

Об уровнях вибрационных воздействий при испытаниях бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов

А. С. Левченко, к. т. н., *levchenko_as@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рост требований к сроку службы и безотказности бортовой радиоэлектронной аппаратуры приводит к необходимости более глубокой и эффективной экспериментальной обработки. В то же время отсутствие зачастую даже двух образцов аппаратуры для проведения испытаний делает задачу подтверждения ее прочностных характеристик трудновыполнимой ввиду разбросов свойств материалов и техпроцессов. В данной работе изложена методика проведения вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов, позволяющая по результатам испытаний одного опытного образца подтвердить прочность произвольного образца данного прибора с высоким уровнем доверия. Определены коэффициенты запаса для разных этапов испытаний аппаратуры при вибрационных испытаниях, которые необходимы для обеспечения заданной вероятности выявления конструктивных дефектов. Произведено сравнение предложенной методики с современными иностранными нормативными документами по испытаниям бортовой аппаратуры космических аппаратов. Предлагаемая методика позволяет гибко подходить к подбору уровней вибрационных испытаний, поскольку позволяет учесть при определении объемов испытаний конструктивные особенности аппаратуры, влияющие на разброс ее прочности от образца к образцу.

Ключевые слова: вибрационные испытания, испытания на прочность, случайная широкополосная вибрация, бортовая аппаратура космических аппаратов

Levels of Vibration Impact during Testing of Spacecraft Avionics Equipment

A. S. Levchenko, *Cand. Sci. (Engineering)*, *levchenko_as@spacecorp.ru*
Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The tightening of avionics lifetime and reliability requirements necessitates a profound and efficient experimental method. At the same time, the not infrequent absence of even two equipment samples for conducting tests (considering the variation of properties of materials and technological processes) makes the problem of confirming hardware strength characteristics difficult to solve. The present paper describes a methodology for vibration tests of spacecraft onboard electronics that allows us to reliably confirm the strength of a random sample of the given equipment based on the testing of a single test specimen. Safety margins for different stages of equipment vibration testing are determined. These margins are necessary to ensure the given probability of design defect detection. The proposed methodology is compared with current foreign regulatory documents dedicated to testing spacecraft onboard electronics. The proposed method allows a flexible approach to the selection of vibration test levels since it takes into account the design features of the equipment affecting strength spread from sample to sample during the determination of the scope of required tests.

Keywords: vibration tests, strength test, random broadband vibration, spacecraft onboard equipment

Введение

Специфика факторов, действующих на бортовую радиотехническую аппаратуру космических аппаратов (КА), определяет сложную структуру наземной отработки этого класса аппаратуры. Одной из особенностей эксплуатации такой аппаратуры является воздействие на нее на этапе выведения кратковременной (не более 10 минут) вибрации с достаточно высокими уровнями спектральной плотности виброускорения.

В мировой практике существуют два подхода к отработочным испытаниям аппаратуры в зависимости от количества образцов:

1. На отработочные испытания может быть выделено большое количество образцов. В этом случае испытания на стойкость к воздействию внешних воздействующих факторов (ВВФ) проводятся подобно испытаниям на надежность, при которых выявляются статистические свойства совокупности аппаратуры, а нормы испытаний могут принимать значения, равные эксплуатационным.

2. На отработочные испытания аппаратуры выделяется малое или среднее количество образцов. В космическом приборостроении этот подход применяется как в России, так и в США и Европе. В этом случае на отработочные испытания выделяется недостаточно образцов для того, чтобы выявить статистические свойства совокупности аппаратуры. При этом на испытание может поступить образец с большими запасами прочности по ВВФ, а в эксплуатацию — не имеющий запасов, в силу чего единственный путь гарантировать работоспособность любого экземпляра аппаратуры, изготовленного по разработанной конструкторской документации (КД), — это испытать с повышенными значениями ВВФ относительно требований технического задания [1,2]. Данный подход реализуется в российских государственных стандартах на бортовую аппаратуру КА 5 класса, американских нормативно-технических документах (MIL-STD-1540, MIL-HDBK-340A), стандартах Европейского космического агентства — ЕКА (ECSS-E-ST-10-02C, ECSS-E-ST-10-03C).

