

УДК 629.78

ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТКРЫТОГО (НЕГЕРМЕТИЧНОГО) ИСПОЛНЕНИЯ

Е.А. Лысенко
«ИСС» им. академика
М.Ф. Решетнёва»
662972, Российская Федерация,
Красноярский край,
г. Железногорск,
ул. Ленина, 52
mla340@iss-reshetnev.ru

В.А. Бернс
«СибНИА им. С.А. Чаплыгина»
630051, Российская Федерация,
г. Новосибирск,
ул. Ползунова, 21/1
v.berns@yandex.ru

Особенностью конструкции космического аппарата открытого исполнения является наличие углепластикового цилиндра, вокруг которого с помощью пилонов закреплены трёхслойные сотовые панели. На этих панелях установлено электронное оборудование, антенно-фидерные системы ретрансляторов, агрегаты и приборы системы управления спутником. Вибрационное нагружение таких конструкций предлагается производить как электродинамическим вибростендом (до 100 Гц), так и диффузным акустическим полем в реверберационной камере. Отклик конструкции на вибрационное и акустическое нагружение фиксируется акселерометрами и представляется в виде амплитудно-частотных характеристик и зависимости спектральной плотности мощности случайного сигнала от частоты колебаний. Обнаружение дефектов космического аппарата производится по изменению параметров его вибрационного отклика. Для этого вибрационные и акустические испытания проводятся в три этапа. На первом этапе выполняется зондирующее вибрационное нагружение конструкции с низкой интенсивностью. Результаты испытаний – резонансные частоты и амплитуды колебаний – сравниваются с проектными значениями или с значениями, определёнными при наземной экспериментальной отработке космического аппарата. На втором этапе испытания производятся при повышенных нагрузках, но на безопасных режимах, рассчитанных по специальной методике. Третий этап является повторением первого. В результате по отклонениям параметров вибраций определяется местоположение и характер дефекта. В статье представлены основные положения методики и результаты виброакустической диагностики космических аппаратов. Сделан вывод о целесообразности использовании такой диагностики на заключительных этапах изготовления изделий.

Ключевые слова: космический аппарат открытого исполнения; акустические испытания; реверберационная камера; вибрационные испытания; электродинамический вибростенд; дефекты конструкции; диагностика по параметрам вибраций.

Введение

Контроль технического состояния машин, агрегатов и конструкций по параметрам вибраций нашёл широкое применение и показал высокую эффективность в различных областях техники. Обзор методов такого контроля можно найти, например, в [2]. Как известно, вибрационные методы можно условно разделить на пассивные и активные. В первом случае исследуются сигналы, получаемые при

функционировании контролируемого объекта. При этом происходит непрерывный мониторинг состояния изделий с целью выявления появляющихся эксплуатационных дефектов. Во втором случае соответствующая информация получается при приложении к объекту специально заданных воздействий. Такой контроль может производиться как до начала эксплуатации объекта, так и с некоторой периодичностью во время его эксплуатации. Диагностика космических

аппаратов (КА) осуществляется только по активной схеме и до начала эксплуатации, когда должна быть обеспечена гарантия качества изделий [3].

Различают два основных метода диагностики конструкций по параметрам вибраций: метод модальной и метод параметрической идентификации дефектов [5–9]. Модальная идентификация предполагает установление связи между характеристиками собственных тонов конструкций и параметрами дефектов с последующим определением этих параметров по изменениям собственных частот и форм колебаний, а также характеристик демпфирования. При этом полностью собранные образцы техники подвергаются модальным испытаниям с помощью многоточечного возбуждения колебаний для выделения «чистых» собственных тонов, как правило, методом фазового резонанса. Для параметрической идентификации дефектов активным способом используются, как правило, изменения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) конструкций, полученных при одноточечном возбуждении вибраций.

1 Методика идентификации дефектов

При разработке методики диагностики КА открытого исполнения необходимо учитывать особенности их конструкции. Конструктивно-силовая схема такого КА состоит из углепластикового цилиндра, конического адаптера изогридной структуры, вокруг которых с помощью пилонов закреплены плоские трёхслойные сотовые панели, общая площадь которых может достигать ста квадратных метров. На панелях установлено приборное оборудование, антенно-фидерные системы ретрансляторов, оборудование для управления КА. Примеры конструктивно-

силовых схем КА открытого исполнения показаны на рисунке 1 (а, б).



