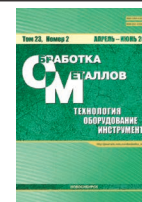




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Контроль зазоров в конструкциях технических изделий в процессе вибрационных испытаний

Николай Тестоедов^{1,а}, Владимир Бернс^{2,3,б,*}, Егор Жуков^{2,с},
Евгений Лысенко^{1,д}, Павел Лакиза^{2,е}

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

^а <https://orcid.org/0000-0002-1280-5303>, testoedov@iss-reshetnev.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0002-2231-7581>, v.berns@yandex.ru,
^с <https://orcid.org/0000-0001-6378-6352>, zh-ep@yandex.ru, ^д <https://orcid.org/0000-0001-5561-2934>, mla340@iss-reshetnev.ru,
^е <https://orcid.org/0000-0002-3863-2762>, qinterfly@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 629.735:620.179

История статьи:

Поступила: 11 марта 2021
 Рецензирование: 19 марта 2021
 Принята к печати: 29 марта 2021
 Доступно онлайн: 15 июня 2021

Ключевые слова:

Технические изделия
 Зазоры в подвижных соединениях
 Люфты в устройствах передачи
 усилий и перемещений
 Люфты и зазоры как дефекты кон-
 струкций
 Летательные аппараты
 Вибрационные испытания
 Портрет колебаний
 Нелинейные искажения портрета
 колебаний
 Контроль зазоров

АННОТАЦИЯ

Введение. Контроль зазоров в технических изделиях является составной частью диагностики этих изделий, если наличие зазоров приводит к отклонениям от заданных условий и режимов работы. В том случае, когда изделия подвергаются вибрационным испытаниям, представляется целесообразным использование этих испытаний для обнаружения таких зазоров. **Цель работы:** разработка методики контроля зазоров в конструкциях технических изделий в процессе вибрационных испытаний по искажениям портретов вынужденных колебаний. **Методика исследований.** С помощью источников гармонических вибраций в изделиях создавались установившиеся вынужденные колебания, регистрируемые акселерометрами. Сигналы акселерометров трансформировались в портреты вынужденных колебаний. Для построения портретов использовалась вертикальная развертка, пропорциональная сигналу датчика. Горизонтальной разверткой являлась первая гармоника сигнала, сдвинутая по фазе на $\pi/2$. Для линейной динамической системы эти портреты являются окружностями. Появление зазоров приводит к искажениям портретов колебаний. Численная оценка искажений определялась так: из ряда Фурье для портрета колебаний вычиталась первая гармоника, в остатке ряда определялся абсолютный максимум за период колебаний. Этот максимум нормировался и принимался за параметр искажений. Описаны два вида нормирования: глобальное и локальное. Управление процессом испытаний осуществлялось с помощью программного обеспечения Test.Lab, в состав которого была введена подпрограмма анализа портретов колебаний. По расположению максимумов искажений определялись местоположения зазоров. Для зазоров в устройствах передачи усилий или перемещений приведена формула, позволяющая вычислить их величины. Изложены практические рекомендации по использованию этой формулы. **Результаты и обсуждения.** Возможность обнаружения зазоров по искажениям портретов колебаний продемонстрирована на примере диагностирования макетной проводки управления и самолетов в процессе модальных испытаний, космических аппаратов открытого исполнения в технологических вибрационных испытаниях. Показано, что разработанная методика позволяет поэтапно выявлять все зазоры в объекте испытаний, которые приводят к искажениям портретов колебаний.

Для цитирования: Контроль зазоров в конструкциях технических изделий в процессе вибрационных испытаний / Н.А. Тестоедов, В.А. Бернс, Е.П. Жуков, Е.А. Лысенко, П.А. Лакиза // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 40–53. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-40-53.

Введение

В конструкциях многих технических изделий имеются зазоры (люфты), которые можно условно разделить на два вида. Одни из них – зазоры в соединениях составных частей конструкций – вводятся для обеспечения нормального функционирования этих соединений.

*Адрес для переписки

Бернс Владимир Андреевич, д.т.н., доцент
 Сибирский научно-исследовательский институт авиации
 им. С.А. Чаплыгина,
 ул. Ползунова, 21,
 630051, г. Новосибирск, Россия
 Тел.: 8 (383) 278-70-42, e-mail: v.berns@yandex.ru

Величины таких зазоров обычно нормируются. Другой вид – люфты, возникающие в процессе эксплуатации. Поскольку нормированные зазоры увеличиваются, как правило, в процессе эксплуатации, то оба этих вида могут привести к повышенной нагрузке и износу деталей, изменению динамических характеристик и ухудшению технического состояния изделий. Поэтому зазоры, конечно же, контролируются. Так как большинство технических изделий подвергается вибрационным испытаниям (прочностным, модальным, испытаниям на виброустойчивость), то представляется целесообразной разработка методики диагностики зазоров в этих испытаниях.

Техническая вибродиагностика машинного оборудования нашла широкое распространение в машиностроении для контроля механических передач, соединительных муфт и подшипников [1–5]. Эти вращающиеся элементы машин при наличии дисбалансов, люфтов, несоосности и изгибов валов генерируют механические колебания. Колебания, регистрируемые на корпусных деталях машин как вибрации, содержат информацию о динамических процессах, которые происходят в работающей машине. Из этого объема информации необходимо выделить такие данные, на основании которых можно идентифицировать дефекты машин и отслеживать развитие этих дефектов [6–8].

Методы вибродиагностики технических изделий по результатам испытаний разделяются на три группы. К первой из групп относятся методы обнаружения дефектов по изменению параметров собственных тонов колебаний [9–15]. Необходимо отметить, что нередко даже относительно большие повреждения слабо сказываются на изменении основных модальных параметров: частот и форм собственных колебаний. Более того, однозначная идентификация дефекта затруднена тем, что модальные параметры являются интегральными характеристиками, а расположение и величина дефекта – дифференциальными [16].

Методы контроля дефектов по параметрам распространения упругих волн образуют вторую группу [17–21]. Но неоднородности конструкции в виде отверстий и вырезов осложняют использование этих методов.

Если в техническом изделии, проектные характеристики которого соответствуют линейной

динамической системе, возникают суб- и супергармонические резонансы, искажения фазовых и других видов портретов колебаний, например фигур Лиссажу, то методы обнаружения дефектов по этим признакам можно отнести к третьей группе [22–30].