В ЕКА на испытания выделяется до 4–5 комплектов аппаратуры, из них на отработочные испытания — до 3–4 образцов [3]. Разработчик про-

водит большие объемы испытаний на стойкость к ВВФ, в том числе до разрушения, чтобы получить максимальный объем информации об аппаратуре. На одном или двух образцах проводятся приемочные (квалификационные по классификации ЕКА) испытания с контролем заказчика, объем которых определяется исходя из конкретной ситуации: достигнутого уровня качества и надежности, уровня новизны аппаратуры.

Особенностью наземной экспериментальной отработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (БРА КА) РФ в современных условиях является невозможность выделить для отработки более чем два комплекта аппаратуры. Поскольку в отработку, кроме испытаний на климатические и механические ВВФ, входят испытания на радиационную стойкость и ресурсные испытания, фактически на отработочные механические испытания поступает только один образец.

В условиях унификации БРА КА, когда многократным проведением испытаний необходимо обеспечить качество аппаратуры, которая может изготавливаться серийно на различных заводах в течение многих лет, единственным способом организации испытаний БРА является испытание на одиночных образцах с величинами воздействий, увеличенными на коэффициент запаса, что позволяет покрыть разброс параметров применяемых компонентов, материалов и прочие вариации свойств аппаратуры, изготавливаемой в дальнейшем по отработанной документации.

В работе рассматривается необходимый уровень запаса нагрузок при испытаниях БРА КА на стационарную вибрацию для обеспечения ее качества и надежности.

Методика проведения вибрационных испытаний БРА КА

Методика проведения вибрационных испытаний БРА КА должна исходить из того, что на механические испытания предоставляются один или два образца аппаратуры, ни на одном из которых невозможно проведение механических испытаний до отказа, поскольку эти образцы должны впоследствии проходить другие этапы испытаний,

такие как ресурсные испытания или испытания на радиационную стойкость. Как следствие, такая методика должна учитывать факторы, влияющие на разброс прочности между образцами приборов. Существуют три базовых фактора, влияющих на разброс прочности аппаратуры:

- разброс материалов по числу циклов виброн нагружения до разрушения [4, с. 510–519];
- разбросы резонансных частот конструктива;
- разбросы добротностей элементов конструктива, вызванные разбросом жесткостей и демпфирующих свойств материалов.

Упомянуты данные факторы по той причине, что их влияние невозможно минимизировать при входном контроле и дополнительных испытаниях материалов и ЭКБ. Разброс материалов по числу циклов виброн нагружения до разрушения и разбросы резонансных частот не требуют увеличения уровня нагрузки при испытаниях, а требуют только увеличения длительности испытательного режима относительно эксплуатационного. В данной работе будет рассматриваться только влияние разбросов добротностей элементов конструктива на необходимые уровни спектральной плотности виброускорения и амплитуды синусоидальной вибрации, поэтому вопросы продолжительности воздействия при вибрационных испытаниях в рамках данной статьи не рассматриваются. При выборе продолжительности испытаний следует руководствоваться требованиями отраслевых нормативных документов.

Рассмотрим влияние разброса добротностей элементов конструктива на требуемые уровни воздействий при вибрационных испытаниях. На прибор со стороны посадочной поверхности космического аппарата воздействует случайная широкополосная вибрация (СШВ), описываемая спектральной плотностью виброускорения $S_{\text{экспл}}(f)$, которая представляет собой функцию частоты. Можно определить эффективное (действующее) значение действующей на прибор СШВ как

$$g_{\text{эфф}} = \sqrt{\int_{f_n}^{f_b} S(f) df}.$$

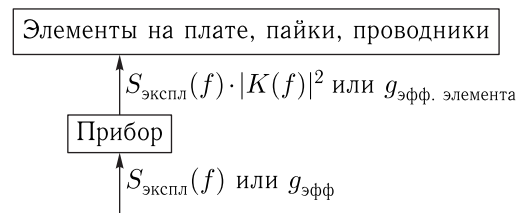


Рис. 1. Спектральная плотность виброускорения с учетом резонансных свойств аппаратуры

