

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

УДК 621.396.69.01

DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-1

О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ НАДЕЖНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ РЭС

С. И. Фролов, Н. В. Горячев, Г. В. Таньков,
И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков

Введение

В современной военной технике используется большое количество различных сложных радиоэлектронных средств (РЭС), к которым предъявляются высокие требования по надежности. Стоимость этих РЭС весьма высока. Например, доля стоимости бортовых РЭС истребителя составляет до 80 % от его общей стоимости [1].

Рост надежности применяемых в РЭС ЭРИ дает заметное снижение количества отказов РЭС, однако поток этих отказов остается пока на значительном уровне [2], что во многом связано с высокими темпами роста сложности аппаратуры и конструктивными недоработками.

Особое внимание приходится уделять обеспечению надежности бортовых РЭС, работающих в условиях воздействия внешних возмущающих факторов (ВВФ), наиболее опасными из которых являются тепловые и механические. Доля отказов от воздействия этих двух факторов составляет до 90 % [3]. Следует при этом отметить, что из механических воздействий наибольшую долю отказов дают вибрации, при которых в блоках РЭС возникают резонансные колебания, усиливающие механические нагрузки на элементы конструкции в десятки раз.

Зависимость показателей надежности РЭС от тепловых воздействий и вибрации

Рассмотрим, как зависят показатели надежности РЭС от внешнего теплового воздействия и вибрации по методике, приведенной в справочнике «Надежность электрорадиоизделий» [4].

Суммарная интенсивность отказов устройства определяется по формуле

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{j=1}^N \lambda_j,$$

где λ_j – интенсивность отказа j -го электрорадиоизделия (ЭРИ); $j = 1, \dots, N$; N – общее число ЭРИ.

Значения эксплуатационной интенсивности отказов большинства групп ЭРИ рассчитываются по математическим моделям, имеющим вид

$$\lambda_j = \lambda_{\text{б}} \cdot \text{ПК}_i \text{ или } \lambda_j = \lambda_{\text{б.с.г.}} \cdot \text{ПК}_i,$$

где $\lambda_{\text{б}}$ ($\lambda_{\text{б.с.г.}}$) – базовая интенсивность отказов типа (группы) ЭРИ, рассчитанная по результатам испытаний ЭРИ на безотказность, долговечность, ресурс; K_i – коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов ($i = 1, \dots, n$); n – число учитываемых факторов.

Данные по λ_6 ($\lambda_{6,с.г.}$) и K_i приведены в вышеуказанном справочнике.

Нас будут интересовать коэффициенты влияния на интенсивность отказов от температуры окружающей среды K_t и от вибрации K_v . В нашем случае в первом приближении можно принять K_v равным жесткости условий эксплуатации K_3 , т.е. $K_v = K_3$.

Тогда, например, для интегральной схемы с количеством элементов от 100 до 1000 из таблицы № 7 [4] при $t = 55^\circ\text{C}$ следует, что $K_t = 2$, а из таблицы № 10 [4] для групп аппаратуры 3.3, 3.4 по ГОСТ РВ 20.39.304-98 $K_3 = 5$, т.е. совместно эти два параметра при температуре окружающей среды равной 55°C дают увеличение интенсивности отказов примерно в 10 раз.

Тепловые воздействия

Для бортовых РЭС доля отказов от тепловых воздействий составляет по данным [3] 42–55 % от всех отказов, вызванных внешними возмущающими факторами (ВВФ). Оценим эффективность некоторых конструктивных мер по обеспечению требуемой надежности РЭС при тепловых воздействиях.

Допустим, что разрабатываемый герметичный блок РЭС с горизонтальным шасси имеет удельную тепловую мощность рассеивания 200 Вт/м^2 . Тогда по графику 6–3 [5] перегрев внутри блока относительно температуры окружающей среды при естественном воздушном охлаждении составит около 50°C . При допустимой величине перегрева, например 40°C , надо принимать конструктивные меры по уменьшению перегрева. Оребрение поверхности блока может дать уменьшение удельной тепловой мощности до двух раз. В этом случае, как видно из того же графика, перегрев составит около 30°C и войдет в зону допустимых значений. На усмотрение конструктора есть и другие способы уменьшения перегрева блоков бортовой РЭС, обдув поверхностей воздухом, кондуктивный отвод тепла от ЭРИ и др.

