Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2019 Том 21 № 2 с. 26–39
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-26-39

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Исследования достоверности диагностирования трещин по искажениям портретов вынужденных колебаний

Владимир Бернс [1, 2, a,*], ***Егор Жуков*** [1, b], ***Павел Лакиза*** [1, c], ***Евгений Лысенко*** [3, d]

[1] Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина, ул. Ползунова, 21, г. Новосибирск, 630051, Россия
[2] Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия
[3] «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнёва, ул. Ленина, 52, г. Железногорск, 662972, Россия

[a] http://orcid.org/0000-0002-2231-7581, v.berns@yandex.ru, [b] http://orcid.org/0000-0001-6378-6352, zh-ep@yandex.ru,
[c] http://orcid.org/0000-0002-3863-2762, qinterfly@gmail.com, [d] https://orcid.org/0000-0001-5561-2934, mla340@iss-reshetnev.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 629.735:620.179

История статьи:
Поступила: 15 марта 2019
Рецензирование: 25 апреля 2019
Принята к печати: 04 мая 2019
Доступно онлайн: 15 июня 2019

Ключевые слова:
Элементы планера самолета
Усталостная трещина
Вибрационная диагностика трещин
Нелинейные искажения портрета колебаний
Нормирование искажений портретов колебаний
Влияние амплитуды колебаний
Электрические помехи
Отслеживание состояния объекта испытаний

АННОТАЦИЯ

Введение. Один из способов вибрационного диагностирования усталостных трещин в металлических элементах планера самолета основан на анализе портретов вынужденных колебаний объектов контроля. Оценка достоверности этого способа применительно к реальным конструкциям является актуальной задачей. **Цель работы:** обеспечение достоверности обнаружения трещин в металлических конструкциях по нелинейным искажениям портретов колебаний. **Методика исследований.** С помощью источников гармонических вибраций в конструкции создавались колебания, регистрируемые акселерометрами. Сигналы датчиков представлялись в виде портрета колебаний: вертикальная развертка пропорциональна сигналу, а горизонтальная – первой гармонике сигнала, сдвинутой по фазе на π/2. Возникновение трещины сопровождается искажениями портретов колебаний. Для численной оценки искажений из ряда Фурье для портрета вычиталась первая гармоника, определялся абсолютный максимум остатка за период, величина максимума относилась к амплитуде первой гармоники и принималась за параметр искажений. По расположениям максимумов искажений определялись места образования трещин. При этом менялись амплитуды колебаний конструкции и способы нормирования параметра искажений, оценивались электрические помехи в системах испытательного оборудования. **Результаты и обсуждения.** Достоверность обнаружения усталостных трещин по искажениям портретов колебаний оценивалась на примере диагностирования металлической панели фюзеляжа самолета. Установлено влияние амплитуды вибраций панели, способа нормирования искажений портретов колебаний и уровня электрических помех в системе возбуждения на эффективность диагностирования трещин. Для повышения достоверности диагностирования дефектов предложен способ математической обработки результатов испытаний, позволяющий исключить из анализа исходное состояние объекта контроля; отследить динамику изменений его состояния и зафиксировать развитие каждого дефекта в отдельности; устранить влияние системы крепления, которая может вносить нелинейности в колебания объекта испытаний. Представлен результат обнаружения трещин в нервюрах крыла самолета.

Для цитирования: Исследования достоверности диагностирования трещин по искажениям портретов вынужденных колебаний / В.А. Бернс, Е.П. Жуков, П.А. Лакиза, Е.А. Лысенко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 26–39. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-26-39.

Введение

Методы вибрационной диагностики дефектов в механических системах нашли широкое применение в машиностроении. На их основе созданы различные контрольные приборы и стенды для диагностирования, в основном машин и механизмов, имеющих вращающиеся части: различного типа подшипники, соединительных муфты и механические передачи [1–5].

Известны также методы контроля технического состояния конструкций по параметрам вибраций. По виду используемых идентификационных признаков производственно-технологических и эксплуатационных дефектов эти методы можно разделить на три группы. В первой группе методов для обнаружения дефектов фиксируются изменения характеристик собственных тонов колебаний конструкций, вызванные

***Адрес для переписки**
Бернс Владимир Андреевич, д.т.н., доцент
Новосибирский государственный технический университет
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия
Тел.: 8 (383) 346-31-21, **e-mail:** v.berns@yandex.ru

этими дефектами [6–12]. Под характеристиками собственных тонов колебаний здесь понимаются в первую очередь собственные частоты, формы и декременты колебаний. Следует отметить, что по изменению этих характеристик можно, как правило, установить только наличие дефекта. Для определения его величины и местоположения предлагаются обычно процедуры, которые носят больше «академический» или учебный характер и зачастую могут быть реализованы только в виртуальном эксперименте.

Вторая группа объединяет методы обнаружения трещин по 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.

В третьей группе методов в качестве идентификационного признака дефектов предложено использование отклонений динамических характеристик объектов контроля от характеристик линейной системы из-за появления дефектов. Такими отклонениями являются возникновение суб- и супергармонических резонансов [16, 17], искажения фазовых портретов [18, 19], фигур Лиссажу [20, 21] и других видов портретов колебаний [22, 23].

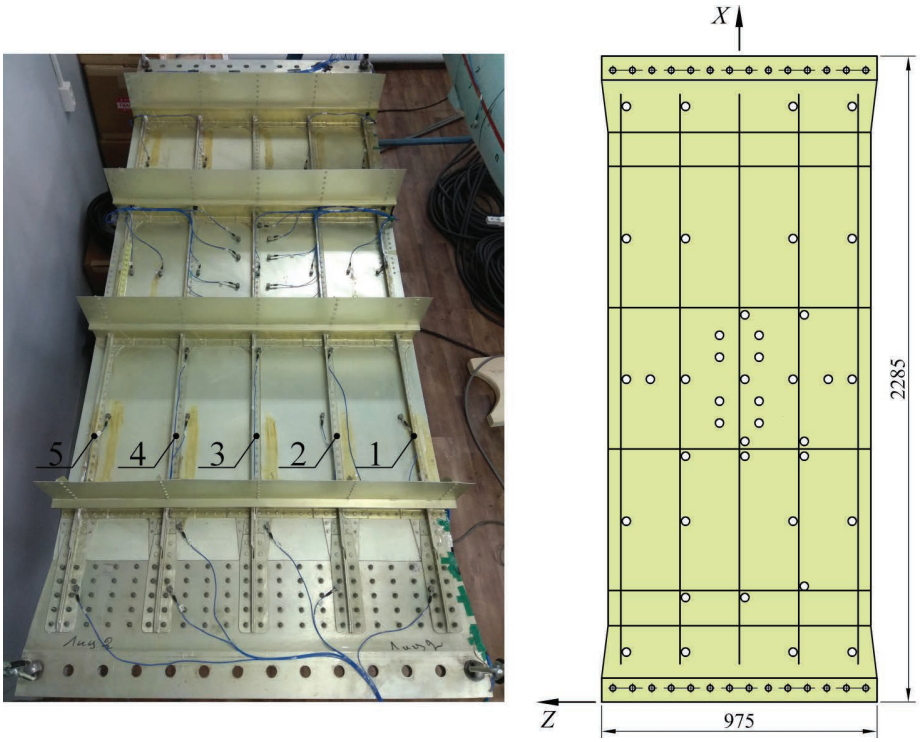
В работе [23] показано, что по нелинейным искажениям портретов вынужденных колебаний можно зафиксировать появление трещин в металлической панели и определить их местоположение. Целью настоящей работы является обеспечение достоверности такого способа обнаружения трещин. Для достижения поставленной цели проведены исследования влияния ряда факторов на чувствительность искажений портретов колебаний к появлению дефектов, а также разработан способ математической обработки результатов испытаний.

