

Д. т. н. В. П. РОЙЗМАН

Украина, Хмельницкий национальный университет
E-mail: roizman@mailhub.tup.km.ua

Дата поступления в редакцию
20.09 2005 г.

Оппонент д. т. н. Л. С. ЛУТЧЕНКОВ
(НПП "ЭлектроРадиоАвтоматика",
г. С.-Петербург)

ПРОБЛЕМА ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

Обосновывается актуальность проблемы механической прочности для изделий радиоэлектроники и сообщается о вкладе хмельницких ученых в разрешение этой проблемы.

Тенденция к снижению массы, получению высокой плотности монтажа и обеспечению герметичности при создании радиоэлектронных систем привела к снижению жесткости элементов, деталей и узлов их (достаточно сложных) конструкций. Эксплуатация таких изделий из новых неметаллических материалов с недостаточно изученными механическими свойствами в условиях эксплуатации различных объектов военной и гражданской техники (ракет, самолетов, бронемашин, судов, автомобилей, радиолокационных станций, стационарных, возимых и носимых радиостанций, компьютеров и др.) при больших перепадах температур и давлений нередко приводит к отказам из-за нарушения целостности отдельных частей или разгерметизации. В радиоэлектронике из-за действия внешних нагрузок или несовершенных технологий изготовления в изделиях возникают напряжения, от действия которых происходит отклонение их параметров за пределы технических условий, что зачастую приводит к отказам еще задолго до поломки. Цена таких отказов бывает очень высокой. (Так, разрушение резистора стоимостью в 0,5 доллара привело в США к гибели ракеты стоимостью 140 миллионов долларов, поломка вывода одной из недорогих микросхем привела к потере связи с опущенным на Венеру и работавшим там аппаратом.)

При анализе причин отказов в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) традиционно считают, что 40—45% всех отказов в эксплуатации происходит от ошибок, допущенных на этапе их проектирования, 20% обусловлено несовершенством технологических процессов изготовления, а также недостаточным уровнем технологической дисциплины, 30% вызвано неправильными режимами эксплуатации и нарушениями правил технического обслуживания и около 5—7% связано с естественным износом составных частей и старением материалов. В приведенной классификации, однако, не учитывается тесная взаимосвязь, например, конструкторских и технологических причин отказов РЭА. Решение же проблемы обеспечения качества РЭА требует не только уче-

та всех этапов их «жизненного цикла» (проектирование, доводка, производство и эксплуатация), но и взаимного влияния этих этапов. Так, на практике весьма часто недостаточная надежность самих технологических процессов изготовления РЭА бывает обусловлена недостаточным уровнем производственной технологичности их конструкций и применяемой элементной базы. Более того, проекты некоторых систем, в основу которых были положены весьма прогрессивные принципы их действия, остались нереализованными только потому, что оказались недостаточно технологичными: слишком трудоемкими и непригодными для производства.

Наиболее общей тенденцией в развитии радиоэлектронной техники является сочетание все большей интеграции выполняемых ею функций со все большей ее микроминиатюризацией. Следствием этого является резкое усложнение конструкций современной РЭА и технологических процессов ее изготовления. Так, технология изготовления современных микросхем практически не допускает корректировки их структуры и параметров в процессе изготовления, проще создать новую микросхему, чем скорректировать уже имеющуюся. Это резко уменьшает возможность экспериментальной доводки (наладки и оптимизации) и, соответственно, требует своевременной отработки основных вопросов технологичности конструкций РЭА и вопросов повышения надежности технологических процессов ее изготовления с одновременным повышением точности проводящихся при этом теоретических расчетов.

Анализ конструкторских особенностей современных РЭА показывает, что решение задач обеспечения влагозащиты и стойкости при изменениях температуры и давления окружающей среды привело к использованию новых материалов с недостаточно изученными свойствами, к соединению разнородных материалов. Возникающие в таких конструкциях механические взаимодействия могут оказывать существенное влияние как на протекание основных электрических процессов, так и на работоспособность изделия в целом. Однако работы по проектированию РЭА зачастую ведутся в основном в чисто радиотехническом (схемном) направлении, без должных расчетов на прочность, без измерений напряжений и оценки напряженного состояния конструкций в целом и их отдельных элементов. Между тем современные тре-

бования и будущее радиоэлектроники, а также области ее использования, выдвигают наряду с чисто радиотехническими задачами проблему обеспечения механической прочности и надежности.

