеспечения Polytec PSV Software.



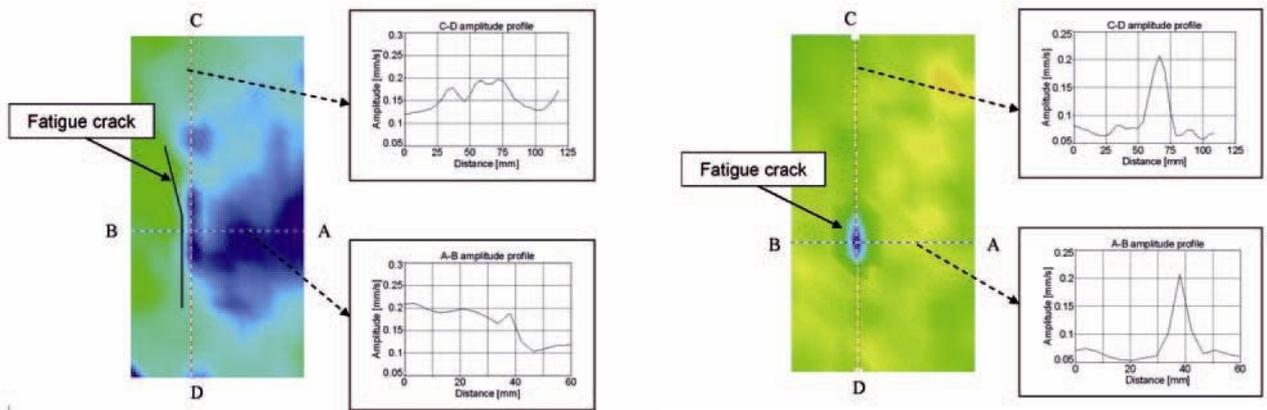


Рис. 3 Обнаружение усталостной трещины в металлической конструкции с использованием волн Лэмба. Поля СКЗ амплитуды и профили по усталостной трещине: плоские колебания с частотой 75 КГц (слева), пространственные колебания с частотой 325 КГц (справа).

### Трехкомпонентная сканирующая лазерная виброметрия

Лазерные виброметры могут помочь преодолеть многие трудности применения волн Лэмба для обнаружения дефектов. На Рис.1 приведен пример применения. Волны Лэмба от пьезокерамического возбудителя воспринимаются сканирующим виброметром Polytec PSV-400-3D (Рис. 2). Трехкомпонентный сканирующий виброметр обеспечивает высокую плотность точек измерения на оптически достижимых участках поверхности. В каждой точке измеряется вектор вибрации, имеющий компоненты в плоскости и вне плоскости. По этим измерениям строится понятная трехмерная анимация форм колебаний. Примеры обнаружения повреждений в образцах авиационных конструкций с использованием мониторинга волн Лэмба приведены на Рис. 3, 4. Данные результаты показывают, что повреждение может быть идентифицировано по локальному возрастанию амплитуды вибрации в плоскости (например, усталостная трещина, Рис. 3, слева и расслоение, Рис. 4) и по ослаблению амплитуды неплоских вибраций (например, усталостная трещина на Рис. 3, справа).

### Выводы

Сканирующая лазерная виброметрия позволяет распознать повреждения конструкции и их серьезность - длину трещины и площадь расслоения.

Понятных результатов в виде полей и профилей амплитуды волны Лэмба вдоль конструкции достаточно, чтобы увидеть поврежденную область. При этом нет необходимости проводить сложное исследование распространения волны, сравнение полученного сигнала с сигналом и выделять признаки наличия дефекта. Метод отличается быстротой, надежностью и защищен от внешних воздействий.