Рисунок 1. Конструктивно-силовые схемы КА открытого исполнения

Наличие на панелях большого количества разнообразного оборудования (с точки зрения динамики – различных масс на упругом основании) приводит к достаточно плотному и широкому спектру резонансных частот такой конструкции. Например, парная полезная нагрузка для совместного выведения на орбиту КА «AMOS» и КА «Луч», представленная на рисунке 2, имеет около 200 собственных тонов колебаний в частотном диапазоне от 0 до 100 Гц. При

этом свыше 100 Гц спектр резонансных частот КА занимает весь звуковой диапазон (рисунок 3).



Рисунок 2. Парная полезная нагрузка КА «AMOS» - КА «Луч»

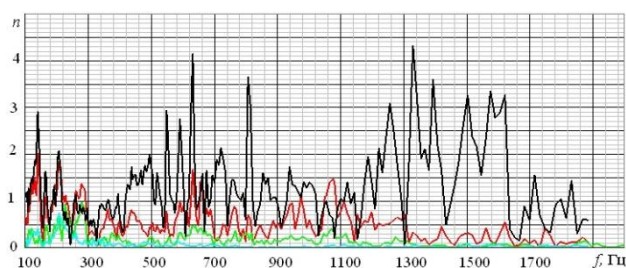


Рисунок 3. Спектр колебательных процессов конструкции КА

Резонансные режимы колебаний элементов КА могут приводить к появлению и развитию таких дефектов, как трещины, нарушение межблочных связей (резьбовые, сварные, паяные, клеевые и электрические соединения), а также разрушение внутренних структур электронных приборов. Резонансный режим не должен оказывать влияние на качество исполнения КА, выполняющего в условиях вибрации одноразовый кратковременный рейс на космическую орбиту. В тоже время контроль технического состояния КА, использующий в процессе диагностики вибрационное воздействие, не должен влиять на это качество. Следовательно, режимы вибрационного нагружения обязаны, с одной

стороны, быть безопасными, а с другой – способствовать проявлению дефектов.

Возбуждение такого большого количества собственных тонов колебаний с помощью, например, электродинамического вибростенда (ЭДВ) через механический интерфейс (адаптер) КА является очень сложной и не всегда осуществимой задачей. Поэтому предлагается дополнить вибрационное нагружение КА электродинамическим вибростендом ещё и возбуждением колебаний акустическим полем со стационарным широкополосным случайным спектром. Очевидно, что такое воздействие требует своего нормирования. Таким образом, исходя из конструктивных особенностей и условий эксплуатации КА открытого исполнения для целей вибродиагностики принято в диапазоне частот до 100 Гц использовать синусоидальное воздействие с помощью электродинамического вибростенда, а вибрационное нагружение с частотами выше 100 Гц обеспечить диффузным акустическим полем в реверберационной камере с управляемой спектральной плотностью мощности акустического давления. Расчет режимов испытаний производится по методикам, изложенным в [1, 4].

Выявление дефектов в конструкции КА производится в несколько этапов.

На первом этапе производится зондирующее вибрационное нагружение КА с низкой интенсивностью и регистрация откликов конструкции по сигналам акселерометров. Полученные экспериментальные данные о резонансных частотах и амплитудах колебаний сравниваются с проектными значениями или со значениями, установленными при наземной экспериментальной отработке КА. Одной из основных задач на этом этапе является составление прогноза поведения конструкции при нормированном вибрационном воздействии.

Суть второго этапа заключается в «раскачке» конструкции вибрационным воздействием такой интенсивности, при которой должны проявиться дефекты. На этом этапе обязательны расчёты безопасных режимов, которые выполняются по методике [4] с использованием экспериментальных данных первого этапа.

Третий этап является повторением первого с последующим сопоставлением результатов испытаний с полученными

ранее. По отклонениям параметров вибраций определяется место и характер дефекта.

Отметим, что для выявления дефектов в конструкциях КА открытого исполнения такой порядок испытаний выдерживается как при гармоническом, так и случайном возбуждении колебаний в реверберационной камере (рисунок 4).