Как показано в работе [29], для обнаружения и оценки величины зазоров в узлах проводки управления отклоняемыми поверхностями самолетов могут быть использованы нелинейные искажения портретов колебаний, которые определяются в модальных испытаниях. Целью данной работы является создание методики контроля зазоров в технических изделиях по искажениям портретов вынужденных колебаний в процессе любых вибрационных испытаний. Для достижения поставленной цели была разработана и введена в программное обеспечение управления испытаниями подпрограмма анализа портретов колебаний. Разработан также способ поэтапного выявления всех зазоров в объекте испытаний, которые приводят к искажениям портретов колебаний. Это позволяет не только идентифицировать зазоры, но и оценивать их величины.

Методика исследований

Диагностирование зазоров в технических изделиях по искажениям портретов колебаний аналогично диагностированию трещин [30]. Создаваемые с помощью источников гармонических вибраций установившиеся вынужденные колебания изделий регистрируются датчиками ускорений. Эти датчики размещаются вблизи подвижных соединений и мест стыковки или крепления агрегатов и оборудования. Сигналы с датчиков представляются в виде портретов колебаний, для построения которых использовалась вертикальная развертка, пропорциональная сигналу датчика. При этом горизонтальной разверткой являлась первая гармоника сигнала, сдвинутая по фазе на $\pi/2$. Для линейной динамической системы эти портреты являются окружностями. При соударении элементов конструкции в зазорах происходит нелинейное искажение портретов колебаний (рис. 1, здесь и далее на рисунках: n – сигнал акселерометра, n_1 – первая гармоника ускорения, сдвинутая по фазе на $\pi/2$). В качестве характеристики искажений был введен параметр Ψ , который есть абсолютный максимум остатка

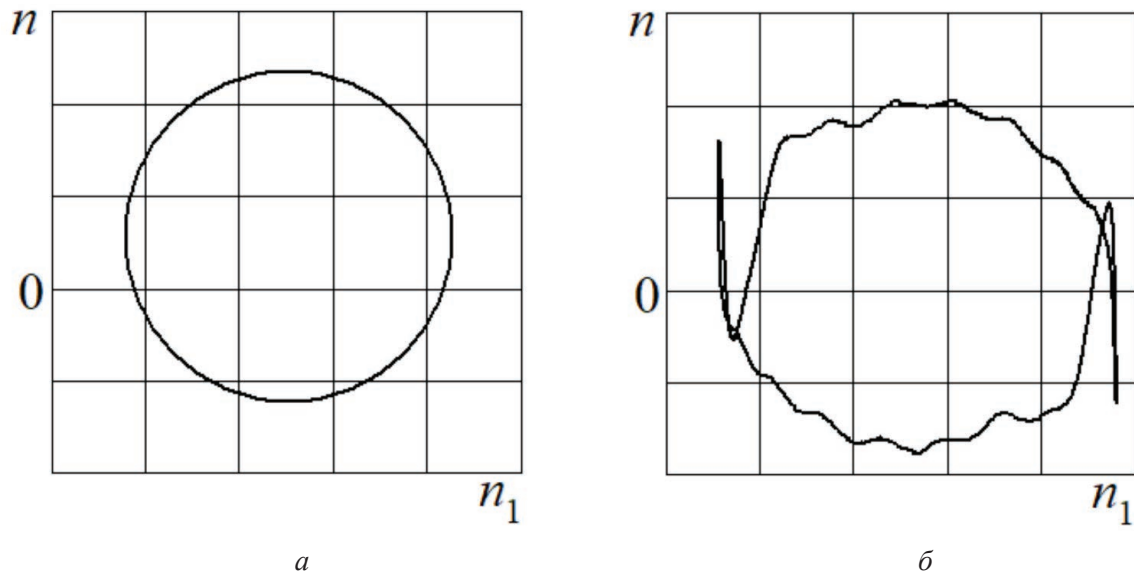


Рис. 1. Портреты колебаний конструкции:

a – без зазора; *б* – с зазором

Fig. 1. The portraits of oscillations of a structure:

a – without a gap; *b* – with a gap

ряда Фурье, получаемого в результате вычитания первой гармоники из этого ряда для портрета колебаний. Распределения нормированной величины параметра искажений Ψ , обозначенной как ξ , строились по объекту контроля. В соответствии с расположениями локальных максимумов искажений портретов колебаний определялись местоположения зазоров.

Для того чтобы с помощью описанной методики можно было контролировать зазоры в процессе вибрационных испытаний конструкций, в программное обеспечение управления экспериментом Test.Lab была введена подпрограмма анализа портретов колебаний. По команде экспериментатора она осуществляла расчет параметров искажений портретов колебаний ξ параллельно по всем каналам измерений, строила распределения искажений по конструкции и запоминала такие распределения. Это позволяло контролировать зазоры в течение вибропрочностных испытаний, а также эксплуатации конструкции путем сравнения полей параметра искажений, записанных для разных состояний изделий. Кроме того, в подпрограмме заложена возможность построения искажений портретов колебаний для отдельных агрегатов и узлов сопряжения конструкции, что необходимо для поэтапного контроля зазоров.

В расчетах параметра ξ использовались два вида нормирования искажений Ψ , условно названные глобальным и локальным. При глобальном нормировании величина Ψ относилась к амплитуде первой гармоники в контрольной точке конструкции. Предлагается принимать в качестве контрольной такую точку, для которой амплитуда колебаний первой гармоники наибольшая из всех сигналов. В случае локального нормирования имеем:

$$\xi_i = \frac{\max |\Psi_i|}{(A_1)_i}, \quad (1)$$

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

Глобальное нормирование необходимо для анализа распределения искажений портретов колебаний по всему изделию. Поскольку частоты вибрационного нагружения объектов испытаний находятся обычно в окрестности их собственных частот, то нужно исключить появление ложных локальных максимумов искажений. Это происходит потому, что некоторые акселерометры могут быть установлены вблизи узлов форм собственных колебаний конструкции.

Локальное нормирование искажений портретов колебаний используется для определения

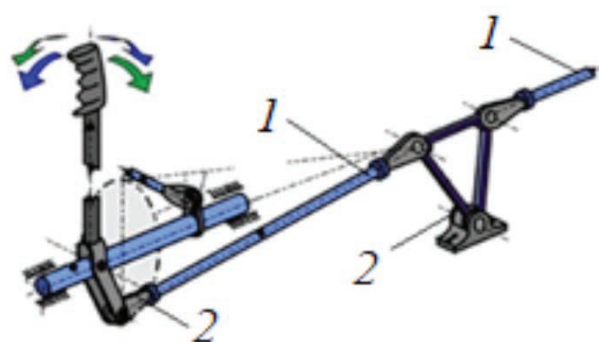
местоположений зазоров в отдельных агрегатах и узлах сопряжения конструкции. Такое нормирование позволяет сопоставить между собой проявления разных зазоров и отследить динамику изменения каждого из них в процессе испытаний или эксплуатации.

