

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 51-74 ББК30в6 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.43.47

**Виртуальные механические испытания объектов
ракетно-космической техники
с использованием цифровых двойников**

С. А. Яхутин, *Yahutin_SA@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Виртуальные механические испытания играют все большую роль в этапе наземной экспериментальной отработки подтверждения стойкости изделий РКТ к механическим воздействиям. Важным показателем качества виртуального моделирования, на основе которого принимаются конструкторские решения, является точность полученных результатов, оценить которую можно путем верификации с результатами натурных испытаний.

В статье предлагается вариант модификации методов векторов и деревьев состояний с использованием нечеткой меры в виде функций принадлежности как степень истинности понятия «параметр по результатам измерений в допуске» или «образец признается работоспособным».

Предложена методика проведения виртуальных механических испытаний изделий РКТ на цифровых двойниках, позволяющая получить количественную оценку достоверности обобщенного заключения о состоянии испытываемого изделия в виде функции принадлежности, отражающей реальную степень близости оценки к его истинному состоянию и реализованной в виде соответствующей программы.

Ключевые слова: цифровой двойник, виртуальные испытания, метод нечеткого контроля, механические воздействия, моделирование, функция принадлежности

**Virtual Mechanical Testing
of Rocket and Space Technology Objects
Using Digital Twins**

S. A. Yakhutin, *Yahutin_SA@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. Virtual mechanical tests play an increasing role in the stage of ground experimental testing to prove the resistance of rocket and space technology products to mechanical impacts. An important indicator of virtual simulation quality, on the basis of which design decisions are made, is the accuracy of the results obtained, which can be estimated by verification with the results of full-scale tests.

The paper proposes a variant of modifying the methods of vectors and state trees using fuzzy measure in the form of membership functions as a degree of truth of the concept “parameter by measurement results in tolerance” or “sample is recognized to be operable”.

A methodology for virtual mechanical testing of rocket and space technology products on digital twins is proposed, which allows obtaining a quantitative assessment of the reliability of the generalized conclusion about the condition of the tested product in the form of a membership function reflecting the real degree of closeness of the assessment to its true state and implemented in the form of an appropriate program.

Keywords: digital twin, virtual tests, fuzzy control method, mechanical impacts, simulation, membership function

В настоящее время виртуальные испытания, проводимые на этапе разработки конструкторской документации (КД), стали важным инструментом и источником инженерной информации, которые позволяют избежать серьезных ошибок во время проектирования.

Объектами для виртуальных испытаний служат цифровые двойники. Цифровой двойник — виртуальный прототип реального физического объекта, с повторением его свойств и характеристик.

Достоверность результатов, получаемых при помощи виртуальных испытаний, зависит от нескольких факторов, в том числе:

- применяемые методики;
- наличие результатов натурных испытаний аналогичных конструкций для возможности проведения верификации и сравнения результатов;
- точность построения расчетной сетки;
- степень математических упрощений;
- квалификация специалиста, проводящего расчет.

Виртуальные испытания будут использованы в разработке ряда методических подходов, позволяющих получать результаты высокого уровня достоверности и развитие программно-математического комплекса; они способны заменить отдельные виды натурных механических испытаний.

При проведении наземной экспериментальной отработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры основной целью является определение ее работоспособности, в частности электрорадиоизделий (ЭРИ), входящих в ее состав.

Один из проблемных вопросов виртуальных механических испытаний, а именно отсутствие разработанных методик оценки работоспособности ЭРИ и аппаратуры в целом, является научно-технической задачей, требующей отдельного рассмотрения.

Виртуальные механические испытания помогают определить физическую целостность конструкции и напряжения, возникающие во время воздействия механических нагрузок. Важный и даже ключевой вывод о работоспособности изделия в заключении виртуального механического испытания мы не получаем. Для решения этой проблемы предназначена методика определения работоспособности радиоэлектронной аппаратуры, основанная на печатных методах контроля.

Учитывая отсутствие достаточной статистики, возможным вариантом является применение методов векторов и деревьев состояний с использованием нечетких методов контроля [4, 5].

Предлагается вариант модификации указанных методов с использованием нечеткой меры в виде функций принадлежности $\mu(x)$ [6], где x — измеряемый параметр, как степень истинности понятия «параметр по результатам измерений в допуске» или «образец признается работоспособным». В этом случае при проведении измерений может быть получена оценка степени истинности понятия «параметр по результатам измерений в допуске» путем преобразования результата измерения в соответствующее значение функции принадлежности $\mu(x) = \mu(X_n, X_v, X_{изм})$, где X_n , X_v — нижняя и верхняя границы допуска, $X_{изм}$ — измеренное значение параметра X [7, 8]. На основе указанных методов предлагается методика проведения виртуальных механических испытаний на цифровых двойниках изделий РКТ с использованием нечетких методов контроля, позволяющая получить количественную оценку достоверности обобщенного заключения о состоянии испытываемого изделия в виде функции принадлежности, отражающей реальную степень близости оценки к его истинному состоянию и реализованной в виде соответствующей программы (рис. 1).

