

К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Е.А. ДАНИЛОВА¹, Е.А. КУЗИНА², А.В. ЛЫСЕНКО¹, В.А. ТРУСОВ¹, Н.К. ЮРКОВ¹

¹Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия

²Московский технологический университет, г. Москва, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, соглашение № 17-79-10281

Дается подход к решению проблемы повышения виброустойчивости бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Показано, что использование испытаний, предусмотренных государственными стандартами, не обеспечивает требуемого уровня отказов, вызванных механическими повреждениями, т. к. испытания проводятся ограниченно, не полностью выявляя основные резонансные явления, определяющие вибропрочность конструкции. Показано, что основными проблемами совершенствования являются повышение адекватности испытательных и реальных режимов вибрации, повышение точности воспроизведения испытательных режимов на вибрационных стендах, а также увеличение достоверности измерительной информации о режимах вибрации и динамических реакциях объекта исследований и увеличение информативности вибрационных испытаний. Для обеспечения эквивалентности испытательных режимов, режимам эксплуатации обеспечиваются режимы испытаний, формируемые несинфазной подачей испытательного сигнала в точки закрепления печатных плат. Показано, что с помощью управления амплитудами и фазами действующих сигналов на резонансных частотах возможно перемещение максимумов прогиба по площади печатной платы и тем самым повышение надежности. Полученные результаты математического моделирования и соотнесение их с результатами натурных испытаний указали на ограниченность виброиспытаний по стандартным методикам. Делается вывод о необходимости модификации натурных испытаний.

Ключевые слова: бортовая электронная аппаратура, печатная плата, надежность, виброустойчивость, вибропрочность, моделирование, динамическая характеристика, стендовые и натурные испытания.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной является проблема повышения виброустойчивости бортовой электронной аппаратуры за счет обеспечения высокой эффективности комплексных стендовых испытаний конструкции на рабочих частотах.

Наиболее уязвимым с точки зрения виброустойчивости конструктивным элементом любого современного электронного средства (ЭС) является печатный узел. Для проверки устойчивости и надежности радиоэлектронных модулей и блоков при механических воздействиях используют испытания на вибростендах. При этом используются стандартные стены и методики испытаний, предусмотренных государственными стандартами. Однако процент отказов, вызванных механическими повреждениями, остается значительным.

Целью работы является повышение эффективности комплексных испытаний для определения динамических характеристик конструктивных элементов ЭС за счет совершенствования существующих методов и средств лабораторно-стендовых испытаний.

Зачастую ошибочное определение динамических характеристик конструкции приводит к неправильному выбору методов и режимов дальнейших испытаний на вибропрочность, виброустойчивость и воздействие ударов, что приводит к необходимости повторных испытаний. В настоящее время проблема комплексного подхода к испытаниям бортовой электронной аппаратуры происходит в направлении увеличения стендовых и, соответственно, сокращения натурных испытаний [1, 2]. При этом стремятся получить полную картину распределения тензорного поля, его искажения за счет несоответствия режимов эксплуатации объекта испытаний (ОИ) и испытательных режимов при проведении стендовых испытаний.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ опубликованных результатов исследований показывает, что проблема технической эффективности виброиспытаний ЭС является комплексной и связана с решением четырех взаимосвязанных проблем:

- повышения адекватности испытательных и реальных режимов вибрации [3, 4];
- повышения точности воспроизведения испытательных режимов на стендах;
- увеличения достоверности измерительной информации о режимах вибрации и динамических реакциях ОИ [5];
- увеличения информативности вибрационных испытаний (ВИ).

Заметим, что основополагающим принципом проводимых испытаний является принцип эквивалентности испытательных режимов режимам эксплуатации. В связи с этим для получения информации о воздействии вибрации в процессе испытаний используют виброметрические преобразователи (ВИП), размещаемые в контрольных точках (КТ). Сигнал с ВИП в КТ используется в системе управления, обеспечивающей стабилизацию передаточной функции вибратора. Контрольные точки располагаются на поверхности объекта испытания. Необходимо задать ускорение движения для КТ, при этом в случае прямолинейной траектории движения контура крепления объекта исследования (ОИ) как абсолютно твердого тела достаточно задать ускорение в одной КТ. Однако в большинстве случаев движение не является прямолинейным. Поэтому вибрационные воздействия, передаваемые в ЭС от контура крепления ИИ, необходимо делить на две составляющие: инерционное воздействие, характеризующее движение контура с ЭС как целого (абсолютно твердого тела), и деформационное воздействие, возникающее вследствие упругих деформаций контура.