Автор

Prof. Wieslaw J. Staszewski  
Department of  
Mechanical Engineering  
Sheffield University  
Sheffield S1 3JD, UK  
w.j.staszewski@sheffield.ac.uk  
www.dynamics.group.shef.ac.uk

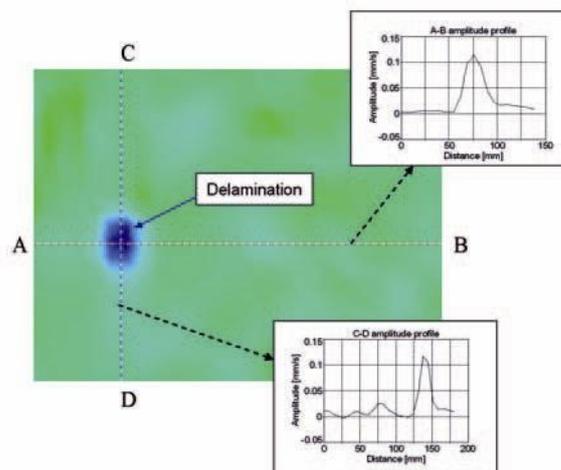


Рис. 4 Обнаружение дефекта в композитной конструкции с помощью волн Лэмба. Поля амплитуд и профили по расслоению при плоских колебаниях с частотой 100 КГц.

Дополнительная информация:  
W.J. Staszewski, C. Boller and G.R. Tomlinson, Health Monitoring of Aerospace Structures, John Wiley & Sons, Chichester, 2003. Полный текст данной статьи (со ссылками) доступен в Интернете и может быть загружен с [www.polytec.com/usa/aerospace](http://www.polytec.com/usa/aerospace).



# Контроль мощности реактивных двигателей

*Применение сканирующей виброметрии для визуализации эффекта локализации в блиске компрессора газотурбинного двигателя*

Технология интегрированных диска и лопатки (блиск) все шире используется при проектировании авиационных газотурбинных двигателей. Чтобы гарантировать экономическую эффективность, при проектировании блисков требуется обеспечивать длительный ресурс. Динамические свойства блисков могут быть использованы для контроля качества процессов проектирования и производства. При таких исследованиях правильная интерпретация нагрузкам – одна из важнейших задач.

Результаты бесконтактных измерений, полученные с помощью сканирующего виброметра PSV-400, служат основой прецизионной визуализации форм колебаний и поиска различий между приемлемыми и неприемлемыми локальными амплитудами.

## Введение

Требования экологичности и увеличения тяги газотурбинных двигателей выводят проектирование блисков на новый уровень.



Рис. 2 Размещение 1128 точек сканирования и тензодатчиков (на отмеченных лопатках)

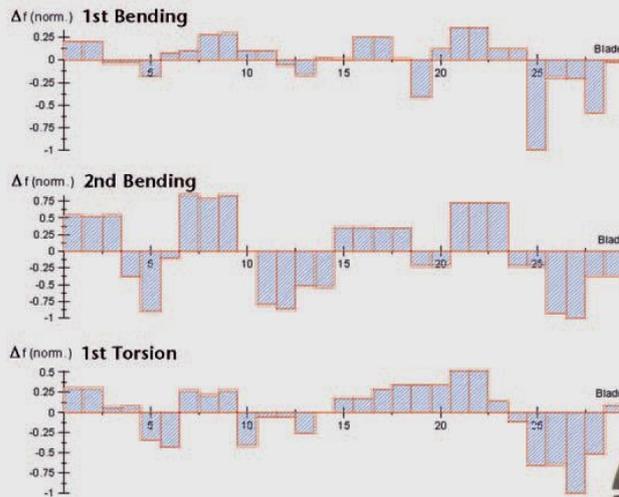


Рис. 1 Испытуемый блиск с частотами отдельных лопаток по окружности диска.



Такие изделия производятся либо из цельной заготовки, либо сваркой трением, таким образом, из конструкции исключаются массы хвостовика и ножки лопатки. Следовательно, получаемое напряженно-деформированное состояние допускает более высокие скорости вращения. Однако имеется множество вопросов, связанных с динамическим поведением блиска. Основной из них касается различия вибрационного поведения отдельных лопаток (Рис. 1) из-за влияния несовершенств (отклонений) технологии. Такие отклонения незначительны в двигателях новых конструкций. Они могут влиять на локальные формы колебаний, на которых возникают высокие напряжения при аэродинамическом возбуждении.

#### Эффект локализации

Если при работе возбуждается локальная форма колебаний, максимальные перемещения могут быть более чем в два раза выше, по сравнению с ожидаемым уровнем (у отстроенных лопаток). Уровень напряжений, вызванных локализацией, особенно негативно влияет на ресурс блиска. Эта тенденция усиливается в связи с чрезвычайно низким уровнем демпфирования интегрированной конструкции.