При эксплуатации радиокомпоненты и функциональные узлы могут работать при температуре от -65 до $+250^{\circ}\text{C}$, с вибрационными частотами от 1 до 5000 Гц, при ускорении до 40 g, подвергаться ударам с ускорением до 120 g, относительная влажность может изменяться от 5 до 100%, атмосферное давление — в пределах $6,6 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^5$ Па, фоновое излучение (проникающая радиация и гамма-излучение) может достигать 10^{10} рад/с. В некоторых случаях эти воздействия могут быть еще более жесткими [1].

Механические воздействия оказывают существенное влияние на надежность изделий радиоэлектроники и вызывают от 30 до 50%, а в авиации — до 80% всех ее отказов, ухудшают точность и другие параметры аппаратуры. При этом надежность всего изделия в целом, его безотказность в работе во многом определяются надежностью составляющих его элементов. Следует учесть, что число элементов в радиоэлектронной аппаратуре за каждые 5 лет увеличивается в 2—5 раз.

Наиболее опасными из указанных факторов являются вибрационные и ударные нагрузки, акустические воздействия, дорожная тряска, выстрелы, неуравновешенности вращающихся деталей, ударная волна, резкие порывы ветра, быстрые турбулентные потоки и т. п. Возможные диапазоны частот вибраций радиоэлектронных средств (РЭС), установленных на различные подвижные объекты, и максимальные амплитуды колебаний приведены в **таблице** [2, с. 22].

Исследования показали, что действующие нагрузки приводят к разрушению отдельных деталей и узлов радиоэлектроники (резисторов, конденсаторов, плат, микромодулей и других деталей) либо к изменению радиотехнических параметров электрорадиоэлементов и узлов (разбалансировка контуров, микрофонный эффект и т. п.). Например, у радиолокационных и сканирующих антенн возможны отклонения зеркала из-за вибрации элементов привода и люфтов в соедине-

ниях, в результате чего могут возникать периодические отклонения антенны от ее нормального положения, колебания зеркала и облучателя, что может привести к полному нарушению функционирования станции и (или) отклонению от цели летящей ракеты [3].

При вибрационных воздействиях в выводах РЭА возникают знакопеременные механические напряжения. Это приводит к накоплению усталостных повреждений в материалах выводов и при длительном воздействии вибрации может привести к обрыву выводов. Усталость является причиной 80% отказов электронных элементов. В полной мере эти данные относятся к испытаниям на воздействие широкополосной случайной вибрации [2, 4, 5].

В процессе ударных воздействий, возникающих при транспортировке, монтаже или эксплуатации, при действии ударной волны и т. д., нагрузки к элементам аппаратуры прикладываются в течение короткого промежутка времени. Вследствие этого возникающие ускорения, перемещения и напряжения в элементах аппаратуры могут достигать больших значений и вызывать различные повреждения. Интенсивность ударного воздействия зависит от формы, амплитуды и длительности ударного импульса. При периодическом приложении ударных импульсов блок РЭА на упругих опорах приходит в колебательное движение. Таким образом, возникает необходимость одновременной защиты от колебаний и ударов.

Линейные ускорения характерны для всех объектов, движущихся с переменной скоростью (например, при разгоне, торможении). Влияние линейных ускорений на детали конструкций и радиоэлементы обусловлено инерционными силами, которые могут во много раз превышать силы тяжения. При движении объекта по криволинейной траектории, например по дуге окружности, элементы конструкции аппарата будут испытывать центробежное ускорение. Трудность борьбы с влиянием линейных перегрузок заключается в том, что они практически не поддаются ослаблению. Только в случае действия линейных перегрузок могут быть использованы некоторые конструкторские меры защиты. Во всех же остальных случаях обеспечение нор-

Диапазоны частот вибраций и максимальные амплитуды колебаний для различных РЭС

Вид РЭС	Частота вибраций, Гц	Максимальная амплитуда, мм
Наземные, устанавливаемые в транспортных средствах:		
в кузовах автомашин	0—80	1,0—2,5
на тракторах, бронетранспортерах колесного типа	8—15	1,0
на тракторах гусеничного типа	400—700	0,25
на танках	20—2000	0,25
Наземные переносные	10—120	0,15—2,5
Самолетные:		
на самолетах с поршневым двигателем	5—150	0,15—5,0
на самолетах с реактивным двигателем	5—500	0,025—0,3
Ракетные: на участке разгона ракет	30—5000	1,0—3,0
Корабельные:		
на судах большого тоннажа	5—150	1,0
на судах малого тоннажа	2—10	До 35
Эксплуатируемые на железнодорожном транспорте	2—150	25

мативных требований к элементам конструкции может быть достигнуто только за счет увеличения их жесткости, что ведет к увеличению массы.

