

КОМПОНОВКА БЕЗРЕЗОНАНСНЫХ БЛОКОВ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С ЖЕСТКОЙ ОСНОВОЙ

С. И. Фролов¹, Е. А. Данилова², И. И. Кочегаров³

^{2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ sfrolov46@mail.ru, ² siori@list.ru, ³ kipra@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью работы является разработка инженерной методики расчета печатных узлов с жесткой подложкой. Проведен анализ методов и способов расчета безрезонансных (в рабочем диапазоне частот) электронных блоков бортовых радиоэлектронных средств (БРЭС) и в целом проектирования безрезонансных электронных блоков. Проведено моделирование собственных частот колебаний для различных способов закрепления печатных узлов. *Материалы и методы.* В применены математические положения теории механических колебаний для получения аналитических выражений собственной частоты колебаний конструкций. Для тестового сравнения полученных результатов использовался программный пакет ANSYS. *Результаты.* Проведено моделирование собственных частот колебаний для различных способов закрепления печатных узлов. Получены численные решения для различных вариантов многослойных печатных плат, отличающихся толщиной и материалами подложек. Проведена оценка точности расчетов собственной частоты колебаний. Предложена методика создания безрезонансных электронных блоков БРЭС и даны рекомендации по созданию технологичных безрезонансных конструкций блоков БРЭС на основе использования современных материалов подложки печатных плат. *Выводы.* Результаты работы в виде рекомендаций по повышению жесткости конструкций цилиндрических конструкций бортовых радиоэлектронных средств позволят создавать более надежные конструкции за счет улучшения стойкости к вибрации. Оперативный обоснованный выбор схем крепления печатных узлов на ранних этапах проектирования позволит сократить сроки работ.

Ключевые слова: печатные узлы, математическое моделирование, собственные частоты, электронные блоки, резонанс

Для цитирования: Фролов С. И., Данилова Е. А., Кочегаров И. И. Компоновка безрезонансных блоков БРЭС с использованием двухслойных печатных плат с жесткой основой // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 3. С. 73–81. doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-8

THE LAYOUT OF ON-BOARD ELECTRONIC SYSTEMS WITHOUT RESONANT BLOCKS USING DOUBLE-LAYER PRINTED CIRCUIT BOARDS WITH A RIGID BASE

S.I. Frolov¹, E.A. Danilova², I.I. Kochegarov³

^{2,3} Penza State University, Penza, Russia
¹ sfrolov46@mail.ru, ² siori@list.ru, ³ kipra@mail.ru

Abstract. *Background.* The aim of the work is to develop an engineering methodology for calculating printed circuit board assemblies with a rigid substrate. The analysis of methods and techniques for calculating resonance-free (in the operating frequency range) electronic units of on-board radio-electronic equipment (OREEq) and, in general, the design of resonance-free electronic units is carried out. The modeling of natural oscillation frequencies for various methods of fixing printed circuit board assemblies is carried out. *Materials and methods.* The mathematical principles of the theory of mechanical oscillations are applied to obtain analytical expressions for the natural oscillation frequency of structures. The ANSYS software package was used for test comparison of the obtained results. *Results.* The modeling of natural oscillation frequencies for various methods of fixing printed circuit board assemblies is carried out. Numerical solutions are obtained for various variants of multilayer printed circuit boards differing in thickness and substrate materials. The accuracy of calculations of the natural oscillation frequency is assessed. A method for

creating resonance-free electronic units of OREEq is proposed and recommendations are given for creating technological resonance-free designs of OREEq units based on the use of modern substrate materials for printed circuit boards. *Conclusions.* The results of the work in the form of recommendations for increasing the rigidity of the cylindrical structures of onboard electronic equipment will allow creating more reliable structures due to improved vibration resistance. Prompt, well-founded selection of printed circuit board mounting schemes at early design stages will reduce the work time.

Keywords: printed circuit assemblies, mathematical modeling, natural frequencies, electronic units, resonance

For citation: Frolov S.I., Danilova E.A., Kochegarov I.I. The layout of on-board electronic systems without resonant blocks using double-layer printed circuit boards with a rigid base. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(3):73–81. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-8

Введение

В настоящее время перед разработчиками ставятся все более сложные задачи по созданию в сжатые сроки высоконадежных бортовых радиоэлектронных систем (БРЭС), эксплуатируемых в жестких условиях внешних механических воздействий. Наиболее опасными являются вибрации электронных блоков БРЭС из-за резонансных колебаний печатных плат с большим количеством электрорадиоизделий (ЭРИ).