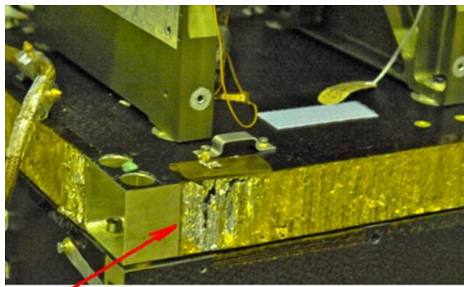
Рисунок 4. Функциональная схема виброакустической диагностики

По характеру изменений АЧХ и спектральной плотности мощности (СПМ) случайной вибрации можно сделать предварительное заключение о виде дефекта, проявившегося в результате вибрационного воздействия на втором этапе испытаний (окончательное заключение – после визуального осмотра). Так, снижение частоты амплитудного резонанса и резкое падение амплитуды вибраций свидетельствует о нарушении целостности конструкции – появление, например, трещины уменьшает жёсткость и значительно повышает демпфирование колебаний. Другой характер имеют изменения АЧХ и СПМ при ослаблении креплений агрегатов: снижение частоты амплитудного резонанса происходит почти без изменения резонансной амплитуды

колебаний. Появление зазора в месте стыковки агрегатов проявляется как небольшое снижение частоты амплитудного резонанса при резком снижении амплитуды резонансных колебаний агрегатов.

Результаты

Ниже в качестве иллюстрации эффективности изложенной методики виброакустической диагностики космических аппаратов открытого исполнения представлены результаты исследований ряда объектов. Обозначения на рисунках 5–7: а) вид дефекта; б) идентификационный признак дефекта. На рисунке 5 показан дефект – разрушение сотовой панели – и проявление этого дефекта в виде изменения АЧХ панели.



а

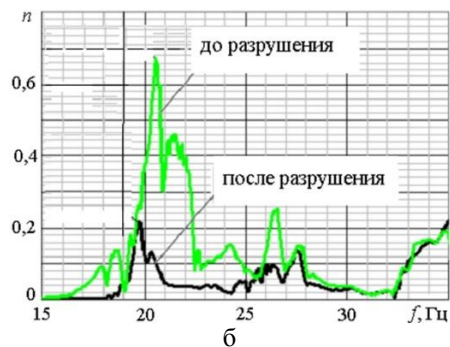
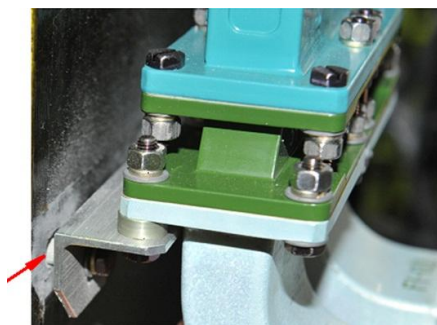
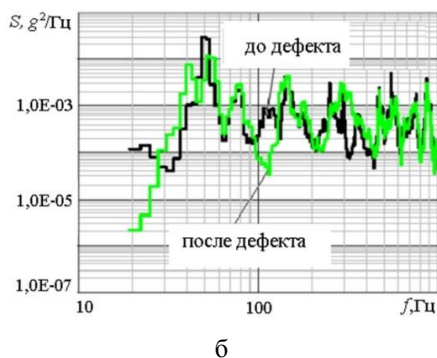


Рисунок 5. Разрушение сотовой панели

Ослабление крепления агрегата и его идентификацию по СПМ случайной вибрации иллюстрирует рисунок 6.



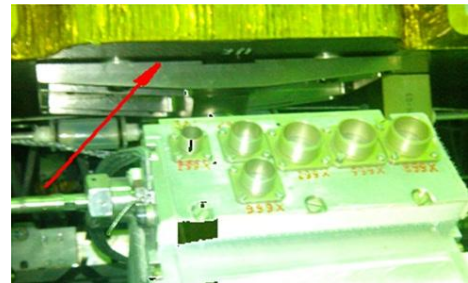
а



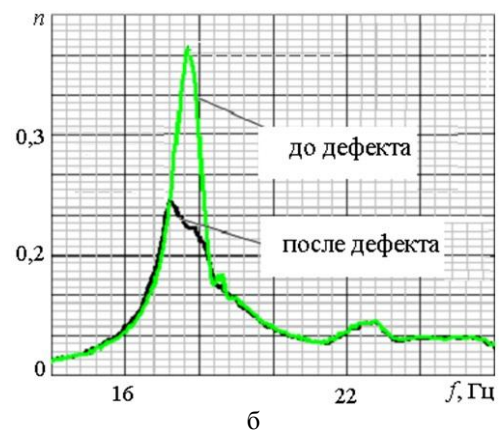
б

Рисунок 6. Ослабление крепления агрегата

Идентификация зазора в креплении агрегата по изменению его АЧХ показана на рисунке 7.