В качестве мощного инструмента визуализации форм колебаний и, следовательно, явления локализации может рассматриваться лазерная виброметрия.

#### Экспериментальная установка

Исследуемый блиск (Рис. 2) имеет 29 лопаток. Лопатки № 3, 9, 12, 18, 26 и 29 препарированы тензодатчиками различных типов. Дополнительные массы тензодатчиков вызывают незначительное отклонение демпфирования и жесткости. Перед испытанием выполнена калибровка тензодатчиков для определения допустимых напряжений. Возбуждение колебаний производилось при помощи электродинамического вибратора, соединенного с зажимным устройством (Рис.3) периодическим линейным частотно-модулированным сигналом (periodic chirp) в диапазоне собственных частот лопатки. Для определения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) на вибратор устанавливался датчик силы. В связи с затенением, выполнялось сканирование прибором PSV- 400 только 22 лопаток. Для дополнения информации о формах колебаний в окружном направлении выполнено кольцевое сканирование торцов лопаток.

Рис. 2

Рис. 3 Установка вибратора



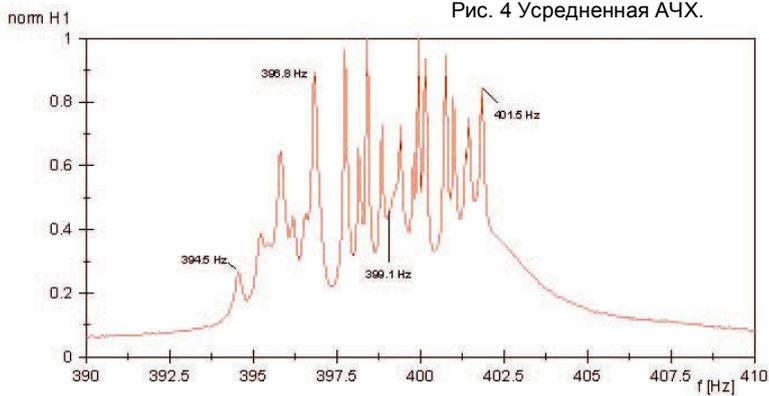


Рис. 4 Усредненная АЧХ.

## Результаты

При построении графика на усредненной по всем точкам сканирования АЧХ (Рис.4) видно, что в исследуемом диапазоне проявилось множество пиков. Некоторые из них – результат отстройки лопаток, тогда как другие вызваны совместным движением диска и лопатки. На Рис. 5 и 6 представлена визуализация избранных форм колебаний. Случаи а) – с) характеризуются совместными колебаниями диска и лопатки, что подтверждается наличием линий узлового диаметра. Случай а) представляет собой форму с двумя узловыми диаметрами, называемую “вторая форма с циклической симметрией” (CSM 2), которая проявляется при некоторых отклонениях отстройки.

По этой причине, как ожидалось, исчезли крутильные формы (проходящие по окружности диска и каждой лопатке) (Рис. 5а). Формы b) и c), соответствуют CSM 5 и CSM 1, тогда как в d) форму определить невозможно. По визуализации можно установить, что локализация, вызванная, по-видимому, отстройкой, наблюдается вблизи лопатки №3. Такие формы описаны для колебаний изолированных лопаток и группы смежных лопаток. Лопатка №3 препарирована тензодатчиком, что вызвало изменение массы, жесткости и, поэтому, дополнительно отстроена. Предварительные эксперименты показывают, что частота на этой форме связана с так называемой “частотой отдельной лопатки” (для препарированной лопатки № 3).

## Заключение

По данным, полученным с помощью сканирующего вибрметра PSV-400, можно проверить эффект локализации отстроенных компрессорных лопаток. Знания об этом явлении важны с точки зрения обоснования ресурса.

Авторы благодарны компании Rolls-Royce за поддержку. Исследования являются частью проекта DeSK Blisk Validation (FKZ: 80121978), который основан федеральной землей Бранденбург и Европейской программой регионального развития.

Версия данной статьи на немецком языке доступна в Интернете и может быть загружена с [www.polytec.de/aerospace](http://www.polytec.de/aerospace).

