

## О ВИБРОИСПЫТАНИЯХ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кукушкин Е. В., Худоногов В. В.

ОАО «Красноярский машиностроительный завод»,  
г. Красноярск, Красноярский край, Россия

Рассматриваем основные вопросы, связанные с виброиспытаниями сложных технических систем. Моделирование как метод исследования сложных технических систем.

В условиях жесткой конкуренции продвижение космической техники на мировой рынок диктует новый уровень требований и подходов к созданию сложных технических объектов ракетно-космической промышленности.

Первоначально методы математического моделирования получили широкое распространение при решении несложных задач. Однако с появлением сложных технических систем роль моделирования резко возрастает. Это объясняется особенностями исследуемых объектов, вытекающими из сложности функциональных связей между параметрами системы и его составными элементами. Параметры системы при этом изменяются в условиях внешней среды и оцениваемыми показателями [1].

Моделирование, как метод исследований, широко применяется не только при подготовке технических предложений и формировании технических требований к создаваемому объекту испытаний, но и на этапах эскизного и технического проектирования, в составе которых предполагается их использование. На этапе различных видов натурных испытаний, определяющих характеристики объектов, их отработанность и возможность перехода от данного этапа испытаний к последующему или служащих основанием для передачи объектов в серийное производство.

Существующие методы виброиспытаний сложных технических систем требуют развития и совершенствования в направлении повышения эффективности. Но в практике виброиспытаний необходимо учитывать, что в реальных условиях измерение сигналов производится на фоне помех, создаваемых неконтролируемыми источниками шума и имеющих вид широкополосных и узкополосных процессов. В связи с этим необходимо учитывать и оценивать указанные помехи на величины оценок статических характеристик задаваемых и регистрируемых при проведении виброиспытаний изделий случайных вибропроцессов. Одним из наиболее актуальных методов решения данной задачи является привлечение математического моделирования. Которое позволит из минимального объема экспериментальных данных, получить необходимый результат в ограниченное время.

Сложность современных испытываемых систем и комплексов, средств, обеспечивающих экспериментальную отработку объектов, организационной структуры экспериментов и связанные с этим трудности перестройки в процессе их реализации делают необходимым проведение ряда мероприятий по повышению эффективности этапа создания сложных технических систем [1-2].

При увеличении объема моделирования позволяет в 2 раза сократить число натурных испытаний и экспериментов [3].

Одной из особенностей сложных систем натурального эксперимента является то, что при их реализации не всегда возможно провести необходимый объем экспериментальных исследований функционирования объекта в целом или отдельных его систем и подсистем в реальных условиях применения. В связи с этим, в натурных испытаниях приходится создавать некоторую имитационную обстановку. В данном

случае полнота и достоверность получаемого экспериментального материала может быть гарантирована при привлечении к исследованиям методов моделирования.

Вне зависимости от вида моделирования и помимо работ, связанных с постановкой задачи, выбором критериев оценки и методов оптимизации, реализации моделей в виде программ или схем моделирования, их отладки и проведения моделирования, важнейшей задачей является разработка моделей, объективно отражающих процессы, подлежащие изучению.

С помощью процессов моделирования можно воспроизводить работу ряда систем, практически не прибегая к натурным испытаниям, оптимизировать их характеристики, осуществлять прогнозы качества. Основное назначение моделирования это выбор оптимальной стратегии поиска наилучшего из возможных вариантов. Выбранная в процессе моделирования стратегия исследования будет оптимальной для совокупности рассматриваемых условий. Но вероятность оказания неоптимальной имеет место, если в ходе исследований раскрываются новые свойства системы. Решением данной проблемы может быть изменение направления поиска.

В процессе моделирования может быть достигнута цель испытаний благодаря проведенной отработке, а конструкция объекта испытаний может оказаться неоптимальной. Однако при моделировании намеченная цель стратегии поиска будет решать поставленную задачу уже при облегченной конструкции объекта испытаний. С учётом этого моделирование физических процессов позволяет решать задачи двух планов:

- определять пути решения задач при известном составе факторов, влияющих на работу системы;

- благодаря выявлению новых свойств и особенностей исследуемых процессов осуществлять новую стратегию поиска.

В практике наземной отработки изделий ракетно-космической техники и их составных частей используются следующие виды испытаний: стендовые или лабораторные, полунатурные и натурные в условиях эксплуатации.

Повышение эффективности виброиспытаний изделий нацелено на повышение информационной насыщенности и достоверности проводимых испытаний, что обеспечивает всестороннюю и объективную оценку соответствия вибростойкости и вибропрочности объектов испытаний предъявляемым к ним требованиям [1-7].

Решению проблем повышения эффективности лабораторно-стендовых испытаний изделий ракетно-космической техники посвящено много основополагающих трудов отечественных и зарубежных учёных. Однако для достижения соответствия современным мировым требованиям существующие методы и средства проведения виброиспытаний сложных технологических систем требует дальнейшего развития и совершенствования.

Существующие методы виброиспытаний сложных технических систем требуют своего дальнейшего развития и совершенствования в направлении повышения их эффективности с применением методов математического моделирования, что, в конечном счете, нацелено на повышение достоверности оценки соответствия вибростойкости объектов испытаний предъявляемым к ним требованиям и достижение мирового уровня их надежности и безопасности.

