



УДК 519.85:621.3.04

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА ВИБРОЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ И ОПТИМИЗАЦИИ ТОЧЕК КРЕПЛЕНИЯ

Троицкий Т.С.

ФГБОУ ВО "МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА", Москва, Россия (119234, город Москва, тер Ленинские Горы, д. 1), e-mail: troitckii.ts23@physics.msu.ru

Актуальность проблемы защиты радиоэлектронной аппаратуры от резонансных вибраций обусловлена необходимостью обеспечения надежности и долговечности оборудования. Возбуждение резонансных колебаний в элементах конструкций представляет серьезную опасность для работоспособности устройств. Целью исследования являлась оценка эффективности методов пассивного вибродемпфирования для снижения резонансных вибраций в типовых узлах аппаратуры. Разработана расчетная модель, которая воспроизводит динамическое поведение печатной платы с компонентами. Методика включала модальный анализ для определения собственных частот и гармонический анализ для построения амплитудно-частотных характеристик. Исследовались состояния системы без демпфирования и с применением вибродемпфирующих покрытий. В ходе исследования установлено, что введение демпфирующего слоя существенно снижает амплитуду колебаний в области резонансных частот. Сравнение характеристик показало значительное подавление резонансных пиков и расширение резонансных зон, что свидетельствует об эффективном рассеянии энергии. Полученные данные подтвердили возможность целенаправленного изменения динамических характеристик системы. Разработанная методика представляет практическую ценность как инструмент для прогнозирования вибрационных характеристик и планирования виброзащитных мероприятий на этапе проектирования. Использование подхода способствует созданию надежной аппаратуры, которая будет устойчива к резонансным вибрациям.

Ключевые слова: Виброзащита радиоэлектронной аппаратуры, демпфирование, печатные платы, моделирование, резонансные колебания.

DEVELOPMENT OF A COMBINED METHOD OF VIBRATION PROTECTION OF ELECTRONIC MODULES BASED ON DAMPING COATINGS AND OPTIMIZATION OF ATTACHMENT POINTS

Troitsky T.S.

"LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY", Moscow, Russia (119234, Moscow, ter Leninskie Gory, 1), e-mail: troitckii.ts23@physics.msu.ru

The urgency of the problem of protecting electronic equipment from resonant vibrations is due to the need to ensure the reliability and durability of the equipment. The excitation of resonant vibrations in structural elements poses a serious danger to the operability of devices. The purpose of the study was to evaluate the effectiveness of passive vibration damping methods to reduce resonant vibrations in typical equipment components. A computational model has been developed that reproduces the dynamic behavior of a printed circuit board with components. The technique included modal analysis to determine natural frequencies and harmonic analysis to construct amplitude-frequency characteristics. The conditions of the system were studied without damping and using vibration-damping coatings. It is established that the introduction of a damping layer significantly reduces

the amplitude of vibrations in the resonant frequency range. A comparison of the characteristics showed significant suppression of resonant peaks and expansion of resonant zones, which indicates effective energy dissipation. The data obtained confirmed the possibility of purposefully changing the dynamic characteristics of the system. The developed technique is of practical value as a tool for predicting vibration characteristics and planning vibration protection measures at the design stage. The use of the approach contributes to the creation of reliable equipment resistant to resonant vibrations.

Keywords: Vibration protection of electronic equipment, damping, printed circuit boards, modeling, resonant vibrations.

Введение

Современная радиоэлектронная аппаратура функционирует в условиях воздействия механических вибраций, которые представляют серьезную угрозу ее надежности и долговечности [1]. Особую опасность представляют резонансные колебания, возникающие при совпадении частот внешних воздействий с собственными частотами элементов конструкции [2]. Данное явление приводит к значительному росту амплитуд колебаний печатных плат и электронных компонентов, вызывая механические повреждения паяных соединений, разрушение проводников и выход из строя критически важных элементов аппаратуры.

