

УДК 621.3.049.75

Математическая модель пространственного совмещения элементов межсоединений в многослойных структурах

АВИОНИКИ

Можаров В. А.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

МАИ, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

e-mail: v.a.mozharov@gmail.com

Аннотация

В статье представлен новый подход к расчету размера контактных площадок многослойных печатных плат авионики и другой ответственной техники, позволяющий определить вероятность появления ослабленных соединений в условиях реального производства. Предложена новая форма контактной площадки, позволяющая увеличить трассировочное пространство печатной платы. Приведен пример расчета минимального размера контактной площадки при заданных параметрах выхода годных по предложенной методике.

Ключевые слова: геометрическая стабильность; базовый материал; печатная плата; межслойные соединения; система базирования; контактные площадки

Введение

Задачи улучшения массово-габаритных характеристик бортовой аппаратуры летательных аппаратов (ЛА) требует использования высокоинтегрированной элементной базы, и вслед за этим – существенного уменьшения размеров монтажных подложек и одновременного увеличения плотности межсоединений, реализованных на них. В связи с этим, неизбежно снижается надежность печатных плат (ПП) в частности, и надежность электронных устройств в целом.

В настоящий момент производить печатные платы высокого класса точности достаточно дорого. При этом надежность таких плат зачастую не соответствует уровню, необходимому для использования в ответственной радиоэлектронной аппаратуре ЛА. И

связано это, в первую очередь, с методами проектирования топологии и обеспечения качественного совмещения элементов межсоединений в многослойных структурах, которые не менялись более 20 лет. Вследствие этого приходится недостатки конструкции и параметров технологических процессов компенсировать использованием дорогостоящих материалов и мириться с высоким процентом брака при производстве печатных плат высокого класса точности.

Предмет исследований выполненной работы состоит в поддержании тенденции увеличения плотности компоновки современной авионики с обеспечением достаточного для данной отрасли уровня надежности и снижения затрат на производство путем улучшения технологического процесса изготовления печатных плат.

Концепция расчета размера контактных площадок

С конструктивной точки зрения, увеличивать плотность межсоединений выгоднее всего уменьшая площадь занимаемую контактной площадкой (КП), тем самым увеличивая количество трасс, проходящих между соседними КП[1]. Стандартно форма контактной площадки принята круглой и рассчитывается[2, стр.99] по следующей формуле:

$$D = d + 2G + 2\Delta_T^{\Sigma} \quad (1)$$

где D – минимальный диаметр контактной площадки; d – диаметр отверстия; G – минимальная ширина гарантированного пояса охвата отверстия; Δ_T^{Σ} – величина суммарной погрешности технологического характера.

Однако имеет смысл использовать эллипс вместо круга, если в базовом материале многослойной печатной платы (МПП) используют в качестве армирующей основы стеклоткань[3]. В зависимости от направления волокон стеклоткани зачастую проявляется различная величина стабильности геометрических размеров. Различают оси утка и основы. Различие их состоит в том, что при производстве стеклоткани основа находится в натянутом состоянии, а уток в относительно свободном, т.к. его нанизывают на основу [4] (рисунок). Коэффициенты теплового расширения (КТР) для различных марок базового материала фирмы ISOLA[5–9] представлена в таблице. Для одного из самых распространенных базовых материалов FR-4[10, стр.11] – разница в КТР для основы и утка достигает 25%.

Таблица 1 – КТР для различных марок базового материала фирмы ISOLA

Тип материала	Температура стеклования T _g , °C	Коэффициент линейного расширения 10 ⁻⁶ /°C	
		Ось утка до T _g /после T _g	Ось основы, до T _g /после T _g
DE104 (FR-4)	130	16/14	13/7
DE156	155	13/14	13/14
IS420	170	13/14	14/17
IS680-333	200	12/13	12/13
P96	260	13/14	14/17

Поэтому предлагается, на этапе расчета размера контактных площадок слоев МПП, учитывая данные о геометрической стабильности материала, использовать контактную площадку не круглой, а эллипсоидной формы. Каноническое уравнение эллипса выглядит следующим образом [11, стр.69]:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

Эллипс описывается двумя параметрами: a и b , где a – большая (соотносится с осью утка), а b – малая (соотносится с осью основы) оси, а F_1 и F_2 – это фокусы эллипса (рисунок).

