

УДК 621.3

# АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЕЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ГИБКИХ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

В. В. Невлюдова, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

*Проанализированы особенности проектирования модулей радиотехнических систем на основе гибких коммутационных структур с точки зрения обеспечения их надежности, качества и заданных эксплуатационных характеристик.*

*Проаналізовано особливості проектування модулів радіотехнічних систем на основі гнучких комутаційних структур з погляду забезпечення їх надійності, якості та заданих експлуатаційних характеристик.*

*In the article the features of the radio systems modules design on the flexible commutative structures basis in terms of their reliability, quality and operating parameters are analyzed.*

**Ключевые слова:** радиотехническая система, гибкий шлейф, проектирование, топология, надежность.

## Введение

Как известно, применение гибких коммутационных структур (ГКС) позволяет уменьшить габариты и вес модулей радиотехнических систем (РТС); отказаться от соединительных разъемов; повысить надежность соединений; упростить монтаж; обеспечить динамическую гибкость соединений и упростить обслуживание при эксплуатации [1]. Особенно актуальным применение подобных шлейфов является для портативных телекоммуникационных устройств, для систем наземной и спутниковой связи, например для печатных антенн, а также для устройств в МЭМС-исполнении.

Однако проектирование гибких многослойных шлейфов сопряжено с рядом трудностей [2-3].

## Постановка задачи исследования

В зарубежной практике уже сложились правила совместной поэтапной работы конструктора и технолога:

- обеспечение технологичности – Design for Manufacturability (DfM);
- обеспечение сборки – Design for Assembly (DfA);
- обеспечение контролепригодности – Design for Testability (DfT);
- и, наконец, обеспечение надежности – Design for Reliability (DfR).

Требования к этим процессам взаимодействия всех служб предприятия при проектировании и изготовлении электроники заложены в зарубежных стандартах, в частности, в IPC-A-620, ANS1/J-STD-001, IPC-SM-785, IPC-D-279 [4].

При проектировании модулей РТС на основе ГКС также необходимо особое внимание уделять:

- анализу условий эксплуатации, в частности возможных влияний на работу модулей различных дестабилизирующих факторов;
  - разработке топологии гибких шлейфов, особенно для многослойных конструкций;
  - вопросам электромагнитной совместимости;
  - разработке технологии изготовления ГКС.
- Анализ первых двух вопросов и является задачей данной работы.

## Анализ конструктивно-технологических особенностей модулей РТС на основе ГКС

Важной задачей является анализ конструктивно-технологических особенностей ГКС с целью обеспечения необходимых показателей качества и надежности готового устройства.

Многие из этих особенностей, а соответственно и требований к ГКС зависят от их назначения и условий эксплуатации [2, 5].

Так, ГКС изготавливаются на эластичном основании толщиной 0,1...0,2 мм. Разновидностью ГКС является гибкий печатный кабель (шлейф). Находят широкое применение, если платы подвергаются вибрации, многократным изгибам или им необходимо придать изогнутую форму (рис. 1).

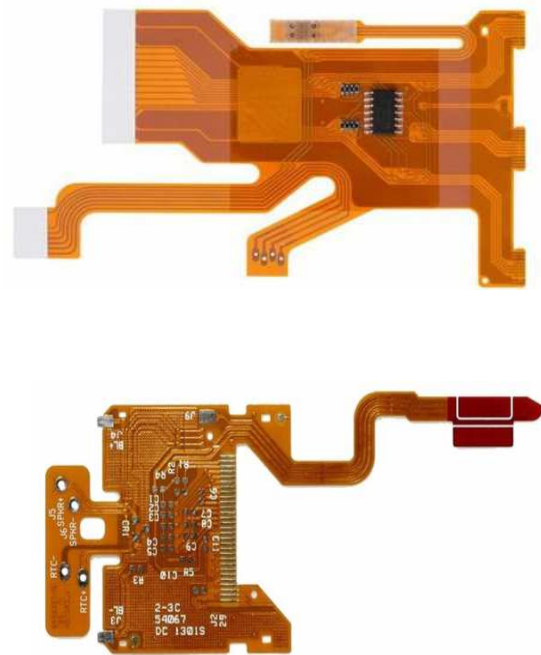


Рис. 1. Примеры конструкций ГКС

Достоинствами ГКС являются:

- упрощение компоновки и уменьшение объема РЭС на 40...50 %;

- высокая надежность, обеспечиваемая хорошими электроизоляционными характеристиками диэлектрических оснований;

- улучшенные электрические характеристики (унифицированные материалы, волновое сопротивление, уменьшение индуктивности);

- высокая механическая прочность;

- устойчивость к вибрациям, ударам и линейным ускорениям;

- технологичность конструкции и экономичность ТП изготовления ГКС вследствие их изготовления путем перематывания гибкой ленты из рулона в рулон; сокращения числа таких операций, как измерение длины, отрезка, снятие изоляции, прозвонка и др.;

- возможность трехмерной конструкции упаковки; совместимость с поверхностным монтажом компонентов (совместимость по коэффициенту расширения).

Таким образом, по сравнению с жесткими печатными платами у гибких есть ряд преимуществ, среди которых:

- компактные размеры и снижение массы, достигаются благодаря более тонкому диэлектрическому основанию печатной платы;

- эргономичность, в зависимости от степени жесткости гибкой плате можно придавать различные формы без потери функциональных параметров.

Стоит отметить, что ГКС обладают повышенной устойчивостью к перегибам, вследствие чего они могут использоваться в конструкциях электронных модулей, позволяющих неоднократно складывать их в книжку или свертывать в рулон. Также благодаря возможности применения групповых методов и автоматизированных процессов сборки и монтажа ГКС снижается трудоемкость технологического процесса, уменьшается себестоимость сборки и повышается надежность модулей РТС [1, 3, 6].

Эксплуатационные факторы для таких шлейфов определяются качеством организации эксплуатации аппаратуры (субъективные факторы), неблагоприятным воздействием внешних условий, а также длительностью работы аппаратуры во время каждого сеанса и цикличностью работы (объективные факторы).

При этом в число важнейших показателей качества модуля РТС на основе ГКС входят показатели надежности, особенно если последний работает в динамическом режиме (например, для модулей, используемых в транспортных средствах, бортовой аппаратуре и т. д.).

Система показателей надежности может быть представлена в виде:

$$R = \{F, LQ, MA, KQ\},$$

где  $F$  – безотказность;

$LQ$  – долговечность;

$MA$  – ремонтпригодность;

$KQ$  – сохраняемость.

Одним из основных показателей надежности, применимых во время эксплуатации РТС, можно считать безотказность, и, следовательно, повысить качество готового модуля можно путем разработки системы обеспечения безотказности. При этом данная система должна включать в себя меры по обеспечению безотказности на всех этапах жизненного цикла РТС.

В частности, систему обеспечения безотказности можно представить в виде

$$S_{OB} = f(Pr, R_p, D_E, I_S, MT_S, T_S),$$

где  $Pr$  – подсистема прогнозирования и планирования технического уровня и качества;

$R_p$  – подсистема регулирования качества продукции в производстве;

$D_E$  – подсистема профилактики брака в производстве;

$I_S$  – подсистема информационного обеспечения;

$MT_S$  – подсистема материально-технического обеспечения;

$T_S$  – подсистема технологического обеспечения.

### Выбор топологии ГКС

Значительный вклад в повышение надежности модулей РТС на основе ГКС вносит правильный выбор топологии печатных проводников и материала гибкого шлейфа [7].

Во избежание возникновения перекрестных искажений в гибком шлейфе необходимо тщательно контролировать ширину проводников и зазоры между ними. Рекомендуется также заранее оценить значения паразитных параметров, чтобы предсказать вероятность проявления связанных с ними физических эффектов на высоких частотах. Также необходимо учитывать диэлектрические свойства многослойного материала печатной платы, в качестве которого могут применяться полиимид, лавсан, полиэфир и др. [1-2].

При проектировании гибкого шлейфа необходимо учитывать также то, что увеличение количества проводников может привести к увеличению количества слоев ГКС, что при эксплуатации модулей РТС может снизить гибкость платы. Также увеличение количества слоев гибкой платы приведет к значительному росту числа межслойных соединений, а именно – соединений с помощью УЗ-сварки [6]. Это значительно усложняет технологию изготовления гибкого шлейфа, а также увеличивает время и стоимость его производства.

