

УДК 534-16

DOI: 10.35330/1991-6639-2019-6-92-95-101

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

**М.О. МАМЧУЕВ, В.В. НАРОЖНОВ**

Институт прикладной математики и автоматизации –  
филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр  
«Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»  
360000, КБР, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89 А  
E-mail: ipma@niipma.ru

*Настоящая работа посвящена обработке и анализу сигналов, возникающих при механических колебаниях многослойных печатных плат. Разработан и изготовлен оригинальный измерительный стенд, который позволяет детектировать вынужденные колебания прямоугольных балок. Изучались следующие характеристики: осциллограммы сигналов, Фурье-спектры, фазовые портреты. Был разработан алгоритм анализа сигналов колебаний. Для реализации этого алгоритма использовались программа Mathcad 15 и встроенные функции для аппроксимации, интерполяции и Фурье-преобразования сигналов. Было показано, что на колебательные характеристики печатных плат оказывает влияние не только общая масса SMD-компонентов, но и структура поверхностного монтажа и металлизации. С увеличением количества SMD-компонентов увеличивается добротность печатных плат. В экспериментальных спектрах колебаний выделяются две гармоники: большой пик соответствует частоте основного тона колебаний; малый пик относится ко второй гармонике, которая с течением времени быстро затухает. С увеличением количества SMD-компонентов увеличиваются амплитуды обеих гармоник, что связано с возрастанием жесткости образцов. С увеличением количества SMD-компонентов пики обеих гармоник смещаются в область меньших частот. Это объясняется тем, что собственные частоты колебаний печатных плат чувствительны к общей массе SMD-компонентов. Таким образом, печатные платы с большим количеством SMD-компонентов способны запасать большое количество механической энергии, что может негативно сказываться на их эксплуатационных характеристиках в условиях интенсивных вибраций.*

**Ключевые слова:** печатная плата, затухающие колебания, фазовый портрет, спектральные характеристики, SMD-компоненты.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

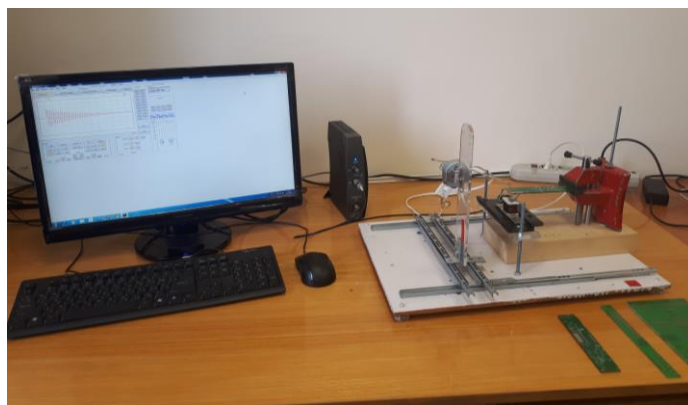
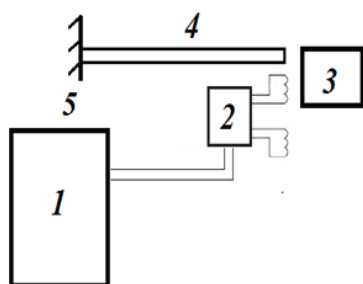
К электронной аппаратуре (ЭА), устанавливаемой на кораблях, самолетах и спутниках, предъявляются повышенные требования по виброзащите [1-3]. В [4] проведено экспериментальное и теоретическое исследование влияния плотности монтажа SMD-компонентов (от англ. Surface Mount Device) на собственную частоту, амплитуду и логарифмический декремент затухания колебаний многослойных печатных плат (ПП). В [4] использовался измерительный стенд оригинальной конструкции, а также приближенные методы анализа динамических колебательных систем.

