

УДК: 629.7.018.4

DOI: 10.53816/20753608_2022_4_111

**СПОСОБ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВИБРАЦИИ
НА ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ
ДВУМЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ ВИБРОСТЕНДАМИ**

**METHOD OF VIBRATION TESTING OF AIRCRAFT WITH A TAIL UNIT
WITH TWO SIMULTANEOUSLY OPERATING VIBRATION STANDS**

По представлению чл.-корр. РАРАН Е.А. Хмельникова

А.А. Козлов, А.В. Проскурин

РФЯЦ – ВНИИТФ

A.A. Kozlov, A.V. Proskurin

В статье рассматривается задача разработки метода вибрационных испытаний летательных аппаратов в виде тел вращения двумя одновременно соосно работающими вибростендами. Для реализации нелинейного характера распространения вибрации по длине корпуса летательного аппарата применяются широко распространенные электродинамические вибростенды, каждый из которых управляется независимой цифровой системой воспроизведения и создания случайной вибрации. С целью нагружения двумя одновременно работающими вибростендами объекта испытаний разработан способ управления широкополосной случайной вибрацией, который позволяет создавать различный спектральный состав и уровень ускорения в двух частях конструкции объекта. **Ключевые слова:** объект испытаний, летательный аппарат, электродинамический вибростенд, широкополосная случайная вибрация, спектральный состав ускорения, среднеквадратическое значение ускорения.

The article considers the problem of developing method of vibration testing of aircraft in the form of bodies of rotational with a tail unit with two simultaneously operating vibration stands. To realize the nonlinear nature of vibration propagation along the aircraft, widespread electrodynamic vibration stands are used, each of which is controlled by an independent digital system for reproducing and creating random vibration. In order to load the test object with two simultaneously operating vibration stands, a method for controlling broadband random vibration has been developed, which allows creating different spectral composition and acceleration level in two parts of the object structure.

Keywords: test object, aircraft, electrodynamic vibration stand, broadband random vibration, spectral composition of acceleration, RMS acceleration level.

Механические конструкции (именуемые в дальнейшем изделия) представляют собой тела вращения с длиной в диапазоне от двух до нескольких метров, являются одной из разновидностей форм летательного аппарата, находят широкое применение в различных областях в авиа-

ционной и ракетно-космической техники [1–3]. При эксплуатации (транспортирование изделия носителем на подвеске к месту его применения или полет по траектории после отделения от носителя) такие конструкции подвергаются длительному силовому воздействию окружающей

среды, в том числе воздействию пульсаций давления набегающего потока воздуха, в результате чего имеет место его виброн нагружение с широким спектром частот от десятков герц до десятков килогерц [4], различными уровнями распределения ускорения по длине изделия, с нелинейным увеличением уровня ускорения от наконечника к хвостовой части и с различным спектральным составом среднего квадратического значения ускорения (СКЗу) в разных частях корпуса изделия.

Традиционно задача вибрационного нагружения изделий с распределением вибрации по корпусу решается путем виброн нагружений на одном мощном электродинамическом стенде (рис. 1) в 2 этапа:

1 этап — изделие закрепляется в центре масс изделия, тем самым нагружаются требуемым уровнем вибрации сборочные единицы в районе центра масс;

2 этап (вариант 1) — изделие закрепляется за хвостовую часть в районе точек 2У или 3У для нагружения хвостовой части изделия;

2 этап (вариант 2) — от изделия отстыковывается хвостовая часть и подвергается автономным нагружениям.

По схеме испытаний, показанной на рис. 1, вибрация корпуса и узлов успешно возбуждается только в области закрепления корпуса объекта на вибростенде [5, 6], в остальных частях наблюдаются существенные отличия реализованного уровня СКЗу от натурального, в частности происходит недогружение (в 1,5–3 раза меньше) требуемым уровнем вибрации хвостовой части. Для обеспечения нагружения требуемым уровнем

вибрации хвостовой части приходится идти на вынужденную меру — разделять изделие на отсеки и проводить их автономные нагружения или изменять место присоединения вибростенда для нагружений требуемым уровнем вибрации остальных частей изделия. Данная (одностендовая) методика виброн нагружений изделия несовершенна, и неоднократно предпринимались попытки ее улучшения с целью получения распределения вибрации по корпусу изделия, близкого к натурному распределению, поиск оптимального присоединения вибростенда к корпусу изделия не привел к положительному результату.

