

Оптимизация расположения развязывающих конденсаторов на печатной плате электронного средства для обеспечения вибрационной стойкости

П.А. МАКЕЕВ,
канд. техн. наук,
С.Ф. ЧЕРМОШЕНЦЕВ,
д-р техн. наук
(КНИТУ-КАИ, Казань)
pragramer@yandex.ru

Разработан критерий вибрационной стойкости для решения задачи автоматизированного размещения элементов на печатной плате электронного средства летательного аппарата. Проведено математическое моделирование вибрационной стойкости для конкретного размещения развязывающих конденсаторов на печатной плате. Проведен сравнительный анализ результатов автоматизированного размещения развязывающих конденсаторов на печатной плате с применением критерия вибрационной стойкости и без него.

Вибрационная стойкость, электромагнитная совместимость, печатная плата, развязывающий конденсатор, электронное средство, генетический алгоритм

Современные летательные аппараты характеризуются воздействием значительных вибрационных нагрузок в частотном диапазоне 10 Гц...2 кГц. При этом в области низких частот наблюдается повышенный уровень вибрационной энергии, что обусловлено влиянием работы двигателей, винтов и пропеллеров. Для беспилотных летательных аппаратов данная ситуация усложняется вследствие их малых габаритных размеров, что приводит к более сложной вибрационной обстановке.

Таким образом, задача обеспечения надежности электронных средств, применяемых на летательных аппаратах, является актуальной. Одновременно на устройства летательных аппаратов накладываются ограничения по габаритным размерам, массе и вычислительным ресурсам. В связи с этим возникает необходимость комплексного решения задачи автоматизированного размещения элементов на печатной плате с учетом требований тепловой и электромагнитной совместимости, а также обеспечения вибрационной стойкости устройства [1–4].

Технология автоматизированного проектирования печатных плат электронных средств включает следующие основные этапы: компоновка и размещение элементов на печатной плате, трассировка межсоединений на печатной плате, математическое моделирование разработанной печатной платы с целью верификации полученного решения. В рамках данной работы рассматривается этап автоматизированного размещения элементов на печатной плате электронных средств. В работах [5, 6] рассмотрены варианты решения проблем тепловой и электромагнитной совместимости при размещении элементов на гибко-жесткие печатные платы электронных средств. Однако не учитывается их вибрационная стойкость, что является актуальным требованием при проектировании устройств для летательных аппаратов.

В данной работе рассматривается процедура автоматизированного размещения развязывающих конденсаторов на печатной плате электронных средств, обеспечивающего электромагнитную совместимость и вибрационную стойкость. Так как на этапе размещения элементов на печатной плате отсутствует трассировка межсоединений, влияние вибрации на качество передаваемого сигнала не учитывается.

Целью данной работы является оптимизация расположения развязывающих конденсаторов на печатной плате электронных средств, что обеспечивает вибрационную стойкость устройства. Для достижения поставленной цели предлагается применение генетического алгоритма и специализированных критериев тепловой совместимости, электромагнитной совместимости и вибрационной стойкости.

В работах [5, 6] разработана методика автоматизированного размещения элементов на печатной плате электронных средств, в рамках которой размещение элементов осуществляется в два этапа.

На первом этапе осуществляется размещение укрупненных блоков активного и пассивных элементов – суперэлемента. Размещение суперэлемента происходит с учетом критериев тепловой совместимости и минимума суммарно взвешенной длины.

Целевая функция данного этапа имеет следующий вид:

$$F_{SEI} = (k_t F'_{\text{termo}} + k_s F'_{\text{sum}}) \rightarrow \max ,$$

где F_{SEI} – целевая функция для размещения суперэлементов; k_t , k_s – весовые коэффициенты для критерия тепловой совместимости и критерия минимума суммарно взвешенной длины; F'_{termo} , F'_{sum} – нормализованные критерии качества. Данные критерии качества детально рассмотрены в работе [6].