Из-за сжатых сроков проектирования в качестве защиты от вибрации применяются главным образом виброизоляция электронных блоков БРЭС с использованием амортизаторов и/или демпфирование их печатных узлов (ПУ) [1]. Однако эти меры ухудшают массогабаритные характеристики БРЭС, а эффективность их недостаточна, так как поток отказов блоков аппаратуры от воздействия вибрации все еще остается значительным.

Исходя из вышеизложенного, по мнению авторов, для дальнейшего повышения уровня надежности блоков БРЭС практически безальтернативным методом обеспечения их вибропрочности и виброустойчивости является отстройка резонансных частот плоских элементов конструкции ПУ электронных блоков за пределы диапазона частот внешних вибрационных воздействий.

Помимо трудностей создания безрезонансных конструкций с требуемыми массогабаритными характеристиками, серьезной проблемой при конструировании безрезонансных (ПУ) является сложность реализации сквозного цикла проектирования печатных плат, так как с использованием существующих САПР на практике часто возникают трудоемкие итерационные петли работ, связанных с необходимостью перетрассировки плат для исключения их резонансов.

Решению вышеназванных проблем создания безрезонансных ПУ блоков БРЭС на ранних стадиях проектирования до трассировки печатных плат посвящена данная статья.

Разработка методики создания безрезонансных печатных узлов

В максимально упрощенном виде задача синтеза безрезонансных ПУ блоков БРЭС сформулирована в работе [2].

Исходные данные:

1. Диапазон частот, в котором у проектируемых пакетных ПУ не должно быть собственных частот колебаний (СЧК). Этот диапазон должен включать в себя диапазон частот возмущающих внешних вибрационных воздействий с коэффициентом запаса 1,5, т.е. $f_{СЧК} > 1,5 f_{В}$.

2. Размер монтажной площади S_m для размещения ЭРИ электрической схемы ПУ. Находится как сумма площадей ЭРИ, умноженная на коэффициент, учитывающий возможности трассировки платы с охранными зонами.

3. Механические характеристики материалов, используемых для изготовления ПУ.

4. На ранних стадиях проектирования влиянием на резонансную частоту ПУ массы малогабаритных ЭРИ можно пренебречь, так как оно в значительной мере компенсируется увеличением жесткости плат от закрепления ЭРИ на их поверхности жестким клеем и лаком.

5. Требуется найти варианты компоновки пакетных ПУ, у которых СЧК находятся вне диапазона частот вибрационных воздействий.

Для решения задач создания безрезонансных ПУ строятся необходимые для этого математические модели и алгоритмы синтеза на их основе [4].

Как известно, СЧК тонких пластин рассчитывается по формуле [3, 5]:

$$f_{СЧК} = A C h / S, \quad (1)$$

где f СЧК – первая СЧК платы, Гц; $A = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{12(1-\nu^2)\rho}}$ – постоянный коэффициент, зависящий

от свойств материала платы; C – частотный коэффициент, зависящий от способа крепления и соотношения сторон платы, для нахождения которого можно использовать методику [2]; h – толщина платы, м; $S = a^2$ – площадь квадратной платы, где a – длина большей стороны, м; E – модуль упругости материала платы, Н/м²; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала платы.

Ниже представлены виды крепления сторон печатных плат ПУ, расположенные в порядке увеличения массогабаритных характеристик блоков [5] (рис. 1–3).

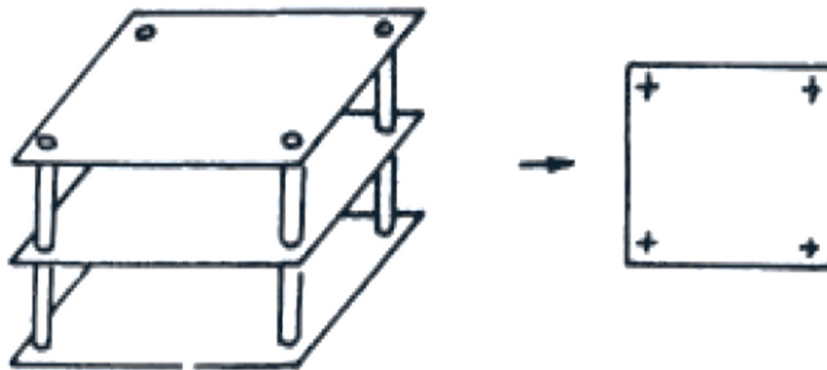


Рис. 1. Жесткое крепление в точках (обозначено крестиками) в случае сборки пакета ПУ на стойках. Края платы свободны