В практике виброиспытаний изделий наиболее важной и сложной задачей является реализация такого способа закрепления на вибростенде, при котором вибрация по длине корпуса соответствовала бы натурной. Для создания и управления вибрацией изделия с распределением натурной вибрации по корпусу предлагается создавать вибрационное состояние испытуемого изделия двумя вибростендами, направления колебаний которых соосны. Первый стенд предлагается закреплять в районе центра масс изделия, второй — за торец хвостовой части по схеме испытаний, показанной на рис. 2. Известно, что в промышленности двухстендовая схема испытаний применяется при вибрационных испытаниях длинномерных объектов, при этом может использоваться различное математическое обеспечение для автоматизации испытаний [6–9].

На рис. 2 показан вибростенд № 1, закрепленный к объекту в районе центра масс, вибростенд № 2 закреплен на торце хвостовой части. Б1У, Б2У — условное обозначение контрольных

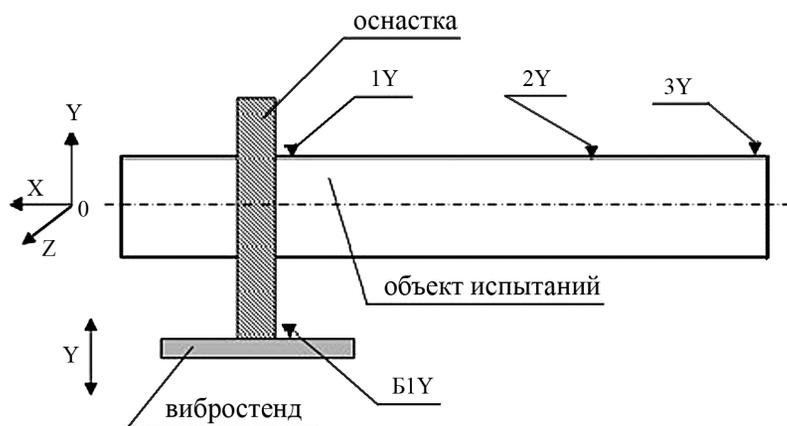


Рис. 1. Схема испытаний изделия с применением одного вибростенда

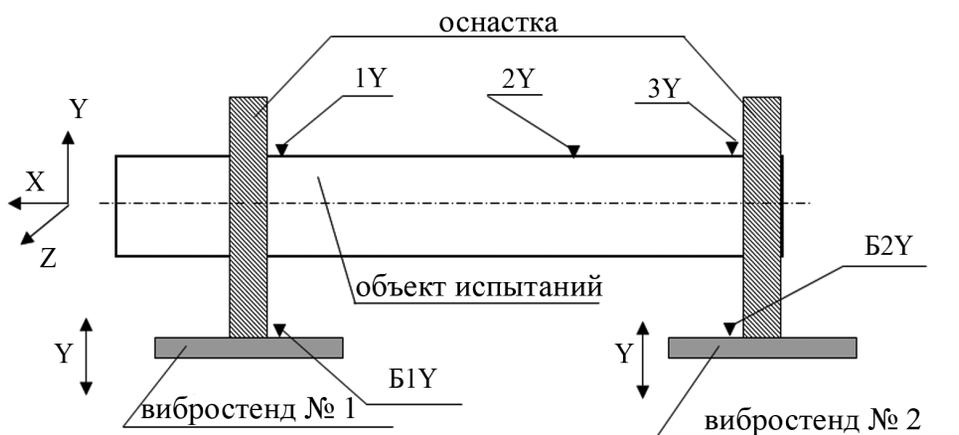


Рис. 2. Схема испытаний изделия на двух виброустановках

датчиков ускорения, расположенных на столах вибростендов; 1Y, 2Y, 3Y — условное обозначение измерительных датчиков ускорения, расположенных по длине корпуса объекта; ось Y — направление работы вибростендов. Схема рис. 2 предусматривает одновременное нагружение всей конструкции широкополосной случайной вибрацией (ШСВ) работающими вибростендами № 1 и № 2. Вибростенд № 2 может быть оснащен приспособлением для его перемещения в горизонтальной плоскости [10], что позволяет оперативно менять место его присоединения в хвостовой части объекта, а также расширяет возможности испытаний объектов с различной протяженностью корпуса. Каждый вибростенд управляется отдельным специализированным цифровым процессором. При испытаниях по схеме на рис. 2 на воздействие широкополосной случайной вибрации задают СКЗу и спектральную плотность ускорения (в диапазоне 20–2000 Гц) в двух сечениях корпуса. Данный способ испытания на воздействие ШСВ предусматривает одновременное возбуждение всех резонансных частот объекта. Правильное воспроизведение вибрации связано с трудностями, обусловленными искажающим влиянием средств возбуждения вибрации (вибростенды № 1 и № 2) с жестко закрепленным на них изделием (объектом испытаний). Поэтому перед проведением испытаний проводились исследования взаимного влияния вибростендов друг на друга, путем исследования передаточных функций.