На следующем этапе производится размещение элементов внутри суперэлемента, тем самым обеспечивается связанность активного элемента и необходимых для его функционирования пассивных элементов с малым количеством связей. Размещение на данном этапе выполняется с учетом критериев электромагнитной совместимости и минимума суммарно взвешенной длины. В качестве критерия электромагнитной совместимости применяется минимизация входного импеданса цепи питания. На этапе автоматизированного размещения элементов на печатной плате отсутствует топология межсоединений. В связи с этим анализ классических проблем электромагнитной совместимости (перекрестные помехи, искажения сигналов, задержки) невозможен. Однако вследствие некачественного размещения развязывающих конденсаторов возникают проблемы, связанные с целостностью питания печатной платы, что, в свою очередь, является одной из составляющих электромагнитной совместимости электронных средств. Таким образом, размещение элементов на печатной плате на втором этапе методики осуществляется по следующему требованию:

$$F_{EI} = (k_{EMC}F'_{EMC} + k_sF'_{sum}) \rightarrow \max ,$$

где F_{EI} – целевая функция для размещения элементов внутри суперэлемента; k_{EMC} – весовой коэффициент для критерия электромагнитной совместимости; F'_{EMC} – нормализованный критерий электромагнитной совместимости. Данные критерии качества детально рассмотрены в работе [6].

Недостатком рассмотренной методики является отсутствие возможности учета вибрационной стойкости печатной платы, что актуально при разработке печатной платы для летательных аппаратов. Таким образом, для применения данной методики при разработке печатной платы летательных аппаратов необходимо разработать и дополнить ее критерием вибрационной стойкости.

Учет вибрационной стойкости печатной платы электронных средств возможен аналитическим расчетом или с помощью сложного компьютерного моделирования, например, методом конечных элементов. В рамках данной работы требуется критерий, позволяющий осуществить проектную оценку размещения элементов на печатной плате электронных средств за минимальное время. В связи с этим применение метода конечных элементов не представляется целесообразным, поскольку его реализация сопряжена с существенными временными затратами. Может быть использован один из аналитических методов – метод Рэлея [7–10]. Суть метода заключается в том, что собственная частота системы определяется соотношением ее жесткости и массы. Увеличение массы приводит к снижению частоты собственных колебаний. При этом степень уменьшения вибраций зависит от места приложения добавочной массы: наибольшее влияние достигается при ее размещении в зонах с максимальной амплитудой колебаний.

Таким образом, частота собственных вибраций печатной платы электронных средств при размещении очередного элемента f_{new} может быть вычислена по следующему выражению:

$$f_{new} = f_0 \sqrt{\frac{m_{pcb}}{m_{pcb} + \sum \left(m_i \left(\frac{A_i}{A_{max}} \right)^2 \right)}},$$

где f_0 – исходная собственная частота пустой печатной платы; m_{pcb} – масса пустой печатной платы; m_i – масса i -го добавленного элемента; A_i – амплитуда колебаний в точке размещения i -го элемента; A_{max} – максимальная амплитуда колебаний.

Влияние добавленной массы элемента пропорционально квадрату отношения амплитуды колебаний в точке ее размещения к максимальной амплитуде. В случае размещения элемента в точке крепления ($A_i = 0$) его влияние на частоту колебаний пренебрежимо мало. Напротив, при размещении элемента на максимальном удалении от точек крепления ($A_i = A_{max}$) его влияние на частоту колебаний является максимальным.

В рамках данной работы на основе применения метода Рэлея был введен дополнительный проектный параметр – коэффициент вибрационной устойчивости печатной платы электронных средств k_{vibro} . На этапе ввода исходных данных в программу необходимо произвести фрагментацию монтажной плоскости печатной платы (рис. 1).

