

УДК 621.396.69
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-28-38>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Расчет допустимых отклонений виброускорений печатных узлов методом имитационного моделирования

В.К. Битюков,
А.В. Долматов[@],
А.А. Задерновский,
А.И. Стариковский,
Р.М. Увайсов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: dolmatov@mirea.ru

Резюме

Цели. При производстве и эксплуатации печатных узлов (ПУ) радиоэлектронных средств (РЭС) используются различные методы контроля технического состояния. Основные из них – это оптический, электрический и тепловой. Но не все возможные дефекты выявляются с использованием указанных методов. Например, ослабленное крепление ПУ в блоке или некорректная установка электрорадиоэлемента (ЭРЭ) на печатной плате выявляются только путем анализа механических характеристик РЭС, в частности значений амплитуд виброускорений на ЭРЭ или в выбранных контрольных точках печатной платы (далее – амплитуда виброускорения ПУ). Чтобы сделать вывод о наличии дефекта, измеренные значения амплитуд виброускорений, полученные в результате испытаний ПУ на воздействие гармонической вибрации, сравниваются с допустимыми значениями, рассчитанными при имитационном моделировании механических процессов в ПУ с учетом разбросов физико-механических параметров материалов и геометрических параметров конструкции ПУ. Цель работы состоит в определении допустимых значений амплитуд виброускорений ПУ, с которыми будут сравниваться измеренные значения.

Методы. Для расчета допустимых отклонений виброускорений предлагается использование метода имитационного моделирования Монте-Карло, заключающегося в многократном расчете значений амплитуд виброускорений при случайных значениях физико-механических параметров материалов и геометрических параметров конструкции ПУ в пределах своих допусков.

Результаты. В результате экспериментальной проверки описанного метода с помощью программы моделирования механических процессов *SolidWorks* определены значения допуска на виброускорения ПУ в контрольной точке на первой резонансной частоте и получены экспериментальные данные при внесении различных дефектов. Результаты сравнения измеренных значений с рассчитанным допуском позволяют сделать вывод о возможности обнаружения дефектов ПУ.

Выводы. Использование данного метода расчета допусков на амплитуду виброускорения ПУ позволяет определять наличие дефектов в РЭС, которые не влияют на электрические или тепловые характеристики РЭС, и таким образом повысить эффективность контроля технического состояния.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, имитационное моделирование, метод Монте-Карло, печатный узел, радиоэлектронное средство, механические процессы

• Поступила: 05.05.2023 • Доработана: 26.06.2023 • Принята к опубликованию: 04.09.2023

Для цитирования: Битюков В.К., Долматов А.В., Заdernовский А.А., Стариковский А.И., Увайсов Р.М. Расчет допустимых отклонений виброускорений печатных узлов методом имитационного моделирования. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):28–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-28-38>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Calculating permissible deviations of vibration accelerations of printed circuit assemblies by simulation modeling

Vladimir K. Bityukov,
Aleksey V. Dolmatov[@],
Anatoly A. Zadernovsky,
Anatoly I. Starikovsky,
Ruslan M. Uvaysov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: dolmatov@mirea.ru

Abstract

Objectives. A variety of technical condition control methods are used in the production and operation of printed circuit assemblies (PCA) for radio-electronic means (REM). The main methods are optical, electrical, and thermal. However, not all possible defects can be detected using these methods. For example, a weakened PCA fastener in a block or the incorrect installation of an electric radioelement (ERE) on a printed circuit board (PCB) can be detected only by analyzing the mechanical characteristics of the REM. These factors, in particular, are the values of the vibration acceleration amplitudes on ERE or at selected PCB control points (hereinafter referred to as the PCA vibration acceleration amplitude). In order to draw a conclusion about the presence of a defect, the measured values of the vibration acceleration amplitudes obtained as a result of testing PCA for the effects of harmonic vibration are compared with the permissible values calculated during the simulation of mechanical processes in PCA. This takes into account the variations in the physical and mechanical parameters of materials and geometric parameters of the PCA design. The aim of this paper is to determine the permissible values of PCA vibration acceleration amplitudes to be compared with the measured values.

Methods. The Monte Carlo simulation method is used to calculate the permissible deviations of vibration accelerations. This consists in repeatedly calculating the values of the vibration acceleration amplitudes at random values of the physical and mechanical parameters of materials and geometric parameters of the PCA design within their tolerances.

Results. Experimental verification of this method was carried out using the *SolidWorks* software for modeling mechanical processes. This enabled the tolerance values for PCA vibration acceleration at the control point at the first resonant frequency to be established and experimental data to be obtained when introducing various defects. The results of comparing the measured values with the calculated tolerance enabled conclusions to be made with regard to the possibility of detecting PCA defects.

Conclusions. Using this method of calculating tolerances for the PCA vibration acceleration amplitude allows the presence of defects in REM that do not affect the electrical or thermal characteristics of REM to be determined, thus increasing the efficiency of technical condition control.

