# ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТРЕЩИН В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПАНЕЛЯХ ПО НЕЛИНЕЙНЫМ ИСКАЖЕНИЯМ ПОРТРЕТОВ КОЛЕБАНИЙ

#### Бернс В.А.

#### аннотация

Введение. Основным дефектом конструкций, возникающим в процессе их эксплуатации или прочностных испытаний, являются усталостные трещины. Для диагностирования трещин перспективными являются вибрационные методы, практическая реализация которых применительно к реальным конструкциям является актуальной задачей. Цель работы: изучение возможности использования искажений портретов вынужденных колебаний в качестве идентификационного признака трещин в металлических конструкциях. Методика исследований. На диагностируемую конструкцию устанавливались датчики ускорений, и с помощью независимых источников гармонических вибраций в ней создавались вибрационные колебания. Динамическим проявлением усталостной трещины являются соударения «берегов» и сухое трение в вершинах трещины под действием вибрационной нагрузки. В работе показано, что идентификационным признаком ударных импульсов и сухого трения могут являться нелинейные искажения портрета колебаний, вертикальная развертка которого пропорциональна сигналу датчика ускорений, а горизонтальная – первой гармонике этого сигнала. Такой портрет колебаний для линейной динамической системы является окружностью. Для численной оценки искажений из ряда Фурье для портрета колебаний вычиталась первая гармоника, в остатке ряда определялся абсолютный максимум за период колебаний, величина максимума относилась к амплитуде первой гармоники. Результаты и обсуждения. Эффективность обнаружения усталостных трещин по искажениям портретов колебаний проиллюстрирована на примере диагностирования металлической панели фюзеляжа самолета размером 2285 × 975 мм. Панель имела продольный и поперечный силовые наборы, а также местные подкрепления. Возбуждение колебаний панели осуществлялось двумя электродинамическими силовозбудителями. Для измерения вибраций использовалось 40 датчиков ускорений. Проведены экспериментальные исследования изменений собственных частот и портретов колебаний панели для следующих дефектов: концентратор напряжений в виде высверленной заклепки и сквозного надреза в центре панели; усталостные трещины в боковых стрингерах; трещина в боковом стрингере после ремонта; трещина в центральном стрингере на разных этапах развития. Установлено, что наибольшие изменения собственных частот могут составлять несколько процентов, но определить местоположение дефектов не представляется возможным. Максимальные искажения портретов колебаний составляют сотни процентов и достоверно отслеживают расположения дефектов и их величины. Отмечено, что способ нормирования искажений портретов колебаний и амплитуда вибраций панели оказывают влияние на эффективность диагностирования трещин.

#### Введение

Методы оценки технического состояния объектов по параметрам вибраций широко используются в различных областях техники. Наибольшее распространение они нашли в машиностроении для диагностирования, в основном, машин и механизмов, имеющих вращающиеся части [1–5]. Эти методы называют еще «пассивными» методами, поскольку их содержанием является анализ вибраций, возникающих при функционировании контролируемого объекта.

Для контроля дефектов конструкций применяют, как правило, «активные» методы вибрационной диагностики. Предметом их анализа является отклик объ-

екта на специально заданное вибрационное воздействие. В качестве дефектов здесь рассматриваются, в первую очередь, усталостные трещины в конструкциях из любого материала, а также расслоения и непроклеи в конструкциях из композитов.

Наиболее часто вибродефектоскопия конструкций производится по изменению их модальных характеристик (собственных частот, форм и декрементов колебаний) в процессе эксплуатации или прочностных испытаний ([6–12]). В [9] отмечено, что во многих случаях даже большое повреждение конструкции не приводит к значительному изменению частот собственных колебаний. Также указано на то, что собственная частота – параметр интегральный, ее изменение может говорить только о наличии повреждения, но не характеризовать его. Различными исследователями предприняты попытки разработки метода локализации повреждений по изменениям собственных частот. Такие методы предполагают построение расчетных моделей конструкций с последующей коррекцией матриц жесткости по результатам модальных испытаний. Кроме того, авторы выражают мнение многих исследователей о том, что использование вибрационных методов диагностики технического состояния конструкций перспективны. Однако для их практической реализации необходимо больше внимания уделять проведению исследований реальных конструкций, а не лабораторных образцов.

