

Оценка деформации печатных плат

С. Никитин¹, К. Поздняков², О. Хомутская³

УДК 621.3.049.75:658.5.012.14 | ВАК 05.13.06

В процессе изготовления печатных плат (ПП) их размеры в большей или меньшей степени «уходят» относительно значений, указанных в конструкторской документации. Для плат высоких классов точности размерная деформация на некоторых технологических этапах может достигать критической величины, приводя к резкому росту брака, который может проявить себя как на выходном контроле производства ПП, так и позже, при сборке электронных узлов либо в эксплуатации, когда дефекты платы проявляют себя как фактор снижения надежности функционирования электронного блока.

В статье рассмотрен метод анализа размерной деформации ПП, который можно применить после проведения любого из этапов технологического процесса и по его результатам принять меры по введению деформации в пределы допуска для ПП данного класса точности.

Постоянная миниатюризация, интеграция всё большего количества компонентов [1], тенденции увеличения функциональности единичного электронного узла требуют применения печатных плат высокого класса точности, что выражается в уменьшении размеров контактных площадок, ширины проводников и зазоров между ними, диаметра переходных отверстий, увеличении количества слоев в многослойных ПП (рис. 1). В совокупности с повышением требований к надежности электроники это ведет к усложнению технологических процессов изготовления ПП и, в частности, актуализирует проблему контроля их размерной деформации. Величина деформации должна оставаться в пределах жестких допусков – только так можно гарантировать требуемую точность совмещения пространственных структур и межуровневых соединений, что, в свою очередь, имеет решающее значение для выхода годной продукции – как ПП, так и печатных узлов при дальнейшей сборке.

Наличие деформаций, превышающих допустимые значения, может привести к ряду неисправимых дефектов, таких как смещение проводников, уход контактных площадок, изменения в геометрии кромки ПП, разрыв проводников и т. п. [2, 3]. В технологическом процессе изготовления ПП можно выделить несколько этапов, наиболее неблагоприятных с точки зрения величины возникающих в их ходе деформаций [4]:

- этап травления – формирование рисунка проводящих слоев ПП;

- этап металлизации, на котором выполняется покрытие медью отверстий, слотов, торцов и увеличение ее толщины на токопроводящем рисунке слоя;
- этап прессования, целью которого является соединение отдельных проводящих слоев в единую структуру многослойной ПП.

Допустимые уровни деформации строго регламентированы в ГОСТ Р 53429-2009 «Печатные платы. Основные параметры конструкции» [5]. В процессе изготовления ПП их необходимо максимально точно контролировать, чтобы своевременно оценить отклонения параметров и дать рекомендации по доработке дизайна рисунка ПП и/или изменению технологических параметров производственного этапа; только таким образом можно добиться уменьшения количества бракованной продукции на выходе и, в конечном итоге, минимизировать временные и материальные затраты производства.

В статье предлагается метод оценки размерной деформации ПП, основанный на обработке данных, полученных оптическим путем. По сравнению с общеупотребимыми методами оценки деформаций ПП – компьютерным моделированием, визуальным исследованием, механическим тестированием при помощи зажимного аппарата – представленный метод позволяет ускорить процесс, практически исключить человеческий фактор и, что особенно важно для принятия компенсирующих мер, увидеть направление деформаций для множества точек, распределенных по всей поверхности платы, и дать им количественную оценку.

Предлагаемый метод может рассматриваться как развитие работы, проведенной коллективом авторов

¹ МАИ (НИУ), магистрант, nsa010995@gmail.com.

² МАИ (НИУ), студент, kiry-98@mail.ru.

³ МАИ (НИУ), ассистент, khomutskayaov@gmail.com.