Для реализации двухстендового способа испытаний разработан порядок, с применением

способа формирования спектров [11], выполнения следующих работ:

1) нагружение объекта тестовым вибрационным воздействием (незначительного уровня) типа «белый шум» в диапазоне частот 20–2000 Гц, возбуждаемого на столах вибростендами в точках Б1Y и Б2Y;

2) исследование взаимовлияния (определение коэффициента корреляции) вибростендов друг на друга.

При малом уровне вибрации (СКЗу ШСВ в диапазоне от 20 до 2000 Гц), задаваемом одновременно двумя вибростендами (в точках Б1Y и Б2Y), были зарегистрированы процессы на столах вибростендов, по данным процессам был определен коэффициент корреляции, представленный на рис. 3, между двумя столами вибростендов через установленный на них объект испытаний.

Если совместно рассматривать два случайных процесса (две случайные величины X_1 и X_2) между ними может существовать, либо не существовать статистическая связь. Отсутствие такой связи означает [12], что плотность вероятности одной случайной величины не зависит от того, какое значение принимает другая случайная величина. Мерой линейной статистической связи между случайными величинами является коэффициент корреляции:

$$\gamma_{12} = \frac{M\{X_1 X_2\} - M\{X_1\}M\{X_2\}}{\sqrt{\sigma_{X_1}^2 \sigma_{X_2}^2}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{X_1}^2$, $\sigma_{X_2}^2$ — дисперсии случайных процессов X_1 и X_2 , соответственно, $M\{X_1 X_2\}$ — мате-

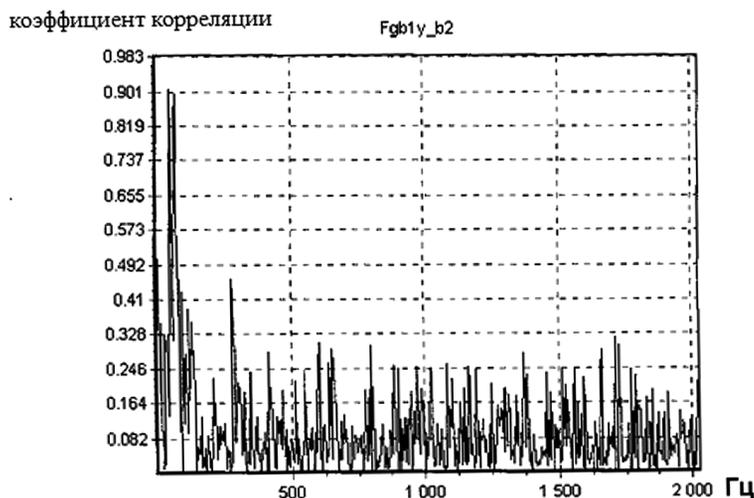


Рис. 3. Коэффициент корреляции между точками Б1У и Б2У

математическое ожидание произведения случайных процессов X_1 и X_2 , $M\{X_1\}$ и $M\{X_2\}$ — математическое ожидание случайных процессов X_1 и X_2 , соответственно. В теории, равенство коэффициента корреляции нулю свидетельствует об отсутствии линейной статистической связи между случайными величинами, при этом говорят об их некоррелированности, на практике же достичь равенства нулю коэффициента корреляции (при нагружении по схеме на рис. 2) невозможно, можно только судить о степени взаимовлияния двух случайных процессов, создаваемых вибростендами. По графику рис. 3 видно, что наиболее явное влияние двух вибростендов друг на друга проявляется в диапазоне частот 50–60 Гц, при этом на других частотах взаимовлияние пренебрежимо мало. Присутствие значительного коэффициента на частотах 50–60 Гц объясняется тем, что все испытательное оборудование (приборы, вибростенды и пр.) запитано от общей сети 380 В переменного тока с частотой 50 Гц;

3) оценка передаточных функций между измерительными точками (1У, 3У), в которых необходимо воспроизвести требуемый уровень СКЗу с заданным спектральным составом и контрольными точками, расположенными на столах вибростендов;

4) проведение расчета спектров СКЗу, задаваемых каждым вибростендом;

5) кратковременное вибронгружение объекта и уточнение передаточных функций;

6) расчет уточненных значений спектров СКЗу, которые следует воспроизвести на столах вибростендов;

7) проведение нагружений объекта в течение требуемого промежутка времени.