а



б

Рисунок 7. Зазор в стыковке агрегатов

Заключение

Вибрационные испытания полностью собранных и укомплектованных оборудованием космических аппаратов являются эффективным средством диагностики их технического состояния. В сочетании с другими видами контроля выявление дефектов конструкций по параметрам вибраций позволяет обеспечить требуемое качество изделий до начала их эксплуатации.

Отличительной особенностью вибродиагностики космических аппаратов открытого исполнения является использование в качестве источника вибраций не только электродинамического вибростенда, но и акустического поля в реверберационной камере. Это позволяет значительно расширить диапазон частот

вибрационного воздействия на объект контроля.

Список использованных источников

[1] А. с. 1111046 СССР, МКИ G 01 M 7/00. Способ регулирования режима частотных испытаний / В. К. Меркулов, С. А. Ложников, Е. А. Лысенко (СССР). – № 3600006/25–28; заявл. 28.02.83; опубл. 30.08.84, Бюл. № 32.

[2] Бернс В.А. Диагностика и контроль технического состояния самолётов по результатам резонансных испытаний: монография. Новосибирск: НГТУ, 2012. 272 с.

[3] Лысенко Е.А., Евтифьев М.Д., Халиманович В.И., Шатров А.К. Выявление дефектов космических аппаратов в процессах испытаний на вибрационные и акустические воздействия в испытательной лаборатории // Вестник СибГАУ, 2005. № 6. С. 174-178.

[4] Лысенко Е.А., Евтифьев М.Д., Халиманович В.И., Акимов А.Н. Алгоритм анализа экспериментальных данных и расчёта режима нагружения при вибрационных испытаниях космического аппарата // Вестник СибГАУ, 2006. №1(8). С. 73-75.

[5] Мотылев Н.И. Выявление механических дефектов в элементах реакторов и конструкций АЭС при тестовых виброударных воздействиях // Технологии и системы обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. СПб.: Менделеев, 2004. Вып. 2. С. 126–131.

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

[7] Постнов В.А., Шлоттманн Г. Использование экспериментальных данных об изменении динамических свойств упругих систем в задачах определения структурных повреждений // Вестник ННГУ. Серия Механика, 2004. № 1. С. 32–42.

[8] Шевелев Н.А., Домбровский И.В. Численное исследование динамических характеристик элементов конструкций с дефектами формы // Вестник ПГТУ. Механика, 2009. № 1. С. 160–163.

[9] Perera, R., Fang, S. E. and Huerta C. (2009), Structural crack detection without updated baseline model by single and multiobjective optimization // *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 23. no. 3. pp. 752–768.

VIBROACOUSTIC DIAGNOSTICS OF OPEN-TYPE (UN-PRESSURIZED) SPACECRAFTS

E.A. Lysenko

Academician M.F. Reshetnev
Information Satellite Systems
52, Lenin st., Zheleznogorsk,
Krasnoyarsk region,
662972, Russian Federation
mla340@iss-reshetnev.ru

V.A. Berns

Siberian Aeronautical Research
Institute named after
S.A. Chaplygin
21/1, Polzunov st., Novosibirsk,
630051, Russian Federation
v.berns@yandex.ru