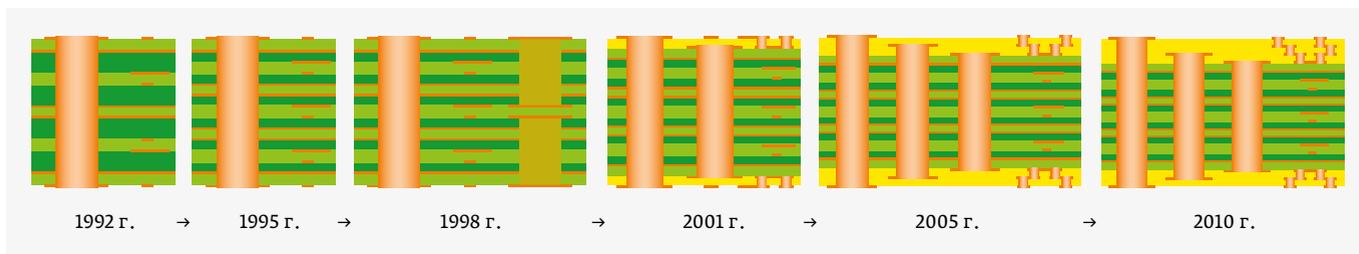


Рис. 1. Увеличение сложности многослойных печатных плат с 1992 по 2010 год [4]

и описанной в статье [6]. Его преимущества по сравнению с последним состоят, во-первых, в использовании другого эталонного изображения – за эталон принимается изображение, полученное из файла формата GERBER, то есть точно соответствующее «идеальной» плате, разработанной конструктором; во-вторых, в увеличении количества операций совмещения анализируемого и эталонного изображений, что повышает точность получаемых данных; в-третьих, в представлении результата анализа в виде карты распределения деформаций по площади платы – это наглядно и удобно для практического использования, будь то переработка топологии платы, направленная на уменьшение деформации в критических зонах, или корректировка параметров технологического процесса, ставшего предметом оценки возникающих в его ходе деформаций.

Процесс оценки деформации состоит из следующих шагов:

1. Получение эталонного изображения ПП (файл в формате bmp) из ее файла формата GERBER (рис. 2).
2. Получение анализируемого изображения – сканирование ПП после технологического этапа, который требует контроля произошедших деформаций (рис. 3).
3. Перевод отсканированного изображения в полутоновый формат.
4. Наложение анализируемого изображения на эталонное и их выравнивание по контуру ПП.
5. Выравнивание изображений относительно реперных точек.
6. Смещение изображений таким образом, чтобы точка с координатами верхнего левого реперного отверстия расположилась в точке с заранее заданными координатами (в данной работе установлены значения координат: 300 по оси X и 300 по оси Y).

7. Проведение операции распознавания отверстий как окружностей и определение координат их местоположения на эталонном и анализируемом изображениях.
8. Расчет смещения в пикселях по осям X и Y каждого отверстия анализируемого изображения относительно соответствующего отверстия на эталонном изображении.
9. Расчет среднего значения смещений отверстий по оси X и оси Y.
10. Сдвиг анализируемого изображения на значения средних смещений по оси X и оси Y в направлении, противоположном направлению смещений; таким образом компенсируется уход реперных знаков, вызываемый деформацией ПП.
11. Проведение операции распознавания отверстий как окружностей и определение координат центров их местоположения на эталонном и анализируемом изображениях.

