

УДК 621.37.39

## **Относительная статистическая оценка технологической неоднородности механических характеристик печатных плат**

**Крылов В.П.\*, Пронин Т.Ю.\*\***

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и*

*Николая Григорьевича Столетовых,*

*ул. Горького, 87, Владимир, 600000, Россия*

*\*e-mail: v\_p\_krylov@vlsu.ru*

*\*\*e-mail: pronin\_t\_y@list.ru*

**Статья поступила 20.03.2019**

### **Аннотация**

Применение печатных плат в электронных блоках беспилотных космических аппаратов, обрабатывающих радиосигналы, связано с ужесточением требований к стабильности механических характеристик. В статье предложена методика относительной статистической оценки неоднородности механических характеристик печатных плат на фоне измерительных погрешностей. Приведены результаты экспериментальных исследований отношения среднеквадратичных отклонений технологических погрешностей и погрешностей измерений для эквивалентных значений модуля упругости и коэффициента механических потерь на партии печатных плат. Сделан вывод о существовании стабильного технологического разброса модуля упругости и характере зависимости технологического разброса коэффициента механических потерь после групповой пайки в печи конвективного нагрева. Даны рекомендации по использованию полученных результатов при

испытаниях вибропрочности электронных устройств беспилотных космических аппаратов, применяемых для обработки радиосигналов.

**Ключевые слова:** платы печатные, характеристики механические, технологическая погрешность, погрешность измерений, статистическая оценка.

### **Введение**

Применение печатных плат (ПП) в конструкциях электронных блоков космических аппаратов (КА), обрабатывающих радиосигналы, для монтажа электронных компонентов, обеспечивает сокращение сроков разработки и удешевление конструкций КА при обеспечении тактико-технических характеристик. Использование конверсионных средств выведения беспилотных КА на заданную орбиту обеспечивает надежный старт и снижение стоимости пуска ценой роста механических нагрузок на элементы конструкции КА [1-4]. Проблема обеспечения механической прочности (в первую очередь, вибропрочности) особенно актуальна при разработке моноблоков третьего уровня кооперации, поскольку технические требования к ним в части механических воздействий на этапе выведения на орбиту разработчиком КА (первый уровень кооперации) или отдельного модуля (второй уровень кооперации) задаются, как правило, «с запасом», который далеко не всегда можно обеспечить в рамках имеющихся экономических и технологических ограничений [5-8].

Компьютерные расчеты (виртуальные испытания) и физическое моделирование (испытания на вибростенде) с использованием конструктивно-подобных моделей (когда дорогостоящие электронные компоненты на плате заменяют муляжами) позволяют прогнозировать вибропрочность через регистрацию виброусиления на резонансных частотах в заданном диапазоне 5 – 2000 Гц при наличии достоверной информации о возможных технологических разбросах механических характеристик печатных плат.

Изготовители фольгированных диэлектриков (ламинатов), как правило, не имеют на выходном контроле средств измерения механических параметров, влияющих на собственные частоты резонанса (модуль упругости) и виброусиление (демпфирование) на этих частотах [9]. Вместе с тем при изготовлении печатных плат, особенно многослойных, часто применяемых при разработке радиотехники, существуют предпосылки для технологического разброса указанных параметров [10-13]. В основном эти предпосылки обусловлены нестационарным характером процесса полимеризации связующих компонентов [14-16], который в ряде случаев может продолжаться и после изготовления платы, например, при хранении, транспортировке, пайке или ремонтной замене отдельных компонентов [17] в процессе предполетной отладки аппаратуры КА, предназначенной для обработки радиосигналов. Таким образом, экспериментальная оценка технологических разбросов механических характеристик печатных плат и ламинатов является актуальной задачей.

### **Постановка задачи, принятые допущения и модели**

Для практического определения модуля упругости и коэффициента демпфирования печатной платы (ламината) можно использовать современные методы параметрической идентификации, основанные на решении обратных некорректных задач по результатам экспериментальных исследований поведения печатных плат в области механических резонансов и конечно-элементного компьютерного моделирования с учетом способа крепления плат на основании стола вибростенда [18-20]. Классический подход к оценке точности таких косвенных измерений, основанный на сравнении с эталонами, в данном случае неприемлем ввиду отсутствия эталонов. Однако для практики входного контроля ламинатов и печатных плат в первом приближении необходимо оценить возможность разрешающей способности таких измерений на фоне погрешностей измерений. Если принять допущение о случайном характере погрешностей косвенных измерений и технологических погрешностей изготовления в части механических параметров, то можно использовать относительную статистическую оценку технологической неоднородности механических характеристик печатных плат в виде отношения среднеквадратичных отклонений указанных погрешностей, которая положительно зарекомендовала себя в задачах оценки технологической однородности производственных партий электронной компонентной базы [21]. Предлагаемый подход основан на использовании раздела математической статистики, именуемого в разных первоисточниках факторным анализом [22] или симметричной схемой действия факторов [23]. Рабочая модель [21] предполагает