Настоящая работа является продолжением [4] и посвящена построению и изучению осциллограмм сигналов, частотных спектров и фазовых портретов колебаний многослойных ПП, содержащих SMD-компоненты. Во всех расчетах применялась программа Mathcad 15.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

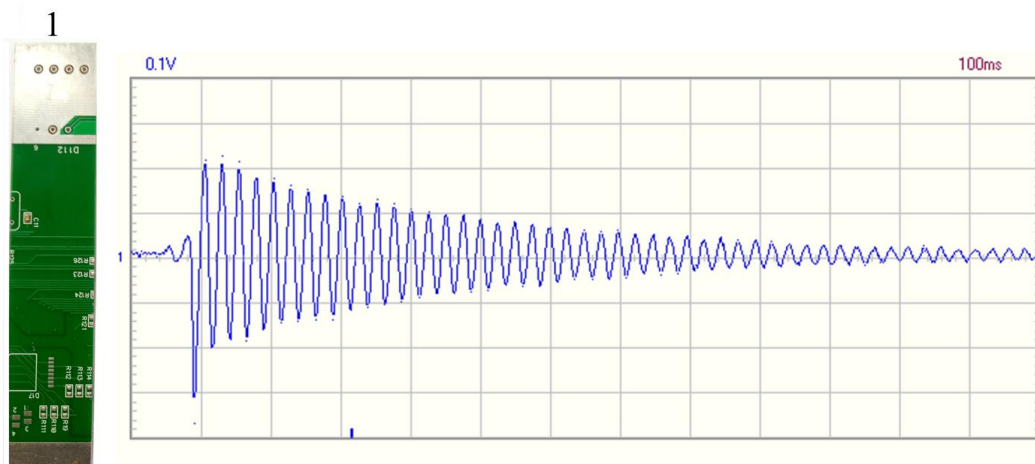
Принцип работы измерительного стенда (см. рис. 1) заключается в следующем. Образец ПП жестко закрепляется с одной стороны. На противоположную сторону образца при-

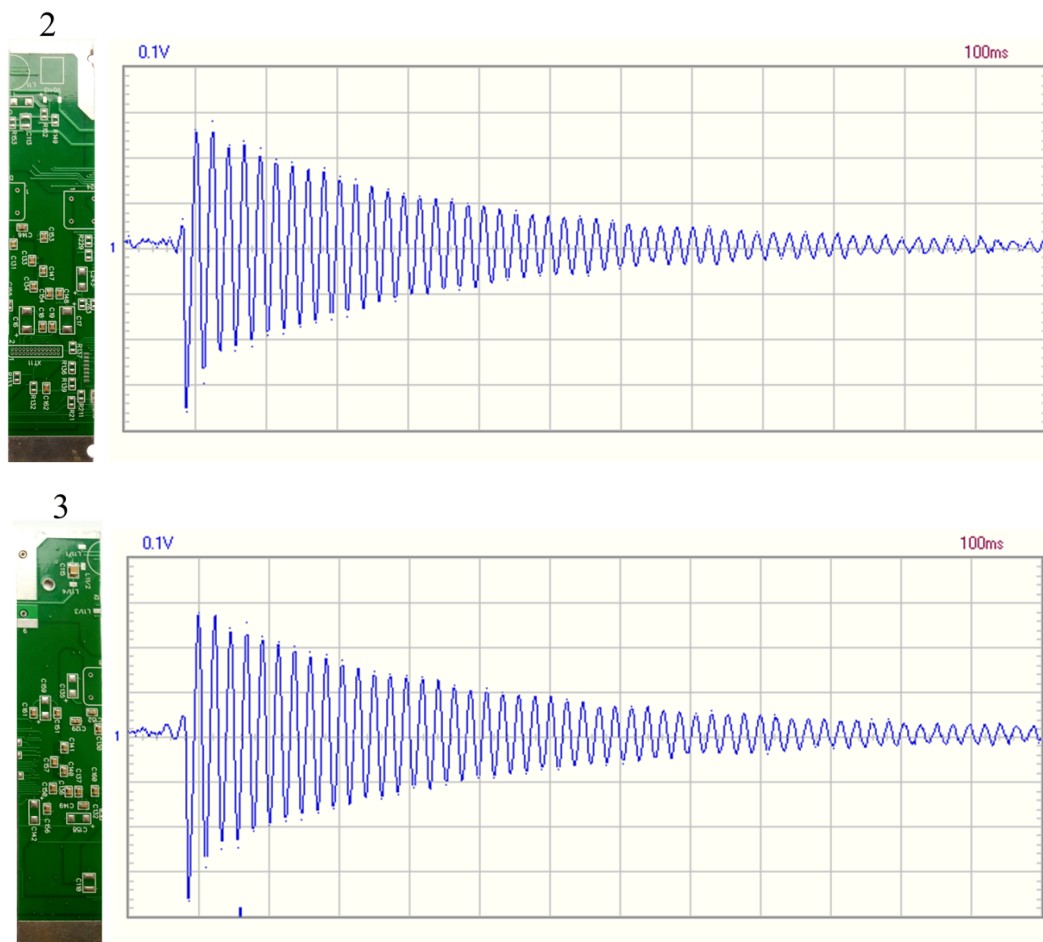
клеивается небольшой магнит, масса которого намного меньше массы образца ПП. На некотором расстоянии от магнита размещается катушка с сердечником, которая служит для детектирования колебаний образца. Для обеспечения одинаковых условий все измерения для различных образцов ПП проводились с одним и тем же магнитом. Колебания ПП возбуждаются механическим способом. Для этого используется электродвигатель с малыми оборотами, на вал которого прикреплена гибкая отклоняющая пластина: в процессе вращения эта пластина цепляет образец за свободный край, отклоняет его и тем самым возбуждает колебания. Измерения электрических сигналов осуществлялись с помощью компьютерного генератора-осциллографа PCSGU-250 фирмы Velleman.



