

Совмещение в технологии печатных плат

Статья посвящена технологии изготовления двусторонних и многослойных печатных плат, а именно операциям совмещения слоев. Предлагается для анализа точности совмещения использовать теорию вероятностей и ее приложение — «теорию стрельбы». Проведен сравнительный анализ методов совмещения, описано оригинальное устройство для пробивки реперных знаков, предложено для повышения точности проводить корректировку программ сверления на основе информации, считываемой с готовых плат. Описывается собственный практический опыт авторов в ОАО «НПК НИИДАР» по совершенствованию технологии совмещения.

**Владимир Сергеев,
к. т. н.
Александр Ливерко**

svp@msk.org.ru

По вопросу совмещения в технологии печатных плат

Обеспечение качественного совмещения контактной площадки с отверстием является, пожалуй, основной проблемой в ходе изготовления печатных плат и, наверняка, основным источником головной боли для цехового технолога. С повышением плотности монтажа острота этой проблемы возрастает. Несмотря на значительное количество публикаций, мы решились написать эту статью, предполагая, что наш опыт и видение проблемы могут быть полезны. Мы готовы ответить на все вопросы по данной статье и, при необходимости, примем участие по реализации высказанных в ней идей.

Философия проблемы

**«Усложнять — просто,
упрощать — сложно». Закон Мейера**

В настоящее время при анализе проблем совмещения недостаточно отражаются количественные критерии. Это приводит к проблемам при разработке технологического процесса, выборе оборудования; усложняет общение между технологами, не позволяет объективно оценить производственную ситуацию. В то же время, широкое распространение в производстве вычислительной техники дает возможность существенно изменить положение к лучшему при использовании наработок по теории вероятностей.

**Контактная площадка,
как мишень, сверло, как выстрел**

Для анализа процесса совмещения удобно пользоваться «теорией стрельбы», которая является практическим приложением теории вероятностей. Вообразим на контактной площадке некую зону, которая будет мишенью для центра сверла. Размеры мишени выбираем таким образом, что при попадании центра сверла в мишень обеспечивается попадание отверстия в контактную площадку с учетом гаранти-

рованного пояса. Естественно, что форма мишени должна быть эквидистантна форме контактной площадки. Мы не будем здесь рассматривать варианты каплевидных контактных площадок, ограничимся только круглыми.

Радиус мишени r можно рассчитать по формуле:

$$r = (D - d - 2b) / 2, \quad (1)$$

где D — диаметр контактной площадки; d — диаметр сверла; b — ширина гарантированного пояса.

Долгое время радиус мишени был практически постоянной величиной. Это объясняется тем, что повышение плотности монтажа происходило за счет совершенствования фотолитографии и уменьшения диаметров переходных отверстий.

Например, в случае простой платы, между отверстиями в шаге 2,5 мм проходит один проводник (диаметр контактной площадки — 1,5 мм, диаметр отверстия — 0,9 мм, гарантийный пояс — 0,05 мм). Тогда радиус мишени равен $0,5(1,5 - 0,9 - 2 \times 0,05) = 0,25$ мм.

Если рассмотреть более сложную плату — два проводника между отверстиями на расстоянии в 2,5 мм, имеем для радиуса мишени почти то же самое значение: $0,5(1,27 - 0,7 - 2 \times 0,05) = 0,235$ мм.

И только в последнее время при изготовлении суперсложных плат существенно снизился размер мишени. Так, для внутреннего слоя МПП, на которой монтируются ЭРЭ с матричным расположением выводов, используются нормы проектирования, определяющие размер мишени: $0,5(0,35 - 0,12 - 2 \times 0,03) = 0,085$ мм (класс Л5).

МПП пятого класса предполагают радиус мишени: $0,5(0,622 - 0,3 - 2 \times 0,025) = 0,136$ мм (класс Л7).