формирование случайного отклонения  $\Delta X$  параметра изделия от среднего значения в виде суммы технологической  $\Delta_T$  и измерительной  $\Delta_{II}$  погрешностей. Если считать погрешность измерений случайной и контроль партии изделий провести дважды, то коэффициент  $r$  парной линейной корреляции результатов первого контроля  $\{X_1\}$  с результатами второго (повторного) контроля  $\{X_2\}$  определится соотношением [21]

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_{II}} = \sqrt{\frac{r}{1-r}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_T$ ,  $\sigma_{II}$  – среднеквадратичные отклонения соответственно технологической и измерительной погрешностей. Соотношение (1) можно также интерпретировать как статистическую разрешающую способность средства контроля параметра  $X$ , которая определена на партии изделий и позволяет сделать вывод о возможности или невозможности ранжирования изделий по параметру  $X$ . Если принять допущение о постоянстве  $\sigma_{II}$ , то можно косвенно оценить поведение  $\sigma_T$  после того или иного внешнего воздействия на партию изделий (температура, радиация и пр.). Достаточно лишь повторить две серии измерений и воспользоваться формулой (1).

В качестве параметра  $X$  использованы усредненные модуль упругости и коэффициент демпфирования материала печатной платы. Усредненный модуль упругости  $E$  определяется в результате обработки экспериментальных результатов в программе SolidWorks Simulation [24,25]. Исходными данными служат размеры, масса и способ крепления образца, а также экспериментально определенная частота первого резонанса. При этом принято допущение об однородности материала платы, то есть реальная плата с рисунком металлизации и сквозными металлизированными отверстиями считается однородной пластиной прямоугольной формы с

четырёхточечным (по углам) закреплением на столе вибростенда. Эквивалентный коэффициент механических потерь (КМП) характеризует демпфирующие свойства материала платы и определяется как величина, обратная добротности (отношение частоты резонанса к полосе частот на уровне 0,707 от амплитуды резонанса)

$$\text{КМП} = \Delta f / f. \quad (2)$$

### Подготовка и проведение эксперимента

Экспериментальные исследования по определению частотных характеристик образцов печатных плат выполнены на вибрационном стенде модели i220 фирмы IMV с компьютеризованной системой управления и измерений виброускорений в диапазоне синусоидальных воздействий с частотой 5 ... 2000 Гц. Образцы двухсторонних и многослойных печатных плат на стеклоэпоксидной основе от разных изготовителей в количестве 12 шт. были любезно предоставлены фирмой «Петрокоммерц» и доработаны в АО «Концерн «Автоматика» до размеров 130 x 60 мм с отверстиями для крепления на специально разработанном и изготовленном приспособлении, которое, в свою очередь крепится на столе вибростенда двумя винтами. Образцы отличаются толщиной платы от 1,4 мм до 3,4 мм и эквивалентной плотностью от 1,861 г/см<sup>3</sup> до 2,327 г/см<sup>3</sup>. Массу образцов измеряли с помощью рычажных весов Fienwaage AF48.

Для исключения погрешностей измерений приспособление было проверено на отсутствие собственных резонансов в диапазоне 5-2000 Гц. На рис. 1 слева приведена 3D-модель приспособления с закрепленными на нем 3D-моделями

печатной платы с винтами крепления и 3D-моделью вибродатчика, а справа – фотография смонтированного на столе вибростенда приспособления с одной из печатных плат и датчиком модели 4393 фирмы «Briel & Kjaer» массой 2,4 грамма.