**Рис. 1.** Блок-схема измерительного стенда для исследования колебательных характеристик печатных плат: 1 – компьютерный осциллограф, 2 – катушка с магнитным сердечником, 3 – электродвигатель, 4 – исследуемый образец (печатная плата), 5 – крепление.

Проводились исследования образцов ПП, которые представляли собой прямоугольные пластины с одинаковыми размерами и с различной плотностью поверхностного монтажа компонентов. Были исследованы три образца ПП цифрового устройства с разным количеством SMD-компонентов (рис. 2). Образцы имели пять чередующихся слоев из меди и стеклотекстолита FR4. Средние значения коэффициентов заполнения слоев: Power и Gnd – 0.9 (90%); Bottom и Top – 0.3 (30%). Размер образцов: длина  $l=13$  см; ширина  $a=2.8$  см; толщина  $h=2$  мм. Масса образцов определялась в пределах точности микровесов Digital Scale Professional-Mini. Характеристики образцов: образец № 1, количество SMD-компонентов – 1, масса – 0.5 г; образец № 2, количество SMD-компонентов – 11, масса – 20.8 г; образец № 3, количество SMD-компонентов – 15, масса – 20.9 г. Для каждого образца проводилась серия из пяти измерений и определялись средние значения измеряемых параметров.