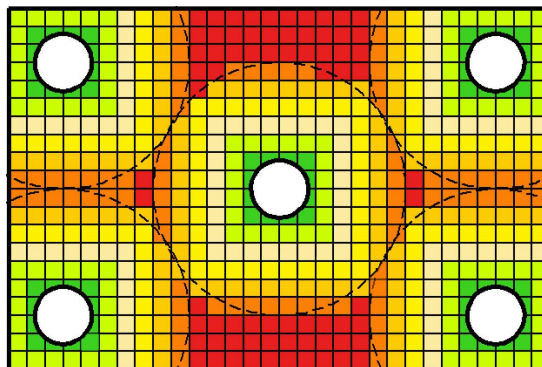


Рис. 1

Таким образом, чем меньше расстояние от элемента до крепежного отверстия (в данном месте собственные вибрации печатной платы минимальны), тем коэффициент k_{vibro} будет меньше.

Зная массу элементов, подлежащих размещению на печатной плате, можно сформулировать критерий вибрационной стойкости следующим образом:

$$F_{\text{vibro}} = \sum_{i=1}^n m_i k_{\text{vibro}}(x_i, y_i) \rightarrow \min ,$$

где m_i – масса i -го элемента, г; $k_{\text{vibro}}(x_i, y_i)$ – коэффициент вибрационной стойкости в точке размещения i -го элемента с координатами (x_i, y_i) ; n – количество элементов, подлежащих размещению.

Учет данного критерия в связке с критериями тепловой и электромагнитной совместимости возможен при его нормализации. Для нормализации применяется линейная свертка критериев:

$$F'_{\text{vibro}} = \frac{F_{\text{vibro max}} - F_{\text{vibro}}}{F_{\text{vibro max}}} \rightarrow \max ,$$

где F'_{vibro} – нормализованный критерий вибрационной стойкости; $F_{\text{vibro max}}$ – максимальное значение критерия вибрационной стойкости; F_{vibro} – нормализуемый критерий вибрационной стойкости.

Таким образом, элементы с наибольшей массой будут стремиться к размещению вблизи крепежных отверстий, что способствует минимизации собственных вибраций печатной платы и, как следствие, повышению вибрационной стойкости устройства.

Произведем дополнение целевой функции критерием вибрационной стойкости для первого и второго уровня методики [5].

Так, для первого уровня методики целевая функция примет вид

$$F_{\text{SEI}} = (k_v F'_{\text{vibro}} + k_t F'_{\text{termo}} + k_s F'_{\text{sum}}) \rightarrow \max ,$$

где k_v – весовой коэффициент для критерия вибрационной стойкости.

Целевая функция для второго уровня методики:

$$F_{\text{EI}} = (k_v F'_{\text{vibro}} + k_{\text{EMC}} F'_{\text{EMC}} + k_s F'_{\text{sum}}) \rightarrow \max .$$

Таким образом, на первом уровне методики вычисляется общая масса всех элементов, принадлежащих суперэлементу, и производится размещение суперэлементов с учетом трех критериев качества.

На втором уровне методики производится размещение элементов внутри суперэлемента, также на основании трех критериев качества.

С целью подтверждения эффективности предлагаемого подхода к повышению вибрационной стойкости электронных средств проведена апробация разработанной методики на практическом примере. В качестве исследуемого объекта выбрано процессорное устройство.

Внешний вид процессорного устройства с фиксированными элементами приведен на рис. 2.

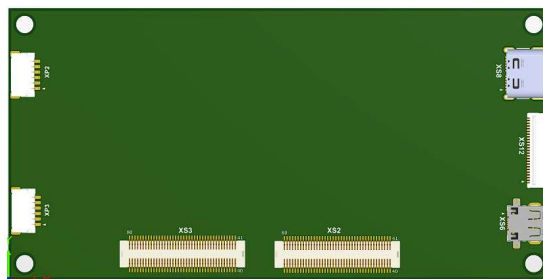
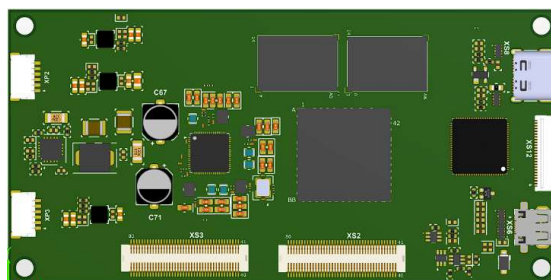


