



Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

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



Диагностирование трещин в металлических панелях по нелинейным искажениям портретов колебаний

Владимир Бернс^{1, 2, a, *}, Егор Жуков^{2, b}, Валерия Маленкова^{2, c}, Евгений Лысенко^{3, d}

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина, ул. Ползунова, 21, г. Новосибирск, 630051, 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/0000-0003-3374-8472>, malenkova_vv@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-5561-2934>, m1a340@iss-reshetnev.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 629.735:620.179

История статьи:

Поступила: 20 февраля 2018

Рецензирование: 14 марта 2018

Принята к печати: 09 апреля 2018

Доступно онлайн: 15 июня 2018

Ключевые слова:

Металлическая панель самолета

Усталостная трещина

Идентификационный признак дефекта

Портрет колебаний

Нелинейные искажения портрета колебаний

Вибрационная диагностика трещин

АННОТАЦИЯ

Введение. Основным дефектом конструкций, возникающим в процессе их эксплуатации или прочностных испытаний, являются усталостные трещины. Для диагностирования трещин перспективными считаются вибрационные методы, практическая реализация которых применительно к реальным конструкциям – задача актуальная. **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 быть нелинейные искажения портрета колебаний, вертикальная развертка которого пропорциональна сигналу датчика ускорений, а горизонтальная – первой гармонике этого сигнала. Такой портрет колебаний для линейной динамической системы представляется 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 гармонике. **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.

Для цитирования: 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.

Введение

Методы оценки технического состояния объектов по параметрам вибраций широко используются в различных областях техники. Наибольшее распространение они нашли в маши-

*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

ностроении для диагностирования в основном машин и механизмов, имеющих вращающиеся части [1–5]. Эти методы называют еще «пассивными», 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 служит отклик объекта 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 виброредфектоскопия конструкций производится по изменению их модальных характеристик (собственных частот, форм и декрементов колебаний) в процессе эксплуатации или прочностных испытаний [6–12]. В работе [9] отмечено, что во многих случаях даже большое повреждение конструкции не приводит к значительному изменению частот собственных колебаний. Указано также 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, что использование вибрационных методов диагностики технического состояния конструкций является перспективным. 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].

Цель настоящей работы – 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

Важный этап в контроле технического состояния конструкций – 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 откло-

няемых поверхностей [20, 21]. Контроль люфтов производится по искажениям фигуры Лиссажу, которые происходят из-за соударения элементов проводки управления. 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 , а 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, 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.

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 – переме-

ние и скорость колебаний контрольной точки поверхности; e – смещение опоры). Фазовый портрет линейной системы – эллипс.

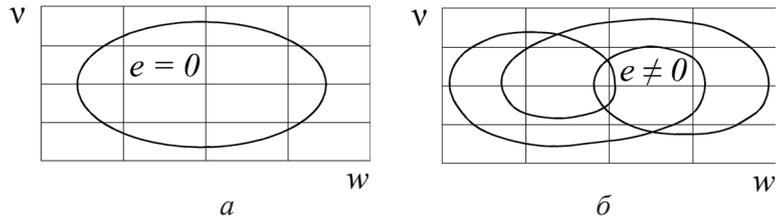


Рис. 2. Фазовые портреты системы с сухим трением

Fig. 2. Coulomb friction system phase-plane portraits

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 ξ , что и степень искажения фигуры Лиссажу.

На основании проведенных исследований разработана методика вибрационной диагностики

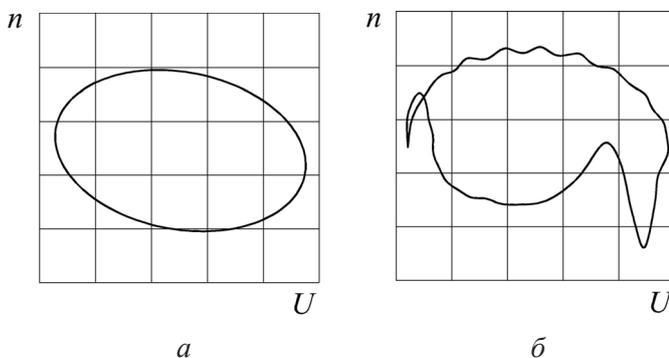


Рис. 1. Фигура Лиссажу до появления люфта (а) и после (б)