На рис. 1 в масштабе изображены мишени, соответствующие технико-конструктивным решениям для плат разной сложности (желтый цвет — контактная площадка, красный — отверстие, белый — мишень).

Вероятность попадания в мишень $P_{(1)}$ равна вероятности попадания в круг радиуса r , и ее можно

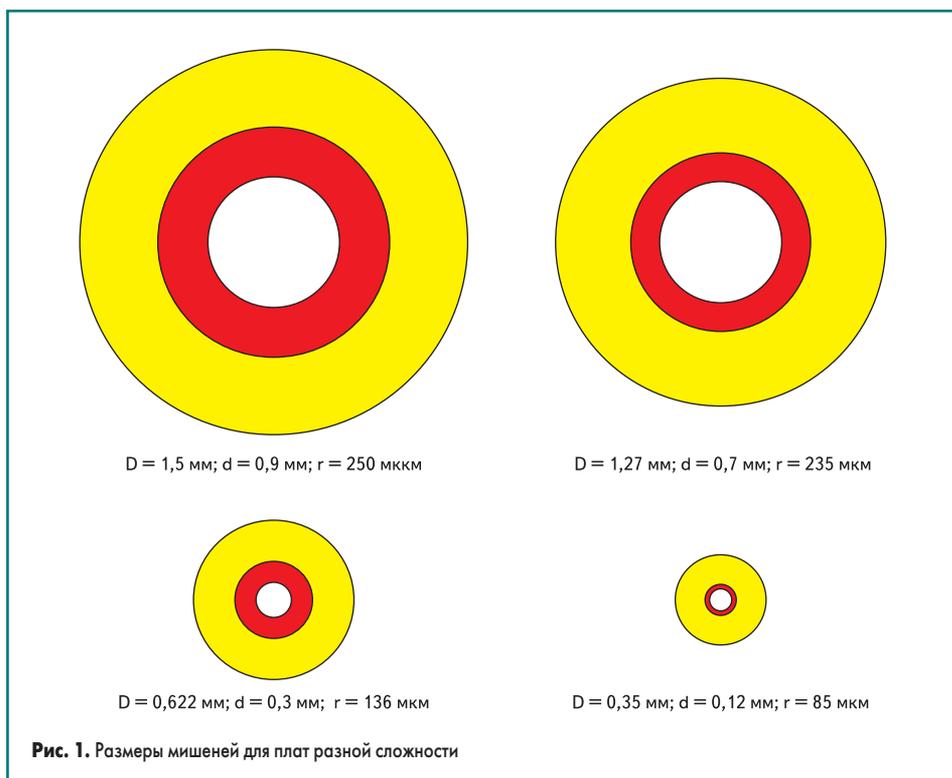


Рис. 1. Размеры мишеней для плат разной сложности

определить по формуле (2) (распределение Релея):

$$P_{(1)} = 1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

Вероятность попадания в n мишеней всегда меньше вероятности поражения одной мишени, ее можно вычислить на основе теоремы умножения вероятностей:

$$P_{(n)} = P_{(1)}^{n-1} \quad (3)$$

Отношение r/σ — это основной критерий, определяющий возможности качественного совмещения для данной мишени в конкретных производственных условиях. Величина r (размер мишени) определяет возможности конструкции по обеспечению совмещения, она задана в конструкторской документации на плату. Величина σ определяет собой суммарную среднюю квадратичную погрешность технологического процесса.