Рис. 2

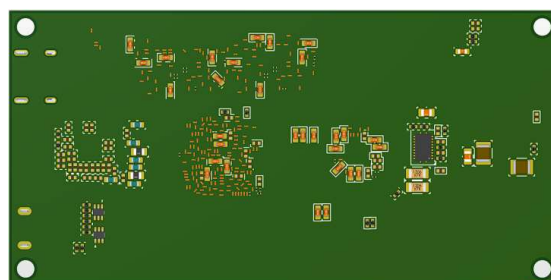
Габаритные размеры процессорного устройства – 100×50 мм. Крепежные отверстия диаметром 3,2 мм расположены на расстоянии 3 мм от края печатной платы. Многослойная печатная плата имеет десять проводящих слоев и общую толщину 1,6 мм. Данное устройство включает микросхемы процессора, память стандарта DDR4, микросхему аналого-цифрового преобразователя, источники вторичного питания, интерфейсы передачи данных стандарта HDMI, MIPI, PCIe, USB 3.2.

Так как целью данного исследования является апробация и подтверждение эффективности применения вибрационного критерия качества, произведено размещение элементов на печатной плате согласно методике [5] и модифицированной методике с учетом вибрационного критерия качества. Влияние весовых коэффициентов на качество получаемого решения в рамках данного исследования не рассматривалось. В связи с этим для первого варианта решения задачи размещения элементов на печатной плате их значения принимались равными 0,5, тогда как при учете вибрационного критерия – 0,33, что соответствует равнозначности каждого критерия при выборе расположения очередного элемента.

Результат размещения элементов на печатной плате в случае методики без учета вибрационного критерия приведен на рис. 3, с учетом данного критерия – на рис. 4: *а* – лицевая сторона печатной платы; *б* – обратная сторона печатной платы.