Основным недостатком всех типов вибраторов является зависимость их передаточной функции от частоты и нагрузки, что существенно усложняет задачу воспроизведения заданных параметров вибрации при испытаниях в широком диапазоне частот. Поэтому используются специальные способы компенсации изменений передаточной функции при изменении частоты и нагрузок.

Главные проблемы, которые нужно решить в области натурного эксперимента и физического моделирования колебательных процессов конструктивных элементов ЭС, – это учет деформационной составляющей вибрационного воздействия, исключение влияния датчиков на исследуемый объект и устранение зависимости погрешности измерения от частоты.

Математическое моделирование показало, что при виброиспытаниях по стандартным методикам невозможно возбудить колебания печатного узла ЭС на всех его собственных частотах, так как механические воздействия от стандартного вибростенда подаются в одной фазе во все точки крепления печатного узла [7]. Для возбуждения колебаний на всех собственных частотах необходимо создать условия, приближенные к реальным условиям эксплуатации, а именно, необходимо подавать в точки крепления вибрационные воздействия, отличающиеся между собой своей фазой.

Математический анализ динамических характеристик плат выполнен с использованием программного комплекса ANSYS, основанного на методе конечных элементов. Проведенный в ANSYS анализ позволил определить собственные частоты конструкции при задании как синфазного, так и разно-фазного режимов (когда в точки крепления печатной платы подавались сигналы со сдвигом фаз [8]).

На рис. 1–5 представлены результаты математического моделирования в ANSYS вибрационных процессов в печатном узле. Моделирование показало, что при стандартном способе возбуждения колебаний (при котором использовался стандартный вибростенд) достигнут резонанс исследуемой платы на первой резонансной частоте с амплитудой 30,12 ед. с максимумом деформации в центре платы (рис. 1). При этом не удается вызвать резонансные колебания на второй и третьей собственных частотах (рис. 2, 4).

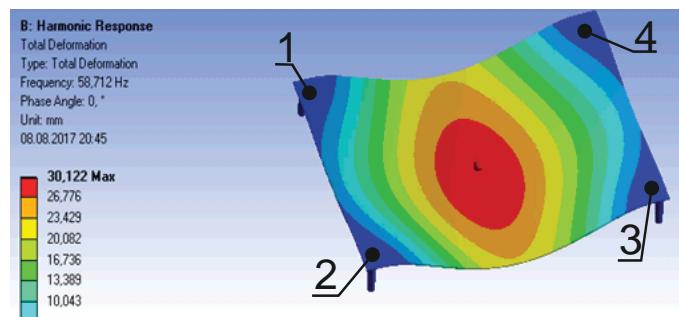


Рис. 1. Первая резонансная частота 58,712 Гц (стандартный способ)
Fig. 1. First resonance frequency of 58.712 Hz (standard method)

На рис. 1 приведен профиль максимальной деформации печатной платы размером 200 x 150 мм, плотность материала платы: 1790 кг/м³; модуль Юнга: 2,1·10¹⁰ Па; коэффициент Пуассона: 0,15. Цифрами обозначены номера точек крепления платы. Вибрация подается на плату через точки крепления синфазными сигналами одинаковой амплитуды. Максимальная деформация расположена в центре платы и имеет амплитуду 30,12 ед. Этот результат полностью соответствует классической теории виброметрии [5, 6], согласно которой самое опасное место на плате для размещенных элементов – в центре платы при резонансе на первой резонансной частоте, а размещение ответственных элементов и разъемов рекомендуется проводить на краях платы.

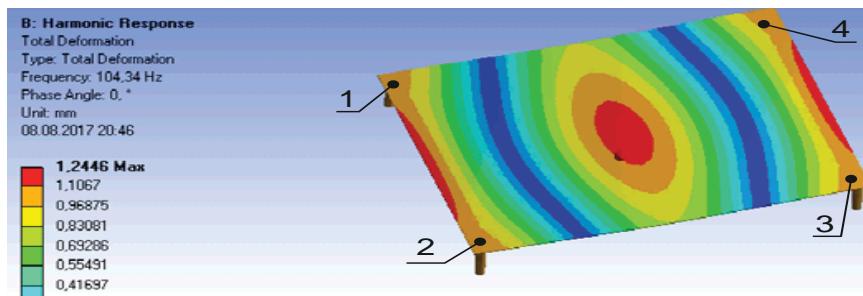


Рис. 2. Вторая резонансная частота 104,34 Гц (стандартный способ)
Fig. 2. Second resonance frequency of 104.34 Hz (standard method)

На рис. 2 приведен профиль максимальной деформации печатной платы размером 200 x 150 мм, плотность материала платы: 1790 кг/м³; модуль Юнга: 2,1·10¹⁰ Па; коэффициент Пуассона: 0,15. Цифрами обозначены номера точек крепления платы. Вибрация подается на плату через точки крепления синфазными сигналами одинаковой амплитуды. Деформация платы незначительная, максимальное значение в центре платы, амплитуда 1,2446 ед. Этот результат также полностью соответствует классической теории виброметрии [5, 6], согласно которой вторая резонансная частота имеет гораздо меньшую амплитуду колебаний, и иногда даже виброиспытания на ней не рекомендуется проводить.

