

УДК 621.389:539.384

*И. Ш. НЕВЛЮДОВ, Е. А. РАЗУМОВ-ФРИЗЮК, В. В. НЕВЛЮДОВА,
Н. П. ДЕМСКАЯ*

Харьковский национальный университет радиозлектроники, г. Харьков, Украина

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ГИБКИЕ ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

Исследование особенностей механических деформаций и разрушений гибких печатных плат в аппаратостроении.

Ключевые слова: *гибкие печатные платы, деформация, изгиб, проводники, растяжение, резонанс.*

Введение. Гибкие печатные платы (ГПП) – это платы с гибким базовым материалом и защитным покрытием или без него [1].

В настоящее время невозможно представить ни одно из существующих направлений электронного аппаратостроения без применения печатных плат (ПП). Если печатные модули на жёстком основании применяются давно, то гибкие ПП являются относительно новым направлением аппаратостроения, но уже активно используются в радио-, авиационной, космической, автомобильной и компьютерной технике.

Причин использования гибких плат в качестве несущего основания и средства межсоединений в электронных устройствах достаточно много. Так как сравнению с привычными жесткими основаниями печатных плат или жгутами соединительных проводов ГПП имеют ряд неоспоримых преимуществ:

- а) снижение габаритных размеров и массы;
- б) динамическая гибкость;
- в) возможность объемной компоновки;
- г) снижение влияния температурных коэффициентов расширения при монтаже элементов на печатную плату;
- д) применение технологии «кристалл-на-гибкой плате» (Chip-on-Flex — COF).

Было бы несправедливо утверждать, что гибкие печатные платы во всем превосходят свои жесткие аналоги, но они имеют целый ряд безусловных преимуществ, позволяющих занять свою нишу в производстве функциональной электроники. Конструкционная гибкость является с одной стороны достоинством ГПП, но с другой стороны приводит к появлению проблем, вызванных необходимостью обеспечения стабильности материалов и конструкций ГПП во времени под воздействием деформаций различного вида. Авторами данной статьи была поставлена задача - провести анализ деформаций возникающих в ГПП и разработать технологические рекомендации для проектирования ГПП.

Постановка задачи. Базовый материал, материал основания, представляет собой гибкую полимерную пленку, играющую роль диалектической основы ГПП. Основными базовыми материалами в настоящий момент являются: полиимид, полиэфир, фторэтиленпропилен, политетрафторэтилен, поливинилхлорид, полиэтилен нафталат.

Прежде всего, необходимо уточнить конструкционные особенности ГПП. Основных элементов структуры гибких печатных плат не так много, но каждый

элемент должен в течение всего срока службы изделия отвечать предъявляемым к нему требованиям: электрическим, механическим, климатическим и др. [2–4].

В качестве проводящего элемента структуры гибкого материала чаще всего используется металлическая фольга: это материал, из которого обычно вытравливаются проводники платы. Основными проводниковыми материалами, используемыми при производстве ГПП являются алюминий и медь.

Проведя анализ последних достижений и публикаций по тематике исследований было выделено три основных вида деформаций ГПП, наиболее распространенных в современном аппаратостроении. К ним относятся деформации изгиба, растяжения и деформации, вызванные вибрационным воздействием. Для исследований был выбран полиимидный материал ГПП фольгированный алюминием марки ФДИ-А-35.

Деформации изгиба. Наиболее распространенным видом деформации ГПП является деформации изгиба (рис.1) [2].

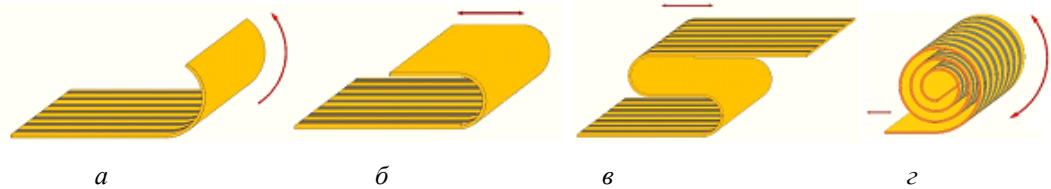


Рис. 1. Деформации изгиба ГПП: *a* – чистый изгиб, *б* – продольный изгиб, *в* – многократный изгиб, *г* – скручивание

Данный вид деформации, как правило, возникает в устройствах, в которых ГПП используется для соединения двух или более жестких модулей, которые перемещаются один относительно другого по некоторой оси, например гибкие солнечные батареи, ноутбуки, датчики, HDD, антенны и др.