### Автор

Dr. -Ing. Bernd Beirow  
Brandenburg Technical University  
Cottbus  
Chair of Structural Mechanics and  
Vehicle Vibrational Technology  
D-03046 Cottbus, Germany  
beirow@tu-cottbus.de  
[www.tu-cottbus.de/strukturmechanik/eng/indexeng.html](http://www.tu-cottbus.de/strukturmechanik/eng/indexeng.html)

Рис. 5: Избранные формы колебаний

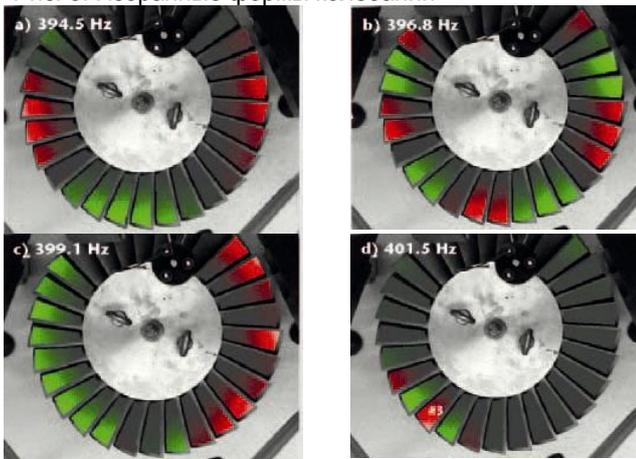
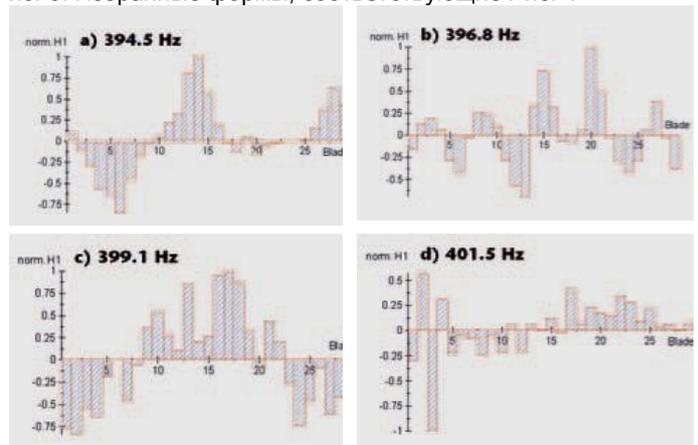
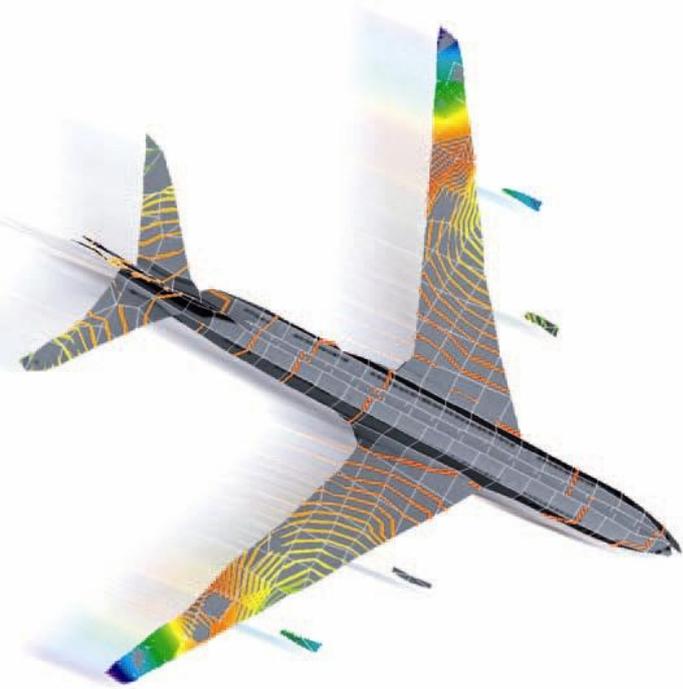