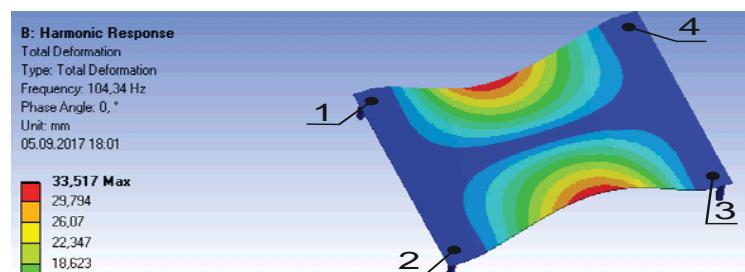


Рис. 3. Вторая резонансная частота 104,34 Гц (нестандартный способ)
Fig. 3. Second resonance frequency of 104.34 Hz (non-standard method)

На рис. 3 приведен профиль максимальной деформации печатной платы размером 200 x 150 мм, плотность материала платы: 1790 кг/м³; модуль Юнга: $2,1 \cdot 10^{10}$ Па; коэффициент Пуассона: 0,15. Цифрами обозначены номера точек крепления платы. Вибрация подается на плату через точки крепления сигналами одинаковой амплитуды, точки 1 и 2, 3 и 4 в противофазе, а 1 и 4, 2 и 3 синфазны, соответственно. Максимальная деформация в центре длинных сторон платы, амплитуда 33,517 ед., причем так как на противоположных сторонах экстремумы имеют разный знак, то результирующая кривизна возрастает, а суммарная величина изгиба удваивается (67,34 ед.). Как видно, при нестандартном способе возбуждения колебаний на второй собственной частоте платы амплитуда резонансных колебаний больше, чем при испытаниях на стандартном вибростенде не только на второй, но даже на первой, как считается, самой опасной частоте [3, 4, 6, 7].

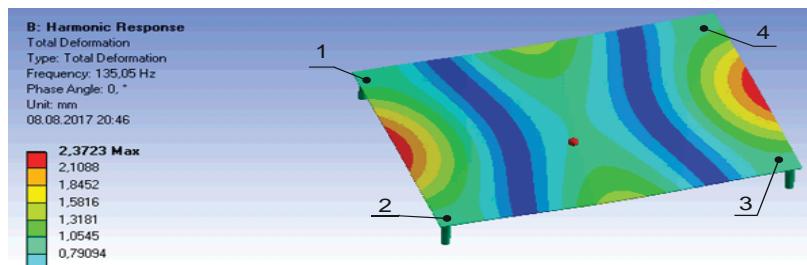


Рис. 4. Третья резонансная частота 135,05 Гц (стандартный способ)
Fig. 4. Third resonance frequency of 135.05 Hz (standard method)

На рис. 4 приведен профиль максимальной деформации печатной платы размером 200 x 150 мм, плотность материала платы: 1790 кг/м³; модуль Юнга: $2,1 \cdot 10^{10}$ Па; коэффициент Пуассона: 0,15. Цифрами обозначены номера точек крепления платы. Вибрация подается на плату через точки крепления синфазными сигналами одинаковой амплитуды. Деформация платы незначительная, максимальное значение в центре коротких сторон платы, амплитуда 2,37 ед. Как видно, при нестандартном способе возбуждения колебаний на третьей собственной частоте платы амплитуда резонансных колебаний больше, чем при испытаниях на стандартном вибростенде не только на третьей, второй, но даже на первой, как считается, самой опасной частоте.