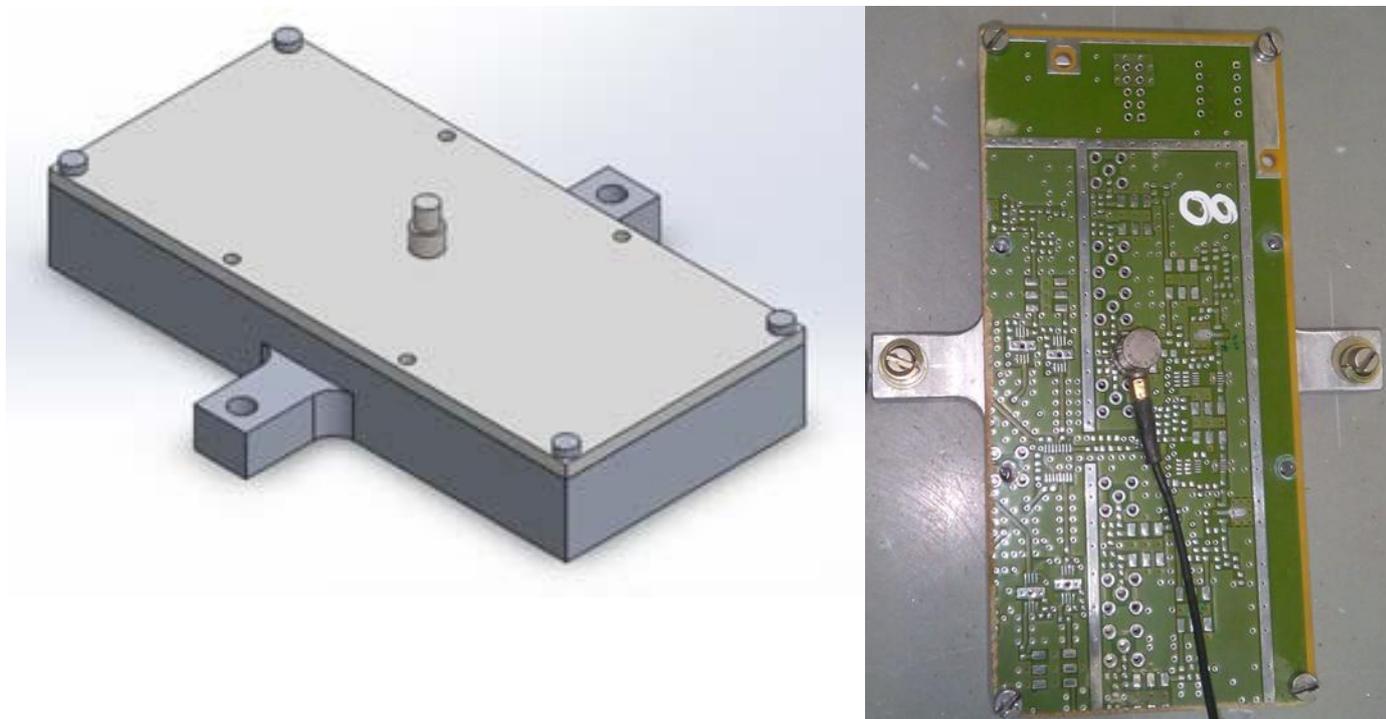


Рис. 1. 3D-модель и фото приспособления с платой и вибродатчиком.

Экспериментальное определение частотных характеристик образцов печатных плат производилось в режиме синусоидальной вибрации в диапазоне 5-2000 Гц с ускорением 2g в течение 3 минут для каждого образца при температуре окружающей среды +25°C. Крепление образцов плат к приспособлению выполнено 4-мя винтами М3 с моментом затяжки 0,7Нм. Две сессии измерений проводились в течение одного дня с перерывом 1 час. Датчик виброускорений (см. рис.1) установлен на клей «Диакрин» с выдержкой 30 с перед проведением каждого эксперимента.

## Экспериментальные результаты: обработка и обсуждение

Резонансные явления на первой резонансной частоте наблюдались в интервале от 230 Гц до 720 Гц в зависимости от образца. Одновременно регистрировалась полоса пропускания на уровне 0,707 от максимума виброускорения. На рис.2 изображено рабочее окно программы SolidWorks Simulation в режиме моделирования первого резонанса. Измерения (2 серии по 12 экспериментов в каждой) выполнялись трижды: до и после термообработки в печи конвективного оплавления, а также спустя примерно 6 месяцев хранения при комнатной температуре.