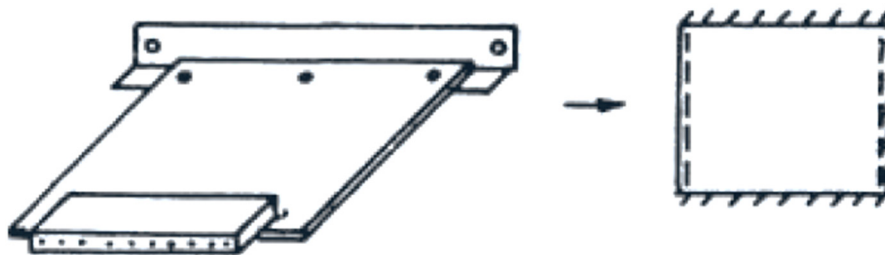


Рис. 2. Опираение сторон, обозначенное штриховой линией

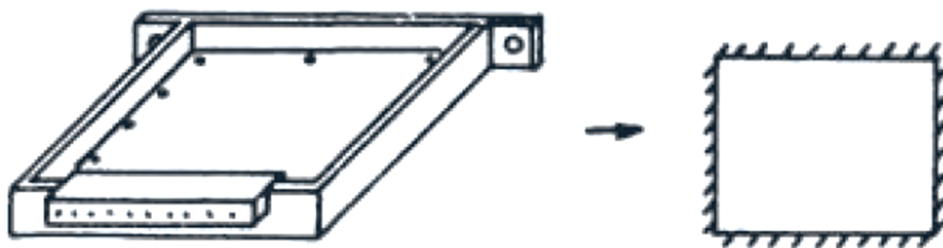


Рис. 3. Защемление края платы, обозначенное наклонной штриховкой

Обеспечивается, если край платы скользит вдоль направляющей в каркасе, а также, если край платы прикреплен к нежесткой планке или соединителю, когда край платы не может смещаться перпендикулярно плоскости платы, но может поворачиваться.

Обеспечивается, если край приклеен, приклепан или привинчен по длине в нескольких точках к жесткой рамке или если на краю платы закреплен разъемный соединитель с большим числом контактов, который при установке платы в блок соединяется с жестко закрепленной ответной частью соединителя.

Относительные значения частотных коэффициентов $C/C_{4т}$ для представленных выше видов крепления сторон плат приведены на графиках рис. 4. Здесь $C_{4т}$ – значение C для квадратной платы с креплением в четырех точках по углам.