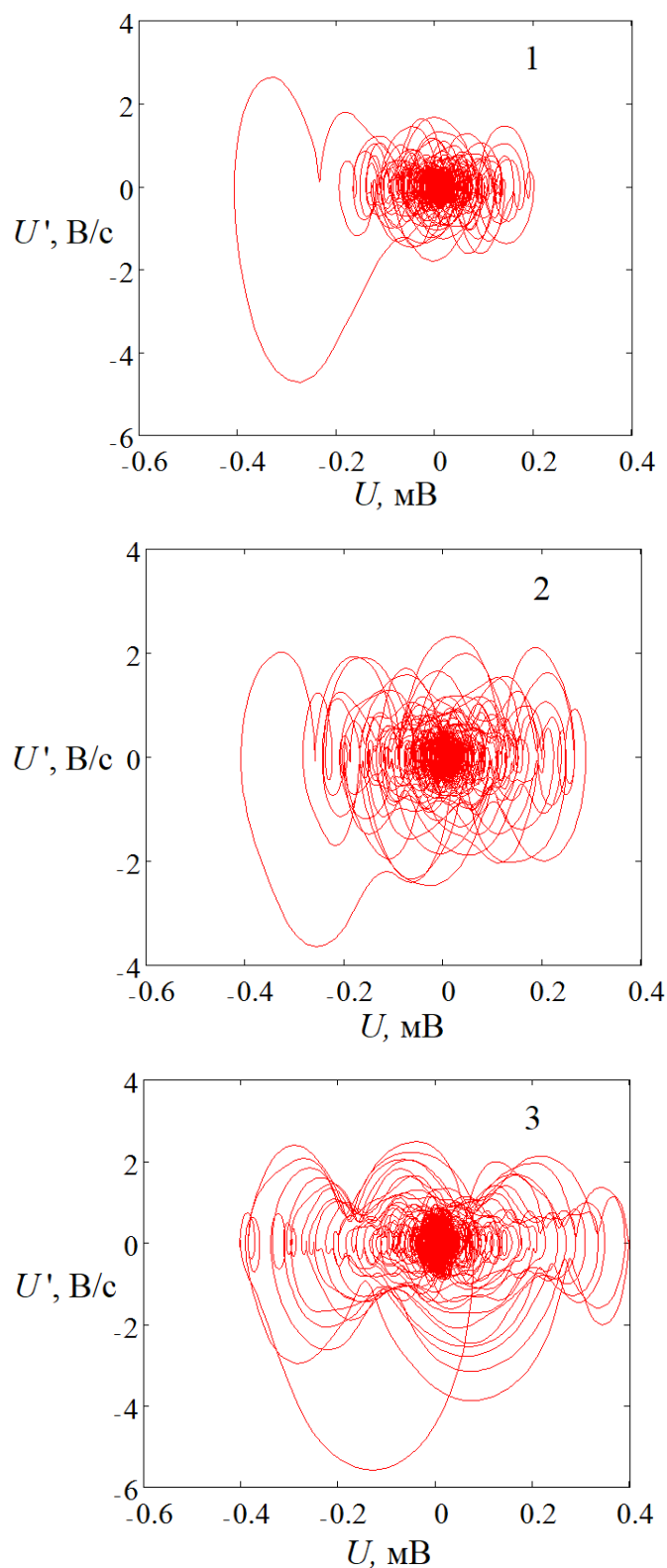


*Рис. 2. Образцы № 1-3 и осциллограммы колебаний пластин*

### 3. ФАЗОВЫЙ ПОРТРЕТ

Чтобы изучить поведение какой-либо динамической системы, можно рассматривать фазовый портрет. Построение фазовых портретов осуществлялось аналогично [5]. Используя встроенные функции «cspline» и «interp» в программе Mathcad 15 [6], проводилась аппроксимация и интерполяция сигналов колебаний ПП с различным числом SMD компонентов. Далее были построены фазовые портреты, которые показаны на рис. 3. При колебаниях ПП возникает аттрактор типа «устойчивый фокус», который соответствует затухающим колебаниям. Из структуры фазовых портретов можно заключить, что с увеличением количества SMD-компонентов увеличивается добротность ПП. Из этого следует, что ПП с большим количеством SMD-компонентов способны запасать большое количество механической энергии, что может негативно сказываться на их эксплуатационных характеристиках.

В фазовом пространстве траектория отличается от эллипса или окружности, которая свойственна простейшему уравнению движения пружинного маятника. Вследствие динамического хаоса реальная траектория в фазовом пространстве перестает быть замкнутой и может иметь сложный и запутанный характер [7]. Главной причиной служит нелинейность реальных колебаний. Однако степень хаотичности сигналов в нашем случае (см. рис. 2) не является столь критичной, поэтому нелинейными эффектами в нашем случае можно пренебречь.