Keywords: non-destructive testing, simulation modeling, Monte Carlo method, printing circuit boards, electronic means, mechanical processes

• Submitted: 05.05.2023 • Revised: 26.06.2023 • Accepted: 04.09.2023

For citation: Bityukov V.K., Dolmatov A.V., Zadernovsky A.A., Starikovskiy A.I., Uvaysov R.M. Calculating permissible deviations of vibration accelerations of printed circuit assemblies by simulation modeling. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):28–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-28-38>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Современные радиоэлектронные средства (РЭС) являются сложными устройствами, как с точки зрения электрических схем, так и с точки зрения конструктивного исполнения. Широкое разнообразие схемных и конструктивных решений¹, а также материалов, используемых в производстве РЭС², обуславливает наличие отклонений их характеристик от своих номинальных значений. Как правило, для определения технического состояния РЭС проводят его диагностирование [1, 2] по электрическим, тепловым и механическим характеристикам³. Методы диагностирования по электрическим и тепловым характеристикам достаточно хорошо развиты и проработаны [3–6], в то время как диагностирование по механическим характеристикам продолжает оставаться актуальной задачей в связи со сложностями контроля механических характеристик и многообразием механических связей, имеющихся в современных конструкциях РЭС [7–9].

Несмотря на высокие требования к качеству и надежности выпускаемой продукции на этапе производства, существует вероятность возникновения различных дефектов, таких как деформация

электрорадиоэлементов (ЭРЭ), ослабление их крепежа или печатной платы, образование трещины в печатной плате, которые в определенной степени будут влиять на механический режим работы и могут привести к нарушению работоспособности РЭС.

Стадия производства печатных узлов (ПУ) завершается испытаниями для подтверждения их надежности в течение всего жизненного цикла. В зависимости от специфики РЭС они подвергаются большому числу различных натурных испытаний⁴ [10]. Подавляющее большинство РЭС испытывают на механические воздействия, прежде всего вибрационные [11–13]. При этом измеренные характеристики сравнивают с предельно допустимыми для оценки виброустойчивости РЭС [14]. Но ряд дефектов (например, ослабленное крепление ПУ, неправильная установка ЭРЭ и др.) могут и не вызывать превышения измеренного значения механической характеристики над предельно допустимым значением, но могут привести к отказам РЭС в процессе эксплуатации. Поэтому в данной работе предлагается сравнивать измеренные значения механических характеристик со значениями их допусков, обусловленными разбросом физико-механических и геометрических параметров материалов РЭС, и по результатам сравнения делать вывод о техническом состоянии РЭС.

МЕТОД РАСЧЕТА ДОПУСТИМЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ВИБРОУСКОРЕНИЙ ПУ

Одним из методов контроля технического состояния, реализация которого необходима для обеспечения высокой надежности РЭС, является метод неразрушающего контроля по механическим

¹ Муромцев Д.Ю., Тюрин И.В., Белоусов О.А., Курносов Р.Ю. *Проектирование функциональных узлов и модулей радиоэлектронных средств*: учебное пособие для вузов. 2-е изд., стер. СПб.: Лань; 2021. 252 с. [Muromtsev D.Yu., Tyurin I.V., Belousov O.A., Kurnosov R.Yu. *Design of functional units and modules of radioelectronic devices*: A textbook for universities. 2nd ed. St. Petersburg: Lan; 2021. 252 p. (in Russ.).]

² Покровская М.В., Попова Т.А. *Материалы и элементы конструкций РЭС*: учебное пособие. М.: РТУ МИРЭА; 2021. Часть 1: Материаловедение и конструкционные материалы. 200 с. [Pokrovskaya M.V., Popova T.A. *Materials and structural elements of REM*: A textbook. Moscow: RTU MIREA; 2021. Part 1: Material science and structural materials. 200 p. (in Russ.).]

³ Давыдов П.С. *Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем*. М.: Радио и связь; 1988. 256 с. [Davydov P.S. *Technical diagnostics of radioelectronic devices and systems*. Moscow: Radio and Communications; 1988. 256 p. (in Russ.).]

⁴ Баранов В.М., Карасевич А.М., Сарычев Г.А. *Испытания и контроль качества материалов и конструкций*: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа; 2004. 359 с. [Baranov V.M., Karasevich A.M., Sarychev G.A. *Testing and quality control of materials and structures*: A textbook for universities. Moscow: Higher School; 2004. 359 p. (in Russ.).]

характеристикам, основанный на сравнении значений амплитуд виброускорений ЭРЭ и в контрольных точках на печатной плате проверяемого ПУ и эталонного образца ПУ. Наличие дефектов в ПУ приводит к отклонению амплитуд виброускорений ЭРЭ от своих номинальных значений, причем, как в большую, так и в меньшую сторону.

Амплитуда виброускорений ПУ зависит от физико-механических параметров материалов ПУ, геометрических параметров конструктивных элементов ПУ, мест крепления ПУ.

Для того чтобы проводить контроль ПУ по механическим характеристикам, необходимо создать его эталонную механическую модель, результаты расчета которой будут использоваться для сравнения с измеренными значениями амплитуд виброускорений исследуемых образцов ПУ. Для создания механической модели можно использовать различные программы моделирования механических процессов в РЭС. Точность моделирования механических характеристик ПУ определяется многими факторами. Среди них можно выделить корректность и полноту описания топологической модели механических процессов, а именно: описание условий крепления, задание таких значений физико-механических параметров материалов и геометрических размеров элементов конструкции, которые бы максимально соответствовали реальным значениям. Для большинства инженерных расчетов, как показывает практика, погрешность моделирования механических характеристик составляет не более 30% при предварительных расчетах и порядка 5–10% для расчетов с уточненными данными.