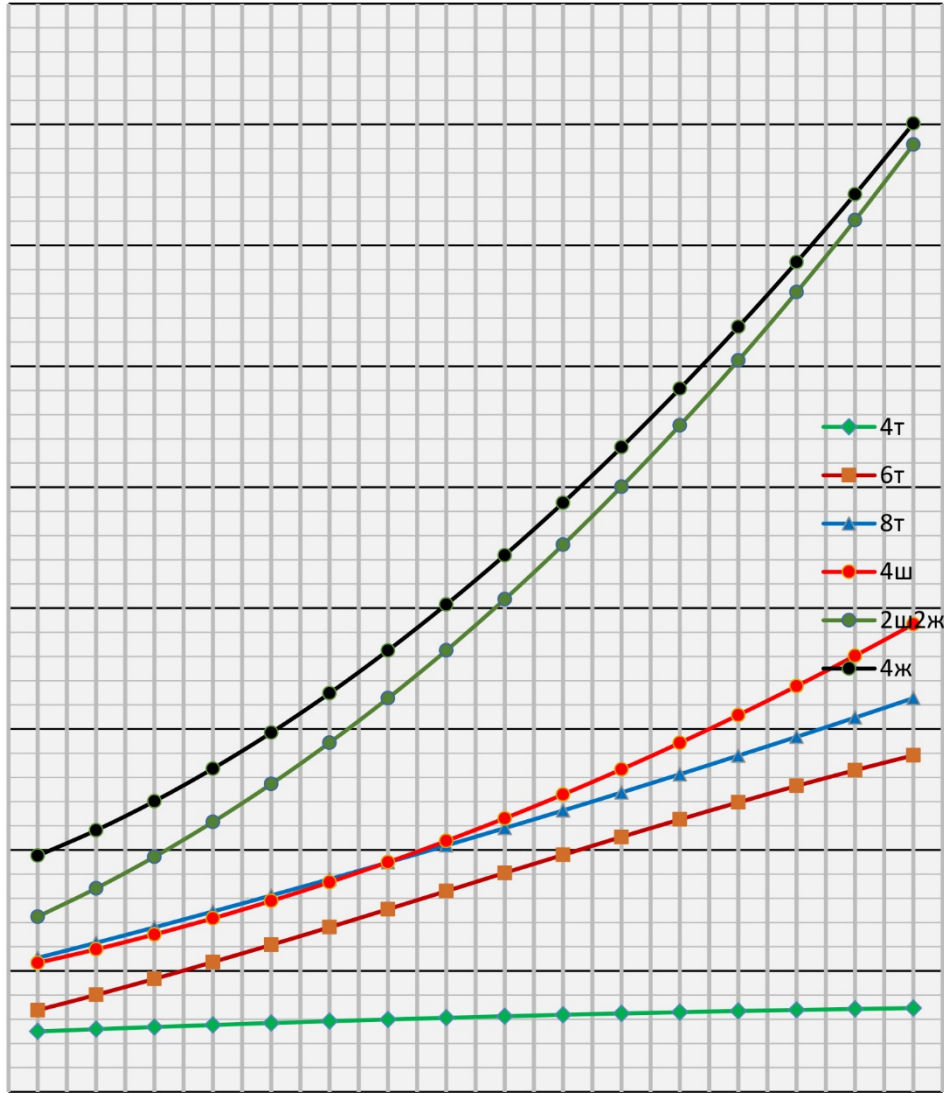


Рис. 4. Графики относительных коэффициентов C в зависимости от соотношения сторон платы a/b .

На графиках сделаны обозначения: 4т – 4 точки крепления по углам платы; 6т – 6 точек крепления, из них 4 по углам и 2 по середине длинных сторон; 8т – 8 точек крепления, из них 4 по углам и 4 по середине сторон; 4ш – шарнирное крепление всех сторон; 2ш2ж – шарнирное крепление коротких и упруго-жесткое крепление длинных сторон; 4ж – жесткое крепление всех четырех сторон

Для квадратных плат с жестким креплением четырех сторон (4ж) $C = 36$.

Графики рис. 4 позволяют сделать некоторые качественные выводы для облегчения принятий решения по синтезу компоновки безрезонансных ПУ в блоках БРЭС.

1. Самые низкие значения частотного коэффициента C и мало зависящие от соотношения сторон имеют платы, закрепленные в четырех точках по углам.

2. Шарнирное крепление всех сторон и крепление в восьми точках по периметру плат имеют практически одинаковый частотный коэффициент для всех соотношений сторон. При этом шарнирное крепление конструктивно сложнее и имеет массогабаритные характеристики блока выше, чем при креплении в точках.

3. Самые высокие значения частотного коэффициента C дает жесткое крепление сторон, но это обеспечивается за счет значительного увеличения массы и габаритов блоков БРЭС, что отрицательно влияет на характеристики их носителей.

4. При выборе конструктивного исполнения ПУ необходимо учитывать, что шарнирное крепление сторон имеет меньшую надежность, чем жесткое крепление сторон и в точках.

В принципе на ранних стадиях проектирования новых БРЭС простота формулы (1) и наглядность графиков рис. 4 позволяют опытному конструктору достаточно быстро определиться с конструктивными параметрами безрезонансного ПУ.

Так, можно сразу определить, что из рекомендованных к применению размеров плат 200×170, 170×150 и 170×75 безрезонансную конструкцию в диапазоне частот до 1000 Гц при максимальной рекомендованной толщине равной 2 мм обеспечивает только плата 170×75 как имеющая самую маленькую площадь. Остальные можно даже не рассматривать (табл. 1).