Если установить вибродатчики внутри прибора, можно увидеть, что на элементе (плате, пайке, ЭРИ, проводнике) прибора спектр СШВ отличается от входного [5] (рис. 1):

$$S_{\text{элемента}}(f) = S_{\text{экспл}}(f) \cdot |K(f)|^2, \quad (1)$$

где $|K(f)|$ — модуль амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) конструктива в исследуемой точке. Здесь следует заметить, что в различных точках прибора АЧХ будет различна. Тогда можно определить эффективное (среднеквадратичное) значение действующей на элемент прибора случайной вибрации, описываемый как резонатор с одной степенью свободы, как

$$g_{\text{эфф. элем}} = \sqrt{\int_{f_n}^{f_b} S(f) \cdot |K(f)|^2 df} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot S_{\text{экспл}}(f_p) \cdot f_p \cdot Q_p}, \quad (2)$$

где f_p — собственная частота резонатора, Q_p — коэффициент динамичности на резонансной частоте. При этом для различных экземпляров прибора коэффициент динамичности различается зачастую в разы из-за разбросов свойств материалов, моментов затяжек винтов и т. п.

Анализ результатов испытаний на большой выборке бортовых радиоэлектронных приборов, проведенный при выполнении научно-исследовательских работ в 1980-х годах, показал, что коэффициенты динамичности имеют распределение, близкое к усеченному по уровню $\pm 3\sigma$ нормальному распределению (рис. 2).

При таком распределении чаще всего с завода выходят образцы одного и того же прибора,

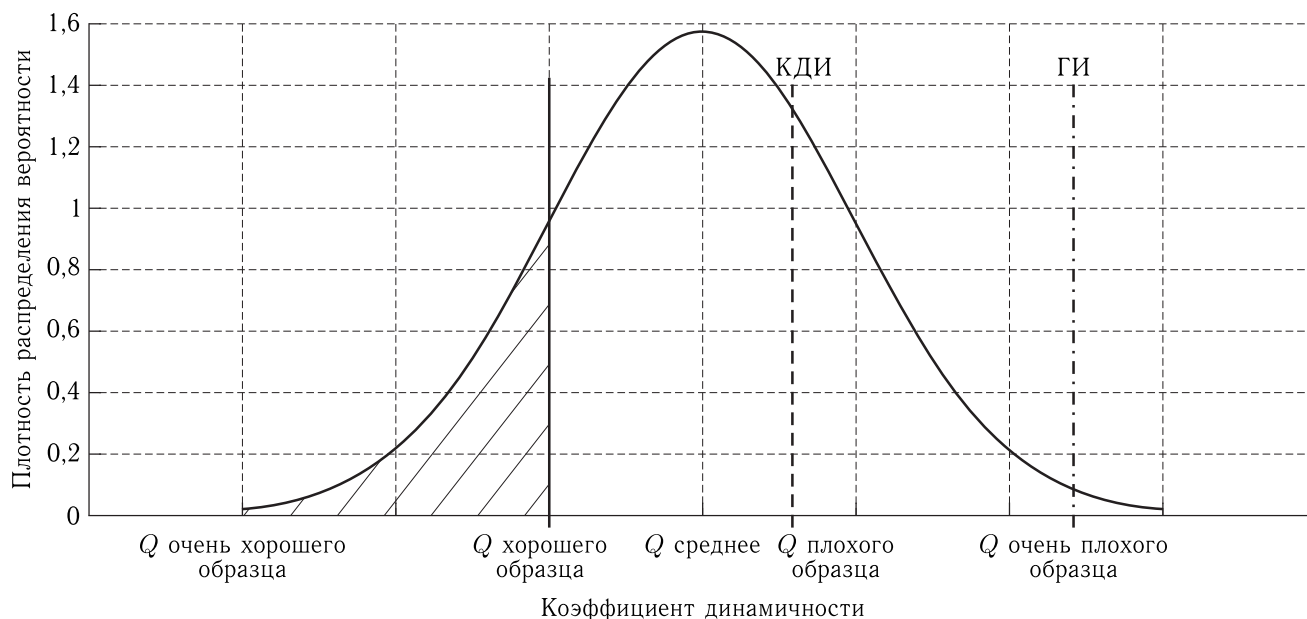


Рис. 2. Распределение коэффициентов динамичности для различных экземпляров одного прибора