Стоит отметить, что исходные данные о значениях физико-механических параметров материалов РЭС, необходимые для моделирования механических процессов и приведенные в различных справочниках, как правило, получены в результате экспериментальных исследований и заданы в определенном диапазоне значений. Модель механических процессов в ПУ, анализ которой выполнен с уточненными физико-механическими параметрами материалов и с экспериментально исследованным распределением амплитуд виброускорений ЭРЭ ПУ, можно принять за эталонную модель и использовать ее для контроля технического состояния при экспериментальных испытаниях образцов ПУ.

При использовании эталонной механической модели исследуемого ПУ в программе моделирования механических процессов вычисляются допуски на значения амплитуд виброускорений ЭРЭ, по результатам чего определяются максимально допустимое (a^{\max}) и минимально допустимое (a^{\min}) значения амплитуд виброускорений для каждого ЭРЭ. Эти результаты моделирования являются основой для

сравнения с экспериментально полученными значениями, отклонения которых за пределы допуска рассматриваются как различного вида дефекты [2].

Для определения пригодности ПУ к эксплуатации необходимо рассчитать допусковый интервал $[a_{\text{ПУ}m}^{\min}, a_{\text{ПУ}m}^{\max}]$ для каждой m -й контрольной точки вектора измеренных значений виброускорений $\overline{a_{\text{ПУ}m}}$. ПУ будет считаться исправным, если выполняется условие:

$$\overline{a_{\text{ПУ}m}} \in [a_{\text{ПУ}m}^{\min}, a_{\text{ПУ}m}^{\max}].$$

При контроле технического состояния ПУ используются минимально ($a_{\text{ПУ}m}^{\min}$) и максимально ($a_{\text{ПУ}m}^{\max}$) допустимые значения амплитуд виброускорений ПУ, а для расчета показателей безотказности можно использовать максимальное значение $a_{\text{ПУ}m}^{\max}$.

После расчета эталонной механической модели ПУ проводится измерение виброускорений в контрольных точках исследуемой группы ПУ с помощью вибродатчиков. Полученные в результате измерений значения амплитуд виброускорений ПУ сопоставляются со своими предельно допустимыми значениями, и по результатам сравнения делается вывод о техническом состоянии ПУ. Значения амплитуды виброускорения элементов для исправных образцов ПУ должны лежать в диапазоне значений, полученном в результате расчета эталонной механической модели. Образец ПУ, в котором обнаружилось отклонение амплитуды виброускорения ПУ за рассчитанные пределы, рассматривается как дефектный.

Рассмотренная эталонная механическая модель ПУ получена при значениях параметров конструкций РЭС, лежащих в пределах своих допусков. Но механическую модель можно использовать и для формирования базы неисправностей – справочника распределения амплитуд виброускорений по поверхности ПУ при наличии какого-либо дефекта. Такой справочник формируется заранее перед проведением диагностирования ПУ. С помощью данного метода можно выявлять как дефекты, связанные с установкой ЭРЭ, так и дефекты, связанные с производством печатной платы.

Таким образом, эталонная механическая модель ПУ учитывает как разброс различных параметров (физико-механических параметров материалов, геометрических параметров конструкций) в пределах своих допусков при использовании модели для поиска дефектных изделий, так и возможное наличие типовых дефектов в ПУ при использовании модели для идентификации дефектов в исследуемых ПУ.

Существующие модели и методы расчета механических режимов конструкций РЭС в некоторых

случаях не позволяют детально проанализировать влияние физико-механических параметров материалов конструкции РЭС и геометрических параметров конструкций РЭС на механический режим изделия. Большими возможностями при решении данной проблемы обладает метод статистических испытаний Монте-Карло, который можно использовать применительно к моделированию различных физических процессов в РЭС, в частности, механических процессов в конструкции ПУ и РЭС в целом [15, 16]. Преимущества метода Монте-Карло перед другими методами при исследовании физических процессов состоят в следующем: достаточно простой математический аппарат вычислений, наглядная физическая интерпретация рассматриваемой задачи упрощают процесс программирования и делают его легко контролируемым на стадии отладки программы.

При применении метода Монте-Карло используется специальная программа – генератор случайных чисел. Данная программа многократно выдает случайные значения некоторой величины, которые распределены в соответствии с заданным законом распределения. Для каждого значения случайной величины определяются значения механических характеристик РЭС. Данный расчет повторяется заданное пользователем количество раз, при этом для каждого расчета значения параметров модели принимают случайные значения, которые лежат в границах своих допусков. По итогам моделирования строятся гистограммы, демонстрирующие законы распределения механических характеристик,

по которым рассчитываются математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение амплитуд виброускорения ПУ.

Используемый метод не требует вычисления функций параметрической чувствительности. Однако требуются большие затраты машинного времени, которые зависят от сложности механической модели и количества итераций. При этом погрешность метода, как правило, составляет порядка 10%.