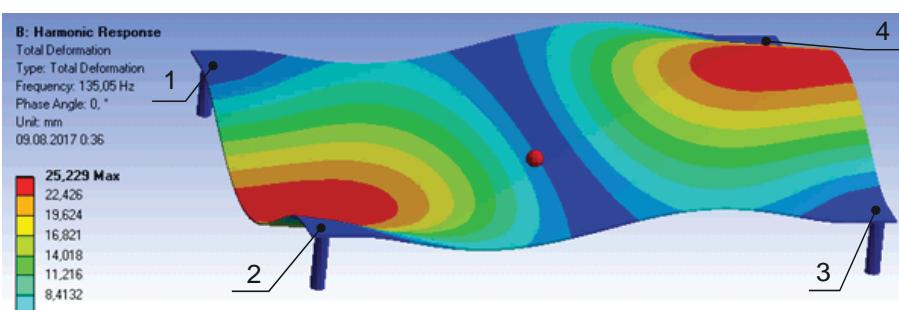


Рис. 5. Третья резонансная частота 135,05 Гц (нестандартный способ)
Fig. 5. Third resonance frequency of 135.05 Hz (non-standard method)

На рис. 5 приведен профиль максимальной деформации печатной платы размером 200 x 150 мм, плотность материала платы: 1790 кг/м³; модуль Юнга: $2,1 \cdot 10^{10}$ Па; коэффициент Пуассона: 0,15. Цифрами обозначены номера точек крепления платы. Вибрация подается на плату через точки крепления сигналами одинаковой амплитуды, точки 1 и 4, 2 и 3 в противофазе, а 1 и 2, 3 и 4 синфазны соответственно. Максимальная деформация расположена в центре коротких сторон платы и имеет амплитуду 25,229 ед., причем так как на противоположных сторонах экстремумы имеют разный знак, то результирующая кривизна возрастает, а суммарная

величина изгиба удваивается (50,458 ед.). Как видно, при нестандартном способе возбуждения колебаний на третьей собственной частоте платы амплитуда резонансных колебаний больше, чем при испытаниях на стандартном вибростенде не только на третьей, второй, но даже на первой, как считается, самой опасной частоте. Кроме того, рекомендации классической теории виброметрии [3, 4, 6, 7] размещать ответственные элементы и разъемы на коротких краях платы при таком резонансе даже крайне опасны.

Таким образом, показано, что резонансы в плате зависят от условий возбуждения колебаний, в том числе от фазы колебаний точек закрепления конструкции.

Применение стандартной методики вибрационных испытаний показывает, что самое вибрационно напряженное место на плате расположено в ее центре [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Юрков Н.К., Жаднов В.В.** Особенности конструирования бортовой космической аппаратуры: учебное пособие. Пенза: ПГУ, 2012. 112 с.
2. **Голушко Д.А., Долотин А.И., Юрков Н.К.** Моделирование влияния внешних механических воздействий на АЧХ бортовых РЭС // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: материалы X международной научно-практической конференции. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 392–394.
3. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / под ред. А.И. Коробова. М.: Радио и связь, 2002. 272 с.
4. **Глудкин О.П.** Методы и устройства испытания РЭС и ЭВС. М.: Высш. школа. 2001. 335 с.
5. **Иориш Ю.И.** Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1972. 772 с.
6. **Талицкий Е.Н.** Защита электронных средств от механических воздействий. Теоретические основы: учебное пособие. Владимир: Владим. гос. ун-т., 2001. 256 с.
7. Математическое моделирование радиоэлектронных средств при механических воздействиях. Кофанов Ю.Н., Шалумов А.С., Гольдин В.В., Журавский В.Г. М.: Радио и связь, 2000. 226 с.
8. Исследование динамики печатных плат радиоэлектронных средств: монография. Н.К. Юрков, Г.В. Таньков, В.А. Трусов, А.В. Григорьев, Е.А. Данилова. Пенза: Изд-во ПГУ. 2016. 118 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Данилова Евгения Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры конструирования и проектирования радиоэлектронной аппаратуры Пензенского государственного университета, siori@list.ru.

Кузина Екатерина Андреевна, студентка кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Московского технологического университета, ketrinkuz97@mail.ru.

Лысенко Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры конструирования и проектирования радиоэлектронной аппаратуры Пензенского государственного университета, lysenko7891@rambler.ru.

Трусов Василий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры конструирования и проектирования радиоэлектронной аппаратуры Пензенского государственного университета, trusov_v@mail.ru.

Юрков Николай Кондратьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и проектирования радиоэлектронной аппаратуры Пензенского государственного университета, yurkov_nk@mail.ru.