A special feature of the open design spacecraft is the presence of a CFRP (carbon-fiber reinforced plastic) cylinder around which three-layered honeycomb panels are fixed by means of pylons. The electronic equipment, antenna and feeder relay systems, units and instruments of the satellite control system are installed on these panels. Vibration loading of such structures is proposed to carry out both with the help of an electrodynamic shaker (up to 100 Hz) and a diffuse sound field in the reverberation chamber. The structure response to acoustic and vibration loading is fixed by accelerometers and presented in the form of amplitude-frequency characteristics and the power spectral density function of the random signal from the vibration frequency. The spacecraft defects are determined by parametric variations of its vibration response. To do this, vibration and acoustic tests are carried out in three stages. At the first stage the probing vibration loading the structure with low intensity is performed. Test results - resonant frequencies and vibration amplitudes - are compared with the design values or the values defined at the ground experimental development of the spacecraft. At the second stage the tests are performed at high loads, but in safe modes, calculated by a special technique. The third stage is a repetition of the first one. As a result, the defect location and nature are determined by the vibration parameters deviations. The article presents the methodology main statements and the spacecrafts vibroacoustic diagnostics results. It is concluded that the use of such diagnostics in the final stages of products manufacturing is reasonable.

Key words: open-type spacecraft, acoustic test, reverberation chamber, vibration test, electrodynamic shaker, structural defects, diagnostics by vibration parameters.

References

- [1] Inventor's Certificate. 1111046 USSR, MKI G 01 M 7/00. Control method of the frequency test mode / V.K. Merkulov, S.A. Lozhnikov, E.A. Lysenko (USSR). no. 3600006 / 25-28; appl. 28/02/83; publ. 30/08/84, Bul. no. 32.
- [2] Berns, V.A. (2012), Diagnostika i kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya samoletov po rezul'tatam rezonansnykh ispytaniy: monografiya [Diagnostics and monitoring of the aircraft technical condition by the result of resonance tests: monography], Publishing House of the NSTU, Novosibirsk, 272 p. (in Russian).
- [3] Lysenko, E.A., Evtifiev, M.D., Halimanovich, V.I. and Shatrov, A.K. (2005), Vyiavlenie defektov kosmicheskikh apparatov v protsessakh ispytaniy na vibratsionnye i akusticheskie vozdeistviya v ispytatel'noi laboratorii [Detection of spacecraft defects in vibration and acoustical testing in the test laboratory], *Vestnik SibGAU [SibSAU Bulletin]*, no. 6, pp. 174-178. (in Russian).
- [4] Lysenko, E.A., Evtifiev, M.D., Halimanovich, V.I. and Akimov, A.N. (2006), Algoritm analiza eksperimental'nykh dannykh i rascheta rezhima nagruzheniya pri vibratsionnykh ispytaniyakh kosmicheskogo apparata [Algorithm of experimental data analysis and loading mode calculation during a vibration test of spacecraft], *Vestnik SibGAU [SibSAU Bulletin]*, no. 1 (8), pp. 73-75. (in Russian).
- [5] Motylev, N.I. (2004), Vyiavlenie mekhanicheskikh defektov v elementakh reaktorov i konstruktsii AES pri testovykh vibroudarnykh vozdeistviyakh [Detection of mechanical defects in the elements of NPP reactors and structures under test vibroimpact], *Tekhnologii i sistemy obespecheniya zhiznennogo tsikla yadernykh energeticheskikh ustanovok [Technology and systems of nuclear power plants life cycle support]*, Mendeleev, St. Petersburg, Issue 2, pp. 126-131. (in Russian).
- [6] Postnov, V.A. (2000), Opreделение povrezhdeniy 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], *Mekh. tverd. tela, izv. RAN* [*Mechanics of Solids, proc. of the Russian Academy of Sciences*], no. 6, pp. 155-160. (in Russian).

[7] Postnov, V.A. and Shlottmann, G. (2004), Opredelenie povrezhdenii uprugikh sistem putem matematicheskoi obrabotki chastotnykh spektrov, poluchennykh iz eksperimenta [Application of experimental data on the elastic systems dynamic properties changing in problems of structural damages assessment], *Vestnik NNGU, Seriya Mekhanika* [*NNSU Bulletin, Mechanics*], no. 1, pp. 32-42. (in Russian).

[8] Shevelev, N.A. and Dombrowskii, I.V. (2009), Chislennoe issledovanie dinamicheskikh kharakteristik elementov konstruksii s defektami formy [Numerical study of dynamic characteristics of structural elements with shape defects] *Vestnik PGTU, Mekhanika* [*PSTU Bulletin, Mechanics*], no. 1, pp. 160-163. (in Russian).

[9] Perera, R. Fang, S. E. and Huerta, C. (2009), Structural crack detection without updated baseline model by single and multiobjective optimization, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 23, no. 3, pp. 752–768.