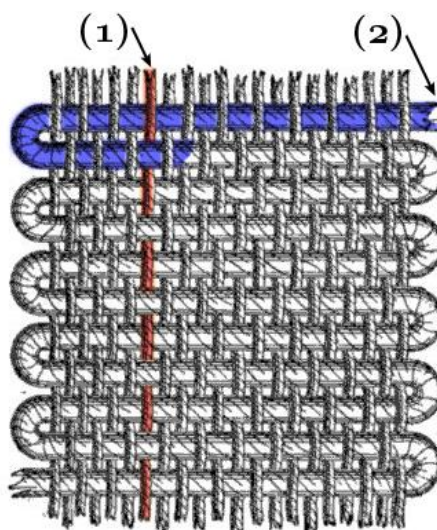


Рисунок 1 – Тканый материал. Основа (1 – красная) и уток (2 – синий)

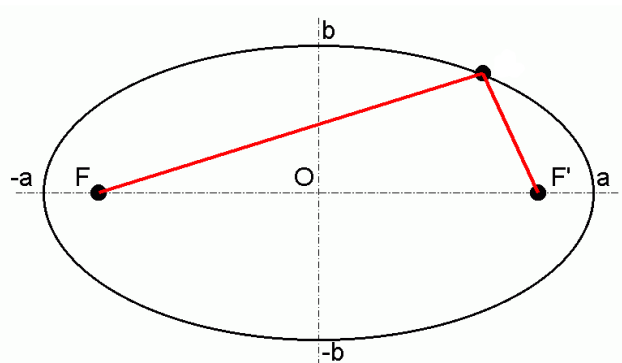


Рисунок 2 – Схема эллипса

Погрешности технологического характера возникают по разным причинам: погрешность при позиционировании инструмента, неточности при воспроизведении оригинала, биение рабочего инструмента, подтравливание и т.д. Сюда же относят погрешности, вызванные геометрической нестабильностью базового материала ПП.

Параметры эллипса можно вычислить, вынеся в формуле (1) влияние геометрической стабильности материала из совокупности погрешностей технологического характера Δ_T^Σ в отдельные показатели А и В для основы и утка соответственно. Отдельно хочется отметить, что погрешности технологического характера принято просто суммировать, согласно известным показателям поля рассеяния того или иного технологического процесса или оборудования, однако, при расчете Δ_T^Σ необходимо также учитывать общую схему технологического процесса, и мероприятия направленные на компенсацию рассовмещения.

Использование КП эллипсоидной формы позволит увеличить трассировочное пространство, если в МПП используется базовый материал, разница усадки по осям основы и утка которого достаточно велика (10% и более). В остальных случаях рациональнее использовать КП классической формы, т.к. это упрощает процесс технологической подготовки производства платы.

Предлагаемый алгоритм расчета проектных норм размера контактной площадки

Используя эллиптическую форму, вышеописанный подход к расчету величины технологической погрешности и данные о геометрической стабильности материала, можно вывести формулу для расчета оптимальной контактной площадки.

Используя формулу (1) в отношении эллипса, получаем:

$$a = \frac{d}{2} + G + \frac{\Delta_T^\Sigma}{2} + A \quad (2)$$

$$b = \frac{d}{2} + G + \frac{\Delta_T^\Sigma}{2} + B \quad (3)$$

где, b – параметры эллипса; A – величина погрешности, обусловленная геометрической стабильностью материала по оси утка; B – величина погрешности, обусловленная геометрической стабильностью материала по оси основы.