В первом столбце перечислены все ЭРИ прибора, по которому имеются данные виртуальных механических испытаний. Далее для каждой пространственной оси X , Y , Z , соответственно, определены максимально допустимая спектральная плотность на элемент по техническим условиям, максимальная расчетная спектральная плотность, максимально допустимая нагрузка по ТУ, расчетная среднеквадратичная нагрузка и определяемая в результате испытаний степень истинности понятия «Элемент работоспособен».

Алгоритм работы программы строится следующим образом:

1. Определяются значения спектральной плотности во время виртуальных испытаний в каждом месте установки ЭРИ в аппаратуре, проводится их обработка и определяется максимальная зафиксированная спектральная плотность и соответствующая ей частота.



Рис. 1. Интерфейс программы определения работоспособности ЭРИ

2. Спектральная плотность пересчитывается в среднеквадратичное значение нагружения по всему диапазону частоты, таким образом получается вся воздействующая энергия на элемент по каждой оси.

3. При обращении к любому элементу (ЭРИ) происходит построение функции принадлежности $\mu(x)$ (рис. 2), которая на графике изображена желтым цветом.

4. Функция принадлежности является ключевым показателем определения работоспособности. Она строится на основе предельных значений нагрузок, которые должно выдержать электрорадиоизделие в соответствии с техническими условиями, и экспертном мнении. По оси абсцисс откладываются среднеквадратичное значение нагрузок, действующих на ЭРИ по трем осям (X, Y, Z). Ось ординат — выражает степень истинности высказывания — «элемент работоспособен», от 0 до 1, где «1» — «элемент работоспособен», «0» — «элемент неработоспособен».

5. От точки, соответствующей среднеквадратичному значению нагрузки, приходящей на ЭРИ по конкретной оси, проводится прямая линия до пе-

ресечения с функцией принадлежности, при этом координата пересечения по оси ординат, будет соответствовать степени истинности понятия — «элемент работоспособен». Например, на рис. 2 видно, что для элемента 2P7233A_PitDKPI-V-10 при нагружении по оси X степень истинности понятия «элемент работоспособен» составляет $\mu(x) = 0,35$, по оси Y — $\mu(y) = 1$, по оси Z — $\mu(z) = 0$.

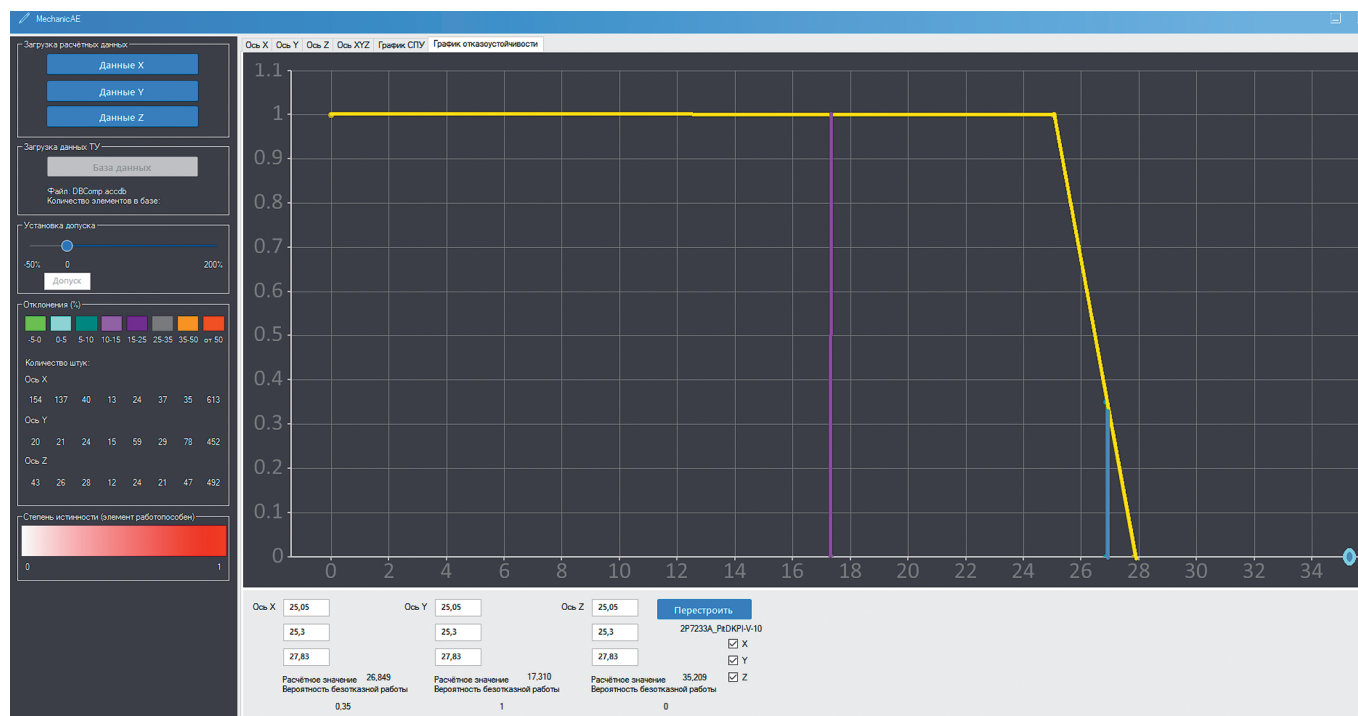
6. Степень истинности обобщенного заключения о работоспособности ЭРИ может быть вынесена путем выбора варианта композиции полученных значений функции принадлежности.

