

Особенности рентгеновского контроля дефектов электрических соединений печатных плат

УДК 621.3.049.75::621.386.12::658.562.4 | ВАК 05.11.14

Ф. Васильев, к. т. н.¹, А. Домени²

Для обеспечения работоспособности современного оборудования необходим эффективный контроль качества и надежности соединений печатных плат (ПП) – как после изготовления собственно платы, так и по окончании установки компонентов. Особенно он актуален для аппаратуры ответственного назначения, подвергающейся нагрузкам в процессе эксплуатации. В статье описаны особенности рентгеновского контроля соединений ПП на примере экспериментального выявления дефектов, оговоренных в нормативных документах. Результаты исследования применимы при сравнительном анализе видов контроля плат, например, при выборе оптимальной системы контроля для конкретного производства.

Технологическими предшественниками рентгеновского контроля являются визуальный и оптический контроль. Первый был наиболее распространенным видом контроля на заре развития производства ПП. Оператор производил осмотр платы, выявлял заметные невооруженным глазом дефекты и принимал решение об их пригодности к ремонту. В рамках промышленного производства визуальный контроль достаточно быстро и повсеместно был замещен оптическим контролем. Принцип поиска дефектов остался прежним, однако осмотр невооруженным глазом сменился осмотром с помощью оптических установок, например электронных микроскопов. Применение технических средств существенно повысило эффективность метода в выявлении более мелких, незаметных человеческому глазу дефектов.

Следующим этапом развития стала автоматическая оптическая инспекция (АОИ). АОИ – это комбинация автоматизированного оптического устройства (микроскопа) и программного обеспечения на основе алгоритмов компьютерного зрения (computer vision, CV), способная производить осмотр ПП и выявление предварительно программно описанных дефектов без участия оператора. Несовершенство технологий распознавания дефектов не позволяет АОИ полностью заменить человеческий взгляд, однако по производительности и надежности она существенно превосходит упомянутые выше ручные методы.

С внедрением в производство многослойных ПП и компонентов с матричным расположением выводов задача локализации некоторых дефектов с помощью прямого осмотра платы оказалась невыполнимой. Решением стал рентгеновский контроль – метод выявления дефектов ПП с помощью анализа рентгеновских снимков образца. Рентгеновская установка способна предоставить больше информации об исследуемом образце, чем оптическая, но с известной спецификой: технология рентгеновского контроля, особенно ее наиболее продвинутые виды, в отличие от оптического контроля, ориентирована в первую очередь на выявление дефектов, связанных с металлическими элементами – печатными проводниками, контактными площадками, переходными отверстиями, паяными соединениями – иными словами, электрическими соединениями ПП.

Инспекция и выявление дефектов может производиться как в ручном режиме оператором, так и в автоматическом, если система контроля оборудована соответствующим программным обеспечением на основе компьютерного зрения. В настоящее время алгоритмы автоматизированной инспекции активно развиваются с целью использовать все данные о плате, которые могут быть предоставлены современными рентгеновскими установками.

Оборудование для рентгенографии позволяет получить плоский снимок или трехмерную (объемную) модель исследуемого объекта, при анализе которых выявляются дефекты исследуемой ПП. В табл. 1 рассмотрены различные виды рентгеновского контроля, их преимущества и недостатки [1].

¹ МАИ (НИУ), заведующий кафедрой, fedor@niit.ru.

² МАИ (НИУ), аспирант, domeni.anton@mail.ru.

Дефекты ПП, включая дефекты подложки, покрытия, травления, металлизации, пайки и т.д., описаны в российском стандарте ГОСТ Р 56251-2014 и зарубежном IPC-A-600H-RU [2, 3]. Список дефектов электрических соединений плат, составленный на основе данных стандартов, приведен в табл. 2 [4].

Данная статья рассматривает рентгеновский контроль на примере несмонтированных ПП, поэтому таблица дефектов не включает дефекты паяных соединений. Следует обратить внимание на то, что она содержит дефекты элементов плат, схожие по физическим параметрам (габариты, местоположение), но различные по причинам возникновения и возможным последствиям при испытаниях и эксплуатации. К таким дефектам относятся, например, разрыв и трещина печатного проводника. Различить, а в некоторых ситуациях и просто выявить данные дефекты средствами визуального, оптического и рентгеновского контроля достаточно сложно:

- разрыв проводника может быть выявлен с помощью оптического контроля, если проводник находится на наружном слое, однако для проводников

на внутренних слоях многослойной ПП необходим рентгеновский контроль;

- трещина печатного проводника может существенно различаться в размерах и оказаться как достаточно большой и примечательной, так и слишком малой и трудно различимой даже на снимке с максимальным разрешением;
- трещину переходного отверстия невозможно выявить на снимке с видом платы сверху, необходимо повернуть детектор рентгеновской системы для снимка под углом.