Методика исследований

Методика диагностирования трещин по искажениям портретов колебаний заключается в следующем: на конструкцию устанавливаются датчики ускорений со сгущениями в наиболее нагруженных зонах. Положения таких зон определяются по результатам расчетов или измерений напряжений в испытаниях. После обнаружения дефектов датчики можно перемещать для уточнения местоположений трещин. Затем с помощью источников гармонических вибраций создаются вынужденные колебания конструкции. Эти колебания фиксируются акселерометрами в виде портретов: вертикальная развертка пропорциональна сигналу датчика, а горизонтальная – первой гармонике сигнала, сдвинутой по фазе на $\pi/2$. Такой портрет колебаний для линейной динамической системы является окружностью. Возникновение усталостной трещины сопровождается нелинейными искажениями портретов колебаний из-за соударения ее «берегов» и сухого трения в вершинах. Для численной оценки искажений из ряда Фурье для портрета колебаний вычиталась первая гармоника, в остатке ряда определялся абсолютный максимум за период колебаний, величина максимума Ψ принималась за параметр искажений. Нормированный параметр Ψ обозначался как ξ. Строились распределения Ψ или ξ по поверхности объекта контроля. По расположениям локальных максимумов искажений определялись места образования трещин.

Таким образом, достоверность обнаружения трещин оценивалась по тому, насколько параметр искажения портретов колебаний Ψ отслеживает местоположение и размеры дефектов. Основными факторами, влияющими на эффективность диагностирования каждого дефекта в отдельности, являются: способ нормирования параметра Ψ; уровни амплитуд колебаний объекта испытаний; электрические помехи в системах испытательного оборудования; наличие дефектов в конструкции в исходном для диагностирования состоянии; нелинейности динамических характеристик объекта контроля из-за условий его крепления в испытательном стенде; «затенение» одного дефекта другим.

Объектом контроля являлась металлическая панель фюзеляжа самолета. На рис. 1 показаны общий вид панели, нумерация стрингеров, габаритные размеры и положения датчиков ускорений. На время испытаний панель была вывешена на упругих жгутах, возбуждение колебаний осуществлялось электродинамическими силовозбудителями (рис. 2). Изучалось влияние способа нормирования искажений портретов колебаний, амплитуды колебаний панели и электрических помех в системах стенда на достоверность



а *б*

Рис. 1. Внешний вид панели (*а*) и схема установки акселерометров (*б*)

Fig. 1. The panel assembled representation (*а*) and the accelerometers installation diagram (*б*)



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Fig. 2. The experimental plant assembled representation

обнаружения трещин. Исследовались следующие состояния панели [23]: исходное; концентратор напряжений в виде надреза в центре панели; разрушены стрингеры № 1 и 5; ремонтная накладка на трещине в стрингере № 5; трещина в стрингере № 2 длиной L, равной 5, 10 и 15 мм; трещина в стрингере № 2, L = 15мм с распространением вдоль стрингера.

Результаты и их обсуждение

Нормирование параметра, оценивающего искажения портретов колебаний, необходимо, например, для отслеживания динамики развития дефекта. Поскольку способ нормирования может иметь большое значение в достоверности идентификации дефектов, рассмотрено несколько вариантов этого нормирования.

Искажения каждого сигнала нормируются по максимальной амплитуде первой гармоники из всех зарегистрированных сигналов

На рис. 3 и 4 представлены ненормированные (слева) и нормированные (справа) распределения искажений портретов колебаний для различных состояний панели. Стрелками отмечены положения дефектов. На представленных рисунках видно, что распределения искажений портретов колебаний качественно не отличаются друг от друга.

В таблице приведены абсолютные и нормированные значения искажений портретов

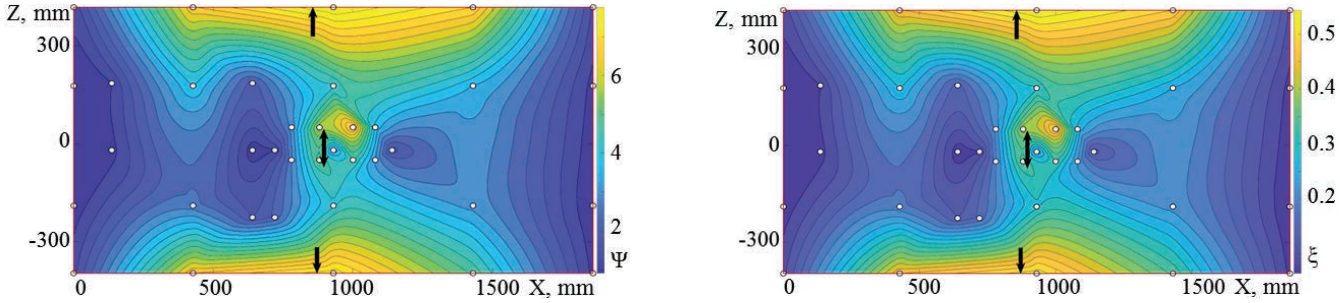


Рис. 3. Надрез в центре панели и трещины в стрингерах № 1 и 5

Fig. 3. The panel with a notch in its center and cracks in the stringers 1 and 5

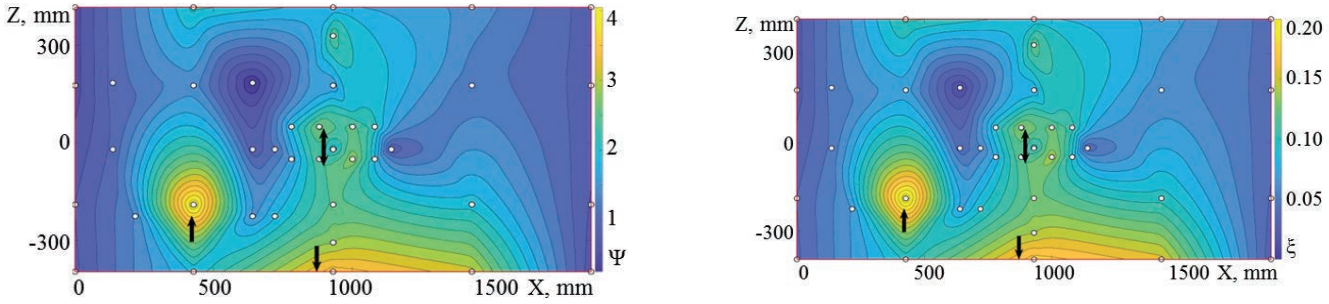


Рис. 4. Надрез в центре панели; трещина в стрингере № 1; ремонтная накладка на стрингере № 5; трещина в стрингере № 2, L = 15 мм