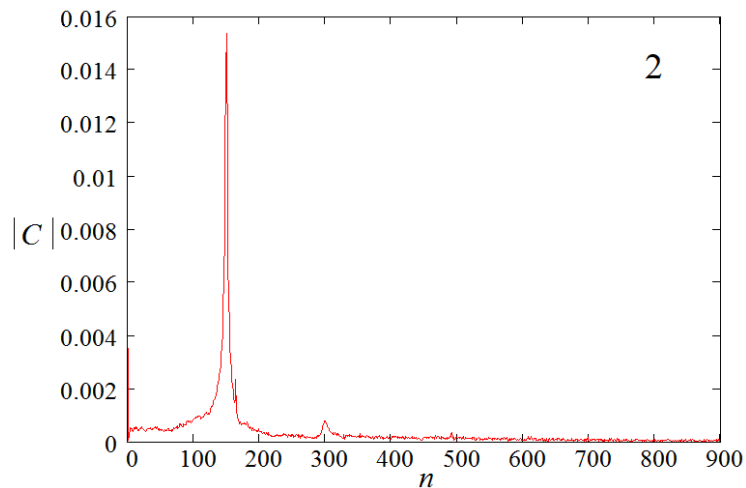
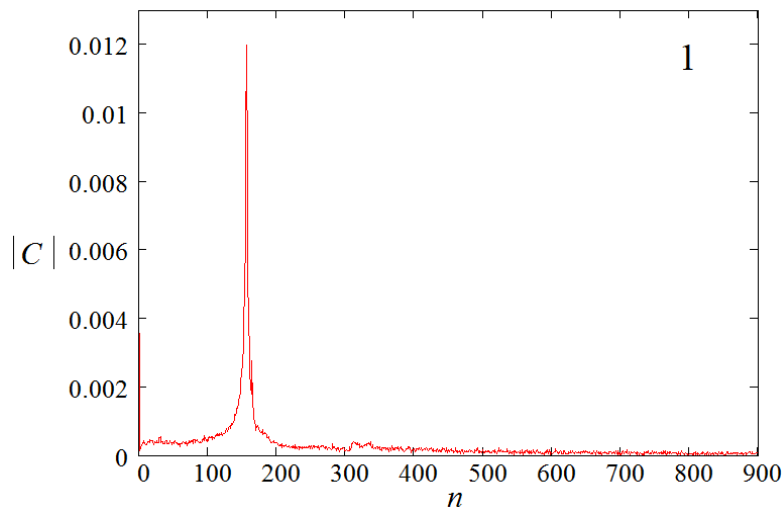
**Рис. 3.** Фазовые портреты сигналов, полученных с помощью измерительного стенда.  
Графики 1-3 соответствуют исследованным образцам

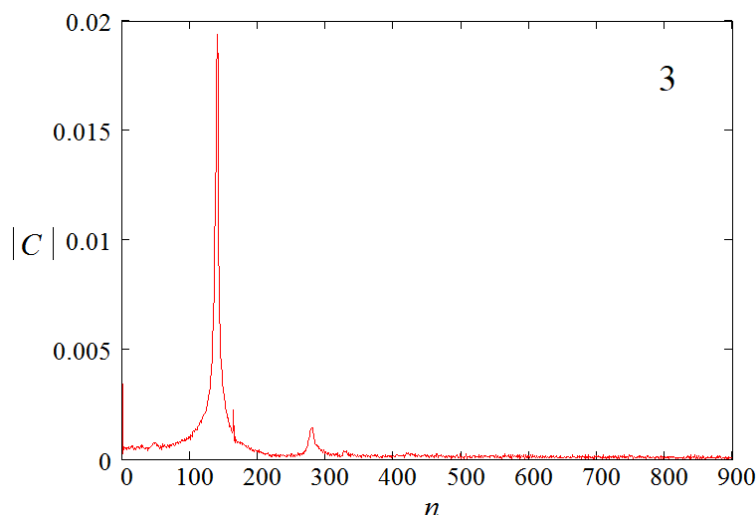
При движении механической системы возникают диссипативные силы, которые вызывают рассеивание механической энергии. Демпфирование колебаний ПП обусловлено следующими факторами: «внешним» трением при колебаниях конструкции в окружаю-