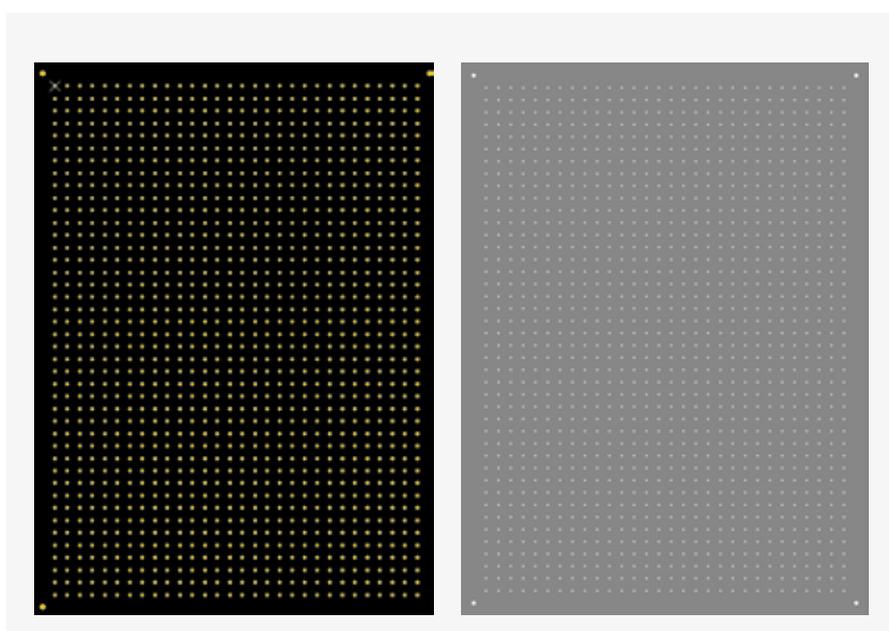


Рис. 2. Пример эталонного изображения формата bmp (справа), полученного из файла формата drl (слева)

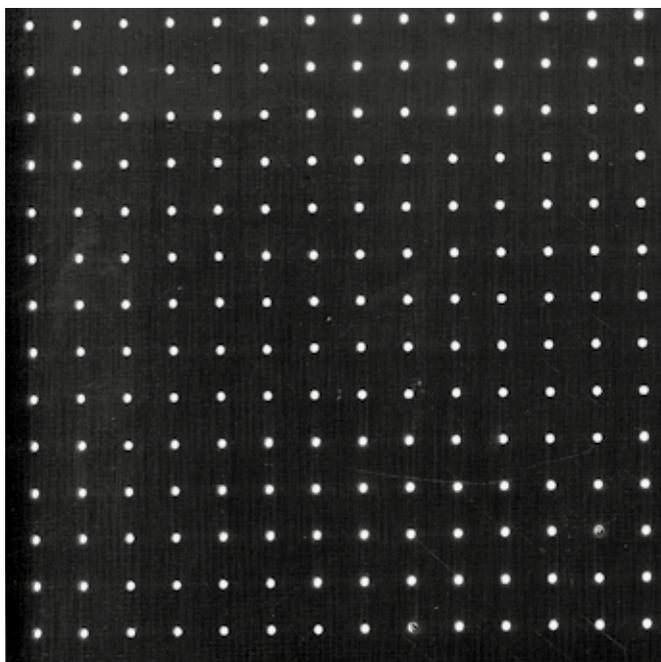


Рис. 3. Пример анализируемого изображения формата bmp

12. Расчет в точках (пикселях) модульной величины смещения для каждого отверстия анализируемого изображения относительно соответствующего отверстия эталона.
13. Расчет интегральной оценки – суммарной средней модульной величины смещения.
14. Расчет дисперсии – отклонения смещений от полученной интегральной оценки.
15. Перевод в миллиметры результатов, полученных по п. п. 8, 13, 14.
16. Экспорт полученных данных в выходной файл формата csv в виде табличных данных.
17. Построение графиков дисперсии для каждого вида тестовых ПП (рис. 4–12) для подтверждения работоспособности метода.
18. Отображение векторов смещения на анализируемом изображении ПП (рис. 13).
19. Построение карты деформации (рис. 14).

По результатам п. п. 8, 9, 13, пересчитанным в миллиметры (п. 15), можно сделать вывод о принципиальной возможности как применения данного базового материала для изготовления ПП заданного класса точности, так и реализации проекта в целом. Изображение тестируемой платы с нанесенными векторами смещения отверстий относительно эталона (п. 18) и особенно карта деформации ПП (п. 19) дают детальную информацию для корректировки проекта печатной платы и/или уточнения параметров технологического процесса. Пункты 10–14, 17 выполняются прежде всего с целью подтверждения

работоспособности метода – достоверности получаемых с его помощью данных.