Fig. 4. The panel with a notch in its center; crack in the stringer 1; repair of the crack in the stringer 5; crack in the stringer 2, L = 15 mm

Максимумы искажений портретов колебаний
The distortions of vibration portraits maxima

Состояние панели / The panel state	Ψ	ΔΨ, %	ξ	Δξ, %
Исходное / Initial	0,71	–	0,03	–
Панель с надрезом / Panel with a notch	5,13	725	0,06	205
Трещины в стрингерах № 1 и 5 / Cracks in stringers 1 and 5	8,13	1149	0,57	1979
Установлена ремонтная накладка на стрингере № 5 / Repair strip on the stringer 5	1,37	194	0,15	512
Трещина в стенке стрингера № 2 / Crack in the stringer wall No 2	1,74	246	0,26	920
Трещина в стрингере № 2, L = 5 мм / Crack in the stringer 2, L = 5 mm	2,04	289	0,30	1029
Трещина в стрингере № 2, L = 10 мм / Crack in the stringer 2, L = 10 mm	2,38	337	0,35	1206
Трещина в стрингере № 2, L = 15 мм / Crack in the stringer 2, L = 15 mm	9,89	1397	0,51	1791
Трещина в стрингере № 2, L = 15 мм, с распространением вдоль стрингера / Crack in the stringer 2, L = 15 mm with branch out along the center-line	13,16	1860	0,60	2099

колебаний, а также их изменения относительно исходного состояния ($\Delta\Psi$, $\Delta\xi$) для различных состояний панели. Следует отметить, что в приведенном примере нормированная величина искажений более чувствительна к появлению дефектов.

Нормирование по амплитуде первой гармоники каждого сигнала

Такой способ нормирования искажений портретов колебаний показал свою эффективность в контроле люфтов в проводках управления самолетом, зазоров в местах стыковки агрегатов и смешений опор отклоняемых поверхностей [20, 22].

Нормированная величина искажений определяется по формуле

$$\xi_i = \frac{\max \Psi_i(t)}{(A_1)_i}, \qquad (1)$$

где $\max \Psi_i(t)$ – абсолютный максимум искажений за период; $(A_1)_i$ – амплитуда колебаний первой гармоники; i – номер канала измерений.

На рис. 5 и 6 представлены поля распределения параметра ξ, вычисленного по формуле (1).

Из представленных на рис. 5 и 6 результатов следует, что при использовании такого способа нормирования максимумы параметра искажений портретов колебаний не всегда совпадают с реальным расположением дефектов. Если совпадение и происходит, то соотношение величин ξ не соответствует соотношениям размеров близлежащих дефектов. Сопоставление полей распределения параметра ξ при возбуждении различных тонов колебаний показало, что его максимумы находятся не вблизи дефектов, а вблизи узлов форм колебаний. Это явление

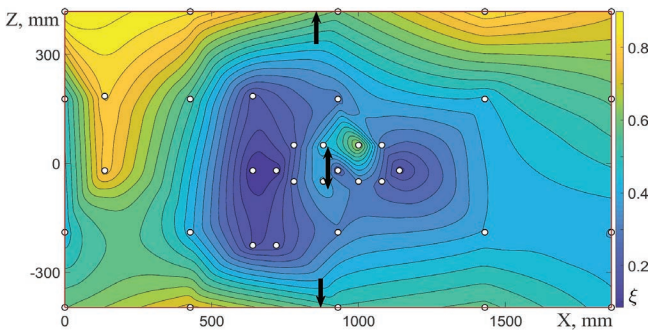


Рис. 5. Надрез в центре панели и трещины в стрингерах № 1 и 5

Fig. 5. The panel with a notch in its center and cracks in the stringers 1 and 5

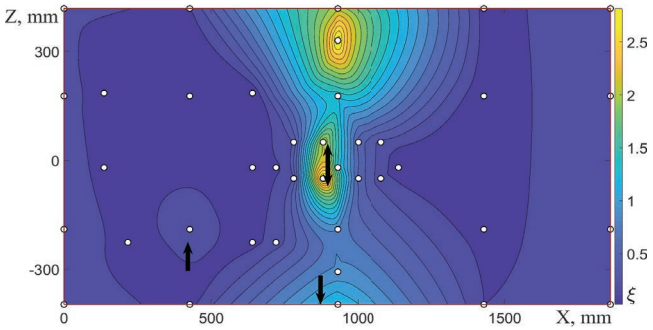


Рис. 6. Надрез в центре панели; трещина в стрингере № 1; ремонтная накладка на стрингере № 5; трещина в стрингере № 2, L = 15 мм

Fig. 6. The panel with a notch in its center; crack in the stringer 1, repair of the crack in the stringer 5, and crack in the stringer 2, L = 15 mm

объясняется следующим: трение и соударения берегов трещины порождают высокочастотные вибрации, распространяющиеся на неповрежденные части конструкции. Размеры области распространения зависят от амплитуды порождаемых вибраций и характеристик демпфирования исследуемого объекта. Ускорение в каждой точке конструкции можно представить в виде набора гармоник, причем нелинейные составляющие сигналов датчиков ускорений состоят из высших (по отношению к сигналу генератора в системе возбуждения колебаний) гармоник. В точках, близких к узлам формы колебаний, амплитуды высших гармоник могут превышать амплитуду первой гармоники и, следовательно, при приближении к узловой линии формы колебаний

$$\xi_i = \lim_{(A_1)_i \to 0} \frac{\max(\Psi_i(t))}{(A_1)_i} = \infty \qquad (2)$$

при $\max \Psi_i(t) \neq 0$.