имеющие средние прочностные характеристики, однако возможно появление как образцов с низким коэффициентом динамичности (далее «хороший» образец), так и образцов с высоким коэффициентом динамичности (далее «плохой» образец). Элементы (например, электрорадиоизделия, пайки, клеевые соединения и т. д.) «плохого» образца прибора получают механическую нагрузку, существенно большую, чем элементы «хорошего» прибора. Если на испытания попадает «хороший» образец (отмечен сплошной вертикальной линией на рис. 2), то такие испытания позволяют подтвердить прочность только 16% из изготовленных образцов прибора. Естественно, в реальных условиях определить, какой из образцов попал на испытания, невозможно, однако это и не требуется при использовании предлагаемой методики.

Для того чтобы подтвердить прочность любого образца прибора, изготовленного по отработанной конструкторской документации, нужно при проведении испытаний учесть возможные разбросы коэффициента динамичности. Поэтому при проведении испытаний на одном образце следует предполагать, что он обладает низкими коэффициентами динамичности и увеличить $S_{\text{экспл}}(f)$ в α^2 раз до уровня $S_{\text{испытат}}(f)$ таким образом, чтобы виброускорение на элементах испытываемого при-

бора $S_{\text{элемент}}^{\text{испытат}}$ было таким же, как и в худшем случае:

$$\alpha^2 = \frac{S_{\text{испытат}}(f)}{S_{\text{экспл}}(f)} = \frac{|K_{\text{плохого}}(f)|^2}{|K_{\text{хорошего}}(f)|^2} = \left(\frac{Q_{\text{р}}^{\text{среднее}} + K_{\text{у.н.р.}}(\gamma)\sigma_Q}{Q_{\text{р}}^{\text{среднее}} - K_{\text{у.н.р.}}(\gamma)\sigma_Q} \right)^2,$$

где $K_{\text{у.н.р.}}(\gamma)$ — квантиль усеченного нормального распределения уровня γ , σ_Q — дисперсия разброса коэффициента динамичности, $Q_{\text{р}}^{\text{среднее}}$ — средний уровень коэффициента динамичности по образцам данного прибора. Определение $Q_{\text{р}}^{\text{среднее}}$ для конкретного прибора — это задача невыполнимая, поэтому следует избавиться от него, заменив на коэффициент вариации как статистическую характеристику с наименьшей дисперсией по генеральной совокупности:

$$\alpha^2 = \left(\frac{Q_{\text{р}}^{\text{среднее}} + K_{\text{у.н.р.}}(\gamma)\sigma_Q}{Q_{\text{р}}^{\text{среднее}} - K_{\text{у.н.р.}}(\gamma)\sigma_Q} \right)^2 = \left(\frac{1 + K_{\text{у.н.р.}}(\gamma)\frac{\sigma_Q}{Q_{\text{р}}^{\text{среднее}}}}{1 - K_{\text{у.н.р.}}(\gamma)\frac{\sigma_Q}{Q_{\text{р}}^{\text{среднее}}}} \right)^2 = \left(\frac{1 + K_{\text{у.н.р.}}(\gamma)V_Q}{1 - K_{\text{у.н.р.}}(\gamma)V_Q} \right)^2, \quad (3)$$

где V_Q — коэффициент вариации по коэффициенту динамичности, используется по причине того, что слабо меняется от одного типа прибора к другому.

Для радиоэлектронных приборов, разрабатываемых в 1980-х годах, значение V_Q , определенное по большой выборке различных типов приборов, составляло 0,15. Естественно, что применяемые в современных приборах конструктивные решения требуют пересмотра величины V_Q . К сожалению, ввиду того, что на отработочные механические испытания БРА КА последние десять лет редко поступает больше двух образцов, набрать достаточно статистики для оценки коэффициента вариации по выборке для современных приборов пока не удалось. Однако даже имеющаяся статистика показывает, что это значение превышает 0,15. Например, коэффициенты динамичности трех образцов типичного для радиоэлектронного прибора элемента конструкции при одной и той же нагрузке в одной из точек приняли значения 22, 43, 62 (рис. 3). Рассмотрим, насколько такие значения соответствуют коэффициенту вариации 0,15.