Fig. 1. The Lissajous figure before (a) and after (b) backlash advent

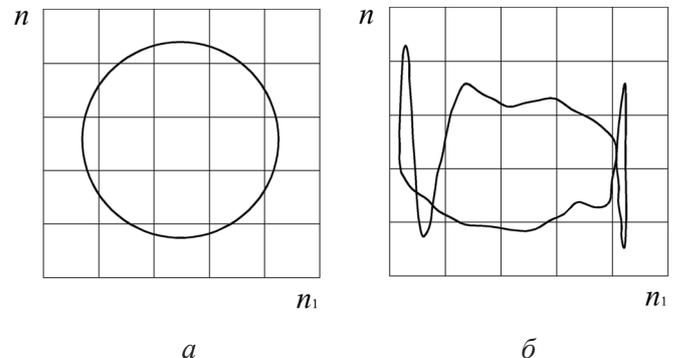


Рис. 3. Портрет колебаний до появления люфта (а) и после (б)

Fig. 3. The vibration portrait before (a) and after (b) backlash advent

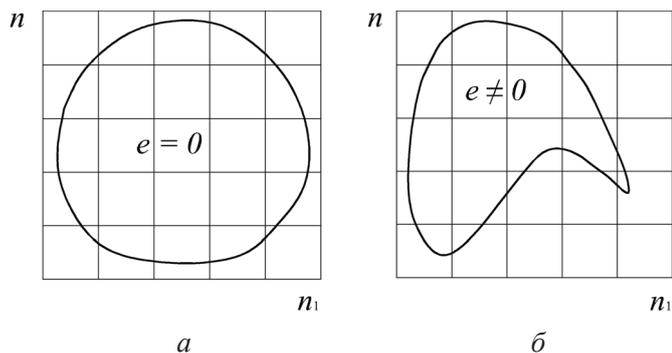


Рис. 4. Портреты колебаний системы с сухим трением
 Fig. 4. Coulomb friction system vibration portraits

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 конструкции 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 процесса 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 обозна-