Рис. 6: Избранные формы, соответствующие Рис. 4



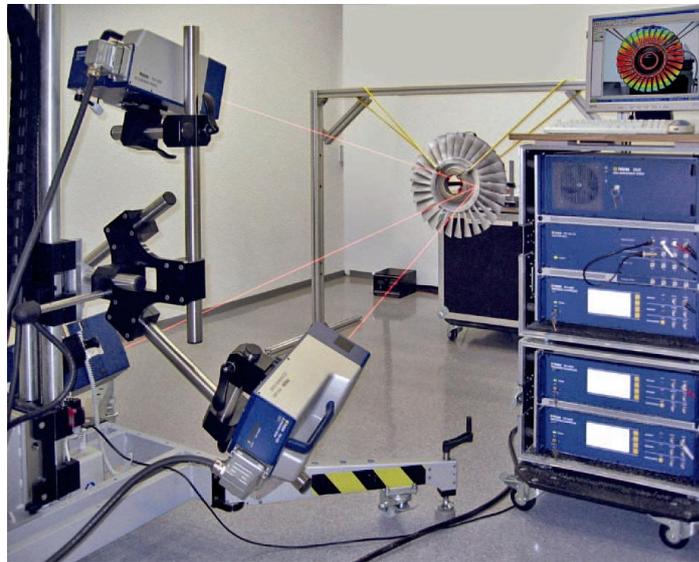
# Сканирующие виброметры Polytec

*Сканирующие виброметры PSV-400 и PSV-400-3D предоставляют передовую технологию измерения для анализа и визуализации вибрации конструкции с частотами до 20 МГц. Любые поверхности могут быть быстро сканированы и автоматически исследованы на гибкой интерактивно создаваемой сетке без изменения массы и жесткости объекта с минимальными затратами времени.*



## Увидеть вибрацию...

В основе каждой системы Polytec – лазерный доплеровский виброметр – прецизионный лазерный одноточечный преобразователь, используемый для определения виброскорости и виброперемещения в точке путем измерения частотного сдвига луча, отраженного от движущейся поверхности. Традиционные способы измерения вибрации в нескольких точках, при которых на объект испытания крепятся контактные датчики, затрудняют анализ мод и форм колебаний и требуют много времени. При использовании двухкоординатных сканнеров позиционирование лазерного луча может быть автоматизировано. Это сильно упрощает построение форм колебаний, модальный анализ и измерение АЧХ. Теперь геометрические свойства объекта и расположение точек измерения могут быть запрограммированы, облегчая процесс измерения и повышая точность. Для исследования форм колебаний просто определите геометрию, сетку сканирования и начните измерение. После завершения автоматического сканирования отобразите анимированные формы колебаний удобным способом в 2D- или 3D-виде. Такой способ отображения – чрезвычайно эффективный инструмент для понимания особенностей вибрации конструкции. Дополнительная информация на сайте [www.polytec.com/usa/psv400](http://www.polytec.com/usa/psv400).



## Мощный инструмент исследователя

PSV-400 – высокопроизводительная платформа сбора данных, которая может быть легко интегрирована в инженеринговый процесс и IT-окружение. Система может импортировать геометрические данные непосредственно из CAE и конечно-элементного программного обеспечения или получать геометрию объекта измерением с помощью удобного модуля сканирования геометрии (сканирующий лазерный измеритель расстояния). Все результаты измерений доступны для других приложений благодаря различным фильтрам экспорта и открытому интерфейсу данных PolyFileAccess. В программное обеспечение интегрирован мощный постпроцессор для выполнения различных математических операций с результатами измерений.

## Получите полную информацию о трехмерном векторе вибрации

В состав сканирующего виброметра PSV-400-3D входят три независимые сенсорные головки, что расширяет сканирующую виброметрию до трехмерных измерений. Это позволяет выполнять наглядную трехмерную анимацию форм колебаний с ясным разделением компонент вектора в плоскости и вне нее. PSV-400-3D может выполнять измерения одновременно по 8 каналам, интегрированный модуль сканирования геометрии дает непосредственную возможность быстрого сбора трехмерных данных о форме объекта испытания.