Запишем выражения, определяющие величины A и B :

$$A = s_x \left(|1 - m_x| \cdot \frac{L_x}{2} + 3\sigma_x \frac{L_x^2}{L_0} \right) \quad (4)$$

$$B = s_y \left(|1 - m_y| \cdot m_y \frac{L_y}{2} + 3\sigma_y \frac{L_y^2}{L_0} \right) \quad (5)$$

где s_x, s_y – коэффициент, зависящий от типа совмещения при прессовании, соответственно для утка и основы; m_x, m_y – математическое ожидание коэффициента усадки по оси утка и основы соответственно, после этапа прессования; σ_x, σ_y – среднее квадратичное отклонение коэффициента усадки по оси утка и основы соответственно, после этапа прессования; L_0 – идеальная длина между метками во время тестирования материала; L_x, L_y – длина сторон заготовки МПП по оси утка и основы соответственно.

Коэффициент, зависящий от типа совмещения при прессовании – эмпирическая величина, устанавливаемая технологом. Испытывать материал на стабильность геометрических размеров целесообразней всего используя MAS-LAM систему прессования, т. к. она не приносит излишних напряжений в базовый материал, в отличие от PIN-LAM систем. Поэтому для MAS-LAM прессования в целом коэффициенты s_x, s_y устанавливаются равными единице. Для PIN-LAM систем принятые значения коэффициентов представлены в таблице, с учетом того, что длинная сторона платы – это направление основы.

Таблица 2 – Коэффициенты, зависящие от типа совмещения при прессовании

Тип системы совмещения		s_x	s_y
MAS-LAM		1	1
PIN-LAM	По 2-м отверстиям	1	1,5
	По 4-м отверстиям	1,5	1,5
	По 4-м слотам	1,2	1,2
	L-конфигурация	2	2

Подставляя (4) и (5) в (2) и (3) получаем в общем виде формулы для расчета параметров эллипса:

$$a = \frac{d}{2} + G + \frac{\Delta_T^z}{2} + s_x \left(|1 - m_x| \cdot \frac{L_x}{2} + 6\sigma_x \frac{L_x^2}{L_0} \right) \quad (6)$$

$$b = \frac{d}{2} + G + \frac{\Delta_T^z}{2} + s_y \left(|1 - m_y| \cdot \frac{L_y}{2} + 6\sigma_y \frac{L_y^2}{L_0} \right) \quad (7)$$

Если использование КП эллиптической формы нецелесообразно по каким-то причинам, то можно использовать КП классической круглой формы. Формула для расчета диаметра круглой КП получаемая из соотношений (2)÷(5), выглядит следующим образом:

$$D = d + 2G + \Delta_T^z + \max[s_x, s_y] \left(|1 - \max[m_x, m_y]| \cdot L + 12 \cdot \max[\sigma_x, \sigma_y] \cdot \frac{L^2}{L_0} \right) \quad (8)$$

Вышеописанные соотношения (6)–(8) для расчета геометрических параметров элементов пространственного межсоединения в МПП позволяют учитывать деформационные особенности материала и влияние систем совмещения, сохраняя при этом все достоинства разработанных ранее статистических методов расчета.

Следует отметить, что существуют методы компенсации деформации базового материала на различных этапах технологического процесса производства МПП. Эти методы, в комплексе, позволяют почти полностью исключить влияние величины $m_{x,y}$ на итоговое совмещение. Формула для расчета диаметра круглой КП в таком случае записывается следующим образом:

$$D = d + 2G + \Delta_T^z + \max[s_x, s_y] \cdot 12 \cdot \max[\sigma_x, \sigma_y] \cdot \frac{L^2}{L_0} \quad (9)$$

Математическая модель обеспечения пространственного совмещения элементов межсоединений

Благодаря использованию статистического метода расчета диаметра КП можно заранее с высокой долей достоверности предсказывать появление ослабленных межсоединений в многослойных печатных структурах. Количество ослабленных соединений зависит от множителя перед среднеквадратичным отклонением (СКО).