Структурная схема метода расчета предельно допустимых значений амплитуды виброускорения ЭРЭ с помощью имитационного моделирования механических процессов приведена на рис. 1.

При моделировании с использованием данного метода учитываются такие факторы, как отклонения значений физико-механических параметров материалов и геометрических параметров конструкции РЭС в пределах своих допусков. Использование имитационного моделирования позволяет набрать достаточно много статистической информации, на основании которой определяется допустимый разброс значений виброускорений ЭРЭ.

Исходными данными для проведения моделирования являются:

- описание конструкции РЭС;
- $q_{mi}^{\min}, q_{mi}^{\max}$ – минимальное и максимальное значения i -го физико-механического параметра конструкции РЭС соответственно;
- $q_{rj}^{\min}, q_{rj}^{\max}$ – минимальное и максимальное значения j -го геометрического параметра конструкции РЭС соответственно.



Рис. 1. Структурная схема метода расчета допустимых отклонений виброускорений ПУ.

$a_{kl}^{\text{НОМ}} = (a_{kl}^{\min} + a_{kl}^{\max})/2$. $a_{\text{ЭРЭ } m}^{\min}, a_{\text{ЭРЭ } m}^{\max}$ – допуски на амплитуды виброускорений ЭРЭ

С использованием программы моделирования механических режимов работы РЭС на первом этапе проводится многократный (N раз) механический расчет конструкции РЭС, в которой установлен ПУ (как правило, это блок). Данный расчет проводится с целью определения разброса значений амплитуд виброускорений в местах крепления ПУ.

Номинальное значение параметра можно определить исходя из минимальной и максимальной границ диапазона разброса его фактического значения с учетом нормального закона распределения параметра по формуле:

$$q^{\text{ном}} = (q^{\text{max}} + q^{\text{min}})/2.$$

Значение относительного допуска на значение параметра определяется по формуле:

$$\delta = (q^{\text{max}} - q^{\text{min}})/q^{\text{ном}}.$$

Значения физико-механических параметров материалов (q_m) и геометрических параметров конструкций (q_r) для каждой реализации метода Монте-Карло принимают случайные значения в пределах своих допусков с учетом значения случайной величины ξ_n в соответствии с формулами:

$$q_m = q_m^{\text{ном}}(1 + \xi_n \delta_m), \quad q_r = q_r^{\text{ном}}(1 + \xi_n \delta_r).$$

Значения случайной величины ξ_n генерируются в соответствии с нормальным законом распределения случайной величины с нулевым математическим ожиданием и значением среднеквадратического отклонения $\sigma = 0.33$. Создается усеченное нормальное распределение величины ξ_n на интервале $\pm 3\sigma$.

Проведя N расчетов механического режима конструкции ПУ, получают N значений амплитуд виброускорений (a_k) в местах крепления ПУ. По этим значениям определяется математическое ожидание амплитуды виброускорений в каждой точке крепления ПУ $m(a_k)$:

$$m(a_k) = \frac{\sum_{n=1}^N a_k^n}{N},$$

где a_k^n – значение амплитуды виброускорения в месте крепления ПУ на n -й реализации.

Дисперсия виброускорения $D(a_k)$ определяется по формулам:

$$D(a_k) = \frac{\sum_{n=1}^N (a_k^n - m(a_k))^2}{N - 1}$$

или

$$D(a_k) = \left(\frac{\sum_{n=1}^N (a_k^n)^2}{N} - (m(a_k))^2 \right) \frac{N}{N - 1}.$$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(a_k)$ амплитуды виброускорения в месте крепления ПУ рассчитывается по формуле:

$$\sigma(a_k) = \sqrt{D(a_k)}.$$

Для определения диапазона допустимых значений амплитуды виброускорения $[a_k^{\text{min}}, a_k^{\text{max}}]$ необходимо задать доверительную вероятность β

$$\beta = P(a_k^{\text{min}} \leq a_k \leq a_k^{\text{max}}),$$

с которой фактическое значение амплитуды виброускорения может лежать в этом диапазоне. С учетом значения вероятности β по справочным данным определяется значение коэффициента χ . Например, для значения доверительной вероятности $\beta = 0.9973$ величина коэффициента χ равна 3.

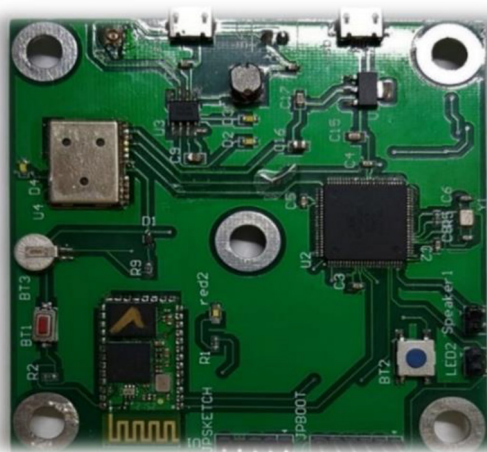
Минимальное (a_k^{min}) и максимальное (a_k^{max}) значения амплитуды виброускорения с учетом значения коэффициента χ для заданной вероятности β рассчитываются по формулам:

$$a_k^{\text{min}} = m(a_k) - \chi \sigma(a_k), \quad a_k^{\text{max}} = m(a_k) + \chi \sigma(a_k).$$