В соответствии с проведенным анализом наибольшую опасность при таких видах деформациях представляют изгибы ГПП с малым радиусом (рис. 2). Определяющим параметром возникновения дефектов является радиус перегиба ГПП.



Рис. 2. Деформация ГПП при изгибе

Нормальные напряжения, действующие по оси, перпендикулярной плоскости платы, в алюминиевом проводнике и полиимидной пленке определяются из уравнений (1):

$$\sigma_a = \frac{y}{\rho} E_a, \quad (1)$$

$$\sigma_n = \frac{y}{\rho} E_n, \quad (2)$$

где ρ – радиус кривизны ГПП; y – расстояние от нейтральной линии; E_a – модуль упругости алюминия; E_n – модуль упругости полиимида.

Определить положение нейтральной линии возможно из условия равенства нулю суммарной осевой силы в поперечном сечении (2):

Изгибающий момент определяется по формуле (3):

$$M = \int \sigma y dF \quad (3)$$

С учетом того, что рассматриваемая ГПП представляет собой двуслойную структуру – полиимид и алюминий получено следующее выражение:

$$M = \int \sigma_a y dF + \int \sigma_n y dF = \frac{J \sigma_a E_a + J \sigma_n E_n}{\rho}, \quad (4)$$

где J_a – момент инерции площади алюминия относительно нейтральной оси; J_n – момент инерции площади полиимида относительно нейтральной оси.

Выразив радиус кривизны балки из уравнения (4) и подставив его в уравнение (1) получены зависимости распределения напряжений ГПП (5):

$$\begin{aligned} \sigma_a &= \frac{MyE_a}{E_a J_a + E_n J_n} \\ \sigma_n &= \frac{MyE_n}{E_a J_a + E_n J_n} \end{aligned} \quad (5)$$

В связи с тем, что модуль упругости слоя алюминия значительно превосходит модуль упругости слоя полиимида, нейтральная линия располагается в слое алюминия (6):

$$E_a \int y dF = E_a \left(-\frac{h_a}{2} h_a B_a + \frac{H_a - h_a}{2} [H_a - h_a] B_a \right), \quad E_n \int y dF = E_n \left(\left[H_a - h_a + \frac{H_n}{2} \right] H_n B_n \right), \quad (6)$$

где H_a – толщина слоя алюминия; H_n – толщина слоя полиимида; h_a – расстояние от нейтральной линии до верхней поверхности слоя алюминия; B_a – ширина алюминиевого проводника; B_n – ширина полиимида под проводником (ширина проводника и расстояние между проводниками ГПП).

Подставив уравнения (6) в равенство (2) получаем значение нейтральной линии:

$$E_a \left(-\frac{h_a}{2} h_a B_a + \frac{H_a - h_a}{2} [H_a - h_a] B_a \right) + E_n \left(\left[H_a - h_a + \frac{H_n}{2} \right] H_n B_n \right) = 0 \quad (7)$$

Из уравнения (7) находим значение нейтральной линии.

$$\frac{E_a B_a H_a^2}{2} + E_n H_n B_n H_a + \frac{E_n B_n H_n^2}{2} = h_a \cdot (E_a B_a H_a + E_n B_n H_n) \quad (8)$$

Таким образом существует возможность управления предельно допустимыми радиусами изгиба ГПП путем изменения параметров топологии проводников, а именно шириной проводников и преимущественным направлением трассировки (рис. 3).