Разработаны также методы обнаружения трещин в конструкциях, основанные на том, что появление дефекта приводит к изменению параметров распространения упругих волн в материале [13–15]. Однако наличие в объекте контроля локальных неоднородностей, таких как отверстия, вырезы, крепежные элементы может вызвать серьезные затруднения в использовании такого подхода.

Появление дефектов вносит, как правило, нелинейности в характер деформирования конструкций. Поэтому в качестве идентификационного признака дефекта предложено использовать появление отклонений динамических характеристик объектов контроля от характеристик линейной системы. К таким отклонениям относятся, например, возникновение суб- и супергармонических резонансов [16, 17], искажения фазовых портретов [18, 19] и фигур Лиссажу [20, 21].

Целью настоящей работы является изучение возможности обнаружения трещин в металлических панелях по нелинейным искажениям их портретов колебаний в процессе исследований динамических характеристик или вибрационной прочности. Целесообразность решения задачи в такой постановке объясняется тем, что во время испытаний к панелям прикладывается тестовая гармоническая нагрузка, отклик на которую измеряется датчиками ускорений (акселерометрами). Если по сигналам датчиков удастся обнаружить и локализовать усталостные трещины без привлечения дополнительного оборудования, то это существенно повысит информативность исследований.

Для достижения поставленной цели необходимо установить, искажения какого вида портретов колебаний можно использовать в качестве идентификационного признака трещин. Следует также ввести параметр, позволяющий оценить величины искажений, и исследовать его чувствительность к появлению дефекта.

# Методика исследований

Важным этапом в контроле технического состояния конструкций является определение идентификационных признаков дефектов. При выборе идентификационного признака усталостной трещины можно использовать такие динамические эффекты, сопровождающие ее появление, как периодические соударения «берегов» и сухое трение в вершине трещины под действием тестовой нагрузки.

Для обоснования идентификационного признака трещины воспользуемся методиками контроля люфтов в проводках управления самолетом и смещений опор отклоняемых поверхностей [20, 21]. Контроль люфтов производится по искажениям фигуры Лиссажу, которые происходят из-за соударения элементов проводки управления. Следствием смещения опор отклоняемых поверхностей является появление сухого трения в этих опорах. Идентификационным признаком трения являются фазовые портреты колебаний. Ставится задача поиска такого единого идентификационного признака (в данном случае портрета колебаний), который отвечал бы как за ударные процессы, так и за сухое трение.

Для построения фигуры Лиссажу вертикальная развертка производится пропорционально сигналу датчика ускорений n, a горизонтальная – гармонике возбуждающей силы U (сигнал управляющего генератора). Такая фигура на резонансе линейной системы является эллипсом. Характерные нелинейные искажения фигуры Лиссажу происходят из-за соударения элементов проводки управления (рис. 1). Для численной оценки искажений применительно к фигуре Лиссажу используется преобразование Фурье. Затем в рядах Фурье выделяется первая гармоника и вычитается из полного сигнала, а в остатке определяется абсолютный максимум искажений за период. Этот максимум относится к амплитуде первой гармоники, и величина отношения обозначается как ξ. Определение дефектного соединения основано на том, что значение ξ в соединении с дефектом значительно превышает его значения в других соединениях.



*Рис.* 1. Фигура Лиссажу до (a) и после появления люфта (b)

Следствием смещения опор отклоняемых поверхностей является появление сухого трения в этих опорах. Идентификационным признаком трения являются искажения фазовых портретов колебаний поверхности (рис. 2; *w*, *v* – перемещение и скорость колебаний контрольной точки поверхности; *e* – смещение опоры). Фазовый портрет линейной системы – эллипс.



Рис. 2. Фазовые портреты системы с сухим трением

В [22] изложены результаты экспериментальных исследований нескольких видов портретов колебаний. На основании полученных результатов сделан вывод о том, что в качестве идентификационного признака люфта и сухого трения может быть принят следующий портрет колебаний: вертикальная развертка пропорциональна сигналу датчика ускорений n, а горизонтальная — первой гармонике этого сигнала  $n_1$ . Вывод базируется на том, что нелинейные искажения портрета колебаний отслеживают изменения как величин ударного импульса, так и сухого трения. Это позволяет выявить и локализовать дефект. Для линейной системы такой портрет колебаний является окружностью.

На рис. 3 показаны портреты колебаний динамической системы с люфтом, а на рис.4 – с сухим трением.

Степень искажения портрета колебаний оценивается тем же параметром  $\xi$ , что степень искажения фигуры Лиссажу.