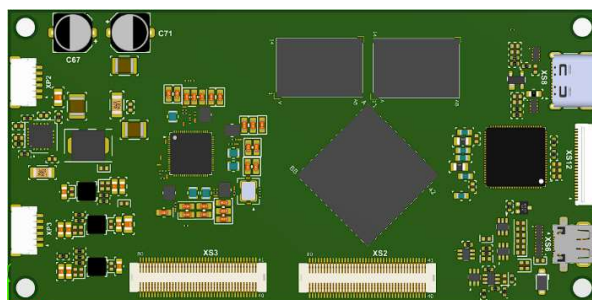


а

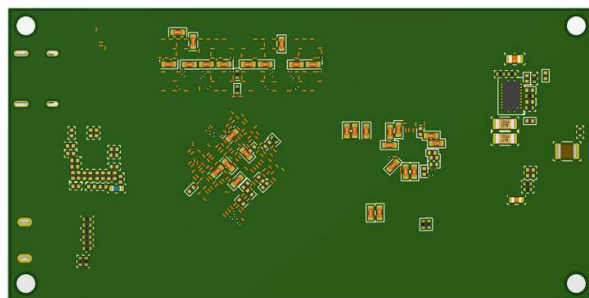


б

Рис. 3



a



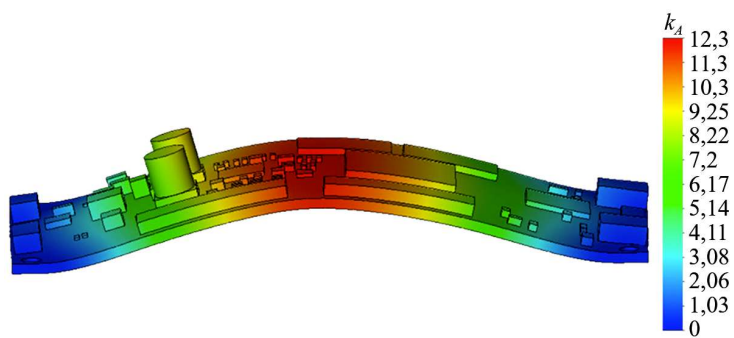
б

Рис. 4

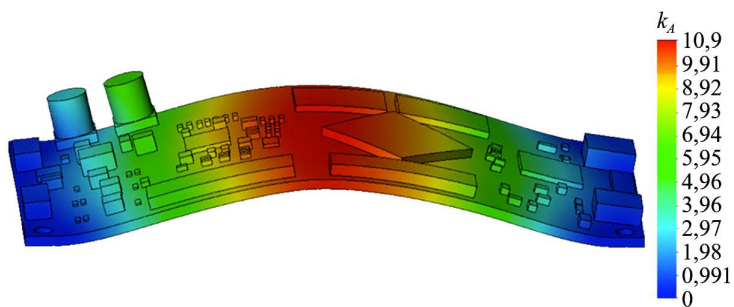
Результаты проведенного анализа указывают на наличие различий в размещении электролитических конденсаторов C_{67} и C_{71} (с собственной массой каждого 1,2 г) в зависимости от учета вибрационного критерия. Так, без его учета указанные элементы располагались на значительном удалении от крепежных отверстий, тогда как при учете вибрационного критерия их размещение смещается в область, прилегающую к крепежным отверстиям.

С целью верификации полученных решений проведен анализ коэффициента усиления амплитуды колебаний k_A процессорного устройства в пакете SolidWorks Simulation.

Приведем результаты моделирования. На рис. 5, *a* представлено размещение без учета вибрационного критерия, на рис. 5, *б* – с учетом вибрационного критерия.



a



б

Рис. 5

Таким образом, смещение конденсаторов C_{67} и C_{71} в область, близкую к крепежному отверстию, позволило сместить первую собственную частоту колебаний с 300,45 до 523,32 Гц. Следует отметить, что, например, собственная частота колебаний беспилотного летательного аппарата составляет 333 Гц. Смещение собственной частоты позволяет исключить вероятность отрыва данных элементов. Также коэффициент усиления амплитуды уменьшился с 12,3 до 10,9 (на 11,4 %), а коэффициент усиления амплитуды непосредственно на конденсаторах уменьшился с 9 до 5. Исходя из представленных результатов моделирования, можно сделать вывод о том, что применение методики размещения элементов на печатной плате электронных средств с учетом вибрационной стойкости эффективно решает поставленную задачу.

Так как электролитические конденсаторы относятся к цепи питания 3,3 В, рассмотрим влияние их перемещения на входной импеданс данной цепи питания. Для этого проведем анализ резонансов полигона питания 3,3 В. Результаты анализа приведены на рис. 6.

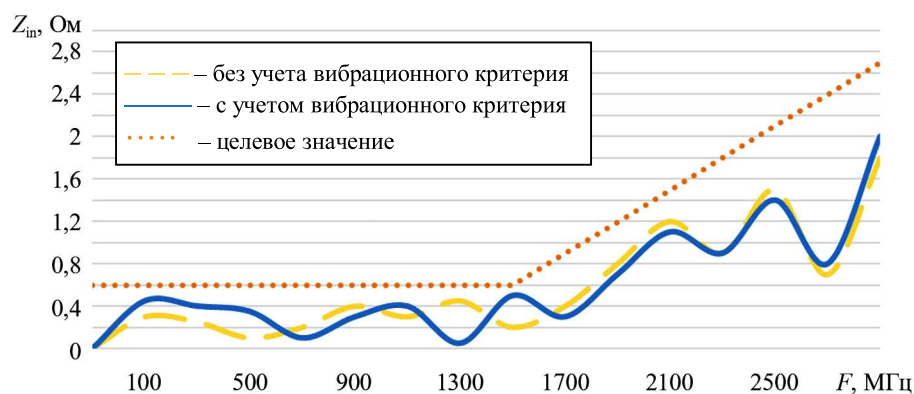


Рис. 6

Согласно полученным результатам значение целевого импеданса не было превышено в обоих вариантах размещения. Следовательно, данные варианты размещения элементов на печатной плате могут быть использованы с точки зрения критерия электромагнитной совместимости.

Так как конденсаторы не оказывают влияния на тепловую совместимость печатной платы, то с точки зрения тепловой совместимости оба варианта размещения эффективны для дальнейшего этапа трассировки межсоединений печатной платы.