Воздействие акустического шума приводит к механическому возбуждению деталей и узлов конструкций РЭА, а также различных радиоэлементов [6]. Отличие данного вида возбуждения от вызванного колебаниями заключается в распределенном воздействии усилий, зависящих не только от уровня звукового давления, но и от площади изделия. При чисто механических воздействиях вибрация передается изделиям главным образом через точки крепления. В технических заданиях на разработку бортовых РЭА звуковое давление, создаваемое акустическим шумом, задается до 175 дБ в диапазоне частот от 10 до 10000 Гц. Давление в столь широком диапазоне частот может привести к существенным поломкам в аппаратуре, в том числе к усталостным, из-за резонансных колебаний.

Наличие тепловыделяющих элементов в составе конструкций РЭА в сочетании с широким диапазоном температур окружающей среды приводит к появлению паразитного теплового фактора, оказывающего существенное влияние на механические процессы, в том числе за счет появления температурных напряжений. При этом от температуры зависят такие физико-механические параметры как модуль упругости, логарифмический декремент затухания колебаний (ЛДК), предел выносливости и другие. Квалификационные испытания цифровых блоков РЭА показали, что около 30% отказов отдельных элементов, которые были зафиксированы при воздействии низкой и высокой температур, в действительности обусловлены повреждением этих элементов в процессе комплексного воздействия колебаний и температуры [7]. Таким образом, необходим учет комплексности воздействия механических факторов и температуры для адекватного принятия мер по обеспечению нормативных требований.

К монтажным (объединительным) платам, подложкам электронных изделий тем или иным способом крепится большое количество электронных элементов, микросхем, микросборок, модулей, микромодулей и других составляющих сложного электронного изделия. При эксплуатации изделий в результате изменения температуры, давления и других параметров внешней среды, а также из-за вибраций, перегрузок объединительные платы деформируются, и эти деформации могут передаваться на элементы навесного монтажа и в сочетании с другими воздействиями вызывать в последних поломки или приводить к отказам.

С другой стороны объединительные платы уже после изготовления могут иметь коробление, и на такие платы также могут устанавливаться изделия. В результате деформации объединительной платы или выравнивания коробленной платы с установленными на ней изделиями в последних возникают напряжения, которые, достигнув некоторого значения, могут нарушить нормальную работу изделия.

Для повышения надежности работы изделия необходимо изучить взаимодействие объединительной платы с элементами навесного монтажа в различных

условиях, определить возникающие при этом деформации и напряжения как в самих платах, так и в контактных узлах и элементах.

Как показывает практика [8], наиболее часто отказы интегральных схем происходят из-за нарушения электромонтажа, разгерметизации, обрыва выводов корпусов и подложек, а также из-за изменения параметров полупроводниковых структур под влиянием механических воздействий. Существенное влияние на отклонения параметров интегральных схем оказывает не только величина напряжений, но и вид напряженного состояния.

Проблема прочностной надежности и сейчас продолжает оставаться одной из острых проблем современной радиоэлектроники.

К сожалению, в институтах и на факультетах радиоэлектроники механика практически не изучалась, да и теперь недостаточно изучается. Современным инженерам по радиоэлектронике трудно разбираться в причинах поломок и производить необходимые расчеты и эксперименты на колебания и прочность в процессе проектирования и доводки изделий. До сих пор (в отличие от других отраслей техники) не существует «Норм прочности» на изделия радиоэлектроники, не установлены зависимости между напряжениями и отклонениями электрических параметров. (Нормы прочности — это свод нормативных документов, определяющих количественные значения коэффициентов запасов прочности типовых элементов и узлов изделий, обязательность их расчетов на прочность и колебания, а также экспериментальных проверок, и методики самих расчетов и необходимых экспериментов.)

В этих условиях еще в 1972 г. академик А. И. Берг обратился с письмом к тогдашнему министру высшего образования СССР с призывом восстановить изучение теоретической механики и сопротивления материалов в радиотехнических институтах и факультетах.