Коэффициенты динамичности γ процентов от общего числа образцов прибора должны попадать в диапазон значений, который определяется как

$$Q_p^{\text{среднее}} \cdot [1 - K_{y.n.p.}(\gamma)V_Q] < Q_\gamma < Q_p^{\text{среднее}} \cdot [1 + K_{y.n.p.}(\gamma)V_Q].$$

Для рассматриваемого элемента конструкции $Q_p^{\text{среднее}}$ приблизительно составляет 42. При коэффициенте вариации 0,15 для 75 % образцов приборов значение коэффициента динамичности не должно выходить за пределы диапазона

$$37,77 < Q_{0,75} < 46,23,$$

а для 95 % приборов — за пределы диапазона

$$31,72 < Q_{0,95} < 52,28.$$

На рис. 3 видно, что для двух образцов приборов из трех значение коэффициента динамичности вышло за пределы данного диапазона. Вероятность такого события при коэффициенте вариации 0,15 меньше 1/4 процента. Учитывая также существенные разбросы коэффициентов динамичности, наблюдаемые в парах опытных образцов других приборов, можно уверенно утверждать, что реальное значение V_Q для аппаратуры разработки АО «Российские космические системы» выше 0,15.

Естественно, что для применения данной методики в других организациях отрасли необходимо оценить V_Q для аппаратуры их разработки, однако для радиоэлектронных приборов в качестве первого приближения можно использовать указанное значение.

С чем большей вероятностью γ мы хотим гарантировать соответствие любого образца прибора эксплуатационным требованиям, тем больше квантиль $K_{y.n.p.}(\gamma)$. В табл. 1 приведены значения квантилей $K_{y.n.p.}$ [6] и коэффициента запаса по спектральной плотности виброускорения α^2 для различных γ при $V_Q = 0,15$. Значения спектральной плотности при испытаниях должны быть увеличены в α^2 раз, а амплитуда виброускорения согласно (2) — в α раз.

Таблица 1. Значения $K_{y.n.p.}$ и α для различных уровней γ

γ	0,75	0,95	0,96	0,97	0,975	0,98	0,985	0,99
$K_{y.n.p.}$	0,672	1,633	1,736	1,862	1,938	2,028	2,137	2,280
α	1,224	1,649	1,704	1,775	1,820	1,874	1,943	2,040
α^2	1,499	2,719	2,905	3,152	3,312	3,513	3,776	4,157

В условиях, когда требования к вероятности безотказной работы прибора за срок автономного существования могут достигать 0,999, отказ приборов по причине механического разрушения после выведения (т. е. на начало срока активного существования) категорически недопустим и его вероятность следует максимально снижать.

Испытания БРА делятся на различные этапы, в том числе конструкторские испытания и граничные испытания, при которых проводятся механические испытания. При безотказном прохождении конструкторских испытаний следует гарантировать прочность 75 % образцов испытуемого прибора (рис. 2, левая вертикальная штриховая линия и табл. 1, столбец с $\gamma = 0,75$), по результатам граничных испытаний — прочность 99 % образцов (рис. 2, правая вертикальная штрихпунктирная линия и табл. 1, столбец с $\gamma = 0,99$).

Главным недостатком предлагаемой методики является то, что для конструктивных элементов с низким разбросом коэффициента динамичности