*Рис. 3.* Портрет колебаний до (a) и после появления люфта (b)



Рис. 4. Портреты колебаний системы с сухим трением

На основании проведенных исследований разработана методика вибрационной диагностики усталостных трещин в конструкциях, которая заключается в следующем:

- на конструкцию устанавливаются датчики ускорений. Места установки датчиков могут выбираться произвольно, но целесообразно размещать их со сгущениями в наиболее нагруженных зонах;

- в конструкцию с помощью независимых источников вибраций создают вибрационные колебания;

- вибрационный отклик панели фиксируется датчиками ускорений в виде портретов колебаний;

- производится численная оценка искажений круговой формы портретов колебаний;

- искажения портретов тем сильнее, чем больше трещина и ближе к ней расположены акселерометры. Это позволяет как локализовать дефекты, так и зафиксировать их развитие

Следует отметить, что если контролируемая конструкция изначально имеет нелинейные динамические характеристики или ее диагностирование начинается спустя некоторое время с начала эксплуатации, то повышенные значения ξ укажут на расположение нелинейных элементов в конструкции. Среди этих элементов могут быть и локальные дефекты, появившиеся в результате начавшегося процес-

са разрушения. Целью дальнейшего диагностирования будет контроль скорости развития дефектов.

# Результаты и их обсуждение

Предлагаемый способ вибрационной диагностики трещин был опробован на подкрепленной панели фюзеляжа самолета. Внешний вид, нумерация стрингеров, габаритные размеры панели в миллиметрах и схема установки акселерометров показаны на рис. 5. На рисунке цифрами обозначены номера стрингеров, точками – положения датчиков ускорений. Масса панели 38,8 кг, материал – алюминиевый сплав В95Т. Продольный и поперечный силовой набор приклепан заклепками. Усиления по коротким сторонам панели имеют болтовое соединение.



*Рис. 5.* Внешний вид панели (*a*) и схема установки акселерометров (*b*)

На время экспериментов панель была вывешена на упругих жгутах малой жесткости. Возбуждение колебаний осуществлялось двумя электродинамическими силовозбудителями. Для измерения вибраций использовались 40 датчиков ускорений. Датчики размещались со сгущением в окрестности пучностей формы первого тона упругих колебаний панели, поскольку выращивание усталостных трещин предполагалось вынужденными колебаниями на резонансной частоте первого тона. По сигналам датчиков ускорений строились портреты колебаний различных точек панели. Для каждого портрета колебаний определялась величина параметра ξ. Строилось поле распределения параметра ξ по поверхности панели: величина ξ в каждой точке измерения изображалась меткой соответствующего цвета градиентной шкалы, а между метками выполнялась аппроксимация в соответствии с картой цветов. Кроме того, в экспериментальных исследованиях отслеживались изменения собственных частот первых четырех тонов упругих колебаний панели, вызванные появлением и развитием дефектов.

Первоначально было зафиксировано распределение параметра  $\xi$  и определены собственные частоты панели  $p_i$  (i = 1-4) в ее исходном состоянии. Затем проведены исследования изменений собственных частот  $\Delta p_i$  и портретов колебаний панели при появлении следующих дефектов: высверленная заклепка и концентратор напряжений в виде сквозного надреза в центре панели; усталостные трещины в стрингерах 1 и 5; трещина в стрингере 5 после ремонта (приклепаны накладки); трещина в стрингере 2 на разных этапах развития. Результаты исследований показаны на рис. 6–8. Стрелками отмечены положения трещин.



Рис. 6. Распределение & по панели с концентратором напряжений



*Рис.*7. Распределение ξ по панели с концентратором напряжений и трещинами в стрингерах 1 и 5



*Puc.8*. Распределение ξ по панели с концентратором напряжений, трещинами в стрингерах 1 и 2 и ремонтной накладкой на стрингере 5

В табл. 1 представлены максимальные значения параметра ξ для различных состояний панели. Измерения отклика панели производились вблизи собственной частоты первого тона колебаний. Следует отметить, что поскольку нормирование искажений портретов колебаний может играть важную роль в оценке размера дефекта и проведении сравнительных исследований, то в табл. 1, наряду с абсолютными значениями ξ, внесены и нормированные значения этого параметра ξ<sub>н</sub>. В данном случае величина абсолютного максимума искажений каждого сигнала относилась к наибольшей величине абсолютного максимума первой гармоники из всех зарегистрированных сигналов за один период колебаний.