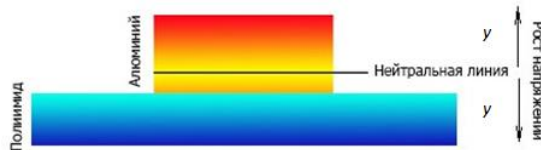


Рис. 3. Рост внутренних напряжений в проводнике ГПП в зависимости от расстояния до нейтральной линии

Деформации растяжения. Еще одной разновидностью часто встречающихся деформаций ГПП, возникающих в длинных линиях, антенной аппаратуре и т.д., являются дефекты, вызванные растяжением – сжатием ГПП. Данному виду деформации могут подвергаться как отдельные участки ГПП так и вся плата целиком.

В отличие от жестких печатных плат, составляющая «сжатия» данного вида деформации не является опасной для ГПП в силу их конструктивных особенностей. В то же время «растяжение» для ГПП создает значительную вероятность возникновения дефектов из-за более тонкого основания гибких печатных плат по сравнению с жесткими. Основными дефектами, возникающими при такого рода деформациях в соответствии с проведенными исследованиями являются обрыв проводников и разрушение ГПП в местах контакта с разъемами.

В соответствии со справочными данными, алюминий обладает значительно меньшими пределом упругости по сравнению с полиимидом. Следовательно, при анализе деформаций типа «растяжение» необходимо рассматривать прочность проводниковой системы ГПП.

Предельно допустимыми напряжениями, возникающими в проводниках ГПП, принято считать напряжения, не превышающие предел упругости материала.

В методе допускаемых напряжений вводится понятие допускаемого напряжения $[\sigma]$, величина которого получается делением опасного напряжения σ_{on} на коэффициент запаса прочности n .

$$|\sigma| = \frac{\sigma_{on}}{n} \quad (9)$$

где n – коэффициент запаса прочности.

Опасным напряжением принимается предел упругости. Коэффициент запаса прочности $n > 1$, он учитывает естественный разброс результатов опытов по определению σ_{on} , неточность значения внешней нагрузки, условия эксплуатации конструкции и ряд других факторов.

В качестве примера рассмотрена ГПП, приведенная на рис. 4.

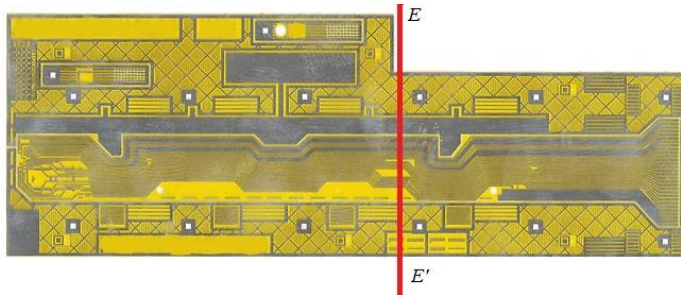


Рис. 4. Анализируемая ГПП

Наиболее вероятным местом возникновения дефектов, вызванных деформацией «растяжение» является сечение $E-E'$ по причине минимальной поперечной толщины диэлектрического основания и ширины проводников и технологических элементов. Возможными методами повышения прочности ГПП при деформациях типа растяжения является нанесение в технологических зонах ГПП дополнительных нефункциональных проводниковых элементов (рис. 5).

Таким образом, технологические элементы ГПП выполняют одновременно несколько функций. Основное их назначение – это размещение технологических элементов, таких как: метки совмещения слоев и масок, сварочные тестовые элементы. Кроме того в технологической зоне находятся элементы в слое алюминия, увеличивающие прочность ГПП.

В соответствии с расчетами, за счет технологической зоны ширина проводниковой системы в зоне деформации увеличивается с 3,8 мм до 14 мм, а допустимые нагрузки растяжения с 0,412 Н до 1,4278 Н.