При реализации вибростендами двухстендовым способом реализуется следующее распределение СКЗу по длине изделия, как показано на рис. 4, которое представлено в сравнении с натурным распределением и распределением, полученным при нагружении по схеме рис. 1 (одностендовым способом).

По данным рис. 4 очевидно, что включение в испытательную схему (рис. 1) вибростенда № 2 (дополнительного источника вибрации рис. 2) положительно повлияло на распределение вибрации по длине изделия, ее уровень на хвостовой части стал более приближенным к натурному распределению. Реализация спектров в точках 1У и 3У приведена на рис. 5, 6, соответственно.

Анализируя результаты, показанные на рис. 4–6, можно сделать вывод, что применение способа воспроизведения вибрации двумя электродинамическими вибростендами является более предпочтительным в использовании для проведения вибрационных испытаний длинномерных изделий на вибрационное воздействие, имитирующее натурную вибрацию при применении.

Преимущества представленного двухстендового способа в сравнении с традиционным

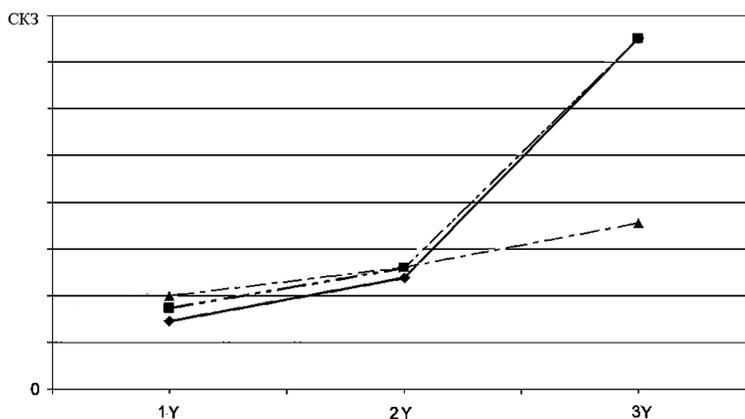


Рис. 4. Результаты сравнения СКЗу по длине объекта (в местах установки датчиков с маркировками 1Y, 2Y, 3Y), где линия — · — — распределение СКЗу, реализованное традиционным способом с применением вибростенда № 1 (схема рис. 1); линия — · · — — распределение СКЗу, реализованное двухстендовым способом нагружения с применением вибростендов № 1 и № 2 (схема рис. 2); линия — — — распределение, полученное в натуральных условиях применения объекта

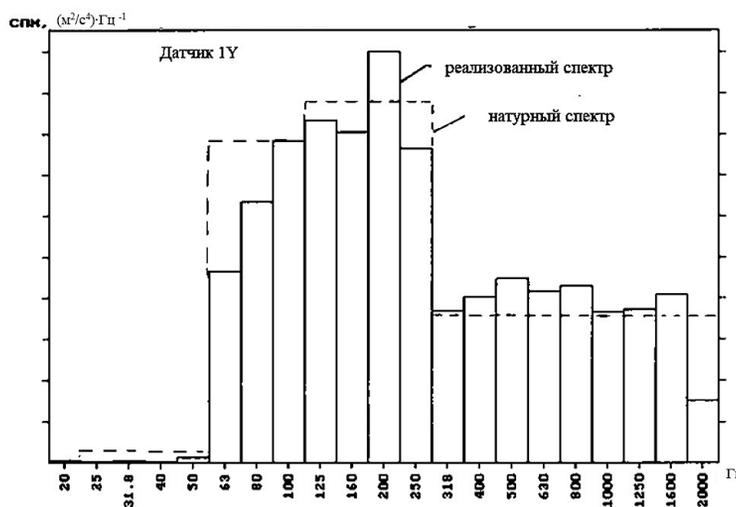


Рис. 5. Сравнение в точке 1Y натурального и реализованного двухстендовым способом спектров