Однако введение 90-часового курса механики, объединяющего курс теоретической механики, сопротивления материалов, теории машин и механизмов и деталей машин, лишь незначительно улучшило положение. И только в отдельных вузах — в Харьковском национальном университете радиоэлектроники, Пензенском политехническом университете, Московском университете электроники и математики и Хмельницком национальном университете (а теперь, возможно, и в некоторых других) — изучаются курсы по влиянию механических воздействий на надежность радиоэлектронной аппаратуры и защите от этих воздействий.

Между тем было бы полезно в рамках специальности «Динамика и прочность машин» открыть в нескольких вузах специализацию «Динамика и прочность радиоэлектронной аппаратуры».

В шестидесятые годы прошедшего столетия в Хмельницкой области Украины интенсивно развивались предприятия радиоэлектронной промышленности с ориентацией на нужды обороны СССР. Появились и приобрели вес такие крупные предприятия как ПО «Новатор», НПО «Катион», заводы «Темп», «Нева», приборостроительные и другие. Поначалу эти

предприятия выпускали серийную продукцию, разработчиками которой были ведущие научно-исследовательские институты Москвы и Ленинграда, а затем и сами стали создавать и производить образцы новой радиоэлектронной техники.

Однако в процессе производства и эксплуатации отечественных изделий на летательных аппаратах или других быстро движущихся объектах в условиях вибраций, ударов, теплосмен имели место отказы изделий из-за механических поломок, растрескиваний, разгерметизации, ухода радиотехнических параметров за пределы, оговоренные техническими условиями. Эти отказы были вызваны не только несовершенством технологии изготовления на серийных заводах, но и ошибками разработчиков, не уделявших должного внимания вопросам прочности создаваемых конструкций.

Борьба с этими дефектами оказалась затруднительной для специалистов по радиоэлектронике, практически не изучавших в вузах цикла механических дисциплин, поэтому в 1970 г. для исследования и ликвидации прочностных дефектов были привлечены специалисты кафедры сопротивления материалов Хмельницкого высшего артиллерийского командного училища (ХВАКУ) — прочнисты, имевшие опыт работы по исследованию и устранению прочностных дефектов в авиационной промышленности.

Сотрудничество оказалось плодотворным. Было показано, что теория расчета на прочность стволов артиллерийских орудий — теория Ляме–Гадолина — может быть использована для построения теории расчета на прочность и герметичность типовых элементов и узлов герметизируемых изделий электронной техники. И хотя природа действующих сил в обоих случаях совершенно различна (в первом случае это громадное давление пороховых газов в канале ствола, а во втором — контактные давления на границах сопрягаемых материалов), основные уравнения равновесия оказались удивительно похожими.

Вскоре ученые ХВАКУ работали уже не только с предприятиями г. Хмельницкого, но и с ведущими научно-исследовательскими и производственными объединениями Советского Союза: Центральным научно-исследовательским радиотехническим институтом (ЦНИРТИ), г. Москва, научно-производственными объединениями «Позитрон», «Авангард», «Вега» (Санкт-Петербург), ПО «Коммунист» (Киев), предприятиями Харькова, Витебска, Черновцов и др. Высокая оценка и поддержка этих работ были получены со стороны ведущего ученого в области радиоэлектроники акад. А. И. Берга и Министра радиопромышленности СССР П. С. Плешакова. Были выделены необходимые средства для проведения исследований.

Следует отметить, что в то время подобных работ было крайне мало, и они внесли существенный вклад в развитие нового научного направления — обеспечения прочностной надежности изделий радиоэлектроники. Исследования проводились в основном на закрытых объектах и потому нашли малое отражение в печати, но сохранились более чем в двухстах пятидесяти научно-технических отчетах.

После ликвидации ХВАКУ работы были продолжены в Хмельницком национальном университете и получили новый толчок — новое направление, основанное на использовании явления акустической эмиссии для неразрушающего контроля, диагностирования и прогнозирования прочности, т. е. для заблаговременного предупреждения о наступлении опасных состояний и недопущении отказов изделий. Несмотря на спад производства и недостаточное финансирование, исследования в области прочностной надежности продолжаются, на материалах этих работ ведется подготовка специалистов по динамике и прочности приборов и аппаратуры.

После распада Советского Союза к этим работам был проявлен большой интерес за рубежом. Исполнители исследований несколько раз приглашались в США различными организациями, в том числе НАСА и «Боинг», и выступали с лекциями и докладами по отдельным несекретным разделам проведенных исследований. По приглашению НАТО и Европейской комиссии были прочитаны обзорные лекции по проблеме прочности в электронике в Норвегии на Европейском форуме по силовой электронике. Отдельные фрагменты докладывались в Японии, Франции, Китае и других странах.