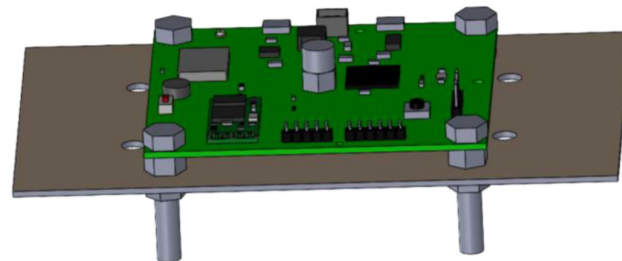
В результате расчета механического режима блока определяется диапазон $[a_k^{\text{min}}, a_k^{\text{max}}]$, в котором могут находиться значения амплитуд виброускорений в местах крепления ПУ.

Затем аналогичным образом проводится статистическое моделирование механических процессов в ПУ, задавая случайным образом значения амплитуды виброускорения в местах крепления ПУ из диапазона $[a_k^{\text{min}}, a_k^{\text{max}}]$ и значения физико-механических параметров материала печатной платы и геометрических параметров конструкции ПУ из диапазона возможных значений. В результате моделирования определяется диапазон $[a_{\text{ПУ}m}^{\text{min}}, a_{\text{ПУ}m}^{\text{max}}]$, в пределах которого должны лежать значения амплитуд виброускорения ЭРЭ для исправных ПУ.

Процесс контроля ПУ по механическим характеристикам предъявляет повышенные требования к достоверности моделирования механических режимов в ПУ. При построении модели механических процессов принимаются некоторые допущения, которые также надо учитывать при анализе результатов моделирования.



(a)



(б)

Рис. 2. Вид исследуемого ПУ (а) и его модель в программе *SolidWorks* (б)

Погрешность $\Delta_a^{\text{расч}}$ расчета амплитуд виброускорений ЭРЭ определяется по следующей формуле:

$$\Delta_a^{\text{расч}} = \sqrt{\Delta_M^2 + \Delta_r^2 + \Delta_c^2 + \Delta_\xi^2},$$

где Δ_M – погрешность, с которой заданы значения физико-механических параметров материалов конструкции РЭС; Δ_r – погрешность, с которой заданы значения геометрических параметров конструкции РЭС; Δ_c – погрешность, зависящая от шага расчетной сетки; Δ_ξ – погрешность, определяемая количеством реализаций метода Монте-Карло.

Погрешность определения предельно допустимых отклонений амплитуд виброускорений ЭРЭ определяется, помимо погрешности $\Delta_a^{\text{расч}}$, вносимой различными допущениями при создании механической модели, еще и количеством реализаций N в методе Монте-Карло. Относительную погрешность, связанную с количеством реализаций, можно определить по формуле:

$$\Delta_\xi = 3\sqrt{\frac{D(\xi)}{N}}.$$

Задача обеспечения точности моделирования механических процессов является очень важной, т.к. от этого зависит результат контроля ПУ по механическим характеристикам. Некорректный результат может привести к «забраковке» исправного изделия, либо к пропуску изделия с дефектом, что грозит серьезными последствиями при его эксплуатации.

Для реализации данного метода можно использовать различные программы моделирования механических процессов в конструкциях РЭС разного уровня

иерархии, такие как *АСОНИКА-ТМ*⁵, *SolidWorks*⁶ и др. [17, 18].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА РАСЧЕТА ДОПУСКОВ ВИБРОУСКОРЕНИЙ ПУ

Для экспериментальной проверки описанного метода использовалось бортовое радиоэлектронное устройство контроля параметров разбега, представляющее собой печатную плату с установленными на ней ЭРЭ: микроконтроллером Atmel ATmega 2560 (Atmel Corporation, США), акселерометром InvenSense MPU-6050 (InvenSense Inc., США), Global Navigation Satellite System приемником U-blox Neo 7M (U-blox, Швейцария), чипом Bluetooth HC-05 (Core Electronics, Китай) и источником питания AMS1117-3.3 (UMW, Китай).

Для расчета допусков на значение амплитуды виброускорения было проведено моделирование механических процессов ПУ с использованием программы *SolidWorks*. Внешний вид исследуемого ПУ и его модель представлены на рис. 2.

При моделировании был задан разброс плотности материала печатной платы 1500–1800 кг/м³ и модуля упругости 22–26 ГПа. Количество реализаций метода Монте-Карло – 500. В результате моделирования был получен разброс амплитуды виброускорения ПУ в контрольной точке ПУ (контрольная точка находится в центре печатной платы и была выбрана по результатам анализа распределения значений виброускорений по печатной плате, исходя из максимального значения) в исправном состоянии на первой резонансной частоте, значение которой составило 170 Гц. Разброс значений амплитуды виброускорения

⁵ <https://asonika-online.ru/products/asonika-tm/> (in Russ.). Дата обращения 15.06.2023. / Accessed June 15, 2023.

⁶ <https://www.solidworks.com/>. Дата обращения 15.06.2023. / Accessed June 15, 2023.