В таблице 1 приведены расчетные данные необходимого отношения r/σ для обеспечения задаваемой вероятности σ поражения 1000 мишеней (принятое количество отверстий на плате). Задав вероятность попадания в 1000 мишеней величиной 0,99, из формул (3) и (2) определяем необходимое для достижения заданной вероятности отношение r/σ . Для условий, которые мы задали, отношение $r/\sigma = 4,79$. По известной r (радиус мишени) можно вычислить r/σ , где r/σ — это допусти-

мая величина погрешности; превышение этой величины приведет к снижению вероятности попадания в мишень, то есть к увеличению брака. Результаты расчета для максимальной и минимальной мишени:

$$r/\sigma = 52,12 \text{ мкм для мишени } 250 \text{ мкм}$$

$$\text{и } r/\sigma = 17,2 \text{ мкм для мишени } 85 \text{ мкм.}$$

В физическом плане среднее квадратическое отклонение можно представить в виде условного круга радиусом, равным s , вероятность попадания в который равна 0,393. Для нас, если принять, что на плате 1000 отверстий и $s = 50$ мкм, это прозвучит так: 393 контактные площадки будут иметь отверстия, которые расположены со смещением от центра контактной площадки не больше чем на 50 мкм, то есть будут находиться внутри круга диаметром 100 мкм. Это следует из формулы (2), при условии $r = s$.

Рассмотрим теперь реальную погрешность. Центры контактных площадок на фотошаблоне и отверстия на печатной плате математически имеют одинаковые координаты. Набор этих точек представляет математическую картину звездного поля в виде координат по осям X и Y . Любая технологическая операция, как всякое физическое воздействие, приводит к изменению геометрических размеров. Поэтому расположение центров контактных площадок на фотошаблоне всегда будет отличаться от математического звездного поля. Разница коор-

динат между ними даст два набора случайных чисел соответственно по оси X и Y .

Свойства случайной величины

Для описания свойств случайной величины в теории вероятностей используются так называемые моменты. Для решения наших задач целесообразно применять понятие центрального момента. Основное достоинство центральных моментов — то, что второй центральный момент имеет минимальную величину. Вычисление центральных моментов производится относительно среднего арифметического m . Поэтому вначале необходимо создать отцентрированные наборы случайных чисел. Для этого определяем среднее арифметическое (m) и затем вычитаем его из каждого числа. В результате мы как бы сдвигаем начало координат в центр тяжести звездного поля и относительно его определяем моменты. Для анализа процесса совмещения вполне достаточно четырех моментов:

- Первый центральный момент:

$$m_1 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4)$$

Он всегда равен нулю, так как он определяется относительно центра звездного поля;

- Второй центральный момент:

$$m_2 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n-1} \quad (5)$$

Часто второй момент в литературе называют дисперсией. Дисперсия характеризует рассеивание случайной величины относительно ее математического ожидания. Чтобы иметь величину, размерность которой будет совпадать с размерностью случайной величины, было введено понятие «среднее квадратическое отклонение»: $s = \sqrt{m_2}$.

- Третий центральный момент:

$$m_3 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^3}{n-1} \quad (6)$$

Применяется для определения асимметрии распределения. Показатель асимметрии $S_k = m_3/\sigma^3$. Если $S_k > 0$, то рассматриваемое распределение имеет положительную асимметрию, если $S_k < 0$, то асимметрия отрицательна, если распределение симметрично относительно своего среднего арифметического, то $S_k = 0$.

- Четвертый центральный момент:

$$m_4 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^4}{n-1} \quad (7)$$

Применяется для определения остроты (крутости) распределения. Количественным мерилем этого свойства является так называемый эксцесс $E_x = (m_4/\sigma^4) - 3$.

Таблица 1. Необходимые значения отношения r к σ

Вероятность попадания в одну мишень $P_{(1)}$	Вероятность попадания в 1000 мишеней $P_{(1000)}$	Необходимое отношение r/σ
0,9	Близкое к нулю	2,14
0,99	Близкое к нулю	3,03
0,999	0,368	3,72
0,9999	0,95	4,29
Близкое к единице	0,99	4,79

В случае нормального закона распределения $E_x = 0$, кривые, более островершинные по сравнению с нормальной, имеют $E_x > 0$, у плосковершинных $E_x < 0$.