Таким образом, проведена модификация методики автоматизированного размещения элементов на печатной плате электронного средства дополнением ее критерием вибрационной стойкости.

Разработан критерий качества, направленный на повышение вибрационной стойкости печатных плат, применяемых на летательных аппаратах.

Применение методики автоматизированного размещения элементов на печатной плате электронного средства с учетом вибрационной стойкости позволило сместить собственную частоту вибрации с 300,45 Гц (при критической 333 Гц) до 523,32 Гц. При этом не ухудшилось качество разрабатываемого устройства с точки зрения тепловой и электромагнитной совместимости. Данное решение позволило обеспечить вибрационную стойкость разрабатываемого устройства.

Работа выполнена в рамках соглашения № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 (шифр FZSU-2023-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трохов Д.А., Туркин И.К. К вопросу проектирования беспилотного летательного аппарата для решения разведывательных задач на море // Труды МАИ [Электронный журнал]. 2014. № 78. URL: <https://mai.ru/upload/iblock/ed2/ed253452c48d6e312d741a190e26d509.pdf?ysclid=mlpamehzmh906470644> (дата обращения: 5.09.2025).
2. Федоров И.И. Комплекс конструктивных составляющих и метод предварительного определения массы фюзеляжа вертолета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2021. № 4. С. 188–194.
3. Уайтм К., Рентюк В. Особенности конструирования печатных плат с выполнением требований по ЭМС // Компоненты и технологии. 2019. № 6 (215). С. 121–128.

4. Аверин С.В. и др. Обеспечение электромагнитной совместимости бортовых кабелей беспилотных летательных аппаратов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2017. № 3. С. 113–117.
5. Макеев П.А., Чермошенцев С.Ф. Аprobация методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате на практических примерах // Труды МАИ [Электронный журнал]. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178481> (дата обращения: 5.09.2025).
6. Макеев П.А., Музафаров И.Р., Чермошенцев С.Ф. Автоматизированное размещение элементов на печатной плате электронного средства летательного аппарата // Изв. вузов. Авиационная техника. 2025. № 1. С. 89–96.
7. Рыбакова Л.Ю., Кириллова В.А. Анализ частоты гибких конструкций с помощью аналитического и программного подхода // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: Сб. ст. 79-й Всерос. науч.-техн. конф., г. Самара, 18–22 апр. 2022. Самара: СамГТУ, 2022. С. 120–127.
8. Таньков Г.В., Затылкин А.В., Рындин Д.А. Волновой метод исследования динамических характеристик упругих конструкций радиоэлектронных средств при нестационарном нагружении // Вестник Пензенского государственного университета. 2013. № 2. С. 101–107.
9. Затылкин А.В., Таньков Г.В. Моделирование изгибных колебаний в стержневых конструкциях РЭС // Надежность и качество: Тр. междунар. симпозиума. Пенза: Информ.-издат. центр ПГУ, 2006. № 1. С. 320–323.
10. Макаева Р.Х., Царева А.М., Каримов А.Х. Определение собственных частот и форм колебаний диска постоянной толщины, закрепленного в центре // Изв. вузов. Авиационная техника. 2008. № 1. С. 41–45.

Поступила в редакцию 5.10.25

После доработки 27.11.25

Принята к публикации 30.11.25

Optimization of the Arrangement of Decoupling Capacitors on the Printed Circuit Board of an Electronic Device to Ensure Vibration Resistance

P.A. MAKEEV AND S.F. CHERMOSHENTSEV

Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

A vibration resistance criterion was developed for solving the problem of automated placement of components on a printed circuit board for aircraft electronics. Mathematical modeling of vibration resistance was conducted for a specific placement of decoupling capacitors on the printed circuit board. A comparative analysis of the results of automated placement of decoupling capacitors on the printed circuit board with and without the vibration resistance criterion was conducted.

Vibration resistance, electromagnetic compatibility, printed circuit board, decoupling capacitor, electronic device, genetic algorithm