Важной характеристикой испытаний на воздействие динамических нагрузок является уровень точности испытаний, который может быть выражен степенью соответствия действительной нагрузки, воспринимаемой объектом испытания, и измеряемой нагрузке, которая лишь считается действительной и учитывается при

обработке и анализе полученных результатов. Такой уровень точности определяется суммой ошибок, допущенных при измерениях величин, характеризующих условия данного испытания и зависящих от степени совершенства и тщательности калибровки измерительных каналов, погрешностей изготовления испытательного стенда, субъективных особенностей испытателя и т. д. К нарушению динамического нагружения объекта испытания приводят и другие дополнительные колебательные процессы, возникающие в результате недостаточной жесткости и массы силового каркаса стенда и фундамента, на который он установлен.

Одной из основных научно-технических проблем разработки методов и средств виброиспытаний является формирование принципов нормирования и оценки точностных характеристик воздействий, имитирующих эксплуатационные факторы в вибрационных испытательных стендах и комплексах.

Случайная вибрация является основным видом испытательного воздействия при вибропрочностных испытаниях изделий. Трудность установления и обеспечения точностных характеристик при виброиспытаниях объясняется сложностью математического аппарата, используемого для задания случайной вибрации, сложностью алгоритмов обработки и анализа информации для определения действительных значений параметров случайной вибрации для закрепления объекта испытания или непосредственно на самом объекте испытания. Испытательный вибрационный стенд при этом является имитатором тех случайных вибраций, которые воздействуют на летательный аппарат в процессе эксплуатации [5]. Вибрационные процессы, протекающие в сложных технических системах связаны между собой. Один процесс может порождать другой. Например, пульсации потока в газовых и жидкостных магистралях пневмогидравлических систем изделия вызывают акустический шум и колебания элементов конструкции. Анализ связи таких процессов позволяет решать практические задачи доводки сложных технических систем для достижения требуемых характеристик их качества и надежности.

Поскольку параметры вибрации, воздействующие на всех этапах жизненного цикла сложных технических систем, имеют шумовой случайный характер, то важную роль в их спектральном анализе имеют методы математической статистики. Спектральная оценка, получаемая по конечной записи данных, характеризует лишь некоторое предположение относительно той истинной спектральной функции, которая была бы получена при использовании записи данных бесконечной длины. Повышение точности оценок связано с решением целого ряда проблем в области современного спектрального оценивания [8-12].

Согласно [8, 9] для определения случайных вибрационных процессов необходима связь между спектральной плотностью и корреляционной функцией, которую обеспечивает преобразование Фурье (1):

$$\begin{aligned}
 G_x^*(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} R_x^*(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^*(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau \\
 R_x^*(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} G_x^*(f) e^{i2\pi f \tau} df = \int_{-\infty}^{\infty} G_x^*(f) \cos 2\pi f \tau df
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Используя данное преобразование (1), определим оценку спектральной плотности по оценке корреляционной функции:

$$G_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau, \quad \delta f \delta \tau.
 \tag{2}$$

Согласно [8] отметим, что спектральная плотность  $G_x(f)$  непрерывного случайного процесса является четной функцией частоты  $f$  и определяется в интервале частот  $-\infty \leq f \leq \infty$ . Учитывая четность функции достаточно вычислить оценку спектральной плотности только для положительных частот.

В заключении необходимо отметить, что исследование широкополосных и узкополосных процессов, имеют свою специфику, что связано как с самим характером этих процессов, так и с методами их расчёта. Незнание ряда тонких моментов может привести к ложной трактовке получаемых результатов. Это касается и искажения вида корреляционной функции, особенно когда она рассчитывается на ЭВМ с помощью обратного преобразования Фурье. Всё это приводит к снижению достоверности информации, получаемой при проведении виброиспытаний изделий, что в итоге, негативно отражается на достоверности оценки соответствия вибростойкости и вибропрочности объектов испытаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматическое управление вибрационными испытаниями / А. Г. Гетманов, П. И. Дяхтяренко, Б. Ю. Мандовский-Соколов и др. – М.: Энергия, 1978.
2. Методы обработки научных и народно-хозяйственных ракетно-космических комплексов. / Под общей ред. В. Ф. Грибанова. – М.: Машиностроение, 1995.
3. Малинский В. Д., Бегларян В. Х., Дубицкий Л. Г. Испытания аппаратуры и средств измерений на воздействие внешних факторов. Справочник под ред. к.т.н., доц. В. Д. Малинского. – М.: Машиностроение, 1993.
4. Вибрация в технике. Справочник / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1981.
5. Испытательная техника. Справочник в двух кн. / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1982.
6. ГОСТ ISO 9000-2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.
7. ГОСТ ISO 9001-2011. Системы менеджмента качества. Требования.
8. Шолом С. А., Александровская Л. Н. Разработка и оценка эффективности алгоритма расчёта статических характеристик случайных вибропроцессов в линейных одномерных и многомерных динамических системах при воздействии широкополосных и узкополосных помех / Тезисы докладов Международной молодежной научной конференции «XXVII Гагаринские чтения» - М.: МАТИ, 2001.
9. Виленкин С. Я. Статическая обработка результатов исследований случайных функций. – М.: Энергия, 1979.
10. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Т. 1 – М.: Мир, 1971.
11. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Т. 2 – М.: Мир, 1972.
12. Жовинский А. Н., Жовинский В. Н. Инженерный экспресс анализ случайных процессов. – М.: Воениздат, 1977.