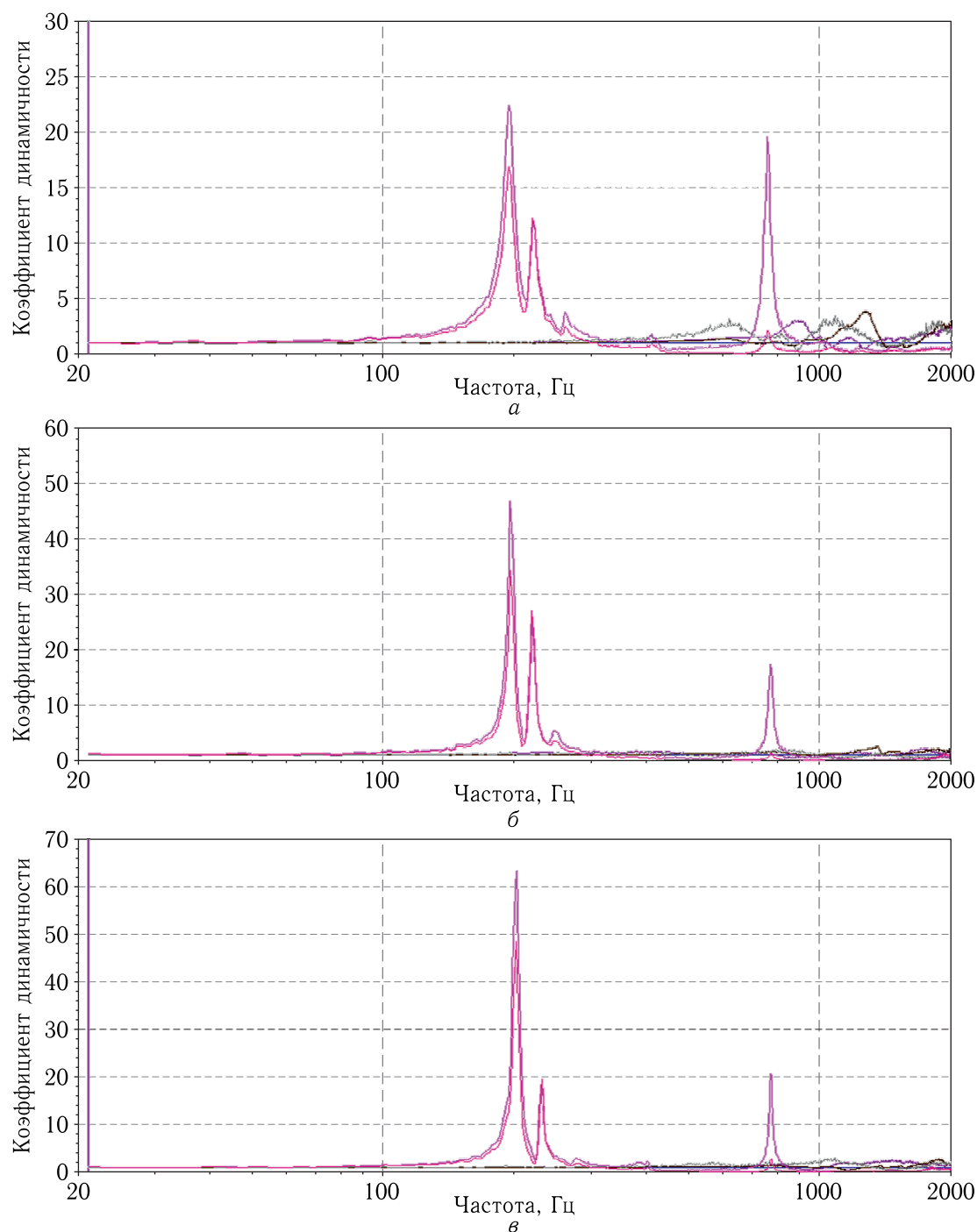


Рис. 3. Коэффициент динамичности трех образцов элемента конструкции радиоэлектронного прибора

(например, для несущих элементов конструктива) нагрузки при испытаниях будут превышать возможные даже для худших образцов прибора. Применяемые в АО «Российские космические системы» стандарты организации предусматривают, что каждый отказ при граничных испытаниях, связан-

ный с прочностными характеристиками приборов, анализируется, и если будет доказано, что разбросы характеристик элемента прибора, являющегося причиной отказа, меньше того, который предполагался при задании норм испытаний, то отказ допустим и не требует доработки аппаратуры.