В экспериментальных исследованиях было обнаружено, что увеличение амплитуды колебаний панели приводит к стабилизации качественной картины распределения локальных максимумов параметра ξ, и положения максимумов соответствуют местоположениям дефектов (рис. 7). 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

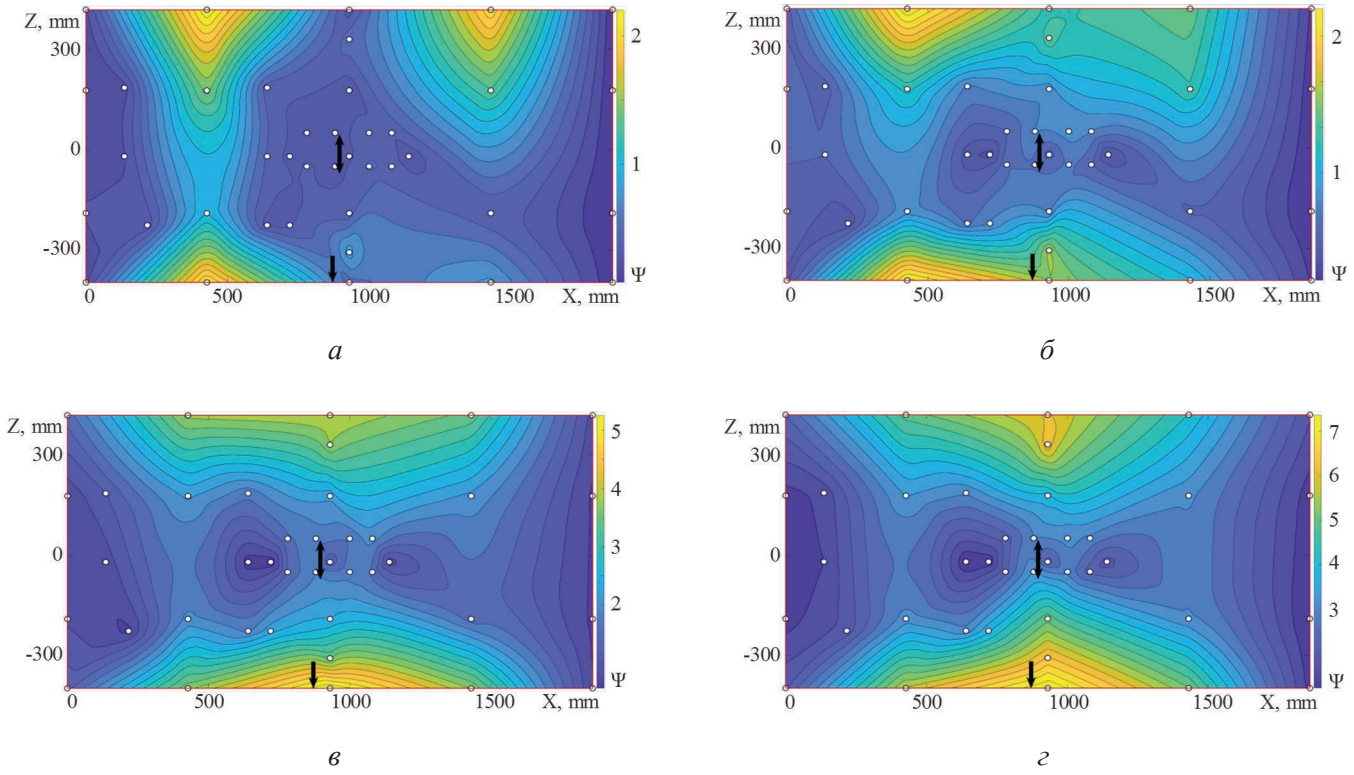


Рис. 7. Трещина в стрингере № 1 и ремонтная накладка на стрингере № 5: амплитуда перегрузки в центре панели:

а – 0,38; *б* – 0,66; *в* – 0,92; *г* – 1,46

Fig. 7. The panel with crack in stringer 1 and repair of the crack in the stringer 5: the load factor amplitude in the center of the panel:

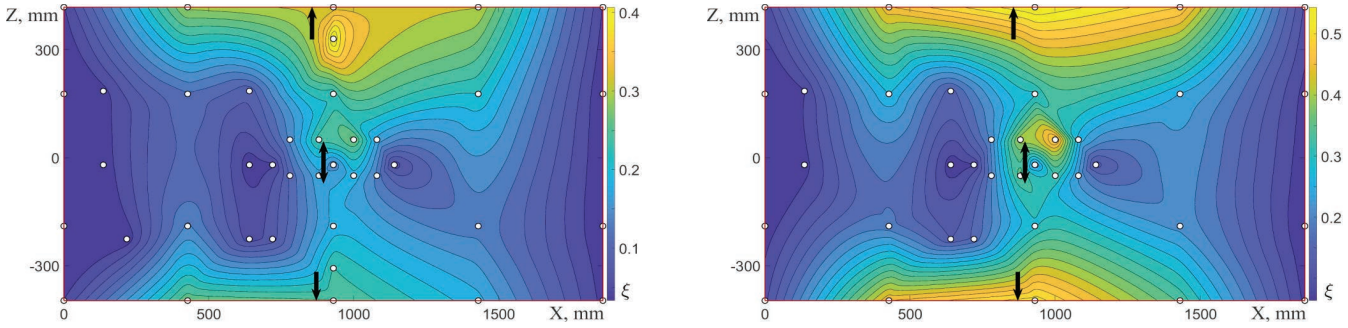
а – 0.38; *б* – 0.66; *в* – 0.92; *г* – 1.46

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. Но при этом необходимо иметь в виду, что уровень вибрационного воздействия на объект испытаний с целью диагностики его технического состояния ограничивается так, чтобы такие воздействия не приводили к накоплению усталостных повреждений.

В системах управления вибрационными испытаниями и измерения параметров колебаний зачастую присутствуют электрические помехи, обусловленные наводками от сети питания, электрических машин, электронных устройств и иных источников. Избавиться от них не всегда возможно, поэтому необходимо оценить влияние помех на достоверность обнаружения дефектов. Установлено, что наибольшие помехи возникают в цепях управления возбуждением колебаний.

Разрабатываемый способ обнаружения дефектов основан на выявлении отличий установившихся вынужденных колебаний объекта диагностики от колебаний линейной системы под действием силы, изменяющейся по гармоническому закону. Наличие электрических помех в элементах системы возбуждения колебаний приводит к формированию воздействия на конструкцию, отличного от гармонического. Оценка уровня вносимых электрическими помехами искажений возможна по анализу спектральных составляющих сигналов датчиков сил (ДС), установленных в точках возбуждения колебаний.