Для экспериментальной проверки метода выбран процесс травления односторонних и двусторонних тестовых ПП с предварительно насверленными отверстиями. Материал плат – FR-4, размер – 148 × 210 мм, толщина – 0,5 мм, толщина металлизации 18 мкм. Отверстия диаметром 1,0 мм насверлены в виде матрицы 30 × 42 с шагом 5 мм. Количество реперных знаков – 3.

Тестовые ПП разделены на несколько видов:

1. С расположением топологии на одной из сторон и отсутствием меди на второй:
 - 1.1. Горизонтальное расположение проводников (здесь и далее – относительно основы переплетения нитей диэлектрика).
 - 1.2. Вертикальное расположение проводников.
 - 1.3. Диагональное расположение проводников.
2. С расположением топологии на одной из сторон и медным полигоном на второй:
 - 2.1. Горизонтальное расположение проводников.
 - 2.2. Вертикальное расположение проводников.
 - 2.3. Диагональное расположение проводников.
3. С расположением топологии на обеих сторонах платы:
 - 3.1. Горизонтальное расположение на одной стороне и вертикальное на второй.
 - 3.2. Горизонтальное расположение на одной стороне и диагональное на второй.
 - 3.3. Вертикальное расположение на одной стороне и диагональное на второй.

Изготовлено 10 образцов каждого вида. Проведена предварительная термостабилизация заготовок в печи при 60 °С в течение 24 ч [7].

Для получения изображений исследуемых ПП использовался сканер Epson Perfection 3170 с разрешением 1800 DPI (Dots Per Inch – точек на дюйм). Для исключения дополнительных искажений в изображении в случае его сжатия использован формат bmp. Размер полученных изображений 10200 × 14000 точек.

Для программной реализации алгоритма использован язык Python 3 с использованием библиотеки компьютерного зрения Open CV [8]. С ее помощью осуществляется поиск окружностей на изображении со сквозными отверстиями на печатной плате.

Расчет смещения центров отверстий на эталонном и анализируемом изображениях осуществлялся по следующей формуле:

$$AB_i = \sqrt{(X_{B_i} - X_{A_i})^2 + (Y_{B_i} - Y_{A_i})^2}, \quad (1)$$

где AB_i – величина смещения центров i -го отверстия в пикселях; X_{A_i} , Y_{A_i} – координаты положения i -го отверстия на эталонном изображении; X_{B_i} , Y_{B_i} – координаты положения i -го отверстия на анализируемом изображении.



МИКРОВОЛНОВЫЕ
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТ. КАЧЕСТВО.

АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»
Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, 11
Тел. (495) 917-21-03
Факс (495) 917-19-70
E-mail: mwsystems@mwsystems.ru
www.mwsystems.ru

- СОВРЕМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО И ТЕХНОЛОГИИ
- ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ЦЕНА/КАЧЕСТВО
- ПОЛНЫЙ СПЕКТР УСЛУГ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ПРОИЗВОДСТВУ МОНОЛИТНЫХ И ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ, МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ И БЛОКОВ РЭА (0,3 - 22 ГГц)

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»



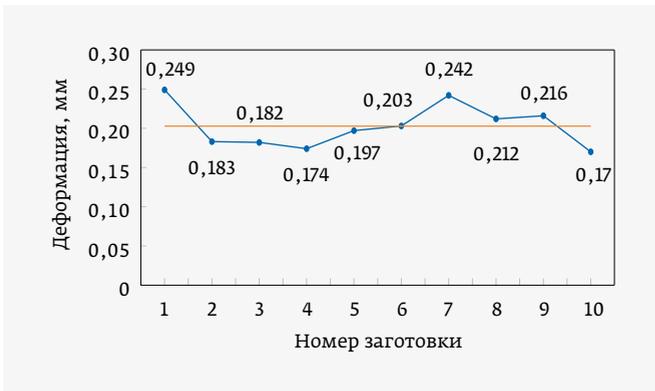


Рис. 4. Экспериментальные результаты размерной деформации ПП при вертикальном расположении проводников на одной стороне и отсутствии меди на второй. Разброс значений не более 3%