[www.polytec.com/usa/psv3d](http://www.polytec.com/usa/psv3d)

Сканирующие виброметры Polytec:

## Преимущество при испытаниях аэрокосмической техники



- Существенное повышение производительности при снижении стоимости измерений
- Упрощение измерений АЧХ, расчета форм колебаний и модального анализа
- Эффективная регистрация и управление большими объемами данных
- Большое установочное расстояние виброметра и модуля сканирования геометрии (до 50 м. при измерениях на типичных поверхностях крупных объектов)
- Высокое пространственное и частотное разрешение (0,001 Гц), например, для модального анализа турбинных лопаток

- Измерения могут быть выполнены непосредственно в узлах конечно-элементной сетки
- Усталостные испытания с очень высоким уровнем вибрации (виброскорость до 20 м/с)
- Измерение форм колебаний жесткого тела (включая плоские перемещения)
- Передача результатов измерения в пакеты модального анализа и обработка ММО-измерений
- Измерения на отдельных частях крупных конструкций могут быть объединены с формированием общей 3D-модели и данных о пространственных колебаниях

## Мы – лидеры!

Polytec – мировая корпорация с представительствами в Европе, Северной Америке и Азии. Сильная команда менеджеров, инженеров и опытные представители компании делают доступными технологии Polytec по всему миру. Компания Polytec GmbH, основанная в 1967 г. – сертифицированный ISO-9000 производитель и поставщик оборудования для лазерных доплеровских измерений, обладающего легендарным немецким качеством. Все предлагаемые системы сканирующих виброметров – полностью нашей собственной разработки и производства. Проектированием такой сложной продукции может заниматься только истинно универсальная компания. Хорошо известны стабильность, высокая репутация и технические преимущества Polytec. Мы испытываем чувство гордости за сканирующие виброметры Polytec. Их конструкция демонстрирует наш опыт в оптике, механике, электронике, компьютерном аппаратном и программном обеспечении, а также компетентность при использовании в инженерной отрасли.

## Polytec помогает вам!

Наше лидерство основано на инновационных технологиях, высококачественной продукции, инженерном опыте, экспертных консультациях и удовлетворении тысяч заказчиков по всему миру. Polytec предлагает продукцию мирового уровня, техническую поддержку, сервис, аренду систем и тренинги, помогающие специалистам любого уровня подготовки решать их сложные измерительные задачи.

## Свяжитесь с нами

Для получения любой дополнительной информации обратитесь к вашему местному представителю или по e-mail [LM@polytec.de](mailto:LM@polytec.de) (all other regions). Посетите наш сайт [www.polytec.com](http://www.polytec.com) чтобы узнать о новинках, событиях, семинарах и тренингах.

### Polytec GmbH (Germany)

Polytec-Platz 1-7  
76337 Waldbronn  
Tel. + 49 (0) 7243 604-0  
Fax + 49 (0) 7243 69944  
[info@polytec.de](mailto:info@polytec.de)

### Polytec France S.A.S.

32 rue Délizy  
93694 Pantin Cedex  
Tel. +33 (0)148 10 39 30  
Fax + 33 (0) 1 48 10 09 66  
[info@polytec.fr](mailto:info@polytec.fr)

### Lambda Photometrics Ltd. (Great Britain)

Lambda House, Batford Mill  
Harpenden, Herts AL5 5BZ  
Tel. + 44 (0)1582 764334  
Fax + 44 (0)1582 712084  
[info@lambdaphoto.co.uk](mailto:info@lambdaphoto.co.uk)

### Polytec Japan

Hakusan High Tech Park  
1-18-2 Hakusan, Midori-ku  
Yokohama-shi, 226-0006  
Kanagawa-ken  
Tel. +81(0) 45 938-4960  
Fax +81(0) 45 938-4961  
[info@polytec.co.jp](mailto:info@polytec.co.jp)

### Polytec, Inc. (USA)

North American  
Headquarters  
1342 Bell Avenue, Suite 3-A  
Tustin, CA 92780  
Tel. +1 714 850 1835  
Fax +1 714 850 1831  
[info@polytec.com](mailto:info@polytec.com)

Midwest Office  
3915 Research Park Dr.  
Suite A-12  
Ann Arbor, MI 48108  
Tel. +1 734 662 4900  
Fax +1 734 662 4451

East Coast Office  
25 South Street, Suite A  
Hopkinton, MA 01748  
Tel. +1 508 544 1224  
Fax +1 508 544 1225