Целью статьи является исследование режимов, определение особенностей и оценка эффективности выявления подобных дефектов на оборудовании рентгеновского контроля. В качестве инструмента исследования выбрана установка рентгеновской инспекции XD7600NT Ruby FP производства Nordson DAGE (Беликобритания), изображенная на рис. 1 [5], которая реализует большую часть существующих методов рентгеновского контроля, включая 3D наклонную компьютерную томографию.

Таблица 1. Преимущества и недостатки видов рентгеновского контроля

Виды	Преимущества	Недостатки
Просвечивающий рентген (2D X-RAY)	Низкая стоимость при высокой скорости контроля несмонтированных ПП и ППП с электронными компонентами с одной стороны	Разный коэффициент увеличения при просмотре объекта под углом. Невозможность выполнения быстрого и качественного контроля собранных электронных узлов с двухсторонним монтажом. Требуется высококвалифицированный персонал для анализа дефектов пайки
Ламинография (Laminography)	Возможность контроля собранных электронных узлов с двухсторонним монтажом	Быстрый контроль только на определенном уровне. Требуется высококвалифицированный персонал. Низкая производительность при формировании трехмерного изображения
Компьютерная томография (Computed tomography, CT)	Быстрое формирование трехмерного изображения	Относительно высокая стоимость. Ограничение коэффициента увеличения. Ограничения по размеру ПП. Плохая четкость изображения
Цифровой томосинтез (Digital tomosynthesis)	Быстрое формирование трехмерного изображения. Возможность контроля собранных электронных узлов с двухсторонним монтажом	Относительно высокая стоимость. Ограничение коэффициента увеличения. Ограничения по размеру ПП. Недостаточная четкость изображения мелких деталей
3D наклонная компьютерная томография (3D oblique computed tomography, 3D CT)	Быстрое формирование трехмерного изображения. Возможность контроля собранных электронных узлов с двухсторонним монтажом. Высокая четкость изображения. Нет ограничения по коэффициенту увеличения. Нет ограничений по размеру ПП	Относительно высокая стоимость

Таблица 2. Дефекты электрических соединений печатных плат

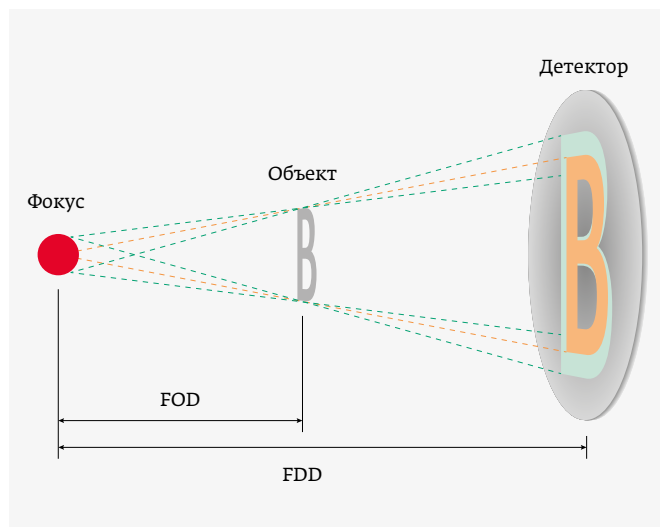
Элемент печатной платы	Вид дефекта
Контактная площадка	Нарушение совмещения слоев
	Отслоение контактной площадки
	Уменьшение гарантийного пояса контактной площадки металлизированного отверстия
Переходное отверстие	Заусенцы в отверстии
	Наросты на гальваническом покрытии
	Пустоты в медном покрытии
	Трещина в гальваническом покрытии
	Уменьшение толщины гальванического покрытия в отверстии
Печатный проводник	Инородные включения
	Короткое замыкание
	Протрав проводника
	Разрыв проводника
	Трещины в фольге
	Уменьшение расстояния между проводниками
	Уменьшение ширины проводника

**Рис. 1.** Установка рентгеновской инспекции Nordson DAGE XD7600NT Ruby FP

Разрешение и глубина цвета получаемых с помощью установки рентгеновских изображений существенно влияют на эффективность контроля, так как от данных параметров зависит, будут ли малые дефекты достаточно хорошо различимы на снимках. Рентгеновские изображения, полученные с помощью выбранной установки, имеют разрешение 1600×1200 пикс. и глубину цвета 16 бит, то есть для каждого пикселя доступны 65 536 оттенков серого. Микроскопический масштаб снимков достигается установкой с помощью геометрического увеличения ×2 500, цифрового увеличения ×5 200 и суммарного увеличения ×15 600.

Геометрическое увеличение системы рентгеновского контроля равно отношению расстояния между фокусом источника и детектором (focus-detector distance, FDD) к расстоянию между фокусом источника и объектом (focus-object distance, FOD), как показано на рис. 2 [6]. Расстояние FDD ограничено размерами установки и является фиксированным, следовательно, максимальное геометрическое увеличение достигается при минимальном расстоянии FOD. В выбранной установке данная функциональность реализована на основе автоматизированного передвижения рабочего стола вплотную к рентгеновской трубке.