THE PROBLEM OF IMPROVEMENT OF THE AVIONIC EQUIPMENT VIBRATION RESISTANCE

Eugenia A. Danilova¹, Catherine A. Kuzina²,
Aleksej V. Lysenko¹, Vasiliy A. Trusov¹, Nikolai K. Yurkov¹

¹Penza State University, Penza, Russia

²Moscow Technological University, Moscow, Russia

ABSTRACT

The article gives an approach to a solution of the problem of improvement the avionic equipment vibration resistance. It is shown that the use of the tests, which are provided by the state standards do not insure the required level of the failures caused by mechanical damages. Due to the fact that the tests are carried out restrictedly they do not completely reveal the main resonant phenomena, which define the structure vibrational strength. It is shown that the main challenges of the improvement are to increase the adequacy of test and real modes of vibration, to increase the accuracy of reproduction of the test modes on shake tables and also to increase the reliability of measuring information about the modes of vibration and dynamic responses of an object of researches and to increase the information capacity of the vibrational tests. To ensure the equivalence of the test modes to the modes of maintenance the modes of tests are provided, they are not created by in-phase submission of a test signal in points of fixing the printed circuit boards. It is shown that with the help of control over the amplitudes and phases of affecting signals on resonance frequencies the displacement of maxima deflection in the area of the printed circuit board is possible and, thereby, it is enable to increase the reliability. The received results of mathematical simulation and their correlation with the results of full-scale tests specified on the limitation of vibration tests by means of standard techniques. The conclusion about the necessity of full-scale tests modifications is drawn.

Key words: avionic equipment, printed circuit board, reliability, vibration resistance, modeling, dynamic characteristics, bench and full-scale tests.

REFERENCES

1. **Yurkov N.K., Zhadnov V.V.** *Osobennosti konstruirovaniya bortovoy kosmicheskoy apparatury* [Features of designing of the onboard space equipment]. Manual. Penza, CCGT, 2012, 112 p. (in Russian)
2. **Golushko D.A., Dolotin A.I., Yurkov N.K.** *Modelirovaniye vliyaniya vnesnih mehanicheskikh vozdeystciy na AChH bortovyh RES. Innovatsii na osnove informacionnyh i kommunikativnyh tehnologiy* [Modeling of the influence from external mechanical impacts on AChH of onboard RES]. Innovations on the basis of information and communication technologies: Materials of the 10th international scientific and practical conference. M., National Research University Higher School of Economics, 2013, pp. 392–394. (in Russian)
3. **Ispytaniya radioelektronnoy, elektronno-vychislitel'noy apparatury i ispytatel'noe oborudovanie** [Tests of the radio-electronic, electronic and computing equipment and the test equipment]. Ed. by A.I. Korobov. M., Radio and communication, 2002, 272 p. (in Russian)
4. **Gludkin O.P.** *Metody i ustroystva ispytaniya RES i EVS* [Methods and devices of RES and EVS test]. M., Higher school, 2001, 335 p. (in Russian)
5. **Iorish Yu.I.** *Izmerenie vibratsii i udarov. Obshchaya teoriya, metody i pribory* [Vibrometrya. Measurement of vibration and blows. General theory, methods and devices]. Revised edition 2nd. M., Mechanical engineering, 1972, 772 p/ (in Russian)
6. **Talitsky E.N.** *Zashchita elektronnykh sredstv ot mekhanicheskikh vozdeystviy. Teoreticheskie osnovy* [Protection of electronic means from mechanical effect. Theoretical basics]. Manual. Vladimir, Vladimir State Univirsity, 2001, 256 p. (in Russian)
7. **Kofanov Yu.N., Shalumov A.S., Goldin V.V., Zhuravsky V.G.** *Matematicheskoe modelirovaniye radioelektronnykh sredstv pri mekhanicheskikh vozdeystviyah* [Mathematical modeling of radio-electronic means at mechanical effect]. M., Radio and communication, 2000, 226 p. (in Russian)

8. Yurkov N.K., Tan'kov G.V., Trusov V.A., Grigoriev A.V., Danilova E.A. *Issledovanie dinamiki pechatnykh plat radioelektronnykh sredstv. Monografiya* [Dynamics research of circuit boards for radio-electronic means. Monograph]. Penza, PSU Publishing house, 2016, 118 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Eugenia A. Danilova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Constructing and Planning of Radio Electronic Apparatus Chair of the Penza State University, siori@list.ru.

Catherine A. Kuzina, the student of Constructing and Production of Radio Electronic Facilities Chair, Moscow Technological University, ketrinkuz97@mail.ru.

Aleksej V. Lysenko, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Constructing and Planning of Radio Electronic Apparatus Chair of the Penza State University, siori@list.ru., lysrenko7891@rambler.ru.

Vasiliy A. Trusov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Constructing and Planning of Radio Electronic Apparatus Chair of the Penza State University, siori@list.ru., trusov_v@mail.ru.

Nikolay K. Yurkov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Head of Constructing and Planning of Radio Electronic Apparatus Chair of the Penza State University, yurkov_nk@mail.ru.

Поступила в редакцию 08.09.2017
Принята в печать 20.09.2017

Received 08.09.2017
Accepted for publication 20.09.2017