Особое внимание уделим применению изложенной методики для диагностирования зазоров в устройствах передачи усилий и перемещений: для таких конструкций удастся не только идентифицировать зазоры, но и оценить их величины по результатам испытаний.

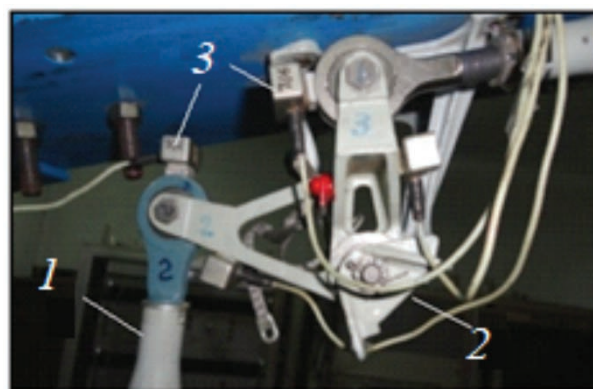
Повышенные зазоры в подвижных соединениях механизмов и устройств передачи усилий или перемещений могут возникать вследствие длительной эксплуатации и нарушения технологий изготовления. Появление зазоров в трансмиссиях вертолетов и автомобилей приводит к

возникновению автоколебательных режимов и затрудняет их управление. Существующие методы контроля зазоров предполагают, как правило, частичную разборку изделий.

В работах [26, 28] показано, что выявление зазоров в подвижных соединениях устройств передачи усилий или перемещений можно произвести по результатам модальных испытаний изделия. В таких испытаниях предложено регистрировать перегрузки в местах сопряжения его конструктивных элементов, которые принято представлять в виде фигур Лиссажу. В статье [29] показано, что использование портретов колебаний приводит к тем же результатам, что и использование фигур Лиссажу. Пример устройства передачи перемещений – механическая проводка управления отклоняемыми поверхностями самолетов – показан на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Проводка управления отклоняемыми поверхностями:

а – пример схемы проводки; б – тяги и качалки с датчиками; 1 – тяги; 2 – качалки; 3 – датчики ускорений

Fig. 2. A control wiring of deflectable surfaces:

а – an exemplary control wiring scheme; б – cables and rockers with sensors; 1 – cables; 2 – rockers; 3 – acceleration sensors

Наличие зазоров в подвижных соединениях (узлах) проводки управления приводит к тому, что у отклоняемой поверхности имеется свободный ход. Поэтому собственная частота вращения поверхности зависит от амплитуды колебаний. Характерная зависимость собственной частоты от амплитуды для отклоняемой поверхности, не имеющей нейтральной весовой балансировку (в проводке управления присутствует статическое усилие), представлена на рис. 3.

На рис. 3 приняты следующие обозначения: A – амплитуда колебаний контрольной точки по-

верхности; ω – собственная частота отклоняемой поверхности (частота фазового резонанса); A_0 – амплитуда колебаний, при которой преодолевается статическое усилие в проводке управления; ω_0 – собственная частота системы без зазора; ω_e – минимальное значение собственной частоты.

Если свободный ход отклоняемой поверхности превышает допустимую величину из-за повышенного зазора в одном из соединений, то дефектный узел выявляется по значению параметра ξ , а величину зазора можно вычислить по формуле ([28])

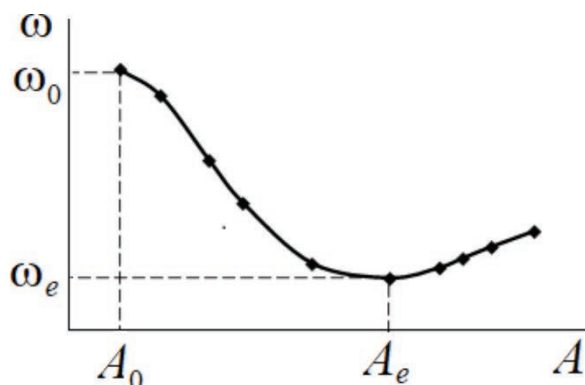


Рис. 3. Зависимость собственной частоты от амплитуды колебаний

Fig. 3. The natural frequency as a function of the oscillation amplitude

$$\tau\delta = A_0 \left[1 - \left(\frac{\omega_e}{\omega_0} \right)^2 \right] \times \left\{ 4,2 \left[1 - \left(\frac{\omega_e}{\omega_0} \right)^2 \right] + 1,39 \right\}, \quad (2)$$

где δ – величина зазора; τ – отношение перемещения датчика в дефектном узле к перемещению датчика в контрольной точке поверхности.

Следует отметить, что если падение резонансной частоты вращения отклоняемой поверхности из-за зазора не превышает 12 %, а амплитуда свободного хода поверхности не выше 50 % величины A_0 , то по формуле (2) размер зазора может быть вычислен с погрешностью не более 10 %.

Использование формулы (2) имеет особенности. Например, для определения частоты ω_e отклоняемой поверхности в момент раскрытия

зазора частоту вынуждающей силы следует изменять от большей к меньшей. Амплитуда колебаний A_0 определяется по моменту появления искажений портрета колебаний, что происходит, как правило, скачкообразно. Измерение A_0 связано с известными трудностями из-за малости ее величины. Величину A_0 можно искусственно поднять, увеличив статическое усилие в проводке управления либо изменением балансировки отклоняемой поверхности, либо введением статической составляющей в силу возбуждения колебаний. Кроме того, в системе измерения колебаний имеются фильтры для удаления шумов.

Важно заметить, что использование фильтров приводит не только к сглаживанию, но и к изменению амплитуды возмущений. При фильтрации с низкой частотой среза могут совсем исчезать нелинейные эффекты, связанные с наличием зазора. Для иллюстрации этих рассуждений рассмотрим результаты применения двойного фильтра Баттерворта с частотами среза 50 и 100 Гц к портрету колебаний одной системы (рис. 4). Частота первой гармоники не превышала 10 Гц.

Если в системе управления имеется нескольких зазоров, то по формуле (2) вычисляется их суммарная величина. Размеры зазоров в каждом из дефектных узлов определяются по величинам параметра ξ .