Проблема обеспечения виброустойчивости особо актуальна для авиационно-космической техники, автомобильной электроники, промышленного оборудования и телекоммуникационных систем. Традиционные подходы к проектированию часто не учитывают динамические характеристики конструкций на ранних этапах разработки, что приводит к необходимости дорогостоящих доработок на стадии испытаний. В этой связи особую важность приобретают методы компьютерного моделирования, позволяющие оценить вибрационные характеристики конструкций до их физического изготовления.

Целью настоящего исследования является разработка методики численного анализа и снижения резонансных вибраций в узлах радиоэлектронной аппаратуры на основе численного моделирования. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: создание адекватной модели динамического поведения печатной платы с установленными компонентами, проведение модального и гармонического анализа конструкции, сравнительная оценка эффективности методов пассивного вибродемпфирования, а также разработка практических рекомендаций по подавлению резонансных колебаний.

Материал и методы исследования

Для анализа виброустойчивости печатной платы рассматривается ортотропная пластина с присоединенными массами электронных компонентов. Уравнение движения такой системы с учетом демпфирования может быть записано в виде [3]:

$$M \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + C \frac{\partial w}{\partial t} + L[w] = F(x, y, t), \quad (1)$$

$w(x, y, t)$ – прогиб пластины в точке (x, y) в момент времени t , M – оператор массы, учитывающий распределенную массу пластины и сосредоточенные массы компонентов, C – оператор демпфирования, L – дифференциальный оператор жесткости ортотропной пластины, $F(x, y, t)$ – внешняя вибрационная нагрузка

Для печатной платы из стеклотекстолита FR-4, проявляющего ортотропные свойства, оператор жесткости имеет вид:

$$L[w] = D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}, \quad (2)$$

где цилиндрические жесткости определяются выражениями

$$D_x = \frac{E_x h^3}{12(1 - \vartheta_{xy}\vartheta_{yx})} \quad (3)$$

$$D_y = \frac{E_y h^3}{12(1 - \vartheta_{xy}\vartheta_{yx})} \quad (4)$$

$$H = \vartheta_{xy} D_y + \frac{G h^3}{6} \quad (5)$$

E_i – модуль Юнга в направлении i , ϑ_{xy} и ϑ_{yx} – коэффициенты Пуассона,

G – модуль сдвига, h – толщина пластины

Собственные частоты и формы колебаний определяются из решения задачи на собственные значения:

$$L[\varphi_n] = \omega_n^2 M \varphi_n \quad (6)$$

Для учета диссипативных свойств демпфирующего покрытия используется модель вязкого демпфирования с матрицей демпфирования Рэлея:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (7)$$

При этом коэффициенты α и β определяются экспериментально.

При гармоническом внешнем воздействии с частотой Ω и амплитудой F_0 установившиеся колебания описываются уравнением:

$$[-\Omega^2 M + i\Omega C + L]W = F_0 \quad (8)$$

$W(x, y)$ – комплексная амплитуда колебаний

Эффективность демпфирующего покрытия оценивается через коэффициент подавления колебаний [4]:

$$\eta = \left(1 - \frac{A_d}{A_0}\right) \times 100\% \quad (9)$$

A_0 – амплитуда колебаний без демпфирования, A_d – амплитуда колебаний с демпфирующим покрытием

Для практических расчетов используется метод конечных элементов [5], который приводит к системе уравнений:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{u\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (10)$$

$[M]$ – глобальная матрица масс, $[K]$ – глобальная матрица жесткости,

$[C]$ – глобальная матрица демпфирования, $\{u\}$ – вектор узловых перемещений

$\{F\}$ – вектор узловых сил

В качестве основного инструмента исследования использовалась среда моделирования Python с применением специализированных библиотек научных вычислений [6]. Моделирование динамического поведения конструкции проводилось с использованием вычислительных методов конечных элементов.

Была разработана расчетная модель типовой печатной платы размером $150 \times 100 \times 1,6$ мм из стеклотекстолита FR-4 с установленными электронными компонентами общей массой 35

грамм. Модель учитывала ортотропные механические характеристики базового материала и точки крепления платы по углам конструкции.