На рис. 8 представлены распределения ξ по поверхности панели с надрезом и трещинами в



а *б*

Рис. 8. Трещины в стрингерах № 1 и 5 и надрез в центре панели:
а – ν = 50 Гц, *Q* = 13,9 %; ν = 100 Гц, *Q* = 6,0 %; ν = 150 Гц, *Q* = 34,4 %; ν = 250 Гц, *Q* = 5,3 %; ν = 450 Гц, *Q* = 31,3 %; *б* – ν = 50 Гц, *Q* = 7,60 %; ν = 150 Гц, *Q* = 17,6 %; ν = 450 Гц, *Q* = 16,5 %

Fig. 8. The panel with cracks in the stringers 1 and 5 and notch in the center:
а – ν = 50 *Hz*, *Q* = 13,9 %; ν = 100 *Hz*, *Q* = 6,0 %; ν = 150 *Hz*, *Q* = 34,4 %; ν = 250 *Hz*, *Q* = 5,3 %; ν = 450 *Hz*, *Q* = 31,3 %; *б* – ν = 50 *Hz*, *Q* = 7,60 %; ν = 150 *Hz*, *Q* = 17,6 %; ν = 450 *Hz*, *Q* = 16,5 %

стрингерах № 1 и 5 при наличии электрических помех разного уровня. Указаны частоты высших гармоник ν и их амплитуды *Q*, выраженные в процентах от амплитуды первой гармоники основного сигнала ДС. Принимались во внимание гармоники с относительными амплитудами *Q*, превышающими 5 %.

Результаты исследований показали, что идентификация местоположений дефектов надежна, если относительный уровень электрических помех не превышает 20 % амплитуды гармоники сигнала генератора. Следует также отметить, что если датчики сил расположены вблизи дефектов, то в спектрах сигнала ДС могут возникать гармонические составляющие, кратные гармонике сигнала генератора. Это объясняется влиянием нелинейных свойств конструкции, а не электрическими помехами.

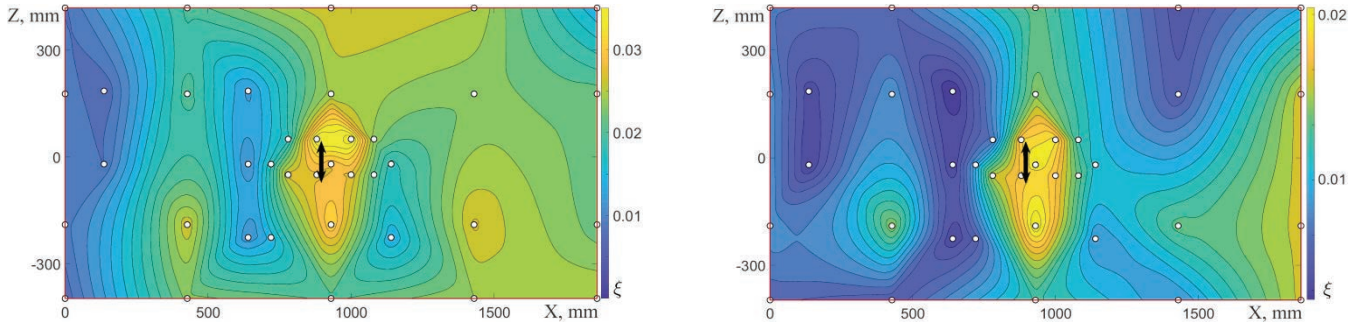
Поскольку расположения дефектов панели определяются по расположениям датчиков, портреты колебаний которых имеют максимальные нелинейные искажения, то появление новых дефектов вблизи уже существующих может быть не обнаружено по причине «затенения» одного максимума другим. Для устранения этого явления предлагается вычитать одно распределение параметра искажений из другого. Таким способом можно исключить из анализа исходное состояние объекта испытаний, отследить динамику изменений состояния панели и зафиксировать развитие каждого дефекта в отдельности. Для этого распределения параметра ξ должны быть построены по результатам испытаний с одинаковыми амплитудами перегрузок в контрольных точках панели.

На рис. 9 показан пример исключения искажений, соответствующих исходному состоянию панели.

На рис. 10 проиллюстрировано исключение двух предшествующих состояний из распределения ξ для панели с надрезом в центральной части, трещиной в стрингере № 1, ремонтной накладкой на стрингере № 5 и трещиной в полке стрингера № 2 длиной 15 мм (рис. 10, *а*). Вычитание состояния с ремонтной накладкой на стрингере № 5 (рис. 10, *б, в*) позволяет выделить новый дефект – трещину в стрингере № 2, а вычитание состояния с длиной трещины 5 мм в полке стрингера № 2 – отследить развитие этого дефекта (рис. 10, *г*, *д*).

Помимо сопоставления распределений искажений портретов колебаний для разных состояний панели изложенный способ трансформации результатов испытаний позволяет исключать из рассмотрения искажения в любых произвольных точках на поверхности панели. Это может быть полезным при анализе и интерпретации результатов экспериментов.

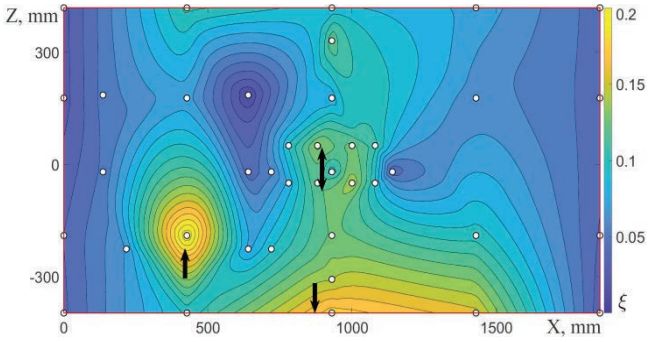
На рис. 11–13 показаны примеры такого исключения для панели с надрезом в центральной части, трещиной в стрингере № 1, ремонтной накладкой на стрингере № 5 и трещиной в полке стрингера № 2. Распределение искажений



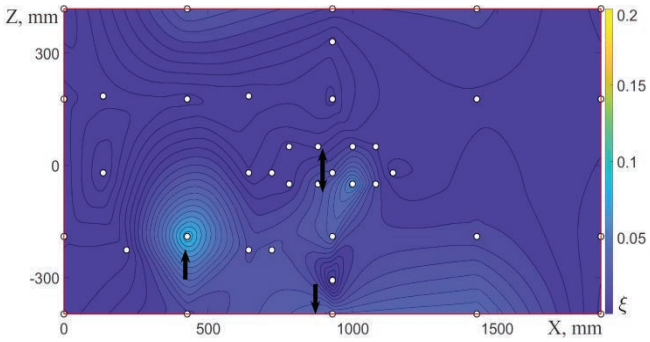
а *б*

Рис. 9. Исключение исходного состояния для панели с надрезом:
а – надрез в центральной части; *б* – исключено исходное состояние