Механические воздействия

Для обеспечения требуемой надежности вибронегруженной РЭС при разработке применяется ряд способов, основными из которых являются [6]:

- использование наиболее устойчивых к механическим воздействиям ЭРИ;
- защита РЭС от механических воздействий установкой амортизаторов (виброизоляция);
- устранение или уменьшение до допустимого уровня резонансных явлений в конструкциях РЭС выведением собственных частот колебаний за пределы диапазона частот возмущающих воздействий (отстройка от резонансов) или увеличением демпфирующих свойств (демпфирование).

С помощью вышеприведенных приемов и других мер на всех этапах жизненного цикла бортовых РЭС в идеале должно быть обеспечено снижение доли отказов от действия вибрации до уровня стационарной аппаратуры, т.е. менее 5 % всех отказов [7]. Однако реально для бортовых РЭС доля отказов от вибраций много больше и составляет по данным из разных источников: 17–28 % [3], 40–60 % [8], 30–50 % от всех отказов, а в авиации – до 80 % [9].

Анализ проблем надежности-ориентированного проектирования РЭС

Проблем надежность-ориентированного проектирования РЭС достаточно много – от методических до технических. Например, следующие:

1. Разброс вышеприведенных данных по отказам от тепловых воздействий и вибрации показывает, что до настоящего времени нет единых методик исследования причин отказов и достаточно глубокого анализа физических процессов, приводящих к отказам бортовой РЭС, что снижает сопоставимость и достоверность получаемых результатов, требуемых для принятия эффективных мер [2].

2. Низкая достоверность расчетов надежности при разработке бортовой РЭС при надежность-ориентированных методах проектирования [7] из-за устаревающих данных по надежности ЭРИ справочника от 2006 г. [4]. Положение усугубляется тем, что погрешность расчетов возрастает в разы при умножении на коэффициент эксплуатационной жесткости K_3 . Все это не может не сказываться негативно на качестве принимаемых решений при разработке бортовой РЭС, в результате чего характеристики надежности при эксплуатации оказываются хуже расчетных.

3. Использование при конструировании РЭС неудачного критерия, по которому уровень вибрационных перегрузок на ЭРИ должен быть не больше допустимых по ТУ. Дело в том, что нет корреляционной связи между перегрузками на ЭРИ и отказами РЭС в диапазоне частот возмущающих воздействий, так как сами ЭРИ практически не отказывают, а определяющими для надежности РЭС являются усталостные разрушения выводов ЭРИ и паяных соединений при изгибных колебаниях печатных плат на резонансных частотах [8]. Это подтверждается в работе [2], где приводятся данные, по которым в диапазоне частот возмущающих воздействий бортовой РЭС от 10 до 2000 Гц интегральные микросхемы и полупроводниковые приборы не имеют отказов до 200 г и отказы начинают появляться из-за обрыва внутренних выводов при перегрузках на этих частотах около 300 г.

4. В специальной литературе при конструировании РЭС рекомендуется обеспечивать отсутствие резонансных частот элементов конструкции в заданном диапазоне частот [10]. Однако действующая на сегодняшний день НТД допускает резонансные колебания конструкций бортовых РЭС в диапазоне возмущающих воздействий выше 40–60 Гц [11, 12]. Рекомендуемая там же защита конструкции РЭС виброизоляцией и демпфированием не устраняет полностью, а только уменьшает амплитуду изгибных колебаний печатных плат на резонансах, да и то не всегда, например, в условиях действия линейных перегрузок амортизаторы теряют свои свойства виброизоляции. Демпфирование часто не применимо, так как ухудшает тепловые режимы и ремонтно-пригодность РЭС.

5. На сегодня отсутствуют инженерные методики синтеза теплоустойчивых блоков РЭС и печатных узлов, не имеющих резонансов в заданном диапазоне частот возмущающих воздействий. На практике конструкторам проще поставить блок РЭС на амортизаторы и сделать ему обдув воздухом, чем искать оптимальные технические решения методом перебора вариантов даже с использованием существующих САПР.