Таблица 1

Показатели	4т	6т	8т	4ш	2ш2ж	4ж
C	12,5	46	53	61	121	124
f , Гц	153	563	653	742	1479	1513

Как показывает приведенный пример и опыт конструирования БРЭС, точечное крепление плат по периметру при всей своей технологичности не позволяет обеспечить отсутствие резонансов в диапазоне частот вибрации выше 500 Гц. А размещение дополнительных точек крепления на поле платы для расширения диапазона до 1000 Гц приводит к уменьшению монтажной площади плат и усложнению сборки блоков. Варианты с жестким креплением по периметру плат обеспечивают более жесткую конструкцию, но это достигается за счет существенного увеличения массогабаритных характеристик блоков БРЭС, что существенно ограничивает возможность использования такого крепления для разработки безрезонансных ПУ. Таким образом, актуальным остается поиск конструктивных решений повышения жесткости ПУ и прежде всего с точечным креплением как превосходящим все другие способы крепления по другим важным показателям.

На практике в отдельных случаях для повышения жесткости ПУ используются двухслойные печатные платы с металлической подложкой, которая помимо всего прочего улучшает теплоотвод от ЭРИ [6]. Это позволяет добиться хороших результатов, но затруднения при сжатых сроках разработки заключаются в том, что сегодня нет удобной инженерной методики расчета параметров такой конструкции ПУ при дефиците времени на разработку новой БРЭС.

Рассмотрим один из возможных вариантов расчета основной СЧК квадратной двухслойной печатной платы с металлической подложкой с поперечным сечением, представленным на рис. 5.



Рис. 5. Поперечное сечение печатной платы с металлической подложкой: h – толщина печатной платы; H – толщина ПУ; Z_0 – расстояние нейтральной поверхности ПУ от верхней граничной поверхности

В работе [3] приведена методика расчета СЧК многослойных печатных плат, которая на практике не очень удобна, но которой можно частично воспользоваться.

В нашем случае при расчете СЧК двухслойной печатной платы можно будет использовать расчетную толщину ПУ по формуле $H_{расч.} = (H - Z_0) \cdot 2$, где Z_0 – расстояние до нейтральной поверхности в процессе изгибных колебаний двухслойного ПУ. Эта поверхность будет находиться в более жестком слое ПУ (слое подложки) и несколько смещена от оси подложки в сторону печатной платы.

Для многослойных плат приведены формулы [4] для определения Z_0 :

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{E}_i h_i \left(2 \sum_{k=1}^i h_k - h_i \right)}{2 \sum_{i=1}^n \bar{E}_i h_i};$$

$$\bar{E}_i = E_i (1 - \nu_i^2), \nu = \frac{\sum_{i=1}^n \nu_i \bar{E}_i h_i}{\sum_{i=1}^n \bar{E}_i h_i},$$

где E_i , ν_i , h_i – модуль упругости, коэффициент Пуассона и толщина i -го слоя.

При расчете СЧК плотность пластины определяется по формуле

$$\bar{\rho} = \sum \rho_i h_i / \sum h_i,$$

где ρ_i – плотность материала i -го слоя.

Для проверки точности расчетов по предлагаемой методике выполнены расчеты СЧК по формуле (1) для ПУ в виде заземленных по всему периметру двухслойных квадратных пластин со сторонами равными 200 мм при $h = 1$ мм и различными значениями суммарной толщины $H = 2; 3; 4$ и 5 мм для вариантов подложки из дюралюминия и стали.

Механические характеристики материала слоев:

- плата (стеклотекстолит): $E = 0,33 \cdot 10^8$ кПа; $\nu = 0,27$; $\rho = 2,4$ т/м³;
- подложка (дюралюминий): $E = 0,72 \cdot 10^8$ кПа; $\nu = 0,34$; $\rho = 2,7$ т/м³;
- подложка (сталь): $E = 2,2 \cdot 10^8$ кПа; $\nu = 0,25$; $\rho = 7,8$ т/м³.

Для тех же ПУ выполнены расчеты СЧК с использованием комплекса программ ANSYS.

Результаты выполненных расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

H, мм	Дюралюминий				Сталь			
	Формула	ANSYS	%	Вес, кг	Формула	ANSYS	%	Вес, кг
2	357,8	372,6	-3,9	0,204	330,2	327,7	0,8	0,408
3	560,7	568,4	-1,3	0,312	532,6	515,9	3,2	0,720
4	772,3	776,8	-0,6	0,420	741,9	726,3	2,1	1,032
5	986,5	991,1	-0,5	0,528	952,1	943,1	1,0	1,344

Из данных табл. 2 видно, что точность расчетов СЧК по предлагаемой методике находится в пределах 5 % по сравнению с результатами расчетов с использованием комплекса программ ANSYS и такая методика может быть рекомендована для инженерных расчетов.