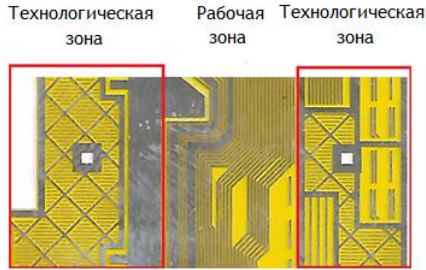


Рис. 5. Рабочая зона (РЗ) и технологические зоны (ТЗ) ГПП

Деформации вызванные вибрационным воздействием. Резонансное разрушение печатных плат, возникает при совпадении частоты внешних вибраций с собственной частотой ПП. В отличие от жестких печатных плат, для ГПП данный тип воздействий опасен лишь при нахождении гибкой платы в «растянутом» рабочем состоянии.

При предварительном расчете собственной частоты колебаний ГПП существует возможность разработки автоматической системы детектирования частоты внешних колебаний, при совпадении данных частот изменяющей тип натяжения ГПП или переводящей ГПП в «нерабочее» состояние во избежание возникновения дефектов.

Явление резонансного разрушения наиболее опасно для «рабочего» – включенного состояния ГПП.

Для расчета ГПП рассматривается как пластина с определенными граничными условиями. Граничные условия выбираются в зависимости от реального закрепления печатной платы в блоке. Для жестких печатных плат существуют три типа классических граничных условий:

- опертый край (вдоль края прогиб и изгибающий момент равен нулю);
- заземленный край (вдоль края прогиб и угол поворота сечения равен нулю);
- свободный край (вдоль края изгибающий момент и перерезывающая сила равен нулю).

Если край платы приклеен к рамке, то это закрепление считается как опертый край.

От того, насколько точно соответствует реальное закрепление печатной платы теоретическому классическому условию, зависит и точность расчета собственных резонансных частот.

Для прямоугольных ПП существует 21 вариант возможных сочетаний классических граничных условий.

Для расчета собственных частот колебаний ПП с разным типом закрепления определяется по формуле:

$$f_i = \left(\frac{a_i}{a^2} \right) \sqrt{\frac{D}{mK_{эпз}}}, \text{Гц}, \quad (10)$$

где $K_{эпз}$ – коэффициент, учитывающий массу ЭРЭ; m – масса ГПП; a – коэффициент, зависящий от способа крепления пластины, соотношения ее сторон, номера обертона и определяемый по табличным значениям; D – цилиндрическая жесткость пластин.

Таким образом меняя способы закрепления ГПП возможно изменение собственных частот колебаний для их смещения относительно частоты внешнего

колебания.

Выводы. На основании проведенного анализа видов деформаций, возникающих в ГПП и приводящих к их разрушению предложены следующие технологические рекомендации по разработке топологии гибких печатных плат:

– для уменьшения воздействия на алюминиевую проводниковую систему деформаций типа «изгиб» целесообразно выбирать полиимидный фольгированный материал с более тонким слоем алюминия, что позволит уменьшить расстояние от «нейтральной линии» до граничных слоев проводника и приведет к снижению нормальных напряжений в данных слоях и, в свою очередь позволит обеспечить меньший радиус изгиба ГПП;

– при изготовлении однослойных ГПП целесообразно использовать защитное полиимидное покрытие (рис. 6), что позволит не только обеспечить более высокую степень защиты тонкой фольгированной проводниковой системы, но и позволит сместить «нейтральную линию» в центральные слои проводников. По сравнению с незащищенными, ГПП с защитным полиимидным покрытием позволит дополнительно снизить нормальные напряжения в граничных слоях алюминия.

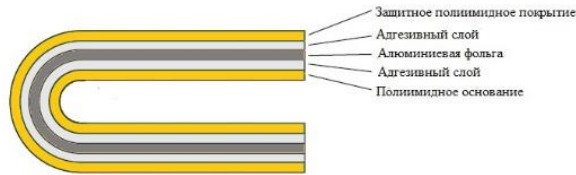


Рис. 6. Однослойная ГПП с защитным полиимидным покрытием

– при трассировке ГПП необходимо придерживаться стратегии, позволяющей максимизировать динамическое время жизни и надежность при статической гибкости. Для этого проводники в зоне предполагаемых деформаций должны соответствовать следующим условиям:

- 1) перпендикулярность к направлению изгиба;
- 2) равномерное распределение по области изгиба;
- 3) максимальная ширина в области изгиба;
- 4) отсутствие дополнительной наращенной металлизации;
- 5) постоянная ширина;
- 6) «шахматное» расположение в соседних слоях (для многослойных ГПП);
- 7) количество слоев в гибкой части должно быть сведено к минимуму (для многослойных ГПП);
- 8) металлизированные сквозные отверстия не допускаются, для межслойных соединений и для установки элементов на ГПП целесообразно использовать ультразвуковую сварку;
- 9) «нейтральная ось изгиба» должна проходить через центр сечения проводника.