составил от 4.8 м/с^2 до 5.2 м/с^2 , соответственно величина допуска была равна $\pm 0.2 \text{ м/с}^2$. Затем было проведено моделирование механических процессов в ПУ с имитацией различных дефектов: ослабленное крепление ПУ (дефект № 1), отсутствие ЭРЭ (дефект № 2), трещина в печатной плате (дефект № 3), другая толщина печатной платы (дефект № 4). В результате моделирования были получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) виброускорения в контрольной точке ПУ, приведенные на рис. 3.

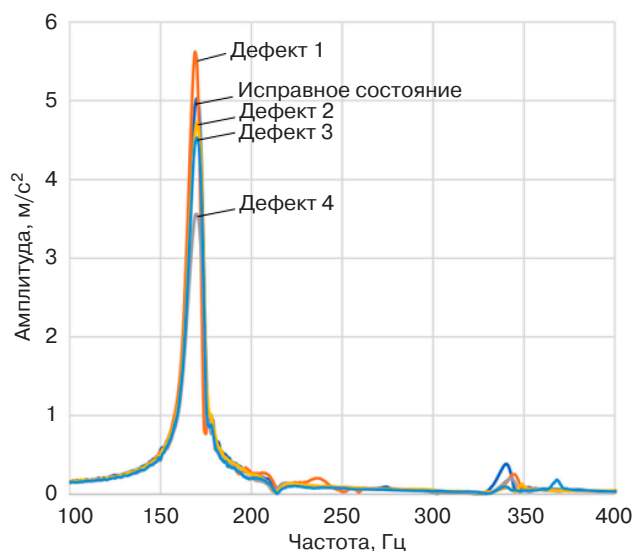


Рис. 3. Расчетные значения АЧХ в контрольной точке ПУ в исправном состоянии и при различных дефектах

Как видно из графиков, каждый из дефектов вызвал отклонение значений АЧХ виброускорений в контрольной точке ПУ от АЧХ для исправного состояния. Причем наиболее эффективно проводить сравнение АЧХ на первой резонансной частоте, т.к. при других частотах результат сравнения может быть некорректен за счет малого отличия значений амплитуд виброускорений, сравнимых с погрешностями расчета.

Далее были проведены экспериментальные исследования механических характеристик исправного ПУ и ПУ с одиночными дефектами, которые имитировались при моделировании. Эксперимент проводился с помощью вибростенда (рис. 4) на частоте гармонической вибрации, равной первой резонансной частоте (170 Гц), полученной в результате моделирования. В результате были получены экспериментальные значения амплитуд виброускорений в контрольной точке ПУ на резонансной частоте при различных дефектах: ослабленное крепление ПУ (дефект № 1) — 5.6 м/с^2 , отсутствие ЭРЭ (дефект № 2) — 4.7 м/с^2 , трещина в печатной плате (дефект № 3) — 4.5 м/с^2 , другая толщина печатной платы (дефект № 4) — 3.5 м/с^2 .

Как видно из результатов эксперимента, каждый из дефектов вызвал отклонение значений



Рис. 4. Установка для проведения экспериментального исследования ПУ при воздействии гармонической вибрации