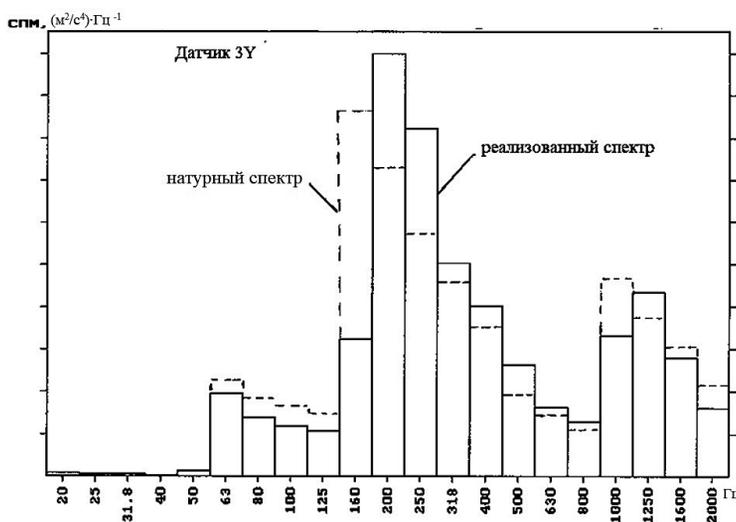


Рис. 6. Сравнение в точке 3Y натурального и реализованного двухстендовым способом спектров

(одностендовым) способом заключаются в следующем:

– возможность проведения испытаний конструкции изделия целиком (без расстыковки и проведения испытаний отсеченных частей по отдельности) с формированием заданного спектрального состава ускорения одновременно в двух частях;

– реализация распределения вибрации по корпусу объекта, более приближенного к натурному распределению;

– возможность использования для задания режимов нагружения двух специализированных систем управления с независимыми каналами связи.

В конечном итоге применение двухстендового способа вибрационных нагружений длиннономерных изделий на вибропрочность и виброустойчивость приводит к повышению качества их наземной лабораторно-конструкторской отработки.

Литература

1. Александровская Л.Н., Круглов В.И., Кузнецов А.Г. и др. Технические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем: учебное пособие. — М.: Издательство «Логос», 2003. 736 с.

2. Челомей В.Н. (пред.) и др. Вибрации в технике. Справочник в 6 томах. — М.: Машиностроение. 1981. 492 с.

3. Кораблев Б.А., Шаронов А.В. Информационное обеспечение испытаний зенитных управляемых ракет // Приложение к журналу «Информационные технологии». 2002. № 2. С. 10–16.

4. Карбовский В.А. Вибронагружение тела вращения с оперением. — Снежинск: Издательство «РФЯЦ-ВНИИТФ». 2009. 116 с.

5. Остроменский П.И., Волошин А.В., Сырецкий Г.А., Эдвабник В.Г. Способ виброиспытаний изделий. Патент на изобретение RUS 2729175. 02.10.2019.

6. Остроменский П.И., Волошин А.В., Эдвабник В.Г. Способ виброиспытаний изделий и устройство для его осуществления. Патент на изобретение RUS 2729980 от 18.02.2020.

7. Трусов В.Н., Шевченко А.Ф. Способ вибрационных испытаний авиационных управляемых ракет в сборе на прочность при воздействии широкополосной случайной вибрации. Патент на изобретение RUS 2731019 от 24.12.2019.

8. Гетманов А.Г., Дехтяренко И.И., Мандровский-Соколов Б.Ю. и др. // Библиотека по автоматике. Выпуск 579. Автоматическое управление вибрационными испытаниями. — М.: «Энергия». 1978. 112 с.

9. Туник А.А., Мандровский-Соколов Б.Ю., Пойда В.Н. и др. Цифровые и гибридные способы управления характеристиками векторных случайных процессов // Журнал «Кибернетика и вычислительная техника». — Киев: Издательство «Наукова думка». 1973. Выпуск 20. С. 110–117.

10. Козлов А.А., Крутиков А.В., Рубашин А.В. Устройство перемещения грузов. Патент на изобретение RUS 184547 от 22.06.2018.

11. Козлов А.А., Крутиков А.В., Старунский В.А. Способ формирования спектров случайной вибрации. Патент на изобретение RUS 2672529 от 18.12.2017.

12. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. 3-е издание. — Санкт-Петербург: «БХВ-Петербург». 2011. 765 с.