Результаты и их обсуждение

Методика обнаружения зазоров по искажениям портретов колебаний была использована для диагностирования макетной проводки управле-

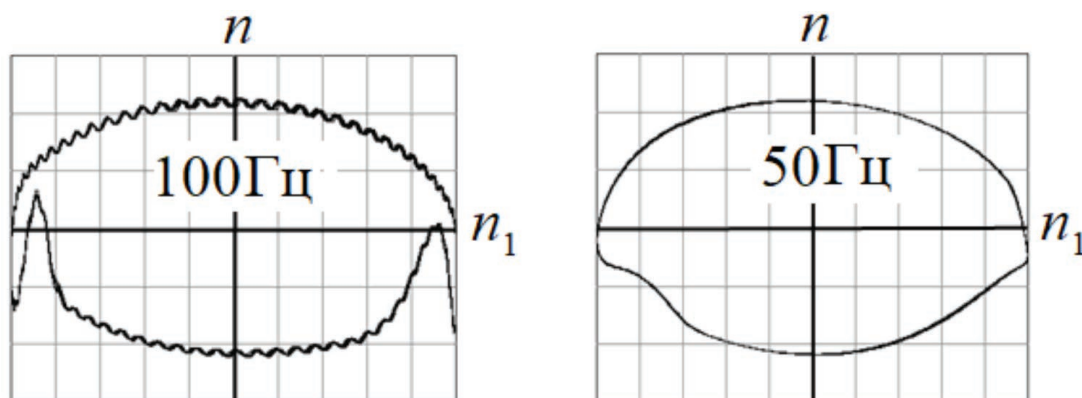


Рис. 4. Портреты колебаний для разных частот среза фильтра

Fig. 4. The portraits of oscillations for the different cutoff frequencies of a filter

ния и самолетов в процессе модальных испытаний, а также космических аппаратов открытого исполнения в технологических вибрационных испытаниях.

В работе [28] приведены результаты диагностирования люфтов в макетной проводке управления (рис. 5). Пример выявления люфта в узле *б* по параметру искажений фигур Лиссажу приведен в табл. 1, а численные оценки люфтов по формуле (2) – в табл. 2.

На рис. 6–11 показаны примеры распределений искажений портретов колебаний, полученные в модальных испытаниях нескольких самолётов. Здесь и далее на рисунках красной цветовой гамме соответствуют области изделий с наибольшими искажениями, а синей – с наименьшими.

На рис. 9 представлены искажения портретов колебаний для самолета с безбустерной системой управления (фюзеляж не показан). Видно,

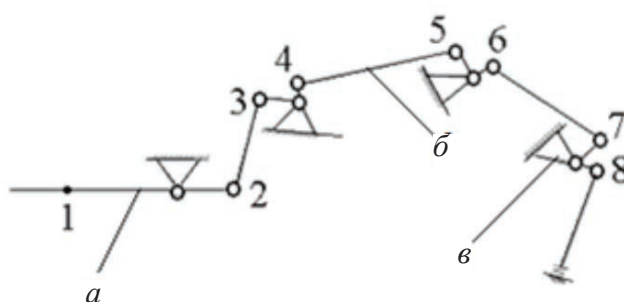


Рис. 5. Макетная проводка управления и ее схема:

a – отклоняемая поверхность; *б* – тяга; *в* – качалка

Fig. 5. A layout of a control wiring and its scheme:

a – a deflectable surface; *б* – a cable; *в* – a rocker

Таблица 1

Table 1

Локализация люфта

Detecting the backlash

Номер датчика / No sensor	1	2	3	4	5	6	7	8
ξ	10,42	8,82	5,99	26,28	9,83	101,62	59,67	43,64

Таблица 2

Table 2

Оценка величины люфтов

Estimation of the amount of backlash

Номер узла / No node	3	3	3	4	4	6	6	3, 6
Истинный люфт, мкм / True backlash, μm	50,0	43,0	20,0	50,0	35,0	50,0	35,0	30+50
Вычисленный люфт, мкм / Calculated backlash, μm	46,5	49,0	22,0	52,6	38,3	47,3	35,3	74,0

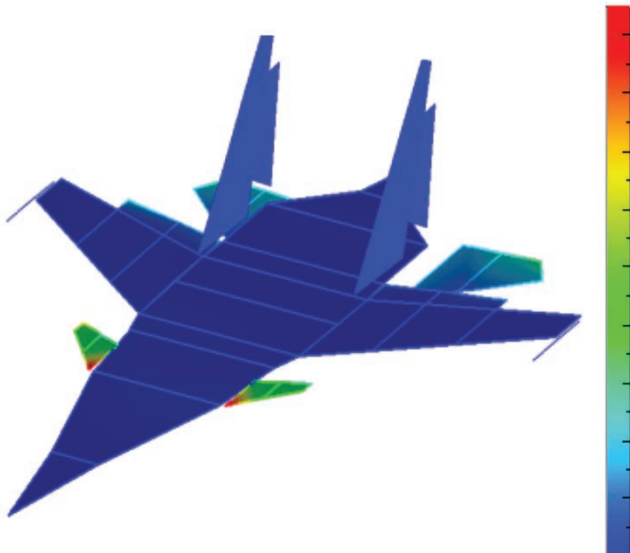


Рис. 6. Зазоры в узлах крепления переднего горизонтального оперения (ПГО). Глобальная нормировка искажений на частоте вращения ПГО

Fig. 6. Gaps in attachment points of a forewing. The global normalization of the distortions at the rotating frequency of the forewing

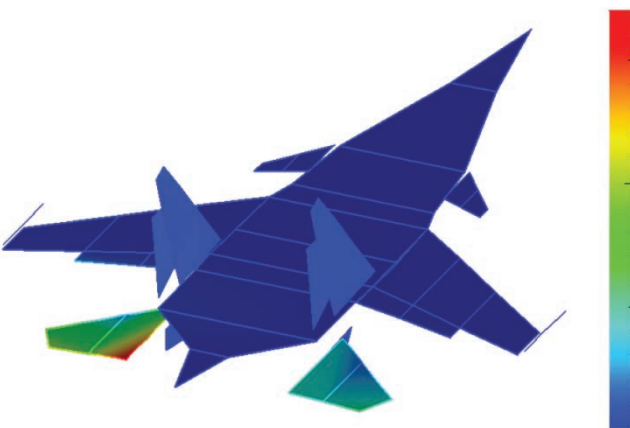


Рис. 7. Зазоры в узлах крепления цельноповоротного стабилизатора. Глобальная нормировка искажений на частоте вращения стабилизатора

Fig. 7. The global normalization of the distortions at the rotating frequency of the stabilizer

что максимумы искажений находятся на руле высоты и триммере из-за зазоров в проводках управления. Исключение этих искажений из рассмотрения приводит к локализации максимума искажений в соединении ручки управления с проводкой управления, где обнаружен повышенный люфт (рис. 10).