6. В настоящее время в радиопромышленности конструкторами РЭС называют специалистов, выполняющих чертежи корпусов, каркасов, панелей и других элементов механической системы РЭС, чертежи для объемного и печатного электромонтажа РЭС по готовым электрическим схемам, разработанным инженерами-схемотехниками. Так называемые инженеры-конструкторы РЭС фактически выполняют работу чертежников и как максимум техников [13].

Выпускники вузов поступают на работу конструкторами не потому, что их увлекает романтика конструирования корпусов РЭС. Чаще всего они равнодушны к такому конструированию, быстро теряют полученные в вузе знания и становятся безынициативными чертежниками, которым не до внедрения перспективных методов надежно-ориентированного проектирования.

Выполнение конструкторских процедур с использованием существующих САПР мало меняет общую картину, поскольку САПР сейчас главным образом нацелены на выпуск чертежей. Кроме того, САПР довольно сложны в освоении и требуют от конструктора выполнения большого числа рутинных работ и особых знаний работы на ЭВМ. Поэтому часто конструкторские должности замещают программисты, которые не владеют навыками конструирования по определению.

Предложения по совершенствованию проектирования РЭС

На основе вышеизложенного можно предположить, что уровень доли отказов РЭС от действия вибраций порядка 30–50 % является пределом возможности методов виброизоляции и демпфирования, и нужно искать другие подходы, чтобы достигнуть снижения отказов бортовых РЭС до уровня стационарной аппаратуры.

Как следует из детального анализа причин отказов РЭС, решение этой задачи может быть достигнуто внедрением конструкций РЭС, у которых собственные частоты колебаний элементов конструкции выведены за пределы диапазона частот возмущающих воздействий, что исключает появление изгибных колебаний печатных узлов, являющихся основной причиной усталостного разрушения выводов ЭРИ и паяных соединений.

Такие печатные узлы, для простоты условно называемые «безрезонансными», не имея в процессе эксплуатации изгибных колебаний в диапазоне частот возмущающих воздействий бортовой РЭС, в плане надежности соответствуют стационарной аппаратуре. А это в соответ-

ствии с п. 3.4 [4] значит, что значение коэффициента эксплуатационной жесткости K_z при прочих равных условиях равняется 1 для всех ЭРИ печатных узлов [14, 15]. В результате использование в РЭС безрезонансных печатных узлов позволяет уменьшить интенсивность их отказов в 5–10 раз.

В настоящее время направление создания безрезонансных конструкций РЭС начинает развиваться. В работах [16, 17] рассматривались вопросы создания безрезонансных конструкций для частных случаев крепления печатных плат и приведены некоторые данные о положительных результатах. Однако эти результаты не решают проблему. Необходимы серьезные усилия для создания инженерных методов и алгоритмов синтеза конструкций бортовых РЭС, надежно функционирующих в условиях жестких ВВФ.

Заключение

Все вышеназванные проблемы надо решать комплексно, вернув творческое начало в конструирование, подключив конструкторов на ранней стадии проектирования к разработке ТЗ, технического проектирования изделия, надежно-ориентированного проектирования узлов и блоков РЭС с поиском новых технических решений и т.п. Соответственно должны быть расширены и возможности САПР, в частности, для начала созданы возможности компоновки и синтеза конструкций тепло- и виброустойчивых печатных узлов на ранних стадиях проектирования РЭС.