Конструкционная надежность трансверсальных соединений в трехмерных структурах МПП для КП эллипсоидной формы обеспечиваются при соблюдении следующих соотношений:

$$\frac{\Delta_T^z}{2} + s_x \left(|1 - m_x| \cdot \frac{L_x}{2} + n \cdot \sigma_x \frac{L_x^2}{L_0} \right) < a - \left(\frac{d}{2} + G \right) \quad (10)$$

$$\frac{\Delta_T^z}{2} + s_y \left(|1 - m_y| \cdot \frac{L_y}{2} + n \cdot \sigma_y \frac{L_y^2}{L_0} \right) < b - \left(\frac{d}{2} + G \right) \quad (11)$$

где n – количество интервалов среднеквадратичного отклонения ($\pm\sigma$).

Для круглой формы КП надежность обеспечивается при условии:

$$\Delta_7^{\Sigma} + \max[s_x, s_y] \left(|1 - \max[m_x, m_y]| \cdot L + 2 \cdot n \cdot \max[\sigma_x, \sigma_y] \cdot \frac{L^2}{L_0} \right) < D - (d + 2G) \quad (12)$$

Для различных интервалов среднеквадратичного отклонения при нормальном законе распределения известно количество попадаемых в этот интервал значений. В таблице дано количество появляющихся дефектов в длительном производственном процессе с плавающим средним значением в пределах $\pm 1,5\sigma$ [12].

Таблица 3 – Количество дефектов в длительном технологическом процессе на разных уровнях СКО

Кол-во СКО ($\pm\sigma$)	Выход годных, %	Дефектов на миллион ед.
2	69,15	308 537
3	93,32	66 807
4	99,379	6 210
5	99,9676	233
6	99,99966	4

Подставляя количество интервалов СКО из таблицы в формулы (10)–(12) получим значения диаметра КП с заданным количеством ослабленных соединений. Для авионики и другой ответственной аппаратуры, где появление ослабленных соединений крайне нежелательно, целесообразно использовать количество интервалов СКО равное $\pm 6\sigma$. Для потребительской электроники в большинстве случаев достаточно $\pm 3\sigma$.

Пример оценки возможностей производства

Используя представленную выше математическую модель обеспечения пространственного совмещения элементов межсоединений в многослойных структурах можно оценивать возможности имеющегося производства в целом, и степень влияния различных реализаций той или иной технологической операции в частности.

Установим, что суммарная технологическая погрешность всех операций при изготовлении МПП методом металлизации сквозных отверстий на производстве равна: $\Delta 1_7^{\Sigma} = 57 \text{ мкм}$. Величины геометрической стабильности термостабилизированного базового материала $m_{БМ(Т)}$ и $\sigma_{БМ(Т)}$ (одинаковые для осей основы и утка), измеренные на длине $L_0 = 260 \text{ мм}$ равны: $m_{БМ(Т)} = 0,99979$, $\sigma_{БМ(Т)} = 0,0000195$. Величины геометрической стабильности нетермостабилизированного базового материала $m_{БМ(НТ)}$ и $\sigma_{БМ(НТ)}$ вычисляются путём умножения полученных значений $m_{БМ(Т)}$ и $\sigma_{БМ(Т)}$ на два, и следовательно равны: $m_{БМ(НТ)} = 0,99959$, $\sigma_{БМ(НТ)} = 0,000039$.

Печатные платы изготавливаются по технологическим нормам 5 класса точности (переходные отверстия реализуются сверлом $d=0,2$ мм с гарантийным пояском $G=0,025$ мм.).