Вид испытания	Составные части	КА
Ударная прочность	На 6 дБ выше максимальной ожидаемой среды, 3 раза в обоих направлениях по 3 осям	1 активация всех событий, вызывающих удары; 2 дополнительные активации управляющих событий (6.2.3.3)
Акустическое	На 6 дБ выше приемочных уровней в течение 3 минут	На 6 дБ выше приемочных уровней в течение 2 минут
Вибрация	На 6 дБ выше приемочных уровней в течение 3 минут по каждой из 3 осей	На 6 дБ выше приемочных уровней в течение 2 минут по каждой из 3 осей
Термовакuum (табл. 5, 6)	На 10 °С выше температуры приемочных уровней для 6 циклов	На 10 °С выше температуры приемочных уровней для 13 циклов
Термовакuum и термоцикл (табл. 5, 6)	На 10 °С выше температуры приемочных уровней для 25 термовакuumных циклов и 53 термоциклов	На 10 °С выше температуры приемочных уровней для 3 термовакuumных циклов и 10 термоциклов
Статистическая нагрузка	В 1,25 раз выше предельной нагрузки для беспилотного полета или в 1,4 раз выше предельной нагрузки для пилотируемого полета на срок, близкий к фактическому времени летной нагрузки	Так же, как и для составной части, но только проверенные на уровне подсистемы

Рис. 4. Коэффициенты запаса при квалификационных испытаниях по НТД США [7, с. 31]

Таблица 2. Сводная таблица коэффициентов запасов при вибрационных испытаниях

Коэффициент запаса при испытаниях относительно эксплуатационных уровней		НТД США	НТД ЕКА	Рассматриваемая методика
Квалификационные или конструкторские испытания	По спектральной плотности виброускорения	4	2	1,499
	По эффективному значению виброускорения	2	1,5	1,22
Разработочные или граничные испытания	По спектральной плотности виброускорения	определяются разработчиком, превышают квалификационные		4,15
	По эффективному значению виброускорения			2,04

Сравнение режимов испытаний согласно предложенной методике с установленными в НТД РФ и зарубежных стран

Сравнение режимов при вибрационных испытаниях по нормативно-технической документации США (рис. 4) [7, с. 31], Европейского космического агентства (рис. 5) [3, с. 48] и режимов согласно предлагаемой методике приведено в табл. 2.

Из таблицы видно, что уровни вибрационных воздействий при квалификационных испытаниях

США близки к предлагаемым для этапа граничных испытаний. Уровни воздействий при квалификационных испытаниях ЕКА выше, чем предлагаемые уровни при конструкторских испытаниях.

Таким образом, предлагаемая методика предполагает проведение вибрационных испытаний с коэффициентами запаса, близкими к применяемым в иностранной НТД. Однако, в отличие упомянутых нормативных документов, предлагаемая методика позволяет для конкретных типов приборов в зависимости от значения коэффициента вариации их конструктивных элементов устанавливать уровни воздействий как больше, так и меньше,

№	Вид испытания	Уровни воздействий	Продолжительность	Количество воздействий	Примечания
1	Срок службы	Ожидаемая обстановка и максимальная рабочая нагрузка	Для длительности и циклов: – для механизмов применяется стандарт ECSS-E-ST-33-01 (таблица 4-3); – для батарей применяется стандарт ECSS-E-ST-20	Одно испытание	
2	Статическая нагрузка	$KQ \times$ допустимая нагрузка. Поправочный коэффициент KQ представлен в стандарте ECSS-E-ST-32-10, пункт 4.3.1.	Требуется для записи данных (10 секунд минимум)	Худшие случаи комбинированной нагрузки	Худшие случаи комбинированной нагрузки определяются путем анализа
3	Вращение	$\sqrt{KQ} \times$ скорость вращения. Поправочный коэффициент KQ представлен в стандарте ECSS-E-ST-32-10	Согласно проекту	Одно испытание	
4	Переходный режим	$KQ \times$ допустимая нагрузка. Поправочный коэффициент KQ представлен в стандарте ECSS-E-ST-32-10, пункт 4.3.1	Требуется для записи данных	В соответствии с указанными требованиями	
5	Случайная вибрация	Максимальный ожидаемый спектр +3 дБ для значений спектральной плотности мощности. Если пределы, превышающие 3 дБ, указаны компетентным органом по пусковым установкам, то они применяются	Две минуты	По каждой из трех ортогональных осей	
6	Акустическое	Максимальный ожидаемый акустический спектр +3 дБ. Если пределы, превышающие 3 дБ, указаны компетентным органом по пусковым установкам, то они применяются	Две минуты	Одно испытание	
7	Гармонические колебания	$KQ \times$ предельный спектр нагрузки. Поправочный коэффициент KQ представлен в стандарте ECSS-E-ST-32-10, пункт 4.3.1	Развертка при 2 окт/мин, 5 Гц–140 Гц	По каждой из трех ортогональных осей	

Рис. 5. Коэффициенты запаса при квалификационных испытаниях по НТД ЕКА [3, с. 48]

обеспечивая при этом неизменную достоверность выявления конструктивных дефектов.