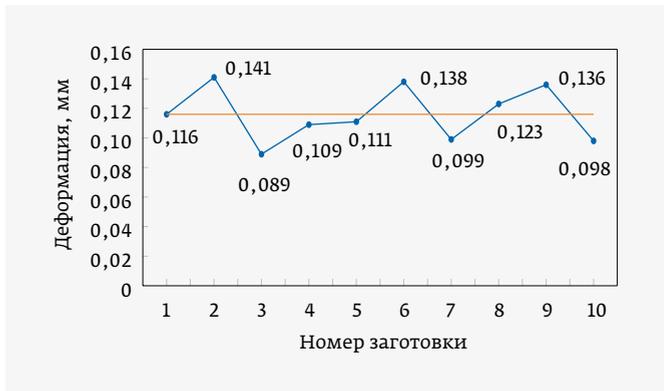


Рис. 7. Экспериментальные результаты размерной деформации ПП при вертикальном расположении проводников на одной стороне и наличии медного полигона на второй. Разброс значений не более 3%

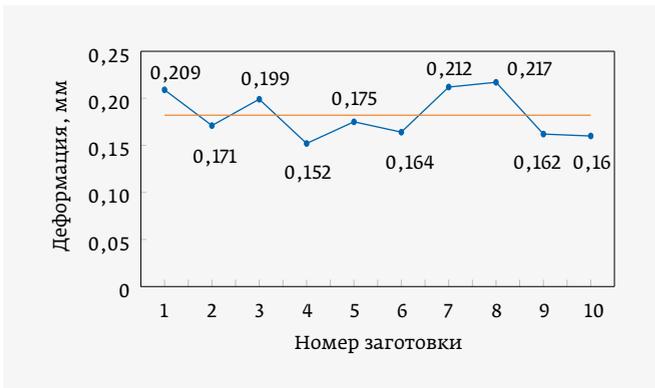


Рис. 5. Экспериментальные результаты размерной деформации ПП при горизонтальном расположении проводников на одной стороне и отсутствии меди на второй. Разброс значений не более 3%

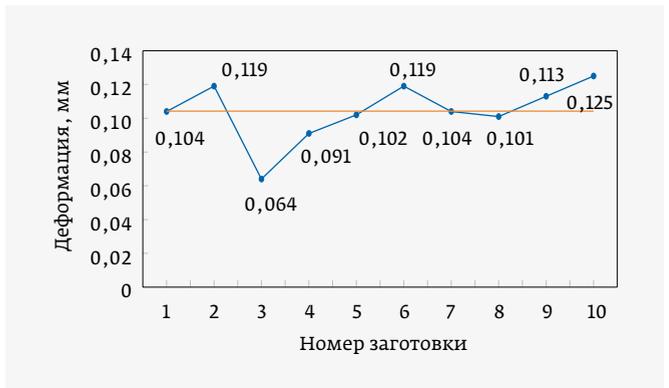


Рис. 8. Экспериментальные результаты размерной деформации ПП при горизонтальном расположении проводников на одной стороне и наличии медного полигона на второй. Разброс значений не более 2%

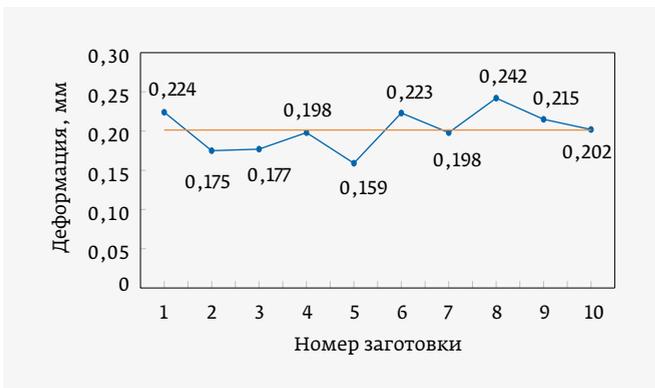


Рис. 6. Экспериментальные результаты размерной деформации ПП при диагональном расположении проводников на одной стороне и отсутствии меди на второй. Разброс значений не более 3%