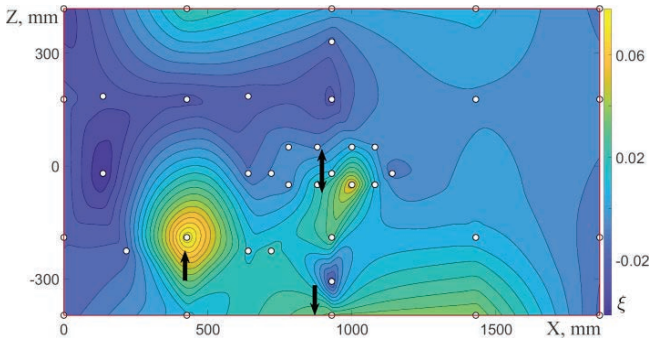
Fig. 9. Excluding the initial state for the panel with notch:
а – notch in center of the panel; *б* – excluding the initial state



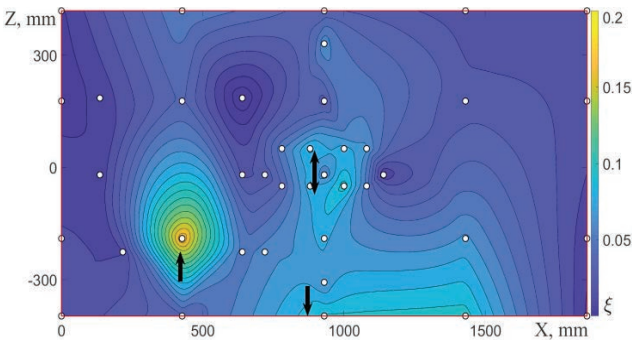
а



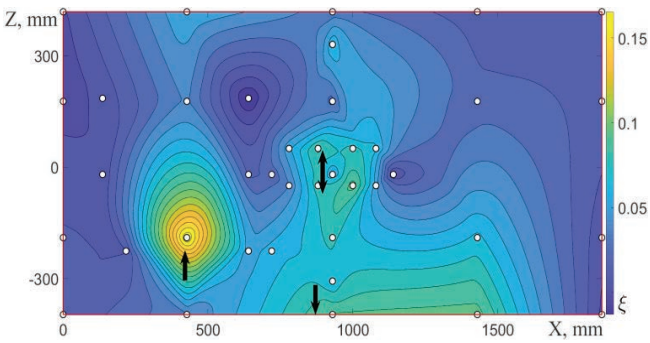
б



в



г



д

Рис. 10. Исключение предшествующих состояний для панели с трещиной в полке стрингера № 2 длиной 15 мм

Fig. 10. Excluding the previous states for the panel with crack in cap of the stringer 2 (L = 15 mm)

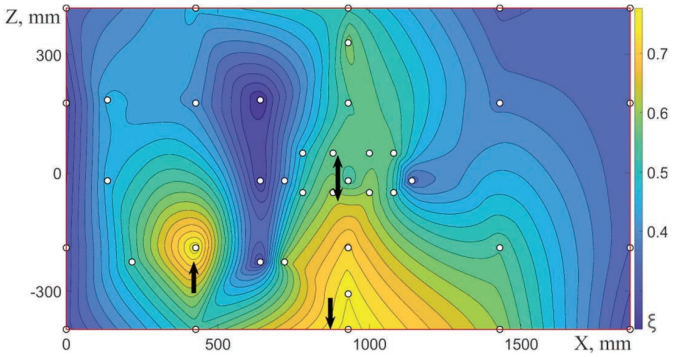


Рис. 11. Надрез в центре панели, трещина в стрингере № 1, ремонтная накладка на стрингере № 5 и трещина в полке стрингера № 2

Fig. 11. The panel with notch in the center; crack in the stringer 1; repair of the crack in the stringer 5 and crack in cap of the stringer 2

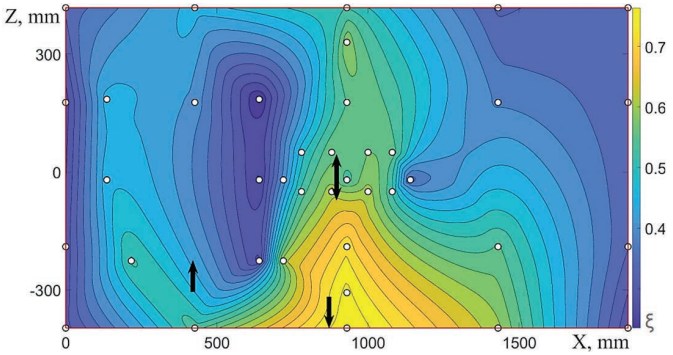


Рис. 12. Исключены искажения вблизи трещины в стрингере № 2

Fig. 12. Excluding distortions in the neighbor of crack in the stringer 2

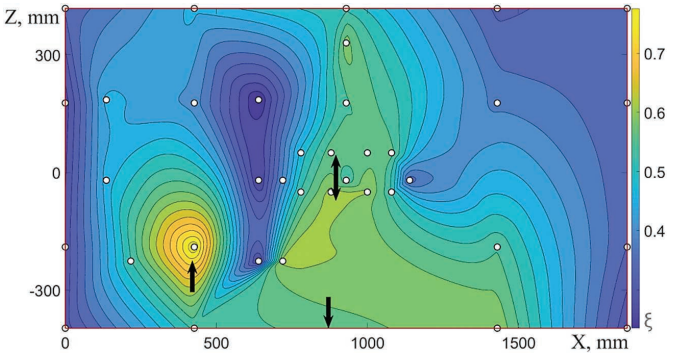


Рис. 13. Исключены искажения вблизи трещины в стрингере № 1

Fig. 13. Excluding distortions in the neighbor of crack in the stringer 1

портретов колебаний панели для рассматриваемого состояния представлено на рис. 11. Исключение из рассмотрения сигналов датчиков, находящихся вблизи трещины в стрингере № 2, позволяет выделить распределение параметра ξ, соответствующее трещине в стрингере № 1 и трещине с ремонтной накладкой в стрингере № 5 (рис. 12). Исключение из рассмотрения сигналов датчиков, находящихся вблизи трещины в стрингере № 1, позволяет более детально проследить за развитием трещины в стрингере № 2 (рис. 13).

На рис. 14 представлен результат обнаружения трещин в нервюрах крыла самолета в процессе их вибропрочностных испытаний.

Выводы

По результатам диагностирования трещин в панели фюзеляжа самолета установлено, что способ нормирования искажений портретов колебаний имеет большое значение для обнаружения дефектов. Показано, что с ростом амплитуды вибраций панели достоверность идентификации дефектов повышается. Отмечено, что электрические помехи в системах возбуждения и измерения колебаний не снижают достоверности идентификации трещин, если амплитуды этих помех не превышают 20 % амплитуды сигнала управляющего генератора.