Запишем уравнения расчета минимального диаметра контактной площадки круглой формы в зависимости от длины L используя формулы (6)÷

(9) для следующих вариантов технологического процесса:

1. Термостабилизация не проводилась, система базирования PIN-LAM L-конфигурация, мероприятия по компенсации усадки не проводились.
2. Термостабилизация проводилась, система базирования PIN-LAM L-конфигурация, мероприятия по компенсации усадки не проводились.
3. Термостабилизация проводилась, система базирования PIN-LAM L-конфигурация, проводились мероприятия по компенсации усадки.
4. Термостабилизация проводилась, система базирования MAS-LAM, мероприятия по компенсации усадки не проводились.
5. Термостабилизация проводилась, система базирования MAS-LAM, проводились мероприятия по компенсации усадки.

$$D1 = 0,307 + 824 \cdot 10^{-6} \cdot L + 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot L^2$$

$$D2 = 0,307 + 412 \cdot 10^{-6} \cdot L + 1,8 \cdot 10^{-6} \cdot L^2$$

$$D3 = 0,307 + 1,8 \cdot 10^{-6} \cdot L^2$$

$$D4 = 0,307 + 206 \cdot 10^{-6} \cdot L + 0,9 \cdot 10^{-6} \cdot L^2$$

$$D5 = 0,307 + 0,9 \cdot 10^{-6} \cdot L^2$$

Построим график (рисунок) зависимости минимального диаметра контактной площадки от длины наибольшей стороны печатной платы для всех рассмотренных выше вариантов технологического процесса, а также изобразим требования ГОСТ Р 53429-2009 для соответствующего класса точности. Использование КП рассчитанного диаметра позволяет обеспечить заданный гарантийный поясок, и соответственно, гарантировать качественное соединение элементов совмещения.

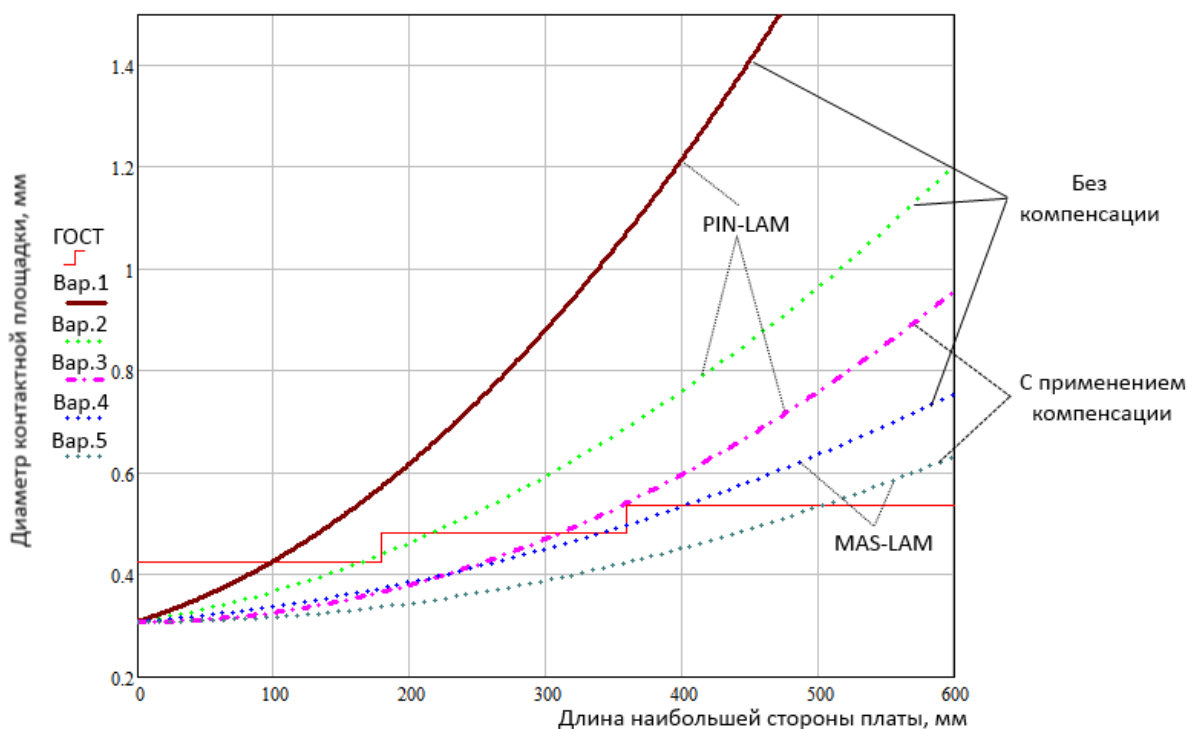


Рисунок 3 – Зависимость минимального диаметра контактной площадки от длины наибольшей стороны печатной платы