Также можно сформулировать такие рекомендации при проектировании ГКС. При проектировании гибкой печатной платы необходимо учитывать: возможность изгиба многослойной склеенной гибкой платы в процессе эксплуатации; особенности монтажа; возможное воздействие влаги и температуры. Важно предусмотреть элементы ужесточения гибкой платы (при необходимости), а также обеспечить надежность переходных отверстий.

Для максимального динамического времени жизни и максимальной надежности при статической гибкости

при проектировании топологии гибкого шлейфа должны выполняться следующие условия:

- перпендикулярность проводников к направлению изгиба;
- максимальная ширина проводников в области изгиба;
- постоянная ширина проводников;
- проводники в смежных слоях должны быть разнесены друг относительно друга для сведения к минимуму площади их перекрытия;
- количество слоев в гибкой части должно быть сведено к минимуму;
- металлизированные сквозные отверстия не допускаются [8-9].

#### **Анализ условий эксплуатации модулей РТС на основе ГКС**

Рабочий режим элементов (узлов) модулей РТС определяется степенью их электрических и механических нагрузок, а также окружающей температурой. В ряде случаев (в аппаратуре космических летательных аппаратов, аппаратуре на судах с источниками ядерной энергии) режим работы модулей РТС зависит от интенсивности ионизирующих излучений. Эти дестабилизирующие факторы могут привести к нарушению механической прочности, и разрушению узлов аппаратуры, а также отказу модуля РТС в целом.

Одной из важнейших задач при создании модулей РТС, работающих в жестких условиях, является выбор способов защиты от дестабилизирующих факторов (механических, климатических, помех).

Основными видами деформаций ГКС являются:

- деформация изгиба;

При использовании гибких материалов нет гарантии, что гибкая плата будет надежно функционировать при сгибании. Имеется множество факторов, способствующих увеличению надежности ГКС, и все эти факторы должны приниматься во внимание в процессе разработки для обеспечения надежной работы гибких печатных плат [10];

- деформация скручивания.

При разработке гибкой платы разработчик должен учитывать все факторы, которые могут влиять на их способность изгибаться в условиях конкретного применения. Это включает в себя анализ того, будет ли плата постоянно находиться в неподвижном состоянии или в движении, радиусов изгибов, толщины и типа диэлектрика, массы фольги, толщины меди, удельной толщины платы, числа слоев и количества и частоты изгибов.

Деформации печатных плат, возникающие в процессе производства, приводят к многочисленным негативным последствиям. Они могут вызвать разрыв проводников, а также существенно осложнить процесс монтажа SMD-компонентов на гибкую плату. Обычно для борьбы с деформацией печатных плат применяют различные технологические решения на этапе производства плат. Однако некоторые приемы, с помощью которых можно существенно снизить

вероятность появления деформации, можно применить уже на этапе проектирования платы [11].

Таким образом, основные требования к конструкциям модулей РТС различного назначения выражаются в их способности противостоять климатическим и механическим воздействиям в процессе эксплуатации.

При воздействии на аппаратуру вибраций, ударов и линейных ускорений могут произойти восстанавливаемые и невосстанавливаемые нарушения ее функционирования.

К восстанавливаемым нарушениям относятся электромагнитные шумы и параллельная модуляция, к невосстанавливаемым – обрывы и поломки. К восстанавливаемым отказам относятся акустические искажения и появления в получаемом сигнале большого уровня шумов и паразитная модуляция положительного сигнала, которая возникает вследствие тензoeffекта и пьезoeffекта.

При воздействии на конструктивный элемент модуля РТС вибрации малого уровня может возникнуть динамическая упругая деформация, при большом уровне вибраций может иметь место пластическая деформация. Если же вибрации будут еще большие, то может произойти разрушение конструкции.

Кроме механической ветви реакции электронного модуля существует ещё и электрическая. Она обусловлена деформацией и механическим напряжением. Существует понятие устойчивости, оно характеризуется нормальным функционированием аппаратуры при механических воздействиях. Причинами нарушения устойчивости могут быть:

- изменение значения переходного сопротивления в контактных группах разъемов и т. д.;
- изменение параметров пассивных и активных элементов модулей РТС;
- появление шумовых напряжений в проводниках, колеблющихся в магнитных полях;
- появление шумовых напряжений в колебаниях за счет возникающих электрических зарядов при механических воздействиях в высококачественных диэлектриках.