Разработан способ математической обработки распределений искажений портретов коле-

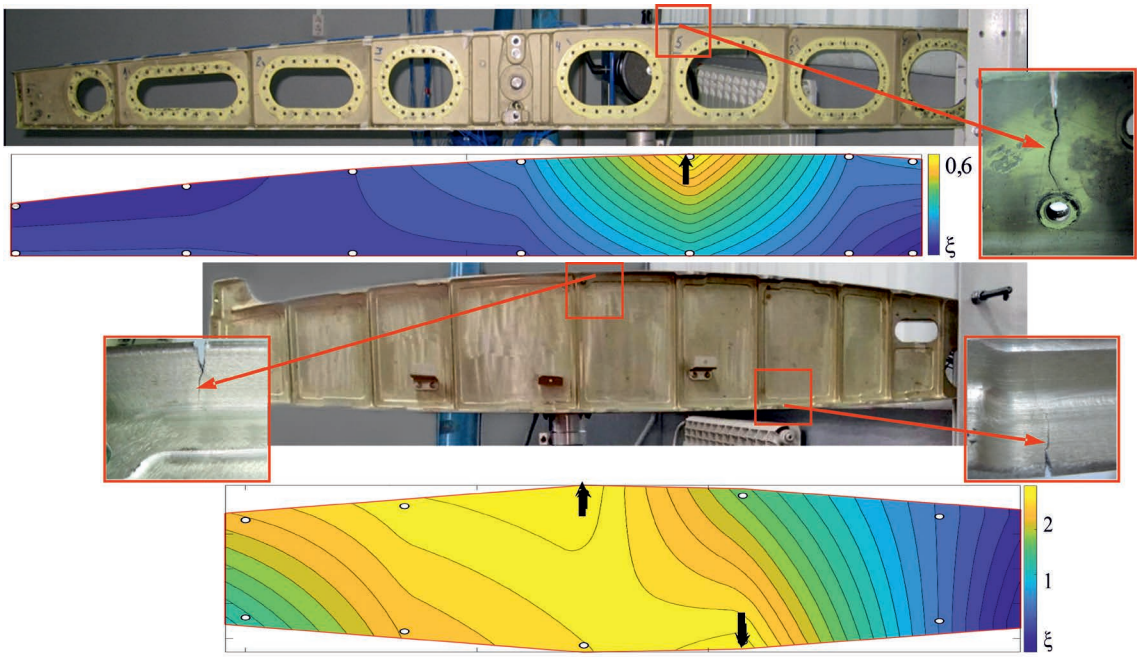


Рис. 14. Трещины в поясах нервюр крыла самолета

Fig. 14. The cracks in the caps of wing ribs

баний, позволяющий исключить из анализа исходное состояние объекта испытаний, отследить динамику изменений его состояния и зафиксировать развитие каждого дефекта в отдельности.

Результаты проведенных исследований позволяют обеспечить достоверность обнаружения трещин в металлических конструкциях по нелинейным искажениям портретов колебаний.

Список литературы

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

2. Неразрушающий контроль. Т. 7, кн. 2. Вибродиагностика: справочник / 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. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – 408 p. – ISBN 978-3-642-01485-7.

5. *Tiwari R.* Rotor systems: analysis and identification. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 1069 p. – ISBN 978-1-138-03628-4.

6. Вибродиагностика авиационных конструкций. – М.: ГосНИИГА, 1986. – 95 с. – (Труды Государственного научно-исследовательского института гражданской авиации; вып. 256).

7. *Постнов В.А.* Определение повреждений упругих систем путем математической обработки частотных спектров, полученных из эксперимента // Известия РАН. Механика твердого тела. – 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, N 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. *Бовсуновский А.П., Матвеев В.В.* Вибродиагностические параметры усталостной поврежденности упругих тел // Механічна втома металів. Праці 13-го Міжнародного колоквіуму (МВМ-2006), 25–28 вересня 2006 року. – Ternopil, 2006. – P. 212–218.

17. *Цыфанский С.Л., Бересневич В.И., Лушников Б.В.* Нелинейная вибродиагностика машин и механизмов. – Рига: ; Рижский техн. ун-т, 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 // Proceedings of International Conference on the Rotordynamics, JSME, September 14–17, 1986, Tokyo. – Tokyo, 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 Московского авиационного института. – 2008. – Т. 15, № 1. – С. 87–91.

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

21. *Al-Khazali H.A.H., Askari M.R.* 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. – Т. 18, № 4. – С. 86–96.

23. Диагностирование трещин в металлических панелях по нелинейным искажениям портретов колебаний / В.А. Бернс, Е.П. Жуков, В.В. Маленкова, Е.А. Лысенко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 6–17. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-6-17.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2019 vol. 21 no. 2 pp. 26–39
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-26-39

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Studies on the Reliability of Crack Diagnosis by the Forced Oscillations Portraits Distortions

Vladimir Berns [1, 2, a,*], *Egor Zhukov* [1, b], *Pavel Lakiza* [1, c], *Evgenii Lysenko* [3, d]

[1] Siberian Aeronautical Research Institute named after S. A. Chaplygin, 21 Polzunov str., Novosibirsk, 630051, Russian Federation
[2] Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
[3] Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems, 52 Lenin str., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation

[a] http://orcid.org/0000-0002-2231-7581, v.berns@yandex.ru, [b] http://orcid.org/0000-0001-6378-6352, zh-ep@yandex.ru,
[c] http://orcid.org/0000-0002-3863-2762, qinterfly@gmail.com, [d] https://orcid.org/0000-0001-5561-2934, mla340@iss-reshetnev.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 15 March 2019
Revised: 25 April 2019
Accepted: 04 May 2019
Available online: 15 June 2019

Keywords:
Airframe elements
Fatigue crack
Vibration diagnostics of cracks
Nonlinear distortions of the oscillations portrait
Normalization of the oscillation portraits distortions
Influence of the oscillations amplitude
Electrical interference
Tracking the state of the test object