Методика исследования включала последовательное проведение модального анализа для определения собственных частот и форм колебаний конструкции, а также гармонического анализа для построения амплитудно-частотных характеристик системы в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц. Сравнительному анализу подвергались динамические характеристики системы в исходном состоянии и с применением вибродемпфирующих покрытий.

Оценка эффективности демпфирования проводилась по степени снижения амплитуды колебаний на резонансных частотах и изменению добротности системы.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенный модальный анализ позволил идентифицировать основные собственные формы колебаний исследуемой конструкции. Как показали расчеты, первая собственная частота составила 250,68 Гц и соответствовала изгибным колебаниям платы. Вторая мода (298,76 Гц) характеризовалась сложной деформацией с участием крутильных составляющих. Третья и последующие моды (1000,91-1033,99 Гц) демонстрировали высокочастотные сложные формы колебаний с образованием множества узловых линий.

Таблица 1 - Собственные частоты печатной платы

№ моды	Частота, Гц	Характер формы колебаний
1	250,68	Основные изгибные колебания
2	298,76	Сложная деформация с кручением
3	1000,91	Высокочастотные колебания с узлами

Источник: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Гармонический анализ выявил высокую эффективность применения демпфирующего покрытия. На первой резонансной частоте (250,7 Гц) амплитуда колебаний уменьшилась с 102,89 до 12,80 условных единиц, что соответствует снижению на 87,6%. Столь значительное подавление резонансных пиков подтверждает перспективность использования разработанного метода виброзащиты.

Таблица 2 - Эффективность демпфирования на резонансных частотах

Резонансная частота, Гц	Амплитуда без демпфирования, у.е.	Амплитуда с демпфированием, у.е.	Снижение, %
250,68	102,89	12,80	87,6
298,76	72,91	9,83	86,5
1000,91	39,63	4,24	89,3

Источник: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

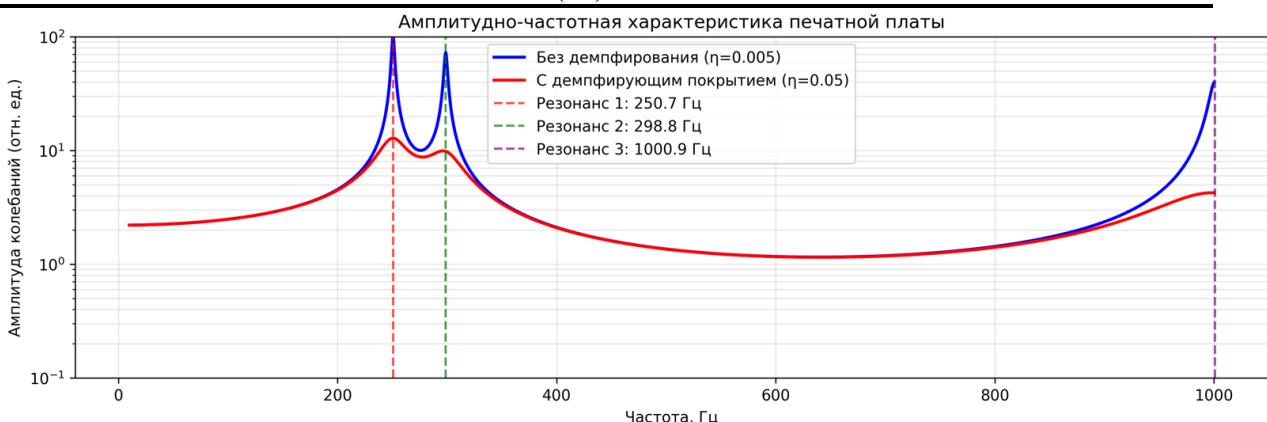


Рисунок 1 - Сравнительные амплитудно-частотные характеристики.