Рис. 9. Экспериментальные результаты размерной деформации ПП при диагональном расположении проводников на одной стороне и наличии медного полигона на второй. Разброс значений не более 3%

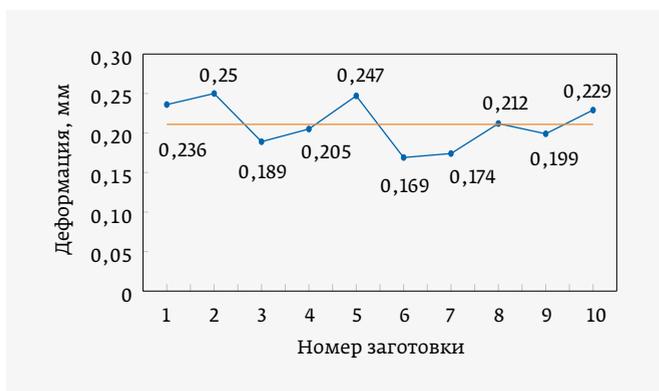


Рис. 10. Экспериментальные результаты размерной деформации ПП при вертикальном расположении проводников на одной стороне и горизонтальном на второй. Разброс значений не более 3%

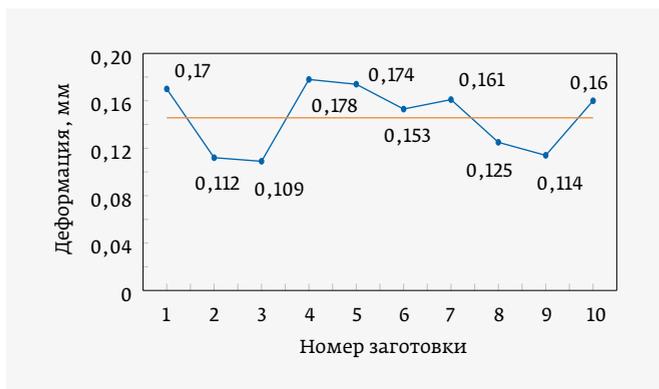


Рис. 11. Экспериментальные результаты размерной деформации ПП при горизонтальном расположении проводников на одной стороне и диагональном на второй. Разброс значений не более 3%

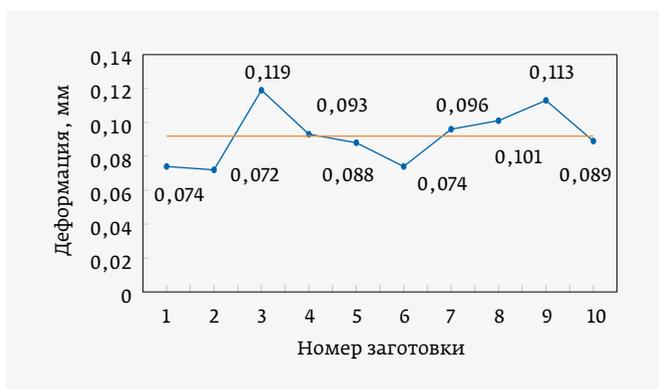


Рис. 12. Экспериментальные результаты размерной деформации ПП при вертикальном расположении проводников на одной стороне и диагональном на второй. Разброс значений не более 2%

Перевод результатов расчета смещений отверстий в миллиметры производится на основе имеющихся исходных данных о параметре DPI полученных изображений.

$$L_i = \frac{AB_i \cdot k}{DPI}, \tag{2}$$

где L_i – величина смещения центра i -го отверстия в мм на изображении; k – коэффициент перевода из дюймовой системы измерения в метрическую, $k=25,4 = \text{const}$.