На рис. 11 показаны распределения искажений портретов колебаний вертикального опере-

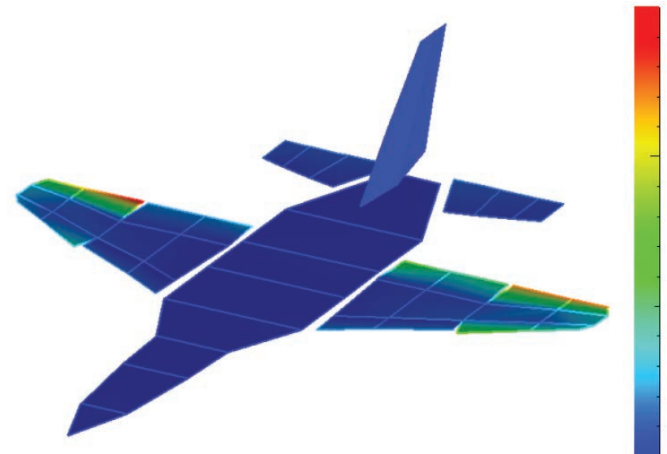


Рис. 8. Зазоры в проводках управления механизацией крыла самолёта. Глобальная нормировка искажений на частоте изгиба крыла

Fig. 8. Gaps in a control wiring of high-lift devices of an airplane. The global normalization of the distortions at the bending frequency of the wing

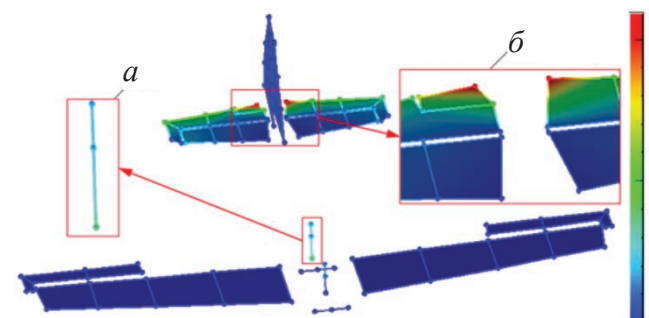


Рис. 9. Зазоры в проводке управления рулем высоты и триммером. Глобальная нормировка искажений портретов колебаний:

a – датчики на ручке управления; *б* – искажения на руле высоты и триммере

Fig. 9. Gaps in a control wiring of an elevator and elevator tab:

a – sensors located on the control stick; *б* – the distortions distributed along the elevator and elevator tab

ния самолёта. В передних болтовых соединениях киля с фюзеляжем обнаружены повышенные зазоры в поперечном направлении.

Космические аппараты (КА) в ходе создания подвергаются технологическим вибрационным испытаниям. Результаты используются для подтверждения качества спроектированной конструкции КА и обеспечения ее вибрационной прочности, в том числе для обнаружения

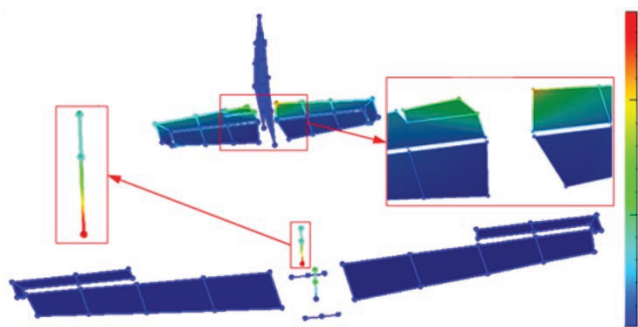


Рис. 10. Люфт в соединении ручки управления с проводкой. Глобальная нормировка искажений портретов колебаний

Fig. 10. The backlash in the connection between the control stick and control wiring. The global normalization of the distortions of the portraits of oscillations

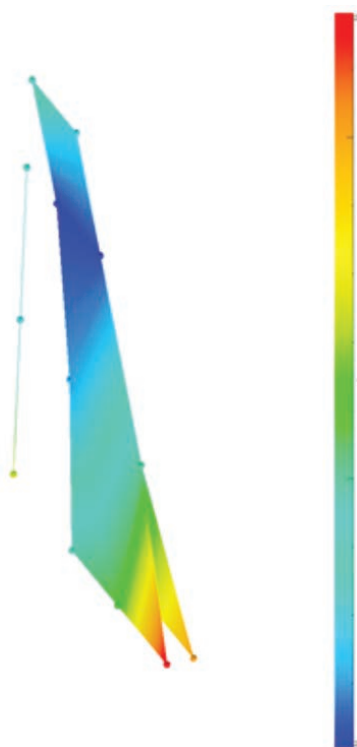


Рис. 11. Зазоры в передних узлах крепления киля. Локальная нормировка искажений

Fig. 11. Gaps in the front attachment points of a vertical stabilizer. The local normalization of the distortions

производственно-технологических дефектов. Поскольку наибольшие вибрационные нагрузки воздействуют на КА во время его выведения на орбиту, то испытаниям подвергаются КА в стартовой конфигурации. На рис. 12 показана