Для понимания и анализа технологического процесса наиболее важны величины m (среднее арифметическое набора случайных чисел) и σ (среднее квадратическое отклонение централизованного набора случайных чисел). Для артиллерийского офицера это информация по корректровке прицеливания (m) и информация о кучности боя (σ), то есть центр рассеивания и величина рассеивания. В нашем случае m — это постоянная составляющая отклонения звездного поля данного фотошаблона от математического. При анализе точности нескольких фотошаблонов мы будем иметь несколько величин m , и так как они будут отличаться друг от друга, их можно рассматривать как случайную величину со своими моментами. Можно «складывать» отклонения разных фотошаблонов «в одну корзину» и затем выделять величины m и σ . В этом случае величина σ заметно больше, так как она будет включать в себя погрешности, возникающие за более длинный период. Такой подход позволяет единообразно анализировать технологические операции, отвечающие за точность. Величина m определяет собой некую закономерность, которую удалось выделить из исследуемой величины, а σ — случайную составляющую этой величины. Случайная по своему характеру величина σ содержит массу закономерностей, каждая из которых создает свою погрешность. Суммируясь, эти погрешности приводят к закону, близкому к нормальному. Если какая-либо погрешность окажется по своему влиянию преобладающей, то закон распределения этой ошибки наложит свое влияние на нормальный закон распределения. Если эта ошибка по своей структуре случайна, то это проявится в увеличении σ , если же она более детерминирована, то это проявится в величине m . Здесь справедлива поговорка: «Случайность — это непонятая закономерность». Знание величины m открывает технологу возможность осмыслить и, соответственно, принять какие-то меры по совершенствованию процесса, ведь с проблемой можно бороться только тогда, когда о ней что-то известно.

Погрешность изготовления фотошаблона состоит из погрешности фотоплоттера (точность засветки) и погрешностей обработки фотопленки. Точность засветки — это фактически аппаратная точность, ее прописывают в паспортных данных. Погрешность обработки складывается из множества факторов, важнейшими из которых являются температурные режимы обработки и способность пленки сохранять размеры в дестабилизирующих условиях. В результате физических воздействий суммарная величина σ фотошаблона будет больше, чем σ фотоплоттера. Так как в производственных помещениях имеется какой-то средний диапазон температуры и влажностного режима, то в σ фотошаблона будет наблюдаться заметная величина m . По суще-

ству, все то же можно перенести и на заготовку с отверстиями, с той разницей, что сверло по сравнению со световым лучом фотоплоттера вносит больше погрешностей, так как оно более грубый инструмент. В процессе сверления происходит отклонение сверла относительно оси Z, из-за чего координаты центров отверстий на разных сторонах заготовки несколько отличаются. Часто эту погрешность относят к погрешности фотошаблона, так как она проявляется при совмещении фотошаблонов и заготовки. Погрешность (σ) просверленной заготовки практически всегда больше σ фотошаблона.

Таким образом, перед экспонированием нам необходимо совместить два звездных поля, имеющих разную масштабность (разные величины m) и в которых звезды имеют разные отклонения от центра (σ), причем сделать это нужно с каждой стороной заготовки. Рассмотрим возможности совмещения в случае, если составляющая погрешностей, зависящих от климатических факторов, будет пренебрежимо мала ($m = 0$) и технология совмещения будет идеальна. Очевидно, погрешность будет равна суммарной погрешности оборудования (аппаратурная погрешность).

Суммарная погрешность фотоплоттера и сверлильного станка (аппаратная погрешность) на основании данных [2, табл. 6.2] такова:

- для 1-го типа производства аппаратная погрешность в микронах:

$$\sigma_a = \sqrt{15^2 + 15^2} = 21,2 \text{ мкм}; \quad (8)$$

- для 4-го типа производства аппаратная погрешность в микронах:

$$\sigma_a = \sqrt{10^2 + 3^2} = 10,4 \text{ мкм}. \quad (9)$$

Теперь о технологической части погрешности. Это погрешности, связанные с обработкой фотопленки, пробивкой базовых отверстий, получением отверстий в заготовке и т. д., то есть погрешности реального физического воздействия на материал и непосредственно операции совмещения. Именно технологические погрешности определяют уровень технологии на данном производстве. И совсем не обязательно, что чем эти погрешности меньше, тем лучше. Экономически целесообразнее поддерживать технологическую погрешность на уровне, соответствующем размеру мишени. Для обеспечения попадания с заданной нами вероятностью