ABSTRACT

Introduction. One of the methods for the vibration diagnosis of fatigue cracks in the airframe metal elements is based on the analysis of the monitor objects forced oscillations portraits. The assessment of the reliability of this method in relation to real structures is an urgent task. **Objective of the work:** to assure the reliability of cracks detecting in metal structures by nonlinear distortions of oscillations portraits. **Research technique.** With the help of harmonic sources, forced oscillations of the diagnosed structure are created and recorded by acceleration sensors. Initially, the acceleration sensors are placed with condensation in the most loaded areas, which are determined by the calculations results or in vibration tests. Then, the sensors positions can be shifted to the defect locations. The signal of each sensor is represented as an oscillations portrait, the vertical scanning of which is proportional to this signal, and the horizontal one – to the first harmonic of the signal, phase shifted by $\pi/2$. Such an oscillation portrait is a circle for a linear dynamic system. The fatigue crack initiation is accompanied by nonlinear distortions of the oscillation portraits because of the collision of its edges and dry friction at the tips. For the numerical evaluation of distortions, the first harmonic is subtracted from the Fourier series for the oscillations portrait; the absolute maximum for the oscillation period is determined in the series remainder, the maximum value related to the first harmonic amplitude and is taken as the distortion parameter. Distributions of the oscillation portraits distortion parameter are built over the surface of the test object. Locations of cracks are determined from the locations of the distortions local maximums. At the same time, the amplitudes of the oscillations of the airframe and the methods of normalizing the distortion parameter changed, electrical interference in the test equipment systems are evaluated. **Results and discussions.** The reliability of the fatigue cracks detecting by distortions of the oscillations portraits are estimated by the example of the aircraft fuselage metal panel diagnosing. The influence of the panel vibrations amplitude, the method of normalization of the oscillation portraits distortions and the level of electrical interference in the excitation system on the effectiveness of crack diagnosis is established. A method for mathematical processing of distributions of the oscillations portraits distortion parameter, allowing to exclude the initial state of the test object from analysis, to track the dynamics of changes in its state and record the development of each defect separately, to eliminate the influence of the fastening system that can introduce nonlinearities in the test object oscillations is proposed to improve the reliability of defects diagnosis. The result of cracks detection in the aircraft wing ribs in the process of strength tests is presented.

For citation: Berns V.A., Zhukov E.P., Lakiza P.A., Lysenko E.A. Studies on the reliability of crack diagnosis by the forced oscillations portraits distortions. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 26–39. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-26-39. (In Russian).

*** Corresponding author**
Berns Vladimir A., D.Sc. (Engineering), Associate Professor
Novosibirsk State Technical University,
20 Prospekt K. Marksa,
630073, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: 8 (383) 346-31-21, **e-mail:** v.berns@yandex.ru

References

1. Zhukov R.V. Obzor nekotorykh standartov ISO/TC-108 v oblasti diagnostiki mashinnogo oborudovaniya [An overview of some ISO/TC-108 standards in the field of machinery diagnostics]. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*, 2004, no. 12, pp. 61–66.

2. Balitskii F.Ya., Barkov A.V., Barkova N.A., Vasil'eva R.V., Gol'din A.S., Zusman A.V., Sokolova A.G., Shirman A.R., Yakubovich V.A. *Nerazrushayushchii kontrol'*. T. 7, kn. 2. *Vibrodiagnostika* [Non-destructive testing. Vol. 7, bk. 2. Vibration-based diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 829 p. ISBN 5-217-03298-7.

3. Kostyukov V.N., Naumenko A.P. *Osnovy vibroakusticheskoi diagnostiki i monitoringa mashin* [Basics of vibroacoustic diagnostics and monitoring of machines]. Omsk, OmSTU Publ., 2011. 360 p. 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*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2010. 408 p. ISBN 978-3-642-01485-7.

5. Tiwari R. *Rotor systems: analysis and identification*. Boca Raton, CRC Press, 2017. 1069 p. ISBN 978-1-138-03628-4.

6. *Vibrodiagnostika aviatsionnykh konstruktsii* [Vibrodiagnostics aircraft structures]. Moscow, GosNIIGA Publ., 1986. 95 p.

7. Postnov V.A. Opredelenie povrezhdenii uprugikh sistem putem matematicheskoi obrabotki chastotnykh spektrov, poluchennykh iz eksperimenta [Determination of elastic systems damages by mathematical treatment of frequency spectra obtained from the experiment]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela = Mechanics of Solids*, 2000, no. 6, pp. 155–160. (In Russian).

8. Kositsyn A.V. Metod vibrodiagnostiki defektov uprugikh konstruktsii na osnove analiza sobstvennykh form kolebanii [Method of the vibrating diagnostics of deffects of elastic designs on the basis of the analysis own forms of fluctuations]. *Pribory i metody izmerenii = Devices and Methods of Measurements*, 2011, no. 2 (3), pp. 129–135.

9. Doebling S.W., Farrar C.R., Prime M.B., Shevitz D.W. *Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review*. *Technical report LA-13070-MS*. 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, pp. 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, pp. 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, pp. 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, pp. 269–278. DOI: 10.1999/1307-6892/9351.

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

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

16. Bovsunovskii A.P., Matveev V.V. Vibrodiagnosticheskie parametry ustalostnoi povrezhdennosti uprugikh tel [Vibrational diagnostics parameters of fatigue damage in elastic bodies]. *Mechanical Fatigue of Metals: Proceeding of the 13-th International Colloquium (MFM)*, Ternopil, 25–28 September 2006, pp. 212–218. (In Russian).

17. Tsyfanskii S.L., Beresnevich V.I., Lushnikov B.V. *Nelineinaya vibrodiagnostika mashin i mekhanizmov* [Nonlinear vibration of machines and mechanisms]. Riga, Riga Technical University Publ., 2008. 366 p. ISBN 978-9984-32-194-3.

18. Diana G., Bachmid N., Angel F. An on-line crack detection method for turbo generator rotors. *Proceedings of International Conference on the Rotordynamics*, JSME, September 14–17, 1986, Tokyo, pp. 385–390.

19. Berns V.A., Bobryshev A.P., Prisekin V.L., Samuilov V.F. *Kontrol' soosnosti ustanovki otklonyaemykh poverkhnostei po rezul'tatam vibratsionnykh ispytanii* [Coaxiality monitoring for deflecting surfaces basing on

vibration tests]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo institute = Aerospace MAI Journal*, 2008, vol. 15, no. 1, pp. 87–91.

20. Bobryshev A.P., Berns V.A., Prisekin V.L., Belousov A.I., Samuilov V.F. Sposob kontrolya lyuftov v mekhanicheskikh provodkakh upravleniya samoletov [Play control method in mechanical aircraft control joints]. *Polet = Polyot*, 2007, no. 12, pp. 50–53. (In Russian).

21. Al-Khazali H.A.H., Askari M.R. Geometrical and graphical representations analysis of Lissajous figures in rotor dynamic system. *IOSR Journal of Engineering*, 2012, vol. 2 (5), pp. 971–978.

22. Berns V.A., Lysenko E.A., Dolgopolov A.V., Zhukov E.P. Opyt kontrolya defektov letatel'nykh apparatov po parametram vibratsii [Experience of aircraft defects monitoring by vibration parameters]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 86–96. (In Russian).

23. Berns V.A., Zhukov E.P., Malenkova V.V., Lysenko E.A. Diagnosis of cracks in metal panels by non-linear distortions of vibration portraits. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 6–17. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-6-17. (In Russian).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).