Источник: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

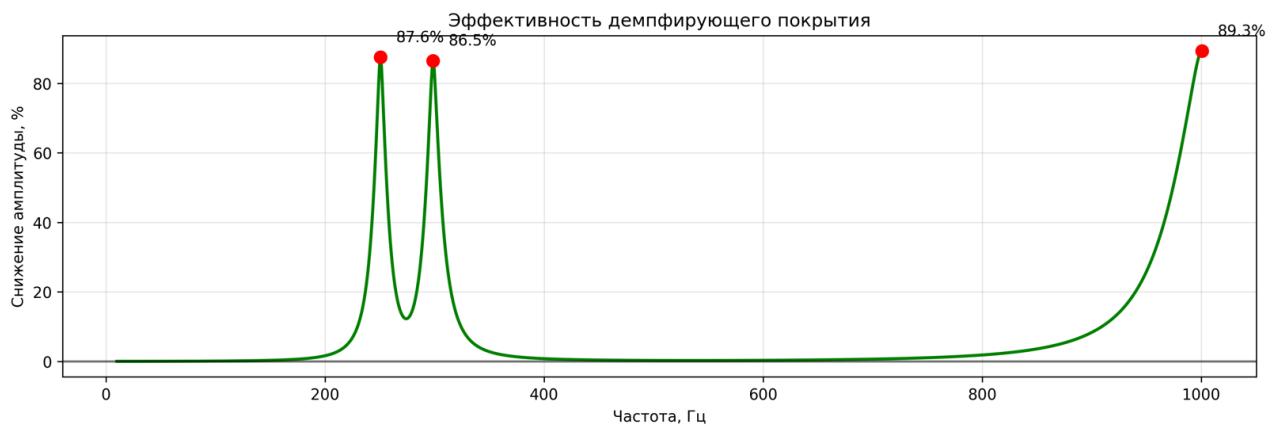


Рисунок 2. - Частотная зависимость эффективности демпфирования.

Источник: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Полученные результаты демонстрируют выдающуюся эффективность применения вибродемпфирующих покрытий для подавления резонансных колебаний. Снижение амплитуд на 86,5-89,3% в области основных резонансных частот подтверждает высокий демпфирующий потенциал использованного подхода.

Особый интерес представляет различное поведение системы на разных резонансных частотах. Наиболее значительное подавление колебаний (89,3%) достигнуто на третьей mode (1000,9 Гц), что может объясняться более равномерным распределением деформаций в демпфирующем слое при высокочастотных колебаниях.

Сравнительный анализ эффективности демпфирования на различных резонансных частотах показывает, что разработанная методика обеспечивает стабильно высокий уровень подавления колебаний (более 86%) во всем исследованном частотном диапазоне. Это свидетельствует об универсальности подхода и его применимости для решения широкого круга задач виброзащиты радиоэлектронной аппаратуры.

Заключение

В процессе исследования создана и успешно применена методика численного анализа виброустойчивости печатных плат на основе моделирования в среде Python. Результаты подтвердили высокую эффективность данного подхода для задач виброзащиты.

Численный анализ показал, что использование демпфирующих покрытий обеспечивает существенное снижение амплитуды резонансных колебаний. Были достигнуты следующие показатели подавления: на первой резонансной частоте 250,7 Гц — 87,6%, на второй (298,8 Гц) — 86,5%, на третьей (1000,9 Гц) — 89,3%. Столь значительное снижение амплитуд свидетельствует о перспективности методики для внедрения в практику проектирования радиоэлектронных средств.

Таким образом, основная ценность работы заключается в разработке инструмента для прогнозирования вибрационных характеристик на ранних стадиях проектирования. Внедрение этого подхода в инженерный процесс позволит оптимизировать виброзащиту без необходимости проведения дорогостоящих натурных испытаний. Как следствие, за счет эффективного подавления резонансов можно значительно повысить общую надежность радиоэлектронной аппаратуры.