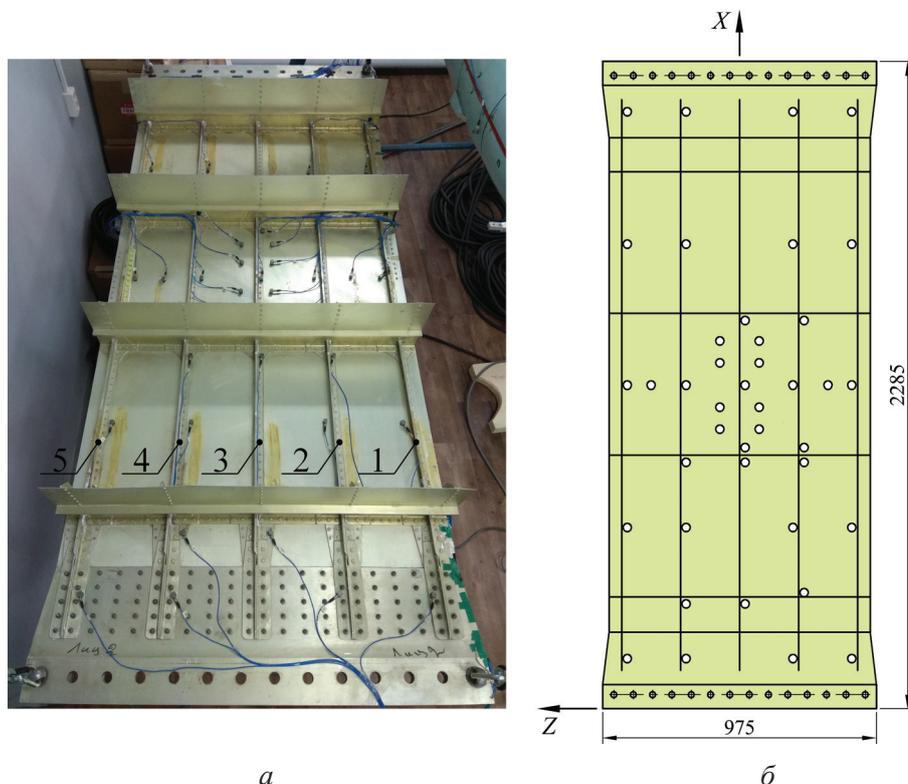


Рис. 5. Внешний вид панели (а) и схема установки акселерометров (б)
 Fig. 5. The panel assembled representation (a) and the accelerometers installation diagram (b)

чены 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.

На время экспериментов панель была вывешена на упругих жгутах малой жесткости. Возбуждение колебаний осуществлялось двумя электродинамическими силовозбудителями. Для измерения вибраций использовалось 40 датчиков ускорений. Датчики размещались со сгущением в окрестности пучностей формы первого тона упругих колебаний панели, поскольку выраживание 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 ξ и определены собственные частоты панели p_i ($i = 1 \dots 4$) в ее

исходном состоянии. Затем проведены исследования изменений собственных частот Δp_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.

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_n . 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.

В табл. 2 приведены 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.