щей среде; «внутренним» трением в материале; трением в подвижных и неподвижных соединениях. Образцы ПП с большим числом навесных компонентов отличаются более развитой структурой металлизации во внутренних и внешних слоях. При этом дорожки металлизации играют роль своеобразных армирующих элементов и придают дополнительную жесткость ПП, что также может сказываться на колебательных характеристиках ПП. На малых интервалах времени, когда затуханием колебаний можно пренебречь, имеет место предельный цикл для всех трех образцов, т.к. их добротность значительно больше единицы. С течением времени предельный цикл переходит в устойчивый фокус.

#### 4. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ

В работе проводился спектральный анализ сигналов, возникающих при колебаниях печатных плат с различным числом SMD-компонентов. Использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), численная реализация которого осуществлялась с помощью программы Mathcad 15. Для решения поставленной задачи наиболее подходящим является общий оператор  $\text{CFFT}(U)$  [6]. Этот оператор возвращает вектор прямого комплексного преобразования Фурье, где  $U$  – вектор решения. Функция  $\text{ICFFT}(C)$  дает вектор обратного комплексного преобразования Фурье, где  $C$  – вектор коэффициентов Фурье, т.е. это энергетический спектр колебательного процесса. Данные функции используют нормировку  $1/N$ , которая позволяет проанализировать усредненное распределение энергии сигнала по частотам, соответствующим элементарным гармоническим составляющим. Модуль коэффициентов Фурье характеризует энергию сигнала на данной частоте.





**Рис. 4.** Фурье-спектры колебаний ПП с различным числом SMD-компонентов. Графики 1-3 соответствуют исследованным образцам

На рис. 4 представлены зависимости модулей коэффициентов Фурье от их номера  $n$  (т.е. фактически от частоты), рассчитанные с применением программы Mathcad 15 и указанного выше оператора. Можно видеть, что в спектре колебаний отчетливо выделяются две гармоники. Главный пик соответствует частоте основного тона колебаний. Малый пик относится ко второй гармонике. С течением времени вторая гармоника быстро затухает, и можно считать, что образцы ПП колеблются с основной частотой. С увеличением количества SMD-компонентов увеличиваются амплитуды первой и второй гармоник, что связано с возрастанием жесткости образцов ПП. С увеличением количества SMD-компонентов пики обеих гармоник смещаются в область меньших частот. Это объясняется тем, что собственные частоты колебаний ПП чувствительны к общей массе SMD-компонентов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Талицкий Е.Н. Защита электронных средств от механических воздействий. Теоретические основы. Владимир: Владим. гос. ун-т., 2001. 256 с.
2. Зеленев Ю.В. Виброзащита радиоэлектронной аппаратуры полимерными компаундами. М.: Радио и связь, 1982. 296 с.
3. Филиппов А.В. Особенности конструирования РЭА, работающей в условиях широкополосной вибрации // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 11. Ч. 2. С. 18-25.
4. Рехвиашвили С.Ш., Мамчурев М.О., Нарожнов В.В., Ойхунов М.М., Тлибеков А.Х. Исследование влияния плотности монтажа компонентов на колебательные характеристики многослойных печатных плат // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2018. Т. 23. № 2. С. 141-148.
5. Нарожнов В.В. Моделирование нелинейного осциллятора при наличии упругих соударений: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.18. Северо-Кавказский федеральный университет. Ставрополь, 2018. 129 с.
6. Кирьянов Д.В. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. СПб.: БВХ-Петербург, 2012. 428 с.
7. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 406 с.