Библиографический список

1. Остроменский, П. М. Вибрационные испытания радиоаппаратуры и приборов / П. М. Остроменский. – Новосибирск : Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. – 256 с.
2. Бережной, В. П. Выявление причин отказов РЭА / В. П. Бережной, Л. Г. Дубицкий. – М. : Радио и связь, 1983. – 364 с.
3. Писарев, В. Система испытаний – основа обеспечения надежности РЭА / В. Писарев, М. Критенко, В. Постнов // Электроника – НТБ. – 2002. – № 5. – С. 24–27.
4. Надежность электрорадиоизделий : справочник 22 ЦНИИ МО. – М., 2006. – 264 с.
5. Гель, П. П. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры / П. П. Гель, Н. К. Иванов-Есипрович. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 350 с.
6. Токарев, М. Ф. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры / М. Ф. Токарев, Е. Н. Талицкий, В. А. Фролов. – М. : Радио и связь, 1984. – 464 с.
7. Жаднов, В. В. Дифференцированная оценка влияния ВВФ при проектных исследованиях надежности электронных компонентов / В. В. Жаднов и др. // Электронные компоненты. – 2010. – № 3. – С. 16–23.
8. Уваров, Б. М. Определение показателей надежности электронной аппаратуры при частичных отказах / Б. М. Уваров, Ю. Ф. Зиньковский // НТ ПСЗСУ. – 2014. – № 2. – С. 15–19.
9. Ройзман, В. П. Надежность радиоэлектронной аппаратуры при работе на транспортных средствах / В. П. Ройзман и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 8. – С. 17–21.
10. Карпушин, В. Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре / В. Б. Карпушин. – М. : Советское радио, 1971. – 256 с.
11. ГОСТ РВ 20.39.309–98. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Конструктивно-технические требования. – М. : Госстандарт России, 1998. – 17 с.
12. ГОСТ РВ 20.39.304–98. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним факторам. – М. : Госстандарт России, 1998. – 18 с.
13. Бобков, Н. М. Конструктор РЭС о конструировании РЭС / Н. М. Бобков. – URL: http://nntc.nnov.ru/sites/default/files/documets/00_konstr_RES_o_konstr_RES.pdf
14. Хади, О. Ш. Конструкторско-технологические аспекты проектирования микросборок, работающих при динамическом нагружении / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 41–48.
15. Фролов, С. И. Вопросы автоматизации конструирования вибропрочных РЭС / С. И. Фролов, Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 301–303.
16. Ухин, В. А. Автоматизация проектирования виброзащиты электронной аппаратуры методом частотной отстройки : дис. ... техн. наук / Ухин В. А. – Владимир, 2007. – 164 с.
17. Кутровский, П. В. Исследование и разработка виброзащиты радиотехнических устройств методом частотной отстройки : дис. ... канд. техн. наук / Кутровский П. В. – Владимир, 2009. – 187 с.

Фролов Сергей Иванович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Горячев Николай Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Таньков Георгий Васильевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: oldalez@yandex.ru

Кочегаров Игорь Иванович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@mail.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. Рост требований к надежности бортовых радиоэлектронных средств (БРЭС) требует развития методов их проектирования. Как правило, БРЭС функционируют в жестких условиях эксплуатации и к ним предъявляются повышенные требования надежности, долговечности и живучести. В работе авторы проводят анализ проблем надежности-ориентированного проектирования БРЭС с учетом теплового воздействия и вибрации. В результате анализа выявлены проблемы существующего подхода к проектированию БРЭС и намечены пути совершенствования надежность-ориентированных САПР за счет автоматизации синтеза конструкций.

Ключевые слова: надежность, внешние воздействующие факторы, вибрация, тепловые воздействия, проектирования, радиоэлектронные средства, система автоматизированного проектирования.

Frolov Sergey Ivanovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Goryachev Nikolay Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Tan'kov Georgiy Vasil'evich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Kochegarov Igor' Ivanovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Abstract. The growth of requirements for the reliability of on-board radio electronic means (BRES) requires the development of methods for their design. As a rule, BRES operate under harsh operating conditions and they are subject to increased requirements for reliability, durability and survivability. In the work, the authors analyze the problems of reliability-oriented design of the BRES taking into account the thermal impact and vibration. As a result of the analysis, problems of the existing approach to the design of the BRES are revealed and ways of improving reliability-oriented CAD are outlined by automating the synthesis of structures.

Key words: reliability, external factors, vibration, thermal effects, design, radioelectronic facilities, computer-aided design system.

УДК 621.396.69.01

О некоторых проблемах надёжностно-ориентированного проектирования бортовых РЭС /
С. И. Фролов, Н. В. Горячев, Г. В. Таньков, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 3–8. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-1.