Для подтверждения предложенной методики требуется проведение экспериментов с фиксацией и анализом полученных результатов, разработка программы проведения натурных испытаний на ограниченной выборке ЭРИ.

Необходимо разработать конструкторскую документацию:

- на плату с расположенными на ней ЭРИ, по которым есть статистика наземных испытаний в составе бортового прибора.

- на рабочее место для проверки работоспособности до и после испытаний плат;

Рис. 2. Функция принадлежности $\mu(x)$

– на приспособление с заложенным прогнозным коэффициентом передачи от испытательного стола до мест крепления платы.

Изготовить 10 образцов плат, рабочее место и приспособление для проведения механических испытаний.

На рис. 3 представлен ориентировочный вид (образец) экспериментального комплекта.

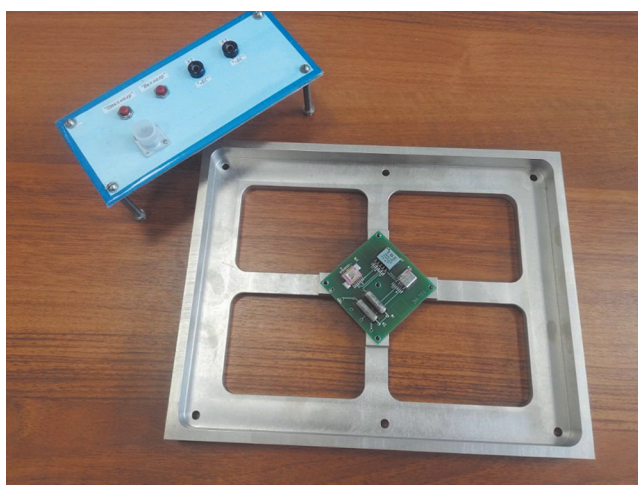


Рис. 3. Образец платы с установленным ЭРИ

Алгоритм проведения эксперимента заключается в механическом испытании ЭРИ, установленных на плате, со ступенчатым повышением воздействующей нагрузки и последующим определением работоспособности ЭРИ. В случае выхода из строя элемента на данной нагрузке будет проводиться повторное испытание следующего образца до трех отказов. Для каждой следующей ступени нагружения берется неиспытанный образец. Полученные экспериментальные данные будут заноситься в таблицу протокола испытаний для дальнейшего анализа и коррекции (при необходимости) методики и функции принадлежности.

Заключение

Подтверждение предложенной методики является важным этапом решения научно-технической проблемы оценки работоспособности ЭРИ, установленных в объектах РКТ, после приложения механических нагрузок и получения обобщающего заключения о работоспособности изделия со степенью достоверности. Ключевым показателем предложенной

методики является функция принадлежности $\mu(x)$. Эксперимент направлен на уточнение параметров функции принадлежности и тем самым адекватности используемой модели путем исследования реальных границ работоспособности ЭРИ.

Список литературы

1. Богомолов М. В. Виртуальные испытания изделий // Электронный журнал «Труды МАИ». Вып. 38. 2010.
2. Гончаров А. С., Соклаков В. М. Цифровой двойник: обзор существующих решений и перспективы развития технологии // Томский политехнический университет. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 24–26. <http://eLibrary.ru/item/asp?id=36585718> (Дата обращения 07.07.2021.)
3. Макаров И. М., Рахманкулов В. З., Ахрем А. А. Виртуальное моделирование и интеллектуальное управление сложными компьютеро-интегрированными системами. <http://isa.ru/jitcs/images/stories/2007/02/maarov> (Дата обращения 07.07.2021.)
4. ГОСТ Р 8.731-2010. Государственная система обеспечения единства измерений «Системы допускового контроля».
5. Воронцов К. В. Лекции по методу опорных векторов 2007. <http://ccas.ru/voron/download/SVM> (Дата обращения 07.07.2021.)
6. Потюпкин А. Ю. Применение нечеткой меры в задачах контроля технического состояния летательных аппаратов // Измерительная техника. 2002. № 7.
7. Потюпкин А. Ю., Хиль С. Ш. Метод решения задачи контроля технического состояния летательных аппаратов с использованием нечеткой меры // Измерительная техника. 2002. № 12.
8. Потюпкин А. Ю. Научно-методические основы решения задач анализа состояния объектов ракетно-космической техники в условиях неопределенности. М.: ВА РВСН, 2003.