- в мишень 250 мкм погрешность должна быть не менее:

$$\sigma = \sqrt{52,12^2 - 21,2^2} = 47,67 \text{ мкм} \quad (10), \text{ если использовать «грубое» оборудование;}$$

$$\sigma = \sqrt{52,12^2 - 10,4^2} = 51,06 \text{ мкм} \quad (11), \text{ если использовать «точное» оборудование;}$$

- в мишень 85 мкм погрешность должна быть не менее:

$$\sigma = \sqrt{17,2^2 - 10,4^2} = 13,7 \text{ мкм} \quad (12), \text{ если использовать «точное» оборудование.}$$

«Грубое» оборудование в данном случае нельзя использовать, так как его погрешность выше минимально возможной по расчету

$21,2 > 17,2$. С другой стороны, из этих расчетов следует, что применение «точного» оборудования для поражения крупных мишеней дает незначительный эффект по повышению выхода годных и может не оправдать затрат на его приобретение.

Схемы совмещения

Совмещение фотошаблона с заготовкой — это совмещение несовместимого. Кроме того, что отверстия и контактные площадки располагаются относительно математического центра со случайным разбросом, вследствие разных коэффициентов температурного расширения и разницы температуры и влажности в помещениях, фотошаблон и заготовка как бы растянуты относительно друг друга. Поэтому совмещение необходимо производить, учитывая разницу в размерах фотошаблона и заготовки.

Применяются разные схемы совмещения, о них достаточно много написано. Принципиальная разница между ними в том, применяются кнопки или нет.

Совмещение без кнопок (мягкое совмещение)

Фотошаблон под микроскопом или проекционным устройством накладывается на просверленную заготовку, вручную сводятся контактные площадки фотошаблона с отверстиями платы, и затем фотошаблон закрепляется на плате при помощи липкой ленты. Для удобства совмещения в фотошаблон за контуром платы вносятся контактные площадки специальной формы, а в заготовку, соответственно, — отверстия. Этот прием довольно широко применялся раньше. В настоящее время он получил развитие в виде установок экспонирования, оснащенных техническим зрением. В этих установках производятся необходимые замеры и по их результатам — сведение фотошаблона с заготовкой.

Совмещение с применением кнопок (жесткое совмещение)

В фотошаблоне сначала пробиваются отверстия, по которым с помощью кнопок он совмещается с заготовкой. Отверстия в заготовке под кнопки получают штамповкой, сверлением по разметке или кондуктору, часто их сверлят по программе одновременно со схемами.

Мягкое совмещение — это интеллектуальное совмещение. Оператор оценивает смещение центров отверстий и контактных площадок и усредняет их. Человеческий мозг в состоянии одновременно оценивать не более шести объектов, поэтому наведение осуществляется по двум, реже четырем реперным знакам, расположенным по сторонам фотошаблона. При этой схеме осуществляется раздельное совмещение сторон заготовки с фотошаблоном, что может дать заметный эффект при разнице в размерах фотошаблонов. В настоящее время выпускаются установки, которые, используя техническое зрение, автоматически совмещают фотошаблоны с заго-

товкой и производят экспонирование. Молва наделяет эти установки прямо таки сверхъестественными свойствами. Реальный же алгоритм совмещения, обеспечивающий его максимальную точность, вероятнее всего, будет заключаться в обмере фотошаблонов и заготовки, поиске отверстий, имеющих наибольшее отклонение от центра контактной площадки, определению по результатам замеров оптимальной величины смещения и расчете его координат. Естественно, ошибка, выванная разницей в размерах фотошаблона и заготовки, не устраняется, а делится в оптимальном соотношении.