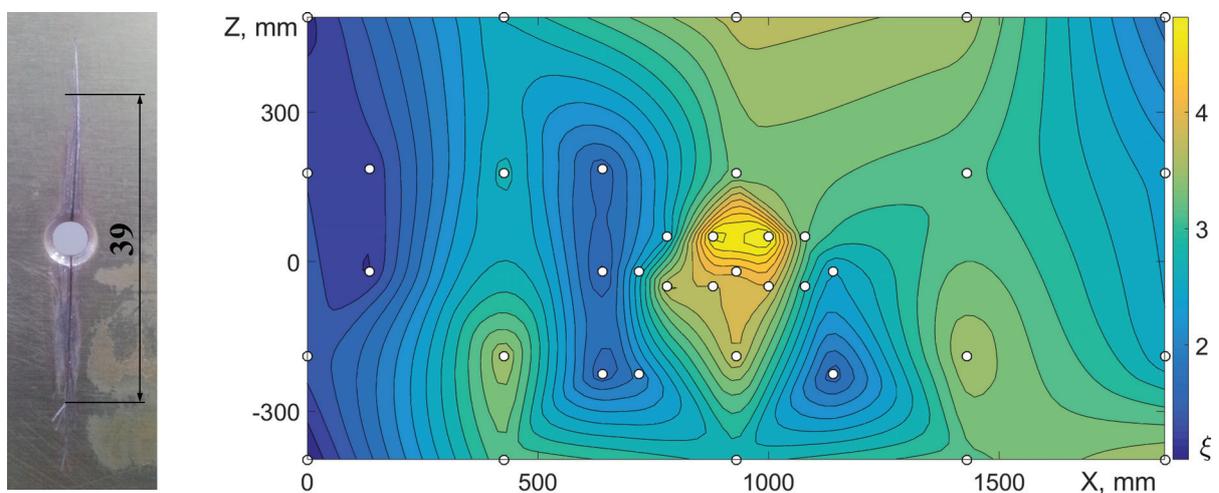


Рис. 6. Распределение ξ по панели с концентратором напряжений

Fig. 6. The ξ distribution over the panel with a stress concentrator

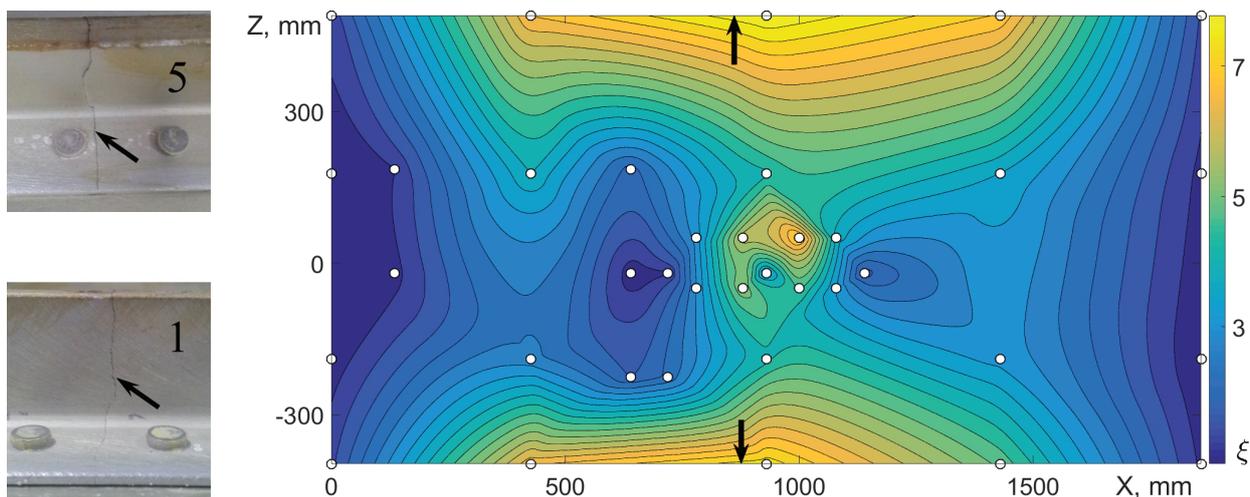


Рис. 7. Распределение ξ по панели с концентратором напряжений и трещинами в стрингерах 1 и 5
 Fig. 7. The ξ distribution over the panel with a stress concentrator and cracks in stringers 1 and 5

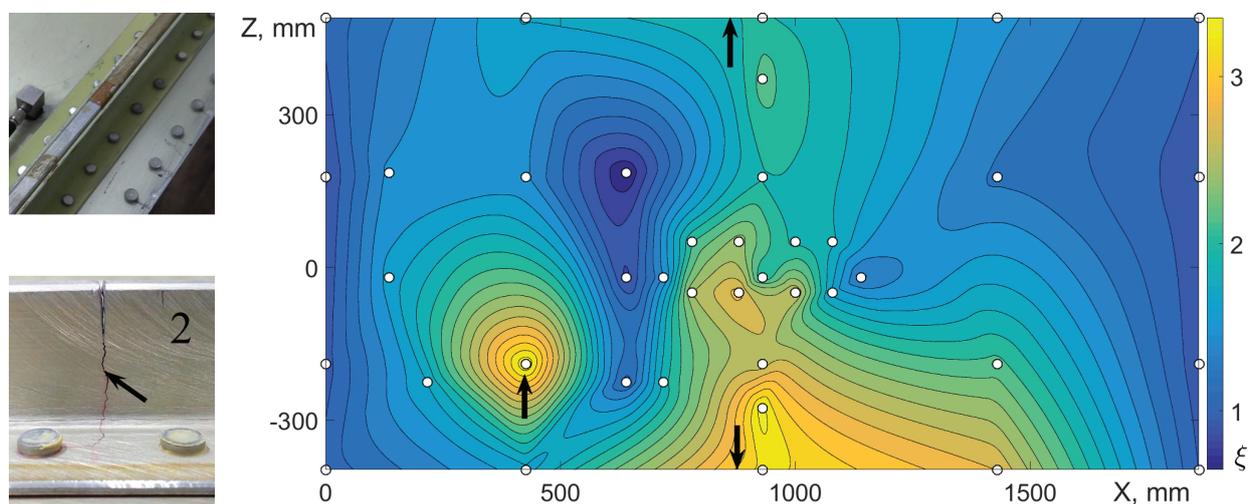


Рис. 8. Распределение ξ по панели с концентратором напряжений, трещинами в стрингерах 1 и 2 и ремонтной накладкой на стрингере 5
 Fig. 8. The ξ distribution over the panel with the stress concentrator, the cracks in the stringer 1 and 2 and repair of the crack in the stringer 5

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. 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.