В ходе проведенного эксперимента получена статистика по 90 заготовкам с более чем 110 тыс. успешно распознанных отверстий. Статистическая обработка результатов показала, что деформация использованного в исследовании материала на этапе травления проводников может быть критична уже для плат 4 класса точности.

Экспериментально полученные значения величины деформации для каждого вида тестовых образцов представлены на рис. 4–12.

Разброс значений модуля вектора деформации в каждом из видов плат относительно среднего значения не превышает 3%, что свидетельствует о достоверности полученных данных.

Полученные в ходе эксперимента результаты визуализированы в соответствии с п. п. 18, 19 описания последовательности действий при оценке деформации. На рис. 13 приведено графическое представление полученных расчетных результатов по формулам 1 и 2 (п. 18), с помощью которого можно увидеть величину и направление смещения для каждого отверстия тестовой ПП. На рис. 14 показан пример карты деформации одной из тестовых ПП (п. 19),

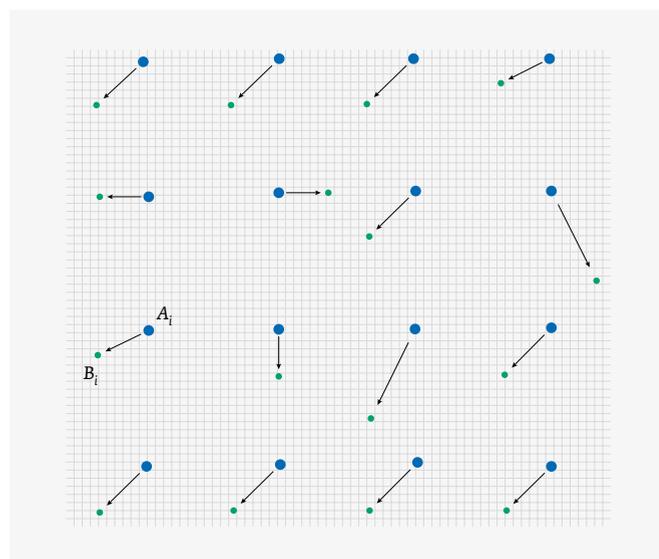


Рис. 13. Пример отображения смещения отверстий на печатной плате (фрагмент); стрелки показывают направление смещения центров отверстий на анализируемом изображении относительно эталонного