Эти работы отличает научность, высокая степень внедрения и экономический эффект на предприятиях — разработчиках изделий, на заводах, выпускающих серийную продукцию, и в эксплуатирующих организациях в Украине, России, Белоруссии, Армении. Как свидетельствуют проведенные тогда расчеты и акты внедрения, на 1 рубль затрат на эти работы государство в те годы получало не менее 100 рублей дохода только за счет снижения затрат на заводах-изготовителях.

Выполненные работы, как и всю проблему механической прочности, можно разделить на три взаимосвязанные части: это статическая прочность, динамическая прочность и неразрушающий контроль, диагностика и прогнозирование прочности.

В рамках одной журнальной статьи невозможно изложить теоретические и экспериментальные материалы по выполненным исследованиям, поэтому укажем только, что было сделано, — со ссылками на некоторые публикации.

По статической прочности.

Разработаны теоретические основы расчета на прочность типовых компаундированных элементов электронной техники: конденсаторов, резисторов, герметизируемых конструкций микромодулей, фоторезисторов, узлов герметизации приборов и микроприборов, интегральных микросхем, стеклоспаев и других с учетом температурных полей, контактных давлений, эксплуатационных факторов, разбросов значений физико-механических характеристик сопрягаемых материалов, а также предельных напряжений, — с учетом дефектов структуры материалов [9].

Из условия обеспечения прочности решена множественная обратная задача обоснованного назначения допусков на физико-механические характеристики материалов и геометрические размеры сопрягаемых деталей. При этом разработан метод определения доверительных интервалов допустимых значений

характеристик при многомодальном законе распределения их вероятностей и тем самым получен общий метод обработки статистических материалов при любом законе их распределения.

На базе метода конечных элементов проведен анализ напряженного состояния изделий электронной техники (ИЭТ) типа «изделие—герметик» в упругопластических областях с учетом изменения свойств материалов при изменении температуры. Предложен расчетно-экспериментальный способ и формулы для идентификации физико-механических свойств керамики и компаунда в ИЭТ с учетом влияния температуры.

Проведено теоретическое исследование проблемы прочности ИЭТ, поставленной и решенной в рамках линейной механики разрушения (с учетом реальной структуры материала). Проанализирована проблема большого (300—500%) разброса механических характеристик применяемых материалов, не подчиняющихся одномодальным законам распределения [10].

Рассмотрена проблема короблений и деформаций печатных плат и подкладок корпусов и передачи возникающих усилий на элементы. На этой основе была издана отраслевая «Инструкция по установлению допустимых короблений печатных плат». Проанализированы монтажные напряжения, зависимость прочности элементов от влияния технологических операций отрезки, формовки, зачистки выводов, а также от влияния концентраторов напряжений; мероприятия по снижению этих влияний внедрены в производство.

Рассмотрена прочность монолитных, пустотелых и полупустотелых конструкций модулей при изменении внешнего давления и выданы рекомендации по условиям применения каждой из них.

Разработан метод тензометрирования ИЭТ с учетом влияния поперечной чувствительности проволочных петлевых тензометров, анизотропии физико-механических свойств материалов и краевых эффектов, с возможностью регулировки тока питания малобазных тензорезисторов, произведен отбор и доработка аппаратуры для измерения деформаций натурных ИЭТ. Это позволило впервые измерить и получить реальные значения деформаций плат, пассивных электронных элементов, контактных узлов, выводов, стеклоспаев в эксплуатационных и лабораторных условиях, определить время окончания полимеризации компаундов и сократить время проведения термоударов в конкретных изделиях.

Разработаны методы контроля на герметичность и высотность, определения реальных коэффициентов запаса прочности и демпфирования, сравнения эффективности применения герметиков и защитных покрытий, определения остаточных деформаций.

Разработана методика оценки запаса прочности по предельным состояниям элементов, воспроизводимым в реальных конструкциях в условиях эксплуатации. Экспериментально подтверждены теоретические положения.

Произведен расчет на прочность и герметичность керамических резисторов типов ОМЛТ-0,1256, ОСМЛМ-0,125, С2-23-0,062, конденсаторов КМ-5в, К10-9, К10-17, К15-5, К78, герметиков.