виброускорений в контрольной точке ПУ от значения для исправного состояния за пределы рассчитанного допуска, полученного в результате моделирования. Причем некоторые дефекты могут вызывать примерно одинаковое изменение виброускорения в контрольной точке ПУ (например, дефекты № 2 и № 3 в эксперименте), сравнимое с погрешностью измерений, что говорит о невозможности однозначного определения вида дефекта (о наличии конкретного вида дефекта можно говорить только с определенной долей вероятности, определяемой на основании анализа возможных видов дефектов в исследуемом образце РЭС). Следовательно, проводя сравнение измеренных значений виброускорений с пределами допуска, полученными в результате имитационного моделирования, можно сделать вывод о наличии или отсутствии дефектов в ПУ и с определенной вероятностью определить вид возможных дефектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод расчета допусков на амплитуду виброускорения ПУ, основанный на имитационном моделировании с использованием метода Монте-Карло механических процессов в ПУ РЭС. При этом учитывается разброс физико-механических и геометрических параметров конструкции РЭС. По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод о правомерности применения описанного метода расчета допустимых значений виброускорений ПУ в практике производства для контроля технического состояния ПУ РЭС и поиска дефектов. Данный метод позволяет эффективно распознавать наличие одиночных дефектов в ПУ. Исследования в направлении возможного определения кратных дефектов (одновременное наличие двух и более дефектов в ПУ) ведутся авторами представленной работы в настоящее время.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Алкадарский А.Э.М., Долматов А.В., Увайсов Р.И. Задачи диагностики на протяжении жизненного цикла изделия. *Проблемы качества, безопасности и диагностики в условиях информационного общества*. 2004;1:103–104.
2. Долматов А.В., Сулейманов С.П., Увайсов Р.И. Диагностирование целостности конструкции электронной аппаратуры. *Проблемы качества, безопасности и диагностики в условиях информационного общества*. 2004;1:99–100.
3. Увайсов С.У., Черноверская В.В., Туан Н.В., Данг Н.В. Применение подхода Сешу-Уоксмэна и алгоритма Кохонена в задаче электрической диагностики аналоговых цепей. *Радиотехника*. 2022;86(12):79–89. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=dtpiyj>
4. Долматов А.В., Лобурец Д.А., Увайсов С.У. Комплексное электротепловое моделирование при проектировании и диагностировании радиоэлектронных средств. *Информатика-машиностроение*. 1998;2:23–31.
5. Увайсов С.У., Черноверская В.В., Данг Н.В., Туан Н.В. Применение искусственной нейронной сети в задаче тепловой диагностики печатного узла бортового устройства контроля разбега самолета. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2022;10(3):23–24. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.38.3.012>
6. Куан Д.А., Увайсова А.С., Демченко С.К., Хань Ф.Л.К. Алгоритм Кохонена в задачах классификации дефектов печатных узлов. *Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». Серия: Естественные и инженерные науки*. 2020;4(49):38–45.
7. Тихонов А.Н., Увайсов С.У., Иванов И.А., Лышов С.М. Концепция и метод диагностирования печатных узлов с использованием встроенных эмуляторов вибрационных колебаний. *Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии*. 2016;4(36):144–154.
8. Лышов С.М., Увайсов С.У., Черноверская В.В., Хань Ф.Л.К. Инженерная методика вибродиагностики конструкций бортовых радиоэлектронных средств. *Наукоемкие технологии*. 2020;21(2):17–28.
9. Эдвабник В.Г., Кузнецов М.М. Повышение надежности измерения ускорений при виброиспытаниях. *Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (Вестник СГУГиТ)*. 2023;28(1):133–141. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50759471>
10. Ямпурин Н.П., Денисюк А.А. Тепловые испытания бортовых радиоэлектронных средств. В сб.: *World Science: Problems and Innovations: сборник статей LII Международной научно-практической конференции*. Пенза, 30 марта 2021 г. С. 64–67.
11. Иванов И.А., Увайсов С.У., Увайсов Р.И. Вибродиагностика блоков радиоэлектронных средств. *Труды международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2009. Т. 2. С. 75–77.
12. Бакулин Я.Ю., Журавлев В.Ю. Виброиспытания изделий ракетно-космической техники. В сб.: *Решетневские чтения: материалы Международной научной конференции*. 2014. Т. 1. С. 123–124.
13. Туркалов О. Основы вибрационных испытаний и анализа конструкций. *Технологии в электронной промышленности*. 2018;1(101):54–65.
1. Alkadarskii A.E.M., Dolmatov A.V., Uvaisov R.I. Diagnostic tasks throughout the product life cycle. *Problemy kachestva, bezopasnosti i diagnostiki v usloviyakh informatsionnogo obshchestva = Problems of Quality, Safety and Diagnostics in the Information Society*. 2004;1:103–104 (in Russ.).
2. Dolmatov A.V., Suleimanov S.P., Uvaisov R.I. Diagnosing the integrity of the electronic equipment design. *Problemy kachestva, bezopasnosti i diagnostiki v usloviyakh informatsionnogo obshchestva = Problems of Quality, Safety and Diagnostics in the Information Society*. 2004;1:99–100 (in Russ.).
3. Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Nguyen V.T., Nguyen V.D. Application of the Seshu-Waxman approach and the Kohonen algorithm in the problem of electrical diagnostics of analog circuits. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2022;86(12):79–89 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=dtpiyj>
4. Dolmatov A.V., Loburets D.A., Uvaisov S.U. Complex electrothermal modeling in the design and diagnostics of radioelectronic devices. *Informatika-mashinostroyeniye = Computer Science-Mechanical Engineering*. 1998;2:23–31 (in Russ.).
5. Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Nguyen V.D., Nguyen V.T. The use of an artificial neural network in thermal diagnostics of the printed node of the on-board take-off control device of an aircraft. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(3):23–24. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.38.3.012>
6. Quan D.A., Han Ph.L.Q. Uvaysova A.S., Demchenko S.K. Kohonen algorithm in problems of classification of defects of printed circuit assemblies. *Vestnik Mezhdunarodnogo universiteta prirody, obshchestva i cheloveka "Dubna". Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki = E- Journal of Dubna State University. A Series of "Science of Man and Society"*. 2020;4(49):38–45 (in Russ.).
7. Tikhonov A.N., Uvaysov S.U., Ivanov I.A., Lyshov S.M. The concept and method of diagnosis of printed board assembly with using on-board emulators of oscillation. *Prikaspiiskii zhurnal: Upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2016;4(36):144–154 (in Russ.).
8. Lyshov S.M., Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Han Ph.L.Q. Engineering technique for vibrodiagnostics of structures of on-board radio electronic means. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2020;21(2):17–28 (in Russ.).
9. Edvabnik V.G., Kuznetsov M.M. Improving the reliability of measuring accelerations during vibration tests. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (Vestnik of SGUGiT)*. 2023;28(1):133–141 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50759471>
10. Yampurin N.P., Denisyuk A.A. Testing on-board electronic equipment for temperature effects. In: *World Science: Problems and Innovations: Collection of articles of the LII International Scientific and Practical Conference*. Penza, March 30, 2021. P. 64–67 (in Russ.).