По рисунку можно сделать следующие выводы:

1. Термостабилизация играет большую роль в стабильности производства, существенно сокращая размеры элементов межсоединений. Производство прецизионных ПП для авионики без неё представляется нецелесообразным.
2. Стоит обращать внимание на используемую систему фиксации заготовок при прессовании, так как при изготовлении плат длиной свыше 300 мм вносимая этой системой погрешность принимает значения более 0,1 мм, что отрицательно сказывается на доступном трассировочном пространстве МПП.
3. Очевидно преимущество использования методов по компенсации нестабильности базового материала.
4. Наглядно продемонстрировано влияние систем базирования заготовки на этапе прессования.
5. Продемонстрировано низкое влияние суммарной погрешности, вносимой оборудованием на итоговый размер КП при длинах ПП свыше 200 мм. Основной вклад в итоговую погрешность вносит нестабильность базового материала, и именно над компенсацией и снижением этой погрешности необходимо работать в первую очередь.

6. Метод расчета диаметра КП, устанавливаемый в ГОСТ 53429-2009 не учитывает изменение величины деформации материала при увеличении размера заготовки. Как следствие, на производстве без мероприятий по компенсации деформаций заготовки, требования ГОСТа не возможно выполнить при длине ПП свыше 350 мм. На дине 500 мм эти требования выполняются только с применением методов компенсации усадки слоёв и при использовании системы базирования MAS-LAMна этапе прессования.

Выводы

Общий итог работы заключается в создании теоретических положений выбора оптимальных проектных решений в практике исследований и разработки систем межсоединений электронных устройств бортовой аппаратуры специального назначения, ориентированных на поддержание высокого уровня надежности в условиях постоянно увеличивающейся плотности компоновки высокоинтегрированной элементной базы и уменьшающихся размеров элементов электрических соединений, реализуемых на основе многослойного печатного монтажа.

Список используемой литературы

1. Медведев А.М., Можаров В.А. Плотность межсоединений электронных компонентов // Печатный монтаж (приложение к журналу «Электроника. НТБ»). 2011. № 3. С. 140–145.
2. Медведев А.М. Печатные платы. Конструкции и материалы. Москва: Техносфера, 2005.
3. Можаров В.А., Шуман К.В. Адаптация техпроцесса подготовки производства печатных плат высокого класса точности под заданные параметры геометрической стабильности базового материала // Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. № 50. С. 13.
4. Жихарев А.П., Румянцева Г.П., Кирсанова Е.А. Материаловедение: швейное производство: Учеб. пособие для нач. проф. образования. Москва: Академия, 2005.
5. ISOLA DE104 Specifications [Электронный ресурс]. URL: <http://www.isola-group.com/products/de104/> (дата обращения: 07.03.2013).
6. ISOLA DE156 Specifications [Электронный ресурс]. URL: <http://www.isola-group.com/products/de156/> (дата обращения: 07.03.2013).
7. ISOLA IS420 Specifications [Электронный ресурс]. URL: <http://www.isola-group.com/products/is420/> (дата обращения: 07.03.2013).
8. ISOLA IS680-333 Specifications [Электронный ресурс]. URL: <http://www.isola-group.com/products/is680-333/> (дата обращения: 07.03.2013).

9. ISOLA P96 Specifications [Электронный ресурс]. URL: <http://www.isola-group.com/products/p96/> (дата обращения: 07.03.2013).
10. РосБизнесКонсалтинг. Российский рынок печатных плат. Аналитический обзор. Москва: РБК, 2011.
11. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
12. Park S.H. Six Sigma for Quality and Productivity Promotion. Tokyo: Asian Productivity Organization, 2003.