Расчетным и экспериментальным путем исследовано взаимодействие компаундов 9 типов, защитных покрытий 15 типов с электрорадиоэлементами в конструкциях ИЭТ, влияние конструкторско-технологических мероприятий, направленных на повышение работоспособности изделий; оптимальные из них внедрены в производство.

Разработаны новые конструкции узла влагозащиты тонкопленочных конденсаторов и новая конструкция закрепления выводов электролитических конденсаторов, позволившие существенно повысить их надежность и долговечность.

Путем расчета и экспериментов установлено, что причиной растрескивания стекол фотодатчиков и гермовыводов является неблагоприятное сочетание значений физико-механических характеристик ковара и стекла, микродефектов поверхности стекла и значительных градиентов температуры по радиусу при стеклоспае. Для повышения надежности фотодатчиков созданы таблицы приемлемых сочетаний физико-механических характеристик материалов при определенных размерах микродефектов и рекомендовано для глазковых стеклоспаев отказаться от индуктивного способа стеклоспая с переходом на прогрев в муфельных печах, что и было реализовано на ряде предприятий.

Из решения множественной обратной задачи назначены допуски на значения физико-механических характеристик резисторов и конденсаторов, а также герметизирующих компаундов, при которых обеспечивается их прочность и герметичность. Из расчетов получена и экспериментально подтверждена новая, не имеющая аналогов конструкция узла герметизации изделий цилиндрической формы с выводом, содержащая компенсатор разницы в значениях физико-механических характеристик материалов при термочиклировании, разработан новый тензометрический способ определения времени и степени полимеризации компаундов, позволивший в 2—10 раз сократить длительность технологического процесса для разных компаундов [11].

Результаты работы внедрены в НИИ «Гириконд», ПО «Новатор», на заводах «Гириконд», «Радар», НПО «Ленинец», «Авангард», ЦНИРТИ, НПО «Позитрон», НПО «Катион», заводе «Измеритель» и др. Экономический эффект, рассчитанный в 1989 г., от внедрения разработок по повышению статической прочности лишь на некоторых предприятиях-изготовителях составил не менее 15 миллионов рублей в год.

По динамической прочности [12].

Разработаны теоретические и экспериментальные методы и средства исследования вибраций и ударов в натуральных изделиях электронной техники. Проведена высокоскоростная компьютерная видеосъемка колебаний типового блока РЭА, позволившая при замедленном воспроизводстве на экране монитора реально увидеть деформации и колебания печатных плат, элементов, стоек и других деталей блока на резонансных частотах возбуждения. Предложена и реализована не имеющая аналогов конструкция крепления печатных плат на тканевой подвеске с демпфером сухого трения, благодаря которой плата имеет колебания лишь в узком интервале низких частот, без

деформации самой платы, а затем, на более высоких частотах, благодаря инерционности и подвижности ткани плата остается неподвижной. Таким образом, обеспечивается сохранность навесного и печатного монтажа и обеспечивается теплоотвод и ремонтпригодность, что неразрешимо при использовании защитных компаундных покрытий. Разработаны основы теории виброизоляции печатных плат на тканевой подвеске с демпфером сухого трения.

Созданы оригинальные установки для определения формы и частоты колебаний натуральных плат с помощью пьезодатчиков, кварца и керосина. Разработана методика и доработана аппаратура для экспериментального определения деформаций и напряжений в изделиях радиоэлектроники с учетом их специфики. Разработаны методики и созданы приборы и установки для бесконтактного определения параметров вибраций натуральных изделий радиоэлектроники. Созданы оригинальные конструкции приспособлений, не имеющих резонансов в диапазонах частот 0...5000 Гц и 0...10000 Гц, для испытания радиоэлектронных изделий. Проведено вибрографирование и тензометрирование не менее 30 конструкций микромодулей и выявлено, что причиной разрушения резисторов, растрескивания компаундов, отслаивания дорожек, обрывов выводов и других дефектов является наличие резонансов в конструкциях и (или) испытательных приспособлениях, из-за чего вибрации в местах поломки в десятки и сотни раз превосходили задаваемые и допустимые.

Разработаны методы и средства повышения вибрационной и ударной прочности конструкций изделий радиоэлектроники.

Созданы не имеющие аналогов конструкции изделий радиоэлектроники и приспособлений, которые либо не имеют резонансов в диапазоне рабочих частот, либо меняют свои упругодемпферные характеристики при подходе к резонансу и восстанавливают эти характеристики после прохода резонансов (безрезонансные приспособления, пневматическая подвеска и подвеска блока с демпфером сухого трения).