Согласно методическим указаниям о проведении рентгеновского контроля, для обнаружения пустоты диаметром d размер пикселя должен составлять $d/2$. Для определения пустоты диаметром 0,1 мм размер пикселя должен

**Рис. 2.** Принцип геометрического увеличения рентгеновской установки

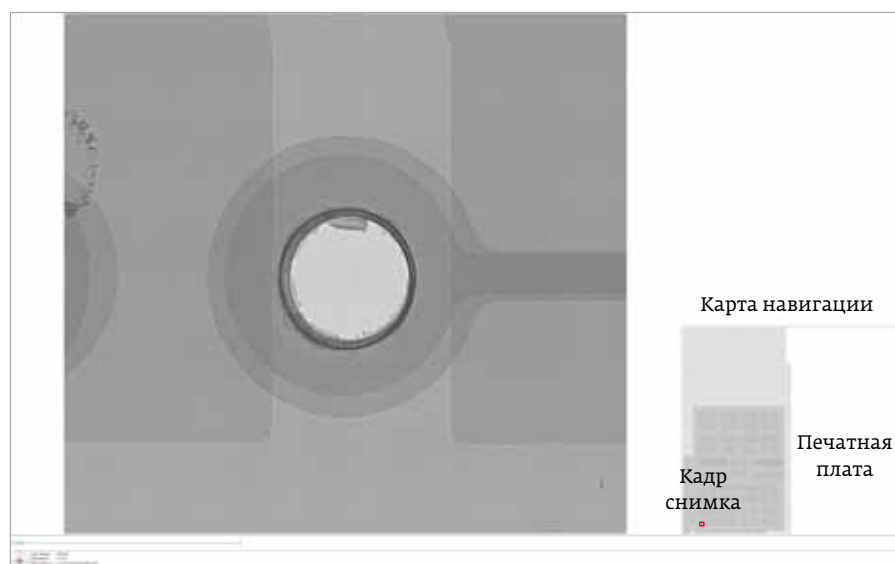


Рис. 3. Скриншот размера кадра снимка относительно размера печатной платы

составить 0,05 мм, тогда при разрешении изображения 1600×1200 пикс. размер кадра будет равен 80×60 мм. Максимальная длина и ширина контролируемой ПП для выбранной установки равна 736×580 мм, что приблизительно в 10 раз больше соответствующих размеров заданного кадра. Таким образом, для исследования одной платы максимального размера с целью поиска пустот диаметром от 0,1 мм потребуется сделать 100 снимков. Если же проверять всю плату в одном кадре, то размер пикселя будет равен примерно 0,5 мм, и пустоты менее 1 мм останутся не обнаруженными. На рис. 3 показано, насколько сильно необходимый для выявления дефекта размер кадра может отличаться от размера платы.

Для выявления на рентгеновском изображении малой трещины проводника необходим не только крупный масштаб, – рекомендуемый размер пикселя для обнаружения трещины шириной w равен $w/3$, – но и заметное различие яркости между темными пикселями проводника и светлыми пикселями трещины. Для оценки перепада яркостей

программное обеспечение установки предоставляет возможность просмотреть гистограмму изображения.

Общий вид гистограммы зависит от нескольких факторов:

- толщины объектов в кадре – более толстая плата приведет к более темному снимку;
- параметров рентгеновской трубки – более мощное рентгеновское излучение приведет к более яркому снимку;
- количества металлических деталей (элементов или соединений) на участке платы в кадре – от этого зависит количество темных пикселей на снимке.

Чрезмерно сосредоточенная гистограмма означает неравномерное распределение пикселей изображения по яркости и отсутствие доста-

точной для выявления дефектов контрастности. На рис. 4 приведено сравнение двух рентгеновских снимков одного и того же участка платы. Дефект (трещина переходного отверстия) сложно различим на снимке с сосредоточенной гистограммой (слева) и легко различим на снимке с распределенной гистограммой (справа).

Рекомендуемые значения напряжения и тока (мощности рентгеновской трубки) для достижения равномерно распределенной гистограммы для различных инспектируемых объектов и компонентов ПП указаны в табл. 3. Выбранная установка позволяет регулировать значения напряжения до 160 кВ и мощности до 10 Вт.

Напряжение на рентгеновской трубке влияет на энергетический спектр и интенсивность рентгеновского излучения. Энергетический спектр, в свою очередь, определяет проникающую способность излучения и чувствительность контроля [7]. Увеличение напряжения рентгеновской трубки увеличивает энергию испускаемых фотонов, увеличение мощности рентгеновской трубки (за счет увеличения силы

Таблица 3. Рекомендуемые значения параметров снятия рентгеновского изображения

Инспектируемый элемент объекта	Напряжение, кВ	Ток, мкА	Мощность, Вт
Паяные соединения безвыводных компонентов поверхностного монтажа	100–140	20–50	3–5
Паяные соединения компонентов поверхностного монтажа с разными формами вывода	100–140	25–50	4–5
Паяные соединения компонентов, монтируемых в отверстия	100–140	25–