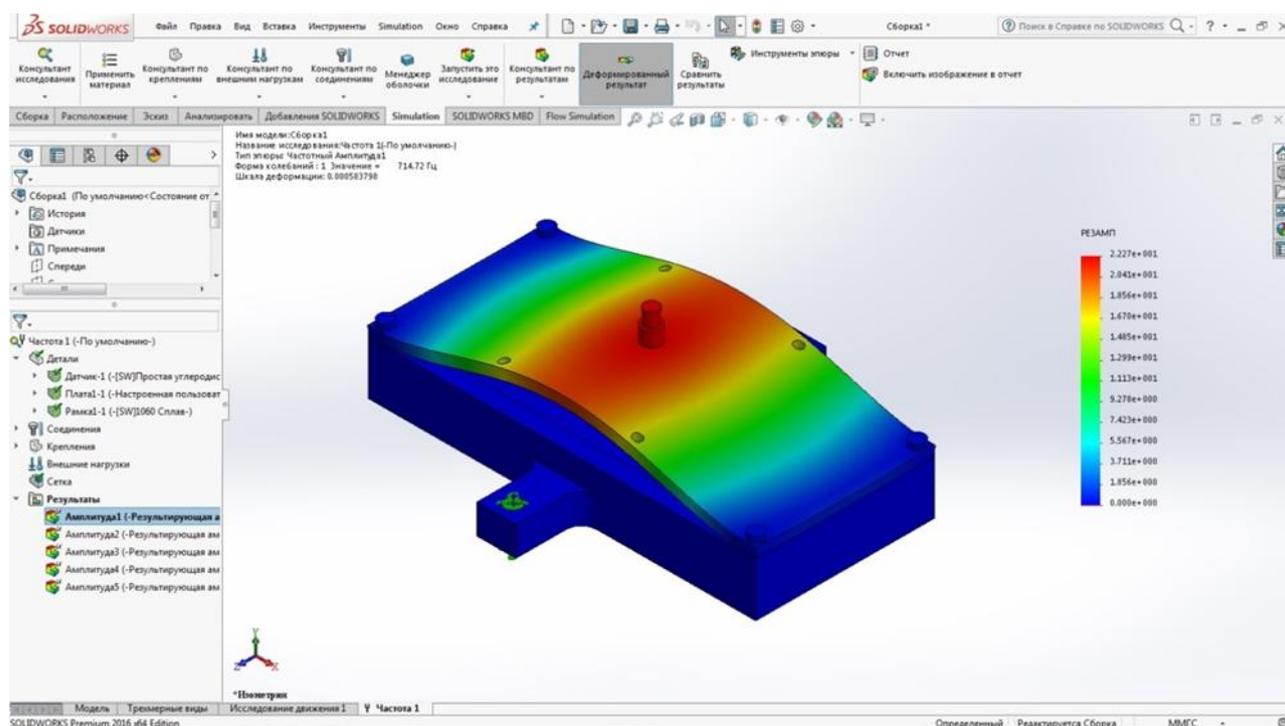


Рис.2. Рабочее окно программы SolidWorks Simulation

В результате обработки экспериментальных данных было получено отношение  $\sigma_T / \sigma_H = 14,60$  для эквивалентного модуля упругости  $E$ . После термической обработки плат в печи конвективного оплавления (имитация пайки) отношение  $\sigma_T / \sigma_H = 14,04$ . С учетом разброса выборочного значения коэффициента

парной линейной корреляции, обусловленного конечным объемом выборки, можно считать это соотношение практически постоянным и сделать вывод об отсутствии влияния термического воздействия при пайке на технологический разброс эквивалентного модуля упругости. Аналогичная картина наблюдалась после 6 месяцев хранения.

В отличие от эквивалентного модуля упругости эквивалентный коэффициент механических потерь, который в исходном состоянии характеризуется отношением  $\sigma_T / \sigma_H = 3,10$ , заметно меняется под влиянием термообработки ( $\sigma_T / \sigma_H = 5,51$ ), восстанавливаясь в процессе хранения практически до исходных величин  $\sigma_T / \sigma_H = 3,47$ . Отсюда следует практическая рекомендация о выдержке собранных ячеек после пайки в течение определенного времени до проведения испытаний на вибропрочность во избежание ошибок, обусловленных изменением демпфирующих свойств.

### **Выводы**

1. Предложена и экспериментально апробирована методика относительной статистической оценки технологических разбросов эквивалентных механических характеристик печатных плат для использования в задачах компьютерного моделирования вибропрочности конструкций электронных средств беспилотных космических аппаратов, обрабатывающих радиосигналы.

2. Установлено существование различной технологической неоднородности эквивалентного модуля упругости, которая не меняется после термообработки в печи конвективного оплавления и при хранении.

3. Технологический разброс эквивалентного коэффициента механических потерь менее различим на фоне погрешностей измерений, однако заметно возрастает после прохождения платой рабочего термопрофиля конвейерной печи конвективного нагрева и с течением времени восстанавливается до первоначальных значений. Для уточнения необходимого времени выдержки смонтированных плат до проведения испытаний на вибропрочность необходимы дополнительные исследования.