Список литературы

1. Талицкий, Е.Н. Защита электронных средств от механических воздействий : Теорет. основы: Учеб. пособие для студентов вузов по спец. "Проектирование и технология РЭС", "Проектирование и технология ЭВС" / Е. Н. Талицкий; М-во образования Рос. Федерации. Владим. гос. ун-т. - Владимир : Владим. гос. ун-т, 2001. - 253 с. : ил., табл. 21 см. ISBN 5-89368-232-7
2. А. С. Смирнов, Б. А. Смольников. История механического резонанса— от первоначальных исследований до авторезонанса // Чебышевский сборник, 2022, т. 23, вып. 1, с. 269–292. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-mehanicheskogo-rezonansa-ot-pervonachalnyh-issledovaniy-do-avtorezonansa?ysclid=mi1hszozak438922794> (дата обращения: 13.11.2025).
3. М. А. Ковырягин, “Управление колебаниями упругой некруговой пластины”, Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 38, СамГТУ, Самара, 2005, с 45–51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-kolebaniyami-uprugoy-nekrugovoy-plastiny> (дата обращения: 15.11.2025).
4. В. А. Мелик-Шахназаров, В. И. Стрелов, Д. В. Софиянчук, И. Ж. Безбах, “Электронные цепи управления для активных виброзащитных устройств нового поколения”, НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, 2012, том 22, № 3, с. 46–52. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novaya-konstruktsiya-aktivnyh-vibrozaschitnyh-ustroystv> (дата обращения: 15.11.2025).
5. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. / О. Зенкевич, Под ред. Б. Е. Победри. - Москва : Мир, 1975. - 541 с. : ил. 22 см.
6. Ермоленко А. В., Осипов К. С. О применении библиотек Python для расчета пластин // Вестник Сыктывкарского университета. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика. 2019. Вып. 4 (33). С. 86–95. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-primenenii-bibliotek-python-dlya-rascheta-plastin> (дата обращения: 16.11.2025).

References

1. Talitsky, E. N. Protection of Electronic Equipment from Mechanical Impacts: Theoretical Foundations: Textbook for University Students in the Specialty "Design and Technology of RES", "Design and Technology of EVS" / E. N. Talitsky; Ministry of Education of the Russian Federation. Vladimir State University. - Vladimir: Vladimir State University, 2001. - 253 p.: ill., table; 21 cm; ISBN 5-89368-232-7
 2. A. S. Smirnov, B. A. Smolnikov. History of Mechanical Resonance – from Initial Research to Autoresonance // Chebyshevsky Collection, 2022, Vol. 23, Issue 1, pp. 269–292. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-mehanicheskogo-rezonansa-ot-pervonachalnyh-issledovaniy-do-avtorezonansa?ysclid=mi1hszozak438922794> (Accessed: 13.11.2025).
 3. M. A. Kovryagin, “Control of Oscillations of an Elastic Non-Circular Plate,” Vestn. Sam. State Technical University. Series: Phys.-Math. Sciences, 38, Samara State Technical University, Samara, 2005, pp. 45–51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-kolebaniyami-uprugoy-nekrugovoy-plastiny> (Accessed: 15.11.2025).
 4. V. A. Melik-Shakhnazarov, V. I. Strelov, D. V. Sofiyanchuk, I. Zh. Bezbakh, “Electronic control circuits for new-generation active vibration protection devices”, SCIENTIFIC INSTRUMENT MAKING, 2012, Vol. 22, No. 3, pp. 46–52. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/novaya-konstruktsiya-aktivnyh-vibrozaschitnyh-ustroystv> (accessed on 15.11.2025).
 5. Finite element method in engineering: Trans. from English / O. Zenkevich; Ed. by B. E. Pobedry. - Moscow: Mir, 1975. - 541 p.: ill. 22 cm.
 6. Ermoolenko A. V., Osipov K. S. On the Application of Python Libraries for Plate Calculation // Bulletin of Syktyvkar University. Ser. 1: Mathematics. Mechanics. Computer Science. 2019. Issue 4 (33). pp. 86–95. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-primenenii-bibliotek-python-dlya-rascheta-plastin> (accessed: 16.11.2025).
-