14. Сафронов П.В. Влияние конструкции электронного блока управления автомобиля на вибростойкость его электронных компонентов. В сб.: *Акустика среды обитания 2022: материалы VII Всероссийской конференции*. Москва, 26–27 мая 2022 г. Т. 1. С. 198–206.
15. Дехтярук Н.Т., Видалко Е.Н. Имитационное моделирование в радиотехнических системах. *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. 2006;9(9):13–22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12773332>
16. Лышов С.М., Иванов И.А., Увайсова А.С., Увайсова С.С. Расчет разбросов резонансных частот печатных узлов электронных средств. *Вестник кибернетики*. 2018;4(32):129–135.
17. Шалумов А.С. АСОНИКА – российская САПР электроники в части виртуальных испытаний. *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2022;3:82–83. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.214.3.82.83>
18. Шалумов А.С., Чабриков С.В., Травкин Д.Н., Шалумов М.А. АСОНИКА-ТМ: моделирование конструкций печатных узлов на тепловые и механические воздействия. *Автоматизация. Современные технологии*. 2021;75(3):99–107. <https://doi.org/10.36652/0869-4931-2021-75-3-99-107>
11. Ivanov I.A., Uvaysov S.U., Uvaysov R.I. Vibrodiagnostics of radio-electronic devices. In: *Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*. 2009. V. 2. P. 75–77 (in Russ.).
12. Bakulin Ya.Yu., Zhuravlev V.Yu. Vibration testing of rocket and space technology products. In: *Reshetnev Readings: Materials of the International Scientific Conference*. 2014. V. 1. P. 123–124 (in Russ.).
13. Turkalov O. Fundamentals of vibration testing and structural analysis. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti = Technologies in the Electronic Industry*. 2018;1(101):54–65 (in Russ.).
14. Safronov P.V. The influence of the design of the electronic control unit of the car on the vibration resistance of its electronic components. In: *Acoustics of the Habitat 2022: Proceedings of the 7th All-Russian Conference*. Moscow, May 26–27, 2022. V. 1. P. 198–206 (in Russ.).
15. Dekhtyaruk N.T., Vidalko E.N. Imitative simulation in radio engineering systems. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2006;49(9):9–15. [Original Russian Text: Dekhtyaruk N.T., Vidalko E.N. Imitative simulation in radio engineering systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Radioelektronika*. 2006;49(9):13–22 (in Russ.). Available from URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12773332>]
16. Lyshov S.M., Ivanov I.A., Uvaisova A.S., Uvaisova S.S. Calculation of resonant frequency spreads of printed circuit assembly of electronic devices. *Vestnik kibernetiki = Proceedings in Cybernetics*. 2018;4(32):129–135 (in Russ.).
17. Shalumov A.S. ASONIKA – Russian CAD electronics in terms of virtual tests. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2022;3:82–83 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.214.3.82.83>
18. Shalumov A.S., Chabrikov S.V., Travkin D.N., Shalumov M.A. ASONIKA-TM: modeling of printed circuit board design for thermal and mechanical effects. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation. Modern Technologies*. 2021;75(3):99–107 (in Russ.). <https://doi.org/10.36652/0869-4931-2021-75-3-99-107>

Об авторах

Битюков Владимир Ксенофонович, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bitukov@mirea.ru. ResearcherID Y-8325-2018, Scopus Author ID 6603797260, SPIN-код РИНЦ 3834-5360, <https://orcid.org/0000-0001-6448-8509>

Долматов Алексей Вячеславович, к.т.н., доцент, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dolmatov@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 3887-2405, <https://orcid.org/0000-0003-2969-2971>

Заdernовский Анатолий Андреевич, д.т.н. заведующий кафедрой физики Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: zadernovsky@mirea.ru. ResearcherID B-5463-2016, Scopus Author ID 6602831427, SPIN-код РИНЦ 2345-7791, <https://orcid.org/0000-0002-4017-4836>

Стариковский Анатолий Иванович, к.т.н., профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: starikovski@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926243, SPIN-код РИНЦ 1126-4471, <https://orcid.org/0000-0003-4040-3843>

Увайсов Руслан Магомедович, аспирант, кафедра радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: uvaysov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0619-649X>

About the authors

Vladimir K. Bityukov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bitukov@mirea.ru. ResearcherID Y-8325-2018, Scopus Author ID 6603797260, RSCI SPIN-code 3834-5360, <https://orcid.org/0000-0001-6448-8509>

Aleksey V. Dolmatov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dolmatov@mirea.ru. RSCI SPIN-code 3887-2405, <https://orcid.org/0000-0003-2969-2971>

Anatoly A. Zadernovsky, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Physics Department, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: zadernovsky@mirea.ru. ResearcherID B-5463-2016, Scopus Author ID 6602831427, RSCI SPIN-code 2345-7791, <https://orcid.org/0000-0002-4017-4836>

Anatoly I. Starikovskiy, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: starikovski@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926243, RSCI SPIN-code 1126-4471, <https://orcid.org/0000-0003-4040-3843>

Ruslan M. Uvaysov, Postgraduate Student, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: uvajsov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0619-649X>