Таблица 1

· · · ·				
Состояние панели	ξ	Δξ, %	$\xi_{\rm H}$	$\Delta \xi_{\scriptscriptstyle  m H},\%$
исходное	0.71	-	0.03	-
панель с концентратором напряжений	5.13	725	0.06	205
трещины в стрингерах 1 и 5	8.13	1149	0.57	1979
ремонтные накладки на стрингере 5	1.37	194	0.15	512
трещина в стенке стрингера 2	1.74	246	0.26	920
трещина в стрингере 2 (1/4 ширины полки)	2.04	289	0.30	1029
трещина в стрингере 2 (1/2 ширины полки)	2.38	337	0.35	1206
трещина в стрингере 2 (3/4 ширины полки)	9.89	1397	0.51	1791
трещина в стрингере 2 (3/4 ширины полки с боко-		1860	0.60	2099
вым ответвлением)				

Максимумы искажений портретов колебаний

В табл. 2 помещены значения собственных частот колебаний панели. Как следует из представленных результатов, даже разрушение двух стрингеров мало сказывается на собственных частотах. Это означает, что в данном случае дефектоскопия панели по изменению модальных параметров неэффективна.

Таблица 2

Состояние панели	$p_{1}$ ,	$\Delta p_1$ ,	<i>P</i> <sub>2</sub> ,	$\Delta p_2$ ,	<i>P</i> <sub>3</sub> ,	$\Delta p_3$ ,	$P_4$ ,	$\Delta p_4$ ,
	Hz	%	Hz	%	Hz	%	Hz	%
исходное	10.93	-	35.16	I	72.09	-	170.0	-
панель с концентратором	10.87	0.73	35.16	0.0	72.07	0.03	170.0	0.0
напряжений								
трещины в стрингерах 1 и 5	10.52	3.75	35.05	0.31	71.64	0.62	170.0	0.0
ремонтные накладки на	10.76	1.56	35.06	0.28	-	-	-	-
стрингере 5								

# Собственные частоты колебаний панели

В экспериментальных исследованиях было обнаружено, что увеличение амплитуды колебаний панели приводит к стабилизации качественной картины распределения локальных максимумов параметра  $\xi$ , и положения максимумов соответствуют местоположениям дефектов (рис. 9). Это объясняется двумя причинами. Во-первых, для воспроизведения высоких амплитуд колебаний необходимо внешнее воздействие с большой амплитудой, для чего на устройства возбуждения колебаний подается повышенный управляющий сигнал. При прочих равных условиях это приводит к увеличению отношения сигнал/шум. Поскольку в системах управления нагружением и измерениями параметров колебаний присутствуют электрические помехи, то сигнал с повышенной амплитудой оказывается более близким к «чистому» гармоническому воздействию. Во-вторых, увеличение амплитуды колебаний конструкции приводит к увеличению амплитуд импульсов, порождаемых трением и соударением берегов трещин. Чем выше интенсивность возникающих высокочастотных вибраций, тем на большем удалении от места расположения дефекта их можно зарегистрировать.



*Рис. 9.* Распределения ξ по панели с трещиной в стрингере 1 и ремонтной накладкой на стрингере 5: амплитуда перегрузки в центре панели: *а*) 0,25; *b*) 0,96; *c*) 1,59; *d*) 1,86

# Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что по нелинейным искажениям портретов колебаний можно зафиксировать появление трещин в металлической панели и определить их местоположения. При построении портретов колебаний развертка по оси ординат производится пропорционально сигналу акселерометра, а по оси абсцисс пропорционально первой гармонике этого сигнала. Для численной оценки искажений из сигнала датчика вычитается его первая гармоника, а в остатке определяется абсолютный максимум искажений за период. Величина этого максимума принимается в качестве идентификационного признака дефекта.

Максимальные искажения портретов колебаний могут составлять сотни процентов, что позволяет достоверно отслеживать расположения дефектов и их развитие. Отмечено, что способ нормирования параметра, оценивающего искажения портретов колебаний, а также амплитуда вибраций панели оказывают влияние на эффективность диагностирования трещин.

#### Список литературы

1. Жуков Р. В. Обзор некоторых стандартов ISO/TC-108 в области диагностики машинного оборудования // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 12. – С. 61–66.

2. Неразрушающий контроль : справочник. Т. 7, кн. 2. Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова и др. – М. : Машиностроение, 2005. – 829 с. ISBN 5-217-03298-7.