При разработке топологии ГПП желательно создание на краях платы специальных технологических зон металлизации (невытравленных фольгированных элементов) для дополнительного упрочнения ГПП при деформациях типа «разрыв». В данных зонах могут находиться реперные метки для совмещения фотомасок и слоев ГПП, тестовые элементы для межслойных соединений и т.д.

Для авиационной и космической аппаратуры возможно предусмотрение одновременно нескольких вариантов закрепления ГПП на жестком основании, а

также размещение на плате емкостных или индукционных элементов, позволяющих детектировать частоты внешних колебаний. При совпадении частот внешних колебаний с собственными резонансными частотами ГПП возможно либо ослабление натяженного «рабочего» состояния платы при помощи пьезоэлектрических приводов, либо изменение варианта закрепления ГПП на жестком основании, что приведет к изменению собственных частот колебаний.

Список литературы

1. IPC-2223A. Sectional Design Standard for Flexible Printed Boards. www.ipc.org
2. Акулин А. Гибкие и гибко-жесткие печатные платы. Комментарии к стандарту IPC-2223A. Часть 1 // Электронные компоненты. 2005. № 10.
3. Акулин А. Гибкие и гибко-жесткие печатные платы. Комментарии к стандарту IPC-2223A. Часть 2 // Электронные компоненты. 2005. № 11.
4. Акулин А. Варианты применения и конструкции гибко-жестких плат // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 6.
5. Медведев А., Мылов Г., Набатов Ю., Люлина В. Гибкие платы. Преимущества и применение // Компоненты и технологии. 2007. № 9.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2016.

I. Ш. НЕВЛЮДОВ, Є. А. РАЗУМОВ-ФРИЗЮК, В. В. НЕВЛЮДОВА, Н. П. ДЕМСЬКА

ОЦІНКА ВПЛИВУ МЕХАНІЧНИХ ДІЙ НА ГНУЧКІ ДРУКОВАНІ ПЛАТИ

Дослідження особливостей механічних деформацій і руйнувань гнучких друкованих плат в апаратобудуванні.

Ключові слова: гнучкі друковані плати, деформація, згин, провідники, розтягнення, резонанс.

I. NEVLIUDOV, E. RAZUMOV-FRIZYUK, V. NEVLYUDOVA, N. DEMSKA

INFLUENCE MECHANICAL ACTION ON FLEXIBLE PRINTED CIRCUIT BOARD

The article analyzes a flexible printed circuit boards in functional electronics deformation (bending, stretching, resonant strain), proposed methods of calculating the deformation of flexible printed circuit boards, and makes recommendations for the development of a flexible printed circuit board layout. Analysis and calculations are made for flexible printed circuit boards on the PDI-A-35 foil-polyimide material.

Keywords: flexible printed circuit boards, deformation, bending wires, tensile, impact.

Невлюдов Игорь Шакирович – д-р тех. наук, профессор, заведующий кафедры технологии и автоматизации производства радиоэлектронных и электронно-вычислительных средств, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, ig-or.nevliudov@nure.ua

Разумов – Фризюк Евгений Анатольевич – канд. тех. наук, доцент кафедры технологии и автоматизации производства радиоэлектронных и электронно-вычислительных средств, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.

Невлюдова Виктория Валерьевна – аспирант кафедры основ радиотехники, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.

Демская Наталия Павловна – старший преподаватель кафедры технологии и автоматизации производства радиоэлектронных и электронно-вычислительных средств, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, nataliia.demska@nure.ua.