## REFERENCES

1. Talickij E.N. *Zashhita jelektronnyh sredstv ot mehanicheskikh vozdejstvij. Teoreticheskie osnovy* [Protection of electronic devices from mechanical influences. Theoretical basis]. Vladimir: Vladim.State Univercity, 2001. 256 p.

2. Zelenov Ju.V. *Vibrozaschita radiojelektronnoj apparatury polimernymi kompaundami* [Vibration protection of electronic equipment with polymer compounds]. M.: Radio i svjaz', 1982. 296 p.
3. Filippov A.V. *Osobennosti konstruirovaniya REA, rabotajushhej v uslovijah širokopolosnoj vibracii* [Design features of REE operating in conditions of broadband vibration] // *Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki*. 2012. Vyp. 11, ch. 2. P. 18-25.
4. Rehviashvili S.Sh., Mamchuev M.O., Narozhnov V.V., Oshhunov M.M., Tlibekov A.H. *Issledovanie vlijaniya plotnosti montazha komponentov na kolebatel'nye karakteristiki mnog-oslojnyh pechatnyh plat* [Investigation of the effect of component density on the vibrational characteristics of multilayer printed circuit boards] // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Elektronika*. 2018. V. 23. № 2. P. 141-148.
5. Narozhnov V.V. *Modelirovanie nelinejnogo oscilljatora pri nalichii uprugih soudarenij*: diss. ... kand. tehn. nauk: 05.13.18. [Modeling a nonlinear oscillator in the presence of elastic collisions Diss. ... cand. tech. Sciences: 05.13.18.] *Severo-Kavkazskij federal'nyj universitet*. Stavropol', 2018. 129 p.
6. Kir'janov, D. V. *Mathcad 15. Mathcad Prime 1.0 / D. V. Kir'janov*. SPb.: BVH-Peterburg, 2012. 428 p.
7. Haken H. *Synergetik*. M.: Mir, 1980. 406 p.

## THE STUDY OF MECHANICAL VIBRATIONS OF MULTILAYER PRINTED CIRCUIT BOARDS

M.O. MAMCHUEV, V.V. NAROZHNOV

Institute of Applied Mathematics and Automation –  
branch of the FSBSE “Federal Scientific Center  
“Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”  
360000, KBR, Nalchik, Shortanov street, 89 A  
E-mail: ipma@niipma.ru

*The present work is devoted to the processing and analysis of signals arising from mechanical vibrations of multilayer printed circuit boards. An original measuring stand was developed and manufactured that allows detecting forced vibrations of rectangular beams. The following characteristics were studied: waveforms of signals; Fourier spectra, phase portraits. An algorithm for analyzing vibration signals was developed. To implement this algorithm, we used the Mathcad 15 program and built-in functions for approximating, interpolating, and Fourier transforming signals. It was shown that the vibrational characteristics of printed circuit boards are influenced not only by the total mass of SMD components, but also by the surface mounting and metallization structure. With the increase in the number of SMD components, the quality factor of printed circuit boards increases. In the experimental spectra of oscillations, two harmonics are distinguished: a large peak corresponds to the frequency of the fundamental tone of the oscillations; small peaks refer to the second harmonic, which decays rapidly over time. With an increase in the number of SMD components, the amplitudes of both harmonics increase, which is associated with an increase in the stiffness of the samples. With an increase in the number of SMD components, the peaks of both harmonics shift toward lower frequencies. This is because the natural frequencies of the printed circuit boards are sensitive to the total mass of SMD components. Thus, printed circuit boards with a large number of SMD components are capable of storing a large amount of mechanical energy, which can adversely affect their performance in conditions of intense vibration.*

**Keywords:** printed circuit board, damped oscillations, phase portrait, spectral characteristics, SMD components.

*Работа поступила 06.12.2019 г.*