При жестком совмещении «печкой, от которой танцуют» являются базовые отверстия на заготовке и фотошаблоне, а погрешность их получения смещает все отверстия и рисунок платы как единое целое. При таком соединении важно как можно больше заставить технологических факторов и обеспечить неподвижное соединение фотошаблонов с заготовкой и, в то же время, не допустить превышения их линейных деформаций. Эти требования противоречивы, так как создание неподвижного соединения уже предполагает деформацию участвующих в этом соединении деталей, и поэтому возникает задача не допустить необратимые деформации.

Получившая наибольшее распространение схема совмещения с двумя кнопками чаще всего на практике не соответствует этим требованиям. Именно на фотошаблонах с двумя базовыми отверстиями для совмещения мы видим заломы у отверстий, а в раме экспонирования — пресловутые «волны»; при «наличии отсутствия» того и другого можно ощутить люфт кнопки в отверстиях.

В 4-кнопочной схеме совмещения заготовка и фотошаблон сводятся по точкам, находящимся в геометрическом центре фигуры, ограниченной реперными точками на фотошаблоне и базовыми отверстиями на заготовке. В результате погрешность из-за разномасштабности фотошаблонов и заготовки делится пополам, при двух кнопках данная погрешность может быть разделена пополам только вдоль одной оси. Значительно уменьшается деформация фотошаблона. Недостаток 4-кнопочной системы — сложность ее реализации в технологическом процессе, что резко ограничивает область ее применения.

Часто дискутируют, как получать базовые отверстия на заготовке: сверлением на станке с ЧПУ одновременно со сверлением схемных отверстий или отдельно (штамповка, сверление вручную по «накладушке», сверление на станке с ЧПУ). При сверлении базовых отверстий одновременно со сверлением на заготовке схемных отверстий очевидно, что в погрешность совмещения будет добавлена погрешность сверления базового отверстия. Так как рисунок платы будет привязан к этому отверстию, то погрешность его расположения для данной платы будет выступать как систематическая и иметь случайный характер от платы к плате. Поэтому погрешность совмещения по сравнению с (8) и (9) увеличится:

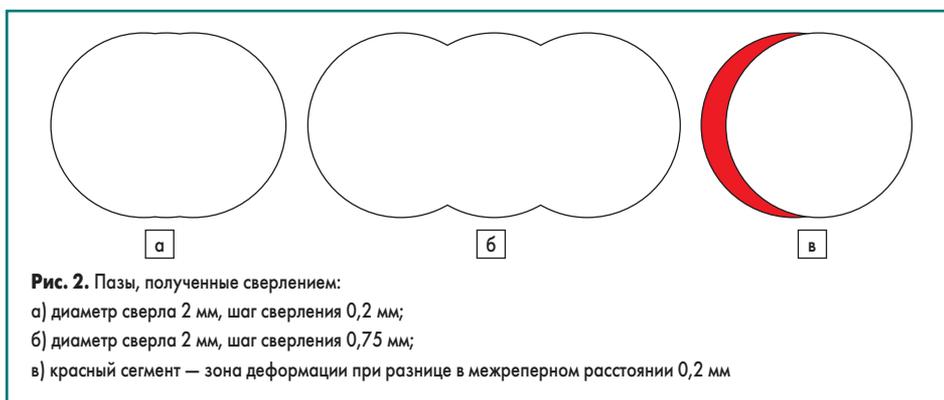


Рис. 2. Пазы, полученные сверлением:

- а) диаметр сверла 2 мм, шаг сверления 0,2 мм;
- б) диаметр сверла 2 мм, шаг сверления 0,75 мм;
- в) красный сегмент — зона деформации при разнице в межреперном расстоянии 0,2 мм

$$\sigma = \sqrt{21,2^2 + (0,674 \times 15)^2} = 23,49 \text{ мкм — для 1-го типа производства,}$$

$$\sigma = \sqrt{10,4^2 + (0,674 \times 10)^2} = 12,39 \text{ мкм — для 4-го типа производства.}$$

Значение 0,674 говорит о том, что выбирается наиболее вероятное значение.