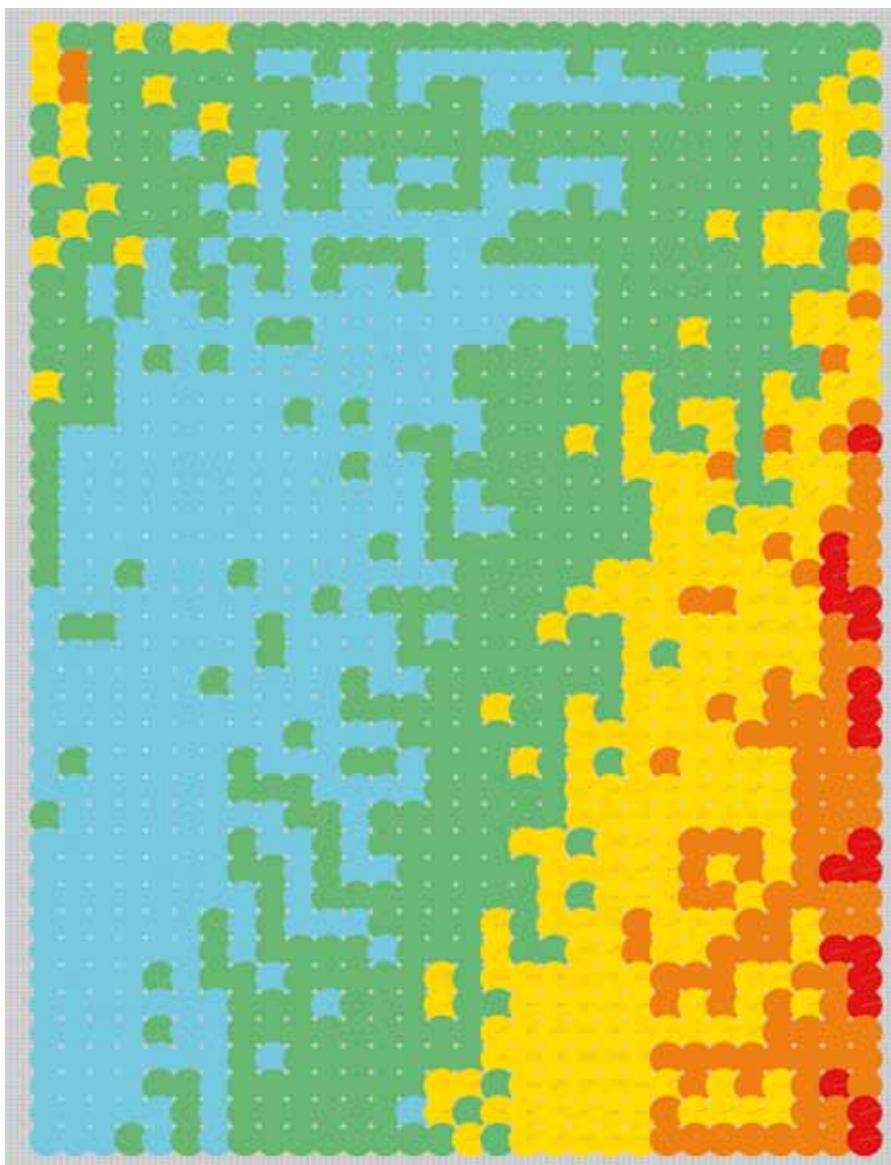


Рис. 14. Пример карты деформации печатной платы, построенной по результатам эксперимента (тестовая ПП с диагональным размещением проводников на одной стороне и медным полигоном на второй). Голубой цвет – менее 0,1 мм; зеленый цвет – 0,1–0,125 мм; желтый цвет – 0,125–0,15 мм; оранжевый цвет – 0,15–0,175 мм; красный цвет – более 0,2 мм.

наглядно отображающей распределения величины деформации по площади платы.

* * *

Изложенный метод позволяет быстро и эффективно оценить общий уровень деформации и определить ее конкретные величины и их распределение по площади ПП. Метод использует цифровую обработку данных, но, в отличие от методов расчета математической модели деформации ПП в САЕ-системах, предполагает работу на реальных печатных платах. Его преимущества – низкая стоимость

реализации и высокая скорость обработки анализируемых данных.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о возможности эффективного применения метода для расчета деформаций печатных плат и целесообразности его внедрения для оценки качества применяемых материалов, уточнения параметров технологических процессов и для формирования рекомендаций по редактированию проекта печатной платы на этапе технологической подготовки производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Медведев А. М.** Электронные компоненты и монтажные подложки. Постоянная интеграция // Компоненты и технологии. 2006. № 12. С. 124–134.
2. **Медведев А. М., Можаров В. А.** Плотность межсоединений электронных компонентов // Печатный монтаж (приложение к журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес»). 2011. № 3. С. 140–145.
3. **Можаров В. А.** Обеспечение пространственного совмещения элементов межсоединений в многослойных печатных структурах. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 2013.
4. **Ronen A.** Predicting Deformation and Strain Behavior in Circuit Board Bend Testing // Army Research Laboratory, 2012.
5. ГОСТ Р 53429-2009. ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ. Основные параметры конструкции. – М.: Стандартинформ.
6. **Куликов Н., Хомутская О., Ванцов С.** Цифровой метод автоматизированной оценки деформации печатной платы. // «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес». 2018. № 2. С. 186–191.
7. **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. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php> (дата обращения 20.11.2018).
8. **Mordvintsev A., Abid K.** OpenCV-Python Tutorials // Documentation Release 1, 2017.