Заключение

Предлагаемая методика вибрационных испытаний показала свою эффективность, т. к. за последнее десятилетие аппаратура разработки АО «Российские космические системы» не имеет ни одного дефекта, связанного с механической прочностью по результатам выведения. Одновременно с этим при проведении НЭО более трети конструктивных дефектов выявляется на механических испытаниях. Причем это конструктивные дефекты, которые невозможно оценить методами моделирования (поскольку в мировой практике в прочностные модели никогда не закладываются все проводники, выводы микросхем, мастики для приклейки реле и т. п.), а проявление этих дефектов провоцируется незначительными отклонениями свойств материалов или техпроцессов. Выявление таких слабых мест конструкции позволяет до изготовления летного образца внести коррекцию в КД, предотвращая возможные ошибки персонала.

Предложенная методика устанавливает уровни воздействия при испытаниях на стационарную вибрацию в зависимости от характерных для применяемых в приборах конструктивных решений разбросов коэффициента динамичности. Получаемые для конструктивных решений, характерных для аппаратуры разработки АО «Российские космические системы», уровни испытаний сопоставимы с требованиями нормативных документов Европейского космического агентства и NASA. Предлагаемая методика позволяет более гибко подходить к подбору уровней вибрационных испытаний, поскольку если по результатам набора статистики для определенных типовых конструктивных решений будет показан более низкий коэффициент вариации коэффициента динамичности, уровни вибрационных воздействий при испытаниях можно снизить по формуле (3) без снижения качества. И напротив, если для каких-то типов приборов характерны более высокие разбросы коэффициента динамичности, методика позволяет определить уровни воздействий при виброиспытаниях для достижения требуемой достоверности выявления конструктивных дефектов.

Применение данной методики особенно актуально в условиях унификации бортовой аппаратуры, когда число конструктивных решений сокращается, а за счет высокой серийности появляется возможность набрать статистические данные для оценки V_Q .

Положения предлагаемой методики следует учитывать всем организациям, создающим БРА КА, при определении объемов вибрационных испытаний, поскольку существующая НД не учитывает изложенные особенности бортовых радиоэлектронных приборов космических аппаратов в условиях снижения числа отработочных образцов, произошедшего за последние четыре десятилетия.

Список литературы

1. *Введенский Н. Ю., Пустобаев М. В.* Анализ отработки космической техники на механические воздействия в США, ЕС и РФ // Вопросы электромеханики, 2012, т. 130. С. 19–26.
2. *Kern D. L., Gordon S. A., Scharton T. D.* NASA handbook for spacecraft structural dynamics testing // Proceedings of the European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing 2005 (ESA SP-581). May 2005, Noordwijk, Netherlands. 11 p.
3. ECSS-E-ST-10-03C. Space engineering. Testing. 1 June 2012. 128 p. // European Cooperation for Space Standardization <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-10-03c-testing/> (Дата обращения 09.11.2020).
4. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти томах / Гл. ред. В. Н. Челомей. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / Под ред. Ф. М. Диментберга и К. С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1980. 544 с.
5. *Wijker J.* Random vibrations in spacecraft structures design. Theory and applications. Dordrecht: Springer, 2009. 516 p.
6. *Печинкин А. В., Тескин О. И., Цветкова Г. М. и др.* Теория вероятностей: учебник для вузов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 456 с.
7. MIL-STD-1540C. Military standard. Test requirements for launch, upper-stage and space vehicles. 15 September 1994. 126 p. http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1500-1599/MIL-STD-1540C_11337 (Дата обращения 09.11.2020).