3. Костюков В. Н., Науменко А. П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учебное пособие. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с. ISBN 978-5-8149-1101-8.

4. Bachschmid N., Pennacchi P., Tanzi E. Cracked Rotors. A Survey on Static and Dynamic Behaviour Including Modelling and Diagnosis. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 408 p. ISBN 978-3-642-01485-7.

5. Tiwari R. Rotor Systems : Analysis and Identification. – CRC Press, 2017. – 1069 p. ISBN 978-1-138-03628-4.

6. Вибродиагностика авиационных конструкций. – М., 1986. – Вып. 256. – 95 с.

7. Постнов В. А. Определение повреждений упругих систем путем математической обработки частотных спектров, полученных из эксперимента // Мех. тверд. тела : изв. РАН. – 2000. – № 6. – С. 155–160.

8. Косицын А. В. Метод вибродиагностики дефектов упругих конструкций на основе анализа собственных форм колебаний // Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2 (3). – С. 129–135.

9. Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review. Technical Report LA-13070-MS. / S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, D. W. Shevitz. – Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 1996. – 132 p.

10. Dilena M., Morassi A. Damage detection in discrete vibrating systems // Journal of Sound and Vibration. – 2006. – Vol. 289. – P. 830–850. – doi:10.1016/j.jsv.2005.02.020.

11. Perera R., Fang S.–E., Huerta C. Structural crack detection without updated baseline model by single and multiobjective optimization // Mechanical System and Signal Processing. – 2009. – Vol. 23, iss. 3. – P. 752–768. – doi: 10.1016/j.ymssp.2008.06.010. 12. Barbieri N., Barbieri R. Study of Damage in Beams with Different Boundary Conditions // International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. – 2013. – Vol:7, no:6. – P. 399–405.

13. Kessler S. S., Spearing M. S., Soutis C. Structural health monitoring in composite materials using Lamb wave methods // Smart Materials and Structures. – 2002. – Vol. 11. – P. 269–278. – doi: 10.1999/1307-6892/9351.

14. Nonlinear acoustics for fatigue crack detection – experimental investigations of vibro-acoustic wave modulations / A. Klepka, W. J. Staszewski, R. B. Jenal, M. Szwedo, J. Iwaniec, T. Uhl // Structural Health Monitoring. – 2011. – Vol. 11, iss: 2. – P. 197–211. – doi: 10.1177/1475921711414236.

15. Critical aspects of experimental damage detection methodologies using nonlinear vibro-ultrasonics / M. Dunna, A. Carcionea, P. Blanloeuilb, M. Veidta // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 188. – P. 133–140. – doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.466.

16. Bovsunovsky A. P., Matveyev V. V. Vibrational diagnostics parameters of fatigue damage in elastic bodies / Mechanical Fatigue of Metals: Proceeding of the 13-th International Colloquium (MFM), Ternopil. – 2006. – P. 212–218.

17. Цыфанский С. Л., Бересневич В. И., Лушников Б. В. Нелинейная вибродиагностика машин и механизмов. – Рига: Зинатне, 2008. – 366 с. ISBN 978-9984-32-194-3.

18. Diana G., Bachmid N., Angel F. An on-line crack detection method for turbo generator rotors // Proceeding of international Conference on Rotordynamics, JSME. – 1986. – P. 385–390.

19. Контроль соосности установки отклоняемых поверхностей по результатам вибрационных испытаний / В.А. Бернс, А.П. Бобрышев, В. Л. Присекин, В. Ф. Самуйлов // Вестник МАИ. – 2008. – Т. 15, № 1. – С. 87–91.

20. Способ контроля люфтов в механических проводках управления самолётов / В.А. Бернс, А.П. Бобрышев, В.Л. Присекин, А.И. Белоусов, В.Ф. Самуйлов // Полёт. – 2007. – № 12. – С. 50–53.

21. Hisham A. H. Al-Khazali, Mohamad R. Askari. Geometrical and Graphical Representations Analysis of Lissajous Figures in Rotor Dynamic System // IOSR Journal of Engineering. – 2012. – Vol. 2 (5). – P. 971–978.

22. Опыт контроля дефектов летательных аппаратов по параметрам вибраций / В. А. Бернс, Е. А. Лысенко, А. В. Долгополов, Е. П. Жуков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Том 18, №4. – С. 86–96.