Кроме того, из результатов расчетов видно, что стальная подложка ничего не дает и даже проигрывает дюралюминиевой по СЧК, а вес двухслойной пластины со стальной подложкой в разы больше. Поэтому варианты плат со стальной подложкой далее не рассматриваются.

Эффект от добавления дюралеминивой подложки можно оценить по табл. 3.

Таблица 3

H, мм	2	3	4	5
$f, \text{Гц}$	357,8	560,7	772,3	986,5
$f/f_{\text{пл}}$	2,2	3,5	4,8	6,2

Как видно из табл. 3, эффект от использования дюралеминивой подложки для повышения СЧК незначительный, что и объясняет, почему она используется на практике редко. Совершенно другая картина получается при использовании в качестве подложки более жесткого материала с меньшей плотностью, например, новых материалов, разработанных в ВИАМ [7], таких как углепластик с характеристиками $E = 1,25 \cdot 10^8$ кПа; $\rho = 1,5$ т/м³ и полиамид с углеродными волокнами, у которого $E = 2,38 \cdot 10^8$ кПа; $\rho = 1,34$ т/м³.

Расчеты для этих материалов приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

H, мм	Дюралюминий		Углепластик		Полиамид с волокном	
	$f, \text{Гц}$	Вес, кг	$f, \text{Гц}$	Вес, кг	$f, \text{Гц}$	Вес, кг
2	357,8	0,204	452,9	0,156	559,4	0,150
3	560,7	0,312	780,2	0,216	1036,4	0,204
4	772,3	0,420	1126,7	0,276	1540,0	0,257
5	986,5	0,528	1479,9	0,336	2053,7	0,312

Таблица 5

H, мм	2	3	4	5
$f, \text{Гц}$	559,4	1036,4	1540,0	2053,7
$f/f_{\text{пл}}$	3,5	6,5	9,6	12,9

Сравнение полученных результатов табл. 5 с табл. 3 показывает, что использование новых материалов в качестве подложки дает эффект, позволяющий существенно расширить возможности создания безрезонансных ПУ БРЭС. Этот эффект можно оценить, заметив например, что при одинаковом весе (0,312 кг) полиамидная подложка при толщине ПУ 4 мм имеет СЧК почти в 4 раза больше, чем ПУ толщиной 3 мм с подложкой из дюралюминия.

Для ПУ рекомендованных минимальных размеров 170×75 при толщине печатной платы $h = 1$ мм и общей толщине ПУ с полиамидной подложкой $H = 4$ мм расчеты СЧК дают результаты, приведенные в табл. 6.

Таблица 6

a	0,17	b	0,075	a/b	2,27	
	4г	6г	8г	4ш	2ш2ж	4ж
C	12,5	46	53	61	121	124
$f, \text{Гц}$	819	3019	3503	3978	7934	8116

Здесь важно отметить, что даже для самых жестких условий эксплуатации, при верхней границе диапазона внешних возмущающих воздействий $f \text{ В} = 2000$ Гц, использование полиамидной подложки позволяет создавать безрезонансные конструкции блоков БРЭС пакетной компоновки с точечным креплением ПУ, например таких, как представлено на рис. 6.