Разработана методика испытаний изделий, чей вес превышает технические возможности вибростендов. Создана методика определения параметров ударного импульса и тарировки ударных стендов. Создана и внедрена в учебный процесс экспериментальная установка для определения формы и частоты колебаний печатных плат и других изделий, имеющих форму пластин.

Разработаны руководящие технические материалы (РТМ) по проведению вибрационных и ударных испытаний, по тарировке виброизмерительной аппаратуры, по паспортизации приспособлений для закрепления изделий, по определению центра тяжести изделий сложной конфигурации, по установке изделий на разгрузочном устройстве вибростенда. РТМ переданы предприятиям и организациям, создающим, выпускающим и эксплуатирующим радиоэлектронную аппаратуру.

По неразрушающим методам контроля, диагностированию и прогнозированию прочности [13].

Создана лаборатория акустической эмиссии (АЭ), оснащенная современными испытательными машинами и компьютерами, а также специально созданными установками и приспособлениями для испытания ИЭТ на различные виды статических, динамических, температурных воздействий и их сочетаний.

Проведена модернизация отечественных акустоэмиссионных приборов. Разработан модуль компьютерного параллельного интерфейса и пакет прикладных программ, что позволило компьютеризировать процесс сбора и обработки параметров сигналов АЭ, повысить в 40 раз количество обрабатываемых сигналов и получать трехмерную (наглядную) диаграмму распределения сигналов АЭ от времени и действующей нагрузки по координате с локацией мест излучения.

Теоретически разработаны и реализованы на практике способы плоскостной и объемной локации (пеленга) источников АЭ путем регистрации разницы времен прихода сигналов к независимым парам первичных пьезоэлектрических преобразователей, расположенных накрест, что позволяет проще и точнее, чем другими методами, определять координаты опасных дефектов плоских и пространственных деталей и конструкций.

Установлено, что метод АЭ малоэффективен для контроля качества пайки в процессе отверждения расплава легкоплавких припоев и, наоборот, высокоэффективен для контроля качества сварки в процессе остывания сварных швов. Разработана методика неразрушающего контроля качества (прочности) сварки соединенных чугуновых деталей путем анализа сигналов АЭ, которые излучаются во время остывания сварного соединения.

Разработан способ локации (пеленга) дефектов в конструкциях, имеющих сложную неоднородную поверхность, и на этой основе — методика неразрушающего контроля качества пайки печатных плат, что позволяет определять места дефектов плат.

Созданные методы и средства фиксации и компьютерной обработки сигналов АЭ позволили отработать ряд конструкций ИЭТ и технологий их производства.

Разработана и внедрена в практику исследований методология разделения сигналов АЭ, излучаемых различными материалами в неразъемных соединениях при термоциклировании ИЭТ.

Создана методика неразрушающего контроля качества керамических конденсаторов, используемых, в частности, в бортовой аппаратуре, с повышенными требованиями к механической прочности, позволяющая отбраковывать потенциально ненадежные конденсаторы. Научно обоснована возможность индивидуального прогнозирования прочности керамических конденсаторов. Разработаны способы прогнозирования пределов прочности, реализация которых основана на регистрации параметров акустической эмиссии в процессе разгрузки, сопровождающейся развитием локальных дефектов без зарождения микротрещин. Один из способов эффективен для конденсаторов, имеющих технологические дефекты, а другой — для конденсаторов, разрушение которых обусловлено зарождением в них магистральной трещины.

Предложен неразрушающий метод контроля герметичности корпусов микросборок СВЧ в условиях эксплуатации, т. е. на борту летательных аппаратов, когда в результате взлетов и посадок корпуса испытывают перепады давления и возникает опасность разрушения сварного шва и разгерметизации корпуса. Зафиксированные прибором АЭ сигналы, амплитудный уровень которых превышает допустимый, свидетельствуют (предупреждают) о начавшемся процессе разрушения и о том, что за 6—8 циклов (т. е. взлетов и посадок) произойдет разгерметизация корпуса. Спроектирован и создан портативный акустоэмиссионный прибор, предназначенный для предупреждения о начале процесса разгерметизации корпусов микросборок СВЧ и контроля качества их сварных швов на борту летательных аппаратов.