*Авторы выражают благодарность фирме «Петрокоммерц» и лично руководителю технологической службы С.А. Савенко за консультации и предоставленные образцы печатных плат.*

*Экспериментальные исследования выполнены при финансовой поддержке АО «Концерн «Автоматика» в рамках хоздоговорных НИОКР с Владимирским государственным университетом.*

### **Библиографический список**

1. Безмозгий И.М., Казакова О.И., Софинский А.Н., Чернягин А.Г. Отработка вибропрочности автоматического космического аппарата дистанционного зондирования земли // Космическая техника и технологии. 2014. № 4 (7). С.31 - 41.

2. Софинский А.Н. Система обработки вибропрочности // Космическая техника и технологии. 2016. № 1 (12). С. 12 - 21.
3. Орлов С.А. Нормирование и обработка бортовой аппаратуры космических аппаратов на механические воздействия // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 1 (47). С. 125 - 129.
4. Veprik A.M. Vibration Protection of Critical Components of Electronic Equipment in Harsh Environmental Conditions // Journal of Sound and Vibration, 2003, no. 259 (1), pp. 161 - 175.
5. Шалумов А.С., Малютин Н.В., Кофанов Ю.Н. и др. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий. - М.: Энергоатомиздат, 2007. Т. 1. - 368 с.
6. Калинин В.И., Лихачев М.В., Усаков В.И. Полиструктурный подход в нисходящем проектировании аэрокосмической техники // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 1. № 12. С. 363 - 365.
7. Лихачев М.В. Методика нисходящего проектирования космического аппарата // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2015. Т. 16. № 2. С. 423 - 429.
8. Кофанов Ю.Н., Новиков Е.С., Шалумов А.С. Информационная технология моделирования механических процессов в конструкциях радиоэлектронных средств. - М.: Радио и связь, 2000. - 160 с.

9. Платы печатные. Методы испытаний физических параметров. ГОСТ Р 55744-2013 Национальный стандарт РФ. ОКС 31.180. - М.: Изд-во стандартов, 2014. – 43 с.
10. Медведев А., Можаров В., Мылов Г. Печатные платы: современное состояние базовых материалов. Печатный монтаж // Приложение к журналу «Электроника: НТБ». 2011. № 5. С. 148 – 162.
11. Медведев А. Технология производства печатных плат. - М.: Техносфера, 2005. - 358 с.
12. Мылов Г.В., Медведев А.М., Семенов П.В., Дрожжин И.В. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 268 с.
13. Медведев А.М. Печатные платы: конструкции и материалы. - М.: Техносфера, 2004. - 302 с.
14. Можаров В.А. Математическая модель зависимости усадки стеклотекстолита от его конструкционных параметров // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=40666>
15. Можаров В.А., Шуман К.В. Адаптация техпроцесса подготовки производства печатных плат высокого класса точности под заданные параметры геометрической стабильности базового материала // Труды МАИ. 2012. № 50. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28828>
16. Глебов И.В., Котенко В.Д. Способ автоматического управления вакуумной технологией изготовления препрегов // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62329>

17. Медведев А.М. Сборка и монтаж электронных устройств. - М.: Техносфера, 2007. – 256 с.
18. Соловьев Д.Б., Шалумов А.С., Першин Е.О. Моделирование механических процессов в шкафах радиоэлектронных средств в подсистеме АСОНИКА-М и идентификация физико-механических параметров модели // Научные технологии. 2011. № 11. С. 25 - 31.
19. Nanahara T., Yamashita K., Inoue T. Identification of System Characteristics of a Power System with Time Series Data-Identification of Frequency Fluctuation Characteristics of a Small-Scale Isolated System // Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 2004, vol. 124, no. 1, pp. 23 - 31.
20. Katsikadelis J.T. System identification by the analog equation method // Boundary Elements XVII Transaction: Modelling and Simulation, Wessex: Institute of Technology, 1995, vol. 10, pp. 512 - 524.
21. Крылов В.П. Определение разрешающей способности процессорных средств входного контроля элементной базы техники связи // Техника средств связи. 1992. № 4. С. 139 – 143.
22. Харман Г. Современный факторный анализ. – М.: Статистика, 1972. – 486 с.
23. Лукомский Я.И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. – М.: Госстатиздат, 1961. – 388 с.
24. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 345 с.

25. Мартюшев С.Г., Дементьев А.А. Трехмерное моделирование внешних механических воздействий на приборы и устройства в SolidWorks Simulation // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2018. Т. 19. № 1. С. 82 - 97.