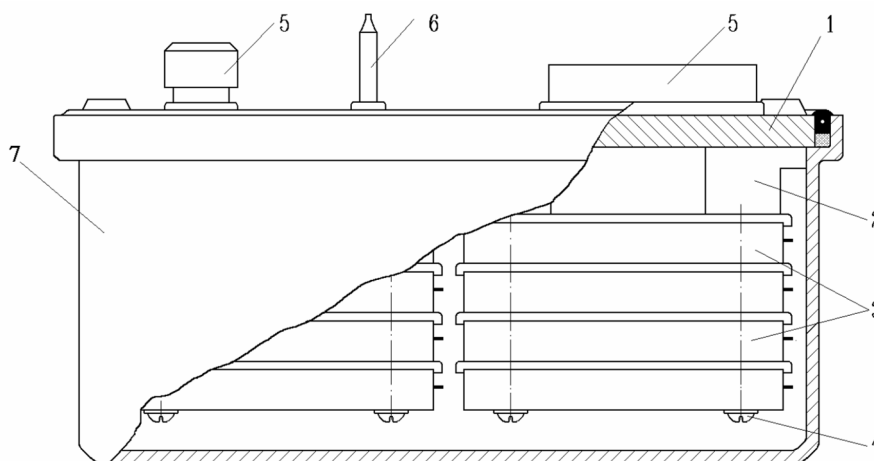


Рис. 6. Герметичный электронный блок БРЭС пакетной компоновки

Таким образом, изготовление подложек ПУ из современных материалов высокой жесткости и малой плотности, таких как углепластики, позволяет во многих случаях решить проблему вибропрочности и виброустойчивости блоков БРЭС, а значит, снизить поток отказов в процессе их эксплуатации. Кроме того, пакетная компоновка с точечным креплением таких ПУ обеспечивает высокую технологичность и возможность эксплуатации блоков БРЭС без амортизаторов и демпфирования даже в условиях жестких вибрационных воздействий. Соответственно, при прочих равных условиях более высокая надежность таких блоков достигается при наилучших массогабаритных характеристиках.

Заключение

На основе проведенных исследований предложены аналитические выражения и графики для определения на ранних стадиях проектирования основной СЧК печатных плат с жесткой подложкой для различных вариантов крепления их в электронных блоках БРЭС.

Выполненные тестовые расчеты с использованием пакета программ ANSYS подтвердили достоверность и необходимую точность результатов расчета СЧК печатных плат с подложкой для практического применения предложенных инструментов.

Предложена методика создания безрезонансных конструкций печатных узлов электронных блоков БРЭС с улучшенной технологичностью и массогабаритными характеристиками на основе использования современных материалов.

Возможность оперативного определения схем крепления и параметров безрезонансных ПУ на схемотехническом этапе и ранних этапах конструирования помимо обеспечения высокой надежности ПУ может позволить существенно уменьшить трудоемкость и сократить сроки работ за счет исключения лишних итерационных петель работ при конструировании.

Список литературы

1. Токарев М. Ф., Талицкий Е. Н., Фролов В. А. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры. М. : Радио и связь, 1984.
2. Фролов С. И., Кочегаров И. И., Данилова Е. А. [и др.]. Разработка методики компоновки безрезонансных блоков БРЭС на ранних стадиях проектирования // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 1.
3. Карпушин В. Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре. М. : Сов. радио, 1971.
4. Юрков Н. К. Современное состояние исследований в области создания высоконадежной бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 5–12. doi: 10.21685/2307-4205-2021-4-1. EDN VBJPMK
5. Талицкий Е. Н. Защита электронных средств от механических воздействий. Владимир : ВГУ, 2001.
6. Борисов В. Ф. Проектирование РЭС. М. : МАИ, 2007.
7. Молчанов Б. И., Гудимов М. М. Свойства углепластиков и области их применения // Авиационная промышленность. 1997. № 3-4.

References

1. Tokarev M.F., Talitskiy E.N., Frolov V.A. *Mekhanicheskie vozdeystviya i zashchita radioelektronnoy apparatury = Mechanical effects and protection of radioelectronic equipment*. Moscow: Radio i svyaz', 1984. (In Russ.)
2. Frolov S.I., Kochegarov I.I., Danilova E.A. et al. Development of a methodology for the layout of non-resonant power plant units at the early stages of design. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;1. (In Russ.)
3. Karpushin V.B. *Vibratsii i udary v radioapparature = Vibrations and shocks in radio equipment*. Moscow: Sov. radio, 1971. (In Russ.)
4. Yurkov N.K. The current state of research in the field of creating highly reliable on-board electronic equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):5–12. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-4-1. EDN VBJPMK
5. Talitskiy E.N. *Zashchita elektronnykh sredstv ot mekhanicheskikh vozdeystviy = Protection of electronic devices from mechanical influences*. Vladimir: VGU, 2001. (In Russ.)
6. Borisov V.F. *Proektirovanie RES = Designing RES*. Moscow: MAI, 2007. (In Russ.)
7. Molchanov B.I., Gudimov M.M. Properties of carbon fiber plastics and their applications. *Aviatsionnaya promyshlennost' = Aviation industry*. 1997;(3-4). (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Иванович Фролов

кандидат технических наук,
независимый исследователь
E-mail: sfrolov46@mail.ru

Евгения Анатольевна Данилова

кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: siori@list.ru

Игорь Иванович Кочегаров

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@mail.ru

Sergey I. Frolov

Candidate of technical sciences,
independent researcher

Evgeniya A. Danilova

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Igor I. Kochegarov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 26.05.2024

Поступила после рецензирования/Revised 23.06.2024

Принята к публикации/Accepted 25.07.2024