Таблица 1

Table 1

Максимумы искажений портретов колебаний
Distortions peaks of vibration portraits

Состояние панели / The panel state	ξ	$\Delta\xi, \%$	ξ_n	$\Delta\xi_n, \%$
Исходное / Initial	0.71	–	0.03	–
Панель с концентратором напряжений / Panel with a stress concentrator	5.13	725	0.06	205
Трещины в стрингерах 1 и 5 / Cracks in stringers 1 and 5	8.13	1149	0.57	1979
Ремонтные накладки на стрингере 5 / Repair strips on the stringer 5	1.37	194	0.15	512
Трещина в стенке стрингера 2 / Crack in the stringer 2 web	1.74	246	0.26	920
Трещина в стрингере 2 (1/4 ширины полки) / Crack in the stringer 2 (1/4 of the cap width)	2.04	289	0.30	1029
Трещина в стрингере 2 (1/2 ширины полки) / Crack in the stringer 2 (1/2 of the cap width)	2.38	337	0.35	1206
Трещина в стрингере 2 (3/4 ширины полки) / Crack in the stringer 2 (3/4 of the cap width)	9.89	1397	0.51	1791
Трещина в стрингере 2 (3/4 ширины полки с боковым ответвлением) / Crack in the stringer 2 (3/4 of the width of the cap with side kinking)	13.16	1860	0.60	2099

Таблица 2

Table 2

Собственные частоты колебаний панели
Panel natural vibration frequencies

Состояние панели / The panel state	P_1, Hz	$\Delta P_1, \%$	P_2, Hz	$\Delta P_2, \%$	P_3, Hz	$\Delta P_3, \%$	P_4, Hz	$\Delta P_4, \%$
Исходное / Initial	10.93	–	35.16	–	72.09	–	170.0	–
Панель с концентратором напряжений / Panel with a stress concentrator	10.87	0.73	35.16	0.0	72.07	0.03	170.0	0.0
Трещины в стрингерах 1 и 5 / Cracks in stringers 1 and 5	10.52	3.75	35.05	0.31	71.64	0.62	170.0	0.0
Ремонтные накладки на стрингере 5 / Repair strips on the stringer 5	10.76	1.56	35.06	0.28	–	–	–	–

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что по нелинейным искажениям портретов колебаний можно зафиксировать появление трещин в металлической панели и определить их местоположение. 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

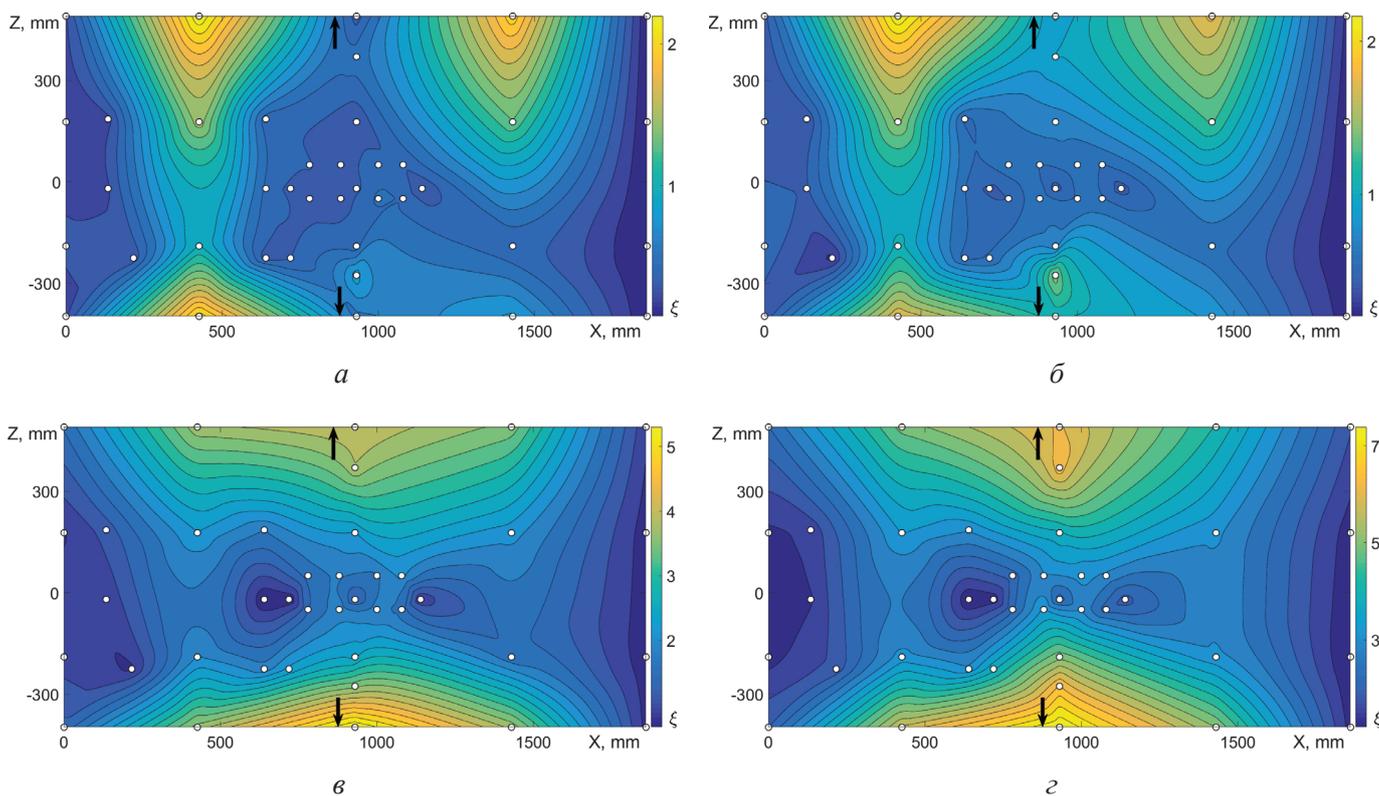


Рис. 9. Распределения ξ по панели с трещиной в стрингере 1 и ремонтной накладкой на стрингере 5; амплитуда перегрузки в центре панели:

$a - 0,25$; $б - 0,96$; $в - 1,59$; $г - 1,86$

Fig. 9. The ξ distributions over 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:

$a - 0.25$; $б - 0.96$; $в - 1.59$; $г - 1.86$

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. 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 ГосНИИ ГА; 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 Vibra-

- tion. – 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.ymsp.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. Szewedo, 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 // *Механическая усталость металлов: труды коллоквиума.* – Тернополь, 2006. – С. 212–218.
17. *Цыфанский С.Л., Бересневич В.И., Лушников Б.В.* Нелинейная вибродиагностика машин и механизмов. – Рига: Изд-во РТУ, 2008. – 366 с. – ISBN 978-9984-32-194-3.
18. *Diana G., Bachschmid N., Angeli F.* An on-line crack detection method for turbogenerator rotors // *Proceeding of international Conference on Rotordynamics, JSME.* – 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 МАИ.* – 2008. – Т. 15, № 1. – С. 87–91.
20. Способ контроля люфтов в механических проводках управления самолетов / А.П. Бобрышев, В.А. Бернс, 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.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 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 - Metal Working and Material Science

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



Diagnosis of Cracks in Metal Panels by Non-linear Distortions of Vibration Portraits

Vladimir Berns^{1, 2, a, *}, Egor Zhukov^{2, b}, Valeriya Malenkova^{2, c}, Lysenko Evgenii^{3, d}

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Siberian Aeronautical Research Institute named after S. A. Chaplygin, 21 Polzunov str., Novosibirsk, 630051, 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/0000-0003-3374-8472>,  malenkova_vv@mail.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0001-5561-2934>,  m1a340@iss-reshetnev.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 February 2018

Revised: 14 March 2018

Accepted: 9 April 2018

Available online: 15 June 2018

Keywords:

Metal plane body panel

Fatigue crack

Identification of the defect

Vibration portrait

Nonlinear distortion of the vibration portrait

Cracks vibration diagnosis

ABSTRACT

Introduction. The main defect of the structures that occurs during its operation or strength tests is fatigue crack. Vibrational methods are promising to diagnose the cracks. The practical implementation of these methods on real structures is a relevant objective. **Objective:** to study the possibility of using distortions of the constrained vibration portraits as an identification feature of cracks in metal structures. **Research Methods.** Acceleration sensor are installed on the diagnose structure, and vibration oscillations are created in it by means of independent sources of harmonic vibrations. The dynamic consequence of the fatigue crack is the collisions of the “faces” and dry friction at the crest points under the action of the vibrational load. It is shown that the identification attributes of shock pulses and dry friction can be presented by nonlinear distortions of the vibration portraits, the vertical dissection of which is proportional to the signal of the acceleration sensor, and the horizontal one is proportional to the first harmonic of this signal. Such an vibrations portrait for a linear dynamical system is a circle. In order to estimate numerically distortions from the Fourier series, the first harmonic is subtracted for the vibration portrait, the absolute maximum is determined for the period of vibrations in the remainder of the series; the magnitude of the maximum is related to the amplitude of the first harmonic. **Results and Discussion.** The efficiency of the fatigue cracks detecting due to distortions in the vibration portrait is illustrated by the example of diagnosing the metal plane body panel with the size of 2285 × 975 mm. The panel had longitudinal and transverse power sets, as well as local reinforcements. The vibrations excitation of the panel was carried out by two electrodynamic exciters. 40 acceleration sensors were used to measure vibrations. Experimental studies of changes in natural frequencies and portraits of panel vibrations for the following defects have been carried out: a stress concentrator in the form of a drilled rivet and a through-cut in the center of the panel; fatigue cracks in the side stringer; crack in the side stringer after repair; crack in the central stringer at different stages of propagation. It is established that the largest changes in natural frequencies can be several per cent, but it is not possible to determine the location of the defects. The maximum distortion of the vibration portrait is hundreds of percent and reliably tracks the locations of defects and its magnitudes. It is noted that the method of normalizing the distortions of the vibration portrait and the amplitude of the panel vibrations affect the efficiency of the diagnosis of cracks.

For citation: 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 (tehnologiya, 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).

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. (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

2. Balitskii F.Ya., Barkov A.V., Barkova N.A. et al. *Nerazrushayushchii kontrol'*. T. 7, kn. 2. *Vibrodiagnostika: spravochnik* [Non-destructive testing: quick reference guide. 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 konstruktssii* [Vibrodiagnostics aircraft structures]. Moscow, State Research Institute of Civil Aviation 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 konstruktssii na osnove analiza sobstvennykh form kolebaniy [Method of the vibrating diagnostics of defects 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. (In Russian).
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. Bovsunovsky A.P., Matveyev V.V. [Vibrational diagnostics parameters of fatigue damage in elastic bodies]. *Mekhanicheskaya ustalost' metallov: trudy kollokviuma* [Mechanical Fatigue of Metals: Proceeding of the 13th International Colloquium (MFM)], Ternopil, 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., Bachschmid N., Angeli F. An on-line crack detection method for turbogenerator rotors. *Proceeding of International Conference on Rotordynamics, JSME*, Tokyo, 1986, 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 ispytaniy [Coaxiality monitoring for deflecting surfaces basing on vibration tests]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta = 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]. *Polyot = Flight*, 2007, no. 12, pp. 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), pp. 971–978.



22. Berns V.A., Lysenko E.A., Dolgoplov 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.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2018 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/>).