При установке на сверлильный станок заготовки с базовым отверстием дополнительной погрешности не возникает, так как отсчет и базирование идет от неподвижного штифта и по этому же отверстию совмещается фотошаблон. С другой стороны, на станках, находящихся длительное время в работе, после ремонтов бывают смещены базовые штифты, в результате платы, просверленные разными шпинделями, имеют довольно большую разницу в смещениях. В этом случае потеря точности будет больше выигрыша, и, если нет достоверной информации о точности станка, следует предпочесть изготовление базовых отверстий в процессе непосредственного сверления. Тем более что для многономенклатурного производства, которое вынуждено работать с разными типоразмерами заготовок, сверление баз одновременно с отверстиями наиболее технологично. Так как базовые отверстия жестко привязаны к контуру платы, то их можно автоматически генерировать одновременно со схемными отверстиями. Целесообразно подготовку рабочих файлов для фотоплоттера и сверлильных станков выполнять с помощью программы НИИПЛАТА, которая для своей работы требует минимальных знаний оператора, так как работает в автоматическом режиме.

Для повышения точности сверления базовых отверстий целесообразно производить операцию центровки. Центровка обладает более высокой жесткостью, чем сверло, и, естественно, влияние текстуры стеклотекстолита на ее точность скажется меньше.

В 4-кнопочной схеме совмещения используются прямоугольные пазы. Изготовление оснастки для пробивки пазов в заготовке довольно трудоемко и дорого, так как к ортогональности расположения пазов предъявляются довольно высокие требования. Поэтому более технологично получать пазы на заготовке фрезерованием одновременно со сверлением схемных отверстий. Однако не всегда в производстве имеются станки, позволяющие вместе со сверлением производить фрезерование. В этом случае паз можно заменить отверсти-

ями, расположенными с достаточно малым шагом. На рис. 2 приведены изображения пазов, полученных сверлением трех отверстий с шагом 0,2 мм (изображение слева) и с шагом 0,75 мм (изображение в центре). На всех изображениях диаметр отверстия — 2 мм, изображения выполнены в масштабе. На левом изображении теоретически тоже должны быть стрелки от пересечения окружностей, но они настолько малы, что не передаются используемыми нами средствами отображения информации. Для сравнения, на правом рисунке приведена зона деформации (красного цвета) при использовании на фотошаблоне и заготовке круглых отверстий и разнице в межреперном расстоянии между ними 0,2 мм. Такой тип соединения не компенсирует разницу в размерах, и естественно, эти 0,2 мм уйдут на заломы пленки при соединении фотошаблона с заготовкой, растяжения фотошаблона или его усадку, в таких случаях при экспонировании появляется «волна».

Прогнозировать распределение погрешности в данном случае невозможно, ведь это зависит даже от того, с какой кнопки (с левого или правого репера) начнет оператор монтировать фотошаблоны с заготовкой.

Окончание следует

Литература

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука 1969.
2. Геннат Б. Технология и оборудование бесштифтового совмещения и бондирования (mass-lam). DIS Tech (США),
3. Медведев А. Печатные платы. Конструкции и материалы. М.: Техносфера, 2005.
4. Закон Мерфи. Минск: ПОПУРРИ, 2000.
5. Одиноборцев М. Современное сверлильно-фрезерное оборудование и роль технолога в получении качественного конечного результата в операции сверления // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 1.
6. Семенов П. Снайпер или автомат? Материалы международной конференции по печатным платам.
7. Семенов П. Системы совмещения. Часть II. «Тень на плетень», или О том, как нас ведут в 5-й класс // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 6.
8. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1972.