Предложен метод предупреждения опасных состояний компаундированных керамических конденсаторов, работающих в условиях термоциклирования от +60 до –50°C. Проявление акустической эмиссии на n -м цикле является предупреждением о начале процесса катастрофического разрушения конденсатора через 5—10 циклов изменения температуры.

В заключение следует заметить, что работы проводились в период с 1970 по 2005 год, и некоторые объекты исследований наверняка уже морально устарели, тем не менее подходы к решению проблем их прочности и полученные результаты, безусловно, представляют интерес не только в историческом плане. Они могут быть перенесены на современные изделия РЭА и использованы разработчиками и изготовителями изделий для ликвидации дефектов и повышения прочностной надежности изделий радиоэлектронной аппаратуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Трифанюк В. В. Надійність пристроїв промислової електроніки.— К.: Либідь, 1992.
2. Карпушин В. Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре.— М.: Сов. радио, 1971.
3. Маликов И. М., Половко А. М., Романов Н. А., Чукреев П. Л. Основы теории и расчета надежности.— Л.: Судпромгиз, 1960.
4. Держинский С. М., Рыжанков В. И. Модель формирования испытаний РЭА на воздействие широкополосной случайной вибрации//Механика радиоэлектронных и вычислительных устройств (Таганрог. радиотехн. ин-т).— 1982.— Вып. 2.— С. 61—66.
5. Кофанов Ю. Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств.— М.: Радио и связь, 1991.
6. Шмидт Э. П. Натурные испытания электронных приборов.— М.: Сов. радио, 1976.
7. Малинский В. Д. Контроль и испытание радиоаппаратуры.— М.: Энергия, 1970.
8. Кузнецов О. А., Логинов А. Н., Сергеев В. С. Прочность элементов микроселекционной аппаратуры.— М.: Радио и связь, 1990.
9. Royzman V. P. Residual stresses in compounding electronic systems / Proceedings of the Fourth International Conf. on Residual Stresses.— Baltimore, Maryland, USA.— 1994.— P. 814—820.
10. Royzman V. P., Nester N. A. Problem of mechanical strength in electronics / Power Electronics and Applications. 7th European Conf.— Trondheim, Norway Voll.— 1997.— P. 1396—1399.
11. Royzman V. P., Lebed A. V. Theoretical and experimental analysis the humidity protective units of electrolytic and thin-film capacitors / Proceedings of PCIM 2001 Conf.— Nuremberg, Germany.— 2001.— P. 382—387.
12. Royzman V. P., Nester N. A. Vibration isolation of wiring boards in products of electronics / Proceedings of the 15th Intern. Modal Analysis Conf.— Orlando, Florida, USA.— 1997.— P. 1838—1844.
13. Royzman V. P. Computation and experimental mechanics electronics / Fifth World Congress on Computation Mechanics. Vol. 1.— Viena, Austria.— 2002.— P. 300—301.

К. т. н. И. В. ИВАНОВА

Россия, г. С.-Петербург, Северо-Западный гос. заочный
технический университет
E-mail: rilala_spb@mail.ru

Дата поступления в редакцию
20.05 2005 г.

Оппонент к. т. н. И. А. КИРЕЕВ
(ОНАС им. А. С. Попова, г. Одесса)

АЛГОРИТМ ГИБРИДНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ КОДОВ РИДА–СОЛОМОНА БЕЗ РЕКУРРЕНТНЫХ ПРОЦЕДУР

На основе вычисления особых продолжений ганкелевых (теплицевых) матриц и синдромов существенно снижается погрешность ошибок при канальном декодировании.

В рамках задачи обеспечения достаточной помехоустойчивости в системах передачи информации в работах [1, 2] сделан вывод о необходимости разработки безрекуррентных процедур декодирования применительно к кодам Рида–Соломона, представляющих наибольший практический интерес. Разработка

таких процедур декодирования возможна с использованием ганкелевых (теплицевых) матриц при вычислении синдромов ошибок.

В теории помехоустойчивого кодирования операции с ганкелевыми (или теплицевыми) матрицами осуществляется при составлении системы линейных уравнений, называемых синдромными и записываемых в векторно-матричной форме в виде $A_T \sigma = b$; $A_T \bar{\sigma} = b$, где A_T, A_r — квадратные матрицы порядка n , соответственно теплицева и ганкелева; $\sigma = [\sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_n]^T$ — вектор-столбец высоты n неизвестных переменных; $b = [b_1 b_2 \dots b_n]^T$ — вектор-столбец высоты n известных