К качеству материала гибких оснований, к технологическим операциям и сборке при изготовлении ГКС, кабелей на их основе предъявляют целый ряд специфических требований

На выходные параметры конструкции модулей РТС на гибком печатном основании могут влиять такие параметры (рис. 2):

- механические: жесткость платы, частота собственных колебаний, динамическая гибкость, износ;
- электрические: паразитные параметры системы проводников, электромагнитная совместимость и т. п.
- технологические: количество слоев платы, материалы основания и проводящих слоев, тип межслойного соединения, ширина проводников и зазор между ними [12].



Рис. 2. Параметры модулей РТС на основе ГКС

### Выводы

Таким образом, учитывая результаты анализа предметной области, можно сделать вывод о том, что применение ГКС в составе модулей РТС позволит существенно повысить их качественные характеристики и надежность РТС в целом.

При этом имеет место ряд трудностей по обеспечению качественных характеристик таких структур на всех этапах жизненного цикла.

Актуальной является задача обеспечения безотказности модуля РТС на основе ГКС, одним из методов которого может стать прогнозирование отказов РТС на этапе проектирования и на этапе эксплуатации в ходе анализа условий и режимов работы модуля, а также его выходных параметров.

Особое внимание стоит уделить вопросам обеспечения динамической гибкости ГКС, мерам по их защите от механических воздействий, вопросам радиационной стойкости (для космической аппаратуры) и электромагнитной совместимости ГКС в составе модулей РТС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Технологии в производстве электроники. Часть III. Гибкие печатные платы / Под общ. ред. А. М. Медведева и Г. В. Мылова. – М.: Группа ИДТ, 2008. – 488 с.
2. Fjellstad, Joseph. Flexible Circuit Technology. Third edition / Joseph Fjellstad. – BR Publishing, Inc., 2007. – 226 p.
3. Невлюдов, И. Ш. Анализ современных технологий изготовления гибридных микросборок / И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко, И. С. Хатнюк, Р. Ю. Аллахверанов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2010. – Вып. 3. – С. 200-209.
4. IPC A-620. Requirements & Acceptance for Cable & Wire Harness Assemblies : Association Connecting Electronics Industries, 2002. – 282 p.
5. Macleod, P. A Review of Flexible Circuit Technology and its Applications / P. Macleod. – UK: PRIME Faraday Partnership, Loughborough University, 2002. – 54 p.
6. Борцов, В. Н. Исследование и выбор оптимальных технологических режимов сварки для автоматизации монтажа гибких алюминий-полиимидных микрокабелей / В. Н. Борцов, И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко, И. Т. Тымчук, И. С. Хатнюк // Технология приборостроения. – 2011. – №1. – С. 3-8.
7. Андрусевич, А. А. Выбор топологии гибких коммутационных шлейфов для телекоммуникационных устройств на основе теоремы Байеса / А. А. Андрусевич, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова, В. В. Невлюдова // Журнал «Проблемы телекоммуникаций». – № 3 (15). – 2014. – С. 95-105.
8. Картер, Б. Техника разводки печатных плат. Ч.1 / Б. Картер // Chip News. – 2004. – №7 (90). – С.63-70.
9. Картер, Б. Техника разводки печатных плат. Ч.2 / Б. Картер // Chip News. – 2004. – №10 (93). – С.46-51.
10. Финстад, М. Разработка гибких печатных плат / М. Финстад. – Режим доступа: <http://portal-ed.ru/index.php/gibkie-platy/83-razrabotka-gibkikh-pechatnykh-plat>. – 2015.
11. Бегер, Е. Деформации печатных плат: как их предотвратить на этапе конструирования / Е. Бегер // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2008. – № 8. – С. 94-98.
12. Андрусевич, А. А. Отображение процесса изменения параметров РЭС на основе системологической модели / А. А. Андрусевич, И. В. Жарикова, В. В. Невлюдова, Н. П. Демская // Системы обработки информации. – 2014. – Выпуск 8 (124). – С. 8-12.