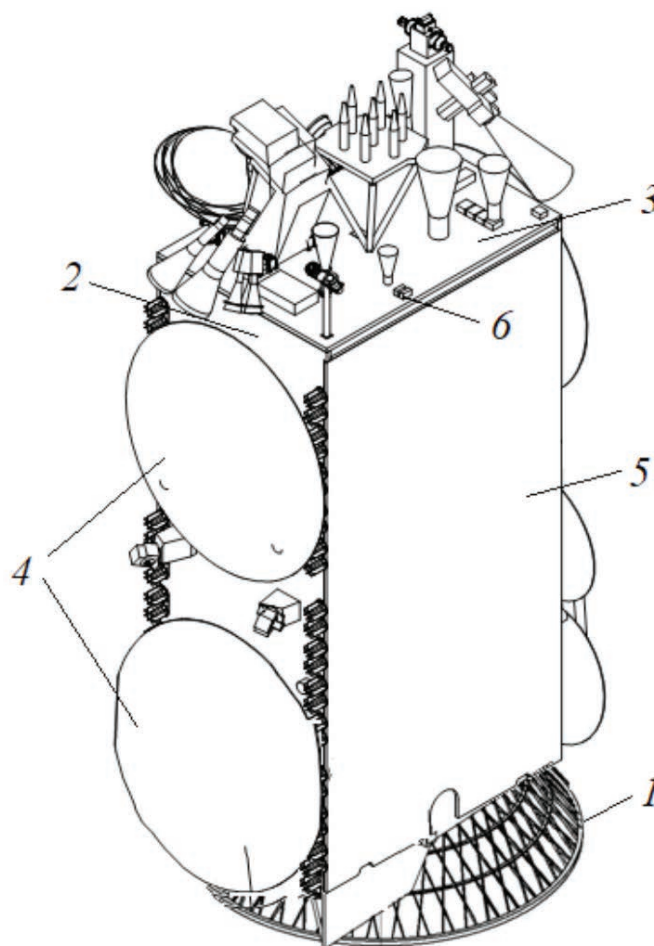


Рис. 12. Конструктивно-компоновочная схема космического аппарата:

1 – адаптер; 2 – панель; 3 – астроплата; 4 – рефлекторы антенн; 5 – панели солнечной батареи; 6 – узел крепления солнечной батареи

Fig. 12. A spacecraft structure design scheme:

1 – an adapter; 2 – a panel; 3 – an astroplate; 4 – antenna reflectors; 5 – panels of solar batteries; 6 – an attachment point of a solar battery

конструктивно-компоновочная схема КА открытого исполнения. Силовым каркасом является углепластиковый цилиндр с закрепленными на нем сотовыми плоскими панелями. Оборудование КА (антенны, солнечные батареи и т. д.), а также астроплата с датчиками системы ориентации и стабилизации расположены на панелях. Для проведения испытаний КА устанавливается на адаптер, предназначенный для стыковки КА с ракетой-носителем.

Вибрационная диагностики КА проводится в несколько этапов [29]. На первом из этапов выполняется вибрационное нагружение низкой интенсивности с целью проверки соответствия динамических характеристик КА их проектным

значениям. На втором этапе происходит нагружение КА нормированным вибрационным воздействием. В ходе нагружения могут возникать и развиваться дефекты, например, нарушаться межблочные связи за счет появления зазоров. Третий этап повторяет программу нагружения первого. На основании изменения параметров вибраций, резонансной частоты и амплитуды колебаний, а также появления высокочастотных составляющих в отклике КА и сдвига частотного спектра определяют местоположения и характер дефектов.

В вибрационных испытаниях КА открытого исполнения используется как гармоническая, так и широкополосная случайная вибрация при акустическом нагружении.

На рис. 13 и 15 представлены результаты обнаружения зазоров по искажениям портретов колебаний применительно к конструкциям двух КА. Необходимо отметить, что в испытаниях нагружение этих КА производилось синусоидальной вибрацией, частота которой изменялась по логарифмическому закону. Поскольку вынужденные колебания КА являлись нестационарным процессом, то в окрестностях резонансных частот объектов испытаний выделялись временные сегменты, для которых в глобальной нормировке вычислялись искажения портретов коле-

баний. Среди всех распределений выбирались те, которым соответствуют наибольшие значения искажений.

На рис. 13 показаны распределения искажений портретов колебаний по поверхности одного из испытываемых КА. Это единственный вариант распределений в диапазоне частот колебаний от 20 до 100 Гц, в котором искажения портретов превышали погрешности их построения. А наибольшие искажения возникали вблизи узлов установки солнечных батарей, в которых имеются конструктивные зазоры.

На рис. 14 и 15 представлена схема установки для вибрационных испытаний антенны дру-

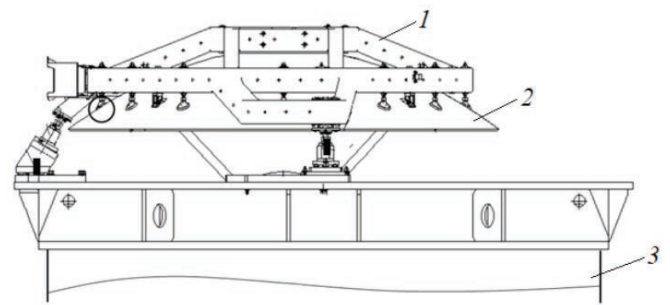


Рис. 14. Установка для испытаний антенны:

1 – каркас; 2 – рефлектор; 3 – вибростенд

Fig. 14. A setup for testing an antenna reflector of a spacecraft structure:

1 – a frame; 2 – a reflector; 3 – a shaker table

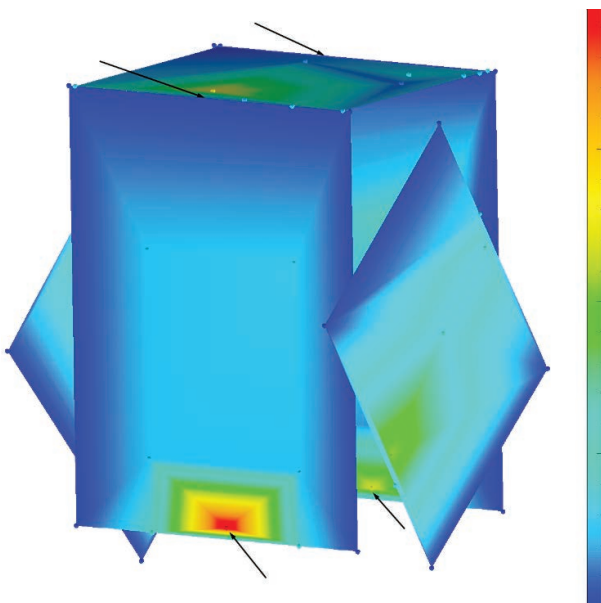


Рис. 13. Проявление зазоров в узлах установки солнечных батарей

Fig. 13. Detecting gaps in attachment points of solar batteries

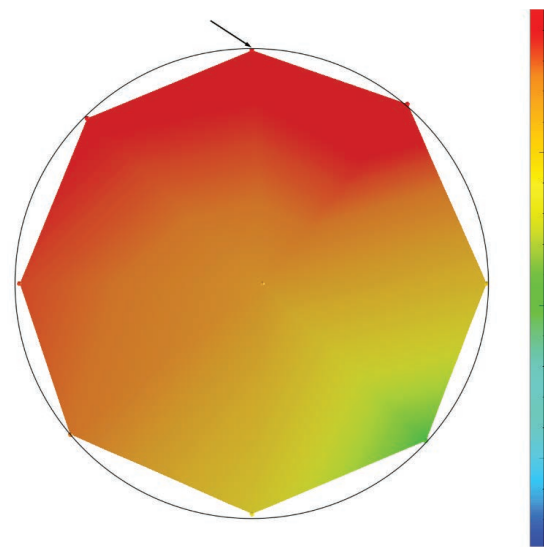


Рис. 15. Искажения портретов колебаний рефлектора антенны

Fig. 15. The distortion distribution of the portraits of oscillations

гого КА и распределение искажений портретов колебаний рефлектора антенны. Точками на рис. 15 отмечены места установки датчиков ускорений на поверхности рефлектора. Стрелкой обозначено местоположение дефекта: разрушение клеевого соединения одной из опор рефлектора с его каркасом, в результате чего возник зазор. Этому месту соответствуют и наибольшие искажения портретов колебаний.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что по нелинейным искажениям портретов колебаний технического изделия можно установить наличие в нем зазоров и определить их местоположение. Для того чтобы контроль зазоров можно было осуществлять в процессе вибрационных испытаний изделий, в состав программного обеспечения управления испытаниями введена подпрограмма анализа портретов колебаний. Подпрограмма позволяет представлять движение объекта испытаний в виде портретов колебаний, оценивать и нормировать их отличие от портретов линейной динамической системы, поэтапно выявлять зазоры разных размеров, отслеживать динамику изменения каждого зазора как во время прочностных испытаний, так и в процессе эксплуатации изделия.

Разработанный способ контроля зазоров может использоваться и в мониторинге состояния и работоспособности технических изделий, если их эксплуатация сопровождается однокомпонентными гармоническими вибрациями. Источниками таких вибраций являются, как правило, несбалансированные вращающиеся массы.

Список литературы

1. *Tiwari R.* Rotor Systems: analysis and identification. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 1069 p. – ISBN 978-1-138-03628-4.
2. *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.
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. 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.

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

6. *Zhuge Qi, Lu Yongxiang, Yang Shichao.* Non-stationary modelling of vibration signals for monitoring the condition of machinery // Mechanical Systems and Signal Processing. – 1990. – Vol. 4, iss. 5. – P. 355–365.

7. *Lacey S.J.* Using vibration analysis to detect early failure of bearings // Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. – 2007. – Vol. 49, iss. 8. – P. 444–446.

8. *Litak G., Friswell M.I.* Dynamics of a gear system with faults in meshing stiffness // Nonlinear Dynamics. – 2005. – Vol. 41, iss. 1–3. – P. 415–421. – DOI: 10.1007/s11071-005-1398-y.

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

10. *Постнов В.А.* Определение повреждений упругих систем путем математической обработки частотных спектров, полученных из эксперимента // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2000. – № 6. – С. 155–160.

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

12. *Perera R., Fang S.E., Huerta C.* Structural crack detection without updated baseline model by single and multi-objective optimization // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2009. – Vol. 23, iss. 3. – P. 752–768. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2008.06.010.

13. *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.

14. *Xu M., Wang S., Jiang Y.* Structural damage identification by a cross modal energy sensitivity based mode subset selection strategy // Marine Structures. – 2021. – Vol. 77. – P. 1–22. – DOI: 10.1016/j.marstruc.2021.102968.

15. *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, iss. 6. – P. 399–405.

16. 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; S.W. Doebling, C.R. Farrar, M.B. Prime, D.W. Shevitz. – Los Alamos, NM, 1996. – 132 p.

17. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. – М.: Наука, 1966. – 169 с.

18. Worlton D.C. Ultrasonic testing with Lamb waves // Non-Destructive Testing. – 1957. – Vol. 15, iss. 4. – P. 218–222.

19. Worlton D.C. Experimental confirmation of Lamb waves at megacycle frequencies // Journal of Applied Physics. – 1961. – Vol. 32. – P. 967–971.

20. 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.

21. Zaitsev V., Sas P. Nonlinear response of a weakly damaged metal sample // Journal of Vibration and Control. – 2000. – Vol. 6. – P. 803–822.

22. 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. – Тернопіль, 2006. – P. 212–218.

23. Цыфанский С.Л., Бересневич В.И., Лушиников Б.В. Нелинейная вибродиагностика машин и механизмов. – Рига: Рижский техн. ун-т, 2008. – 366 с. – ISBN 978-9984-32-194-3.

24. Diana G., Bachmid N., Angel F. An on-line crack detection method for turbo generator rotors // Proceed-

ings of International Conference on the Rotordynamics, JSME, September 14–17, 1986, Tokyo. – Tokyo, 1986. – P. 385–390.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. Бернс В.А., Долгополов А.В. Контроль зазоров в подвижных соединениях по результатам резонансных испытаний // Вестник СибГАУ. – 2013. – № 6 (52). – С. 149–153.

29. 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.

30. 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.

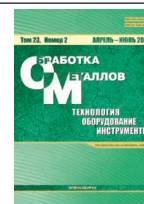
© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

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



Control of gaps in technical structures during ground vibration testing

Nikolay Testoyedov^{1, a}, Vladimir Berns^{2, 3, b, *}, Egor Zhukov^{2, c},
 Evgenii Lysenko^{1, d}, Pavel Lakiza^{2, e}

¹ Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems, 52 Lenin str., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation

² Siberian Aeronautical Research Institute named after S. A. Chaplygin, 21 Polzunov str., Novosibirsk, 630051, Russian Federation

³ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-1280-5303>, testoyedov@iss-reshetnev.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2231-7581>, v.berns@yandex.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-6378-6352>, zh-ep@yandex.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-5561-2934>, mla340@iss-reshetnev.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0002-3863-2762>, qinterfly@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 March 2021

Revised: 19 March 2021

Accepted: 29 March 2021

Available online: 15 June 2021

Keywords:

Technical structures

Gaps in moving structural connections

Backlashes in force-displacement

application systems

Backlashes and gaps as structural defects

Aeronautical vehicles

Ground vibration testing

Portrait of oscillations

Nonlinear distortions of a portrait of oscillations

Gap control

ABSTRACT

Introduction. A fair number of technical structures have gaps (backlashes) which can be contingently divided into two types. One of them is the gaps in connections between substructures which are introduced so that the connections may operate correctly. Sizes of such gaps are usually normalized. Another type is the backlashes which occur during operation. Due to the normalized gaps usually expand while operating, both of the types may lead to increased loading and wear of mechanical parts, an alteration in dynamical characteristics and a deterioration in a technical state of mechanical structures. It explains the necessity to control the gaps. When the ground vibration testing of the structures is performed, it seems appropriate to use these tests to detect such gaps. **Research Objective:** developing the method to control the gaps in the technical structures during the ground vibration testing based on distortions of portraits of forced oscillations. **Research Technique.** The steady-state forced oscillations of the technical structures, which were measured by acceleration sensors, are excited by means of shakers. The sensor signals are represented as the portraits: the vertical scanning is proportional to the signal and the horizontal scanning – to its first harmonic with the phase shift of $\pi/2$. In case of a linear system, the portraits are circles. The presence of the gaps distorts the portraits of oscillations specifically. To estimate the distortions numerically, the first harmonic is subtracted from the Fourier series of the portrait of oscillations, the absolute maximum of the residue is calculated over the oscillation period and used subsequently as the distortion parameter Ψ . The value of the parameter Ψ is normalized and denoted as ξ . The ξ distributions are plotted on controlled objects. The locations of the gaps are determined through the positions of the local maxima of the distortions. While calculating the parameter ξ , the two types of normalization, which were conditionally named the global and local ones, are being used. In case of the global normalization, the value of Ψ is related to the amplitude of the first harmonic at the control point of the structure. The local normalization means that the magnitude of Ψ is related to the amplitude of the first harmonic of the sensor where that parameter was previously calculated. The global normalization is required to analyze the distortion distribution of the portraits of oscillations of the entire technical structure. The local normalization of the distortions of the portraits of oscillations is utilized to establish the locations of the gaps in the mechanical parts and structural connections. The ground vibration tests were carried out via *Test.Lab* software. The subprogram is integrated into the software interface in order to analyze the portraits of oscillations. It enabled one to calculate the distortions of the portraits of oscillations, plot the distortion distributions of the structure and save it for further use. It allowed one to control the gaps during vibration strength tests, as well as while the structures being used, by means of comparing the distortion distributions of the parameter ξ related to different states of the structure. Additionally, the plotting of the distortion distributions of the portraits of oscillations for each structural component is added to the subprogram so as to control the defects subsequently. Not only the locations of the gaps are determined in the force-displacement application systems but also the equation is given to calculate its magnitudes. The practical recommendations on using that equation are presented. **Results and Discussion.** The possibility of detecting the gaps by the distortions of the portraits of oscillations is illustrated with the example of the diagnostics of the layout of the control wiring and the airplanes during the ground vibration testing as well as the open-type spacecraft structures. It is shown that the developed method enables one to detect all the gaps in the testing object which distort the portraits of oscillations.

For citation: Testoyedov N.A., Berns V.A., Zhukov E.P., Lysenko E.A., Lakiza P.A. Control of gaps in technical structures during ground vibration testing. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 40–53. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-40-53. (In Russian).

* Corresponding author

Berns Vladimir A., D.Sc. (Engineering), Associate Professor
 Siberian Aeronautical Research Institute named after
 S.A. Chaplygin 21 Polzunov str.,
 630051, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: 8 (383) 278-70-42, **e-mail:** v.berns@yandex.ru

References

1. Tiwari R. *Rotor systems: analysis and identification*. Boca Raton, CRC Press, 2017. 1069 p. ISBN 978-1-138-03628-4.
2. 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.
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. Balitskii F.Ya., Barkov A.V., Barkova N.A. et al. *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.
5. 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.
6. Zhuge Qi, Lu Yongxiang, Yang Shichao. Non-stationary modelling of vibration signals for monitoring the condition of machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1990, vol. 4, iss. 5, pp. 355–365.
7. Lacey S.J. Using vibration analysis to detect early failure of bearings. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2007, vol. 49, no. 8, pp. 444–446.
8. Litak G., Friswell M.I. Dynamics of a gear system with faults in meshing stiffness. *Nonlinear Dynamics*, 2005, vol. 41, iss. 1–3, pp. 415–421. DOI: 10.1007/s11071-005-1398-y.
9. *Vibrodiagnostika aviatsionnykh konstruksii* [Vibrodiagnostics aircraft structures]. Moscow, GosNIIGA Publ., 1986. 95 p.
10. 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).
11. Kositsyn A.V. Metod vibrodiagnostiki defektov uprugikh konstruksii 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).
12. Perera R., Fang S.E., Huerta C. Structural crack detection without updated baseline model by single and multi-objective optimization. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, vol. 23, iss. 3, pp. 752–768. DOI: 10.1016/j.ymssp.2008.06.010.
13. 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.
14. Xu M., Wang S., Jiang Y. Structural damage identification by a cross modal energy sensitivity based mode subset selection strategy. *Marine Structures*, 2021, vol. 77, pp. 1–22. DOI: 10.1016/j.marstruc.2021.102968.
15. 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, iss. 6, pp. 399–405.
16. 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.
17. Viktorov I.A. *Fizicheskie osnovy primeneniya ul'trazvukovykh voln Releya i Lemba v tekhnike* [Physical fundamentals of application of the Rayleigh and Lamb ultrasonic waves to technical devices]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 169 p.
18. Worlton D.C. Ultrasonic testing with Lamb waves. *Non-Destructive Testing*, 1957, vol. 15, iss. 4, pp. 218–222.
19. Worlton D.C. Experimental confirmation of Lamb waves at megacycle frequencies. *Journal of Applied Physics*, 1961, vol. 32, pp. 967–971.
20. 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.
21. Zaitsev V., Sas P. Nonlinear response of a weakly damaged metal sample. *Journal of Vibration and Control*, 2000, vol. 6, pp. 803–822.
22. 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).

23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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).
27. 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.
28. Berns V.A., Dolgoplov A.V. Kontrol' zazorov v podvizhnykh soedineniyakh po rezul'tatam rezonansnykh ispytaniy [Gaps control in movable joints by the results of resonance test]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva = Vestnik SibGAU*, 2013, no. 6 (52), pp. 149–153.
29. 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. (In Russian).
30. Berns V.A., Zhukov E.P., Malenkova V.V., Lysenko E.A. Diagnostirovanie treshchin v metallicheskih panelyakh po nelineinym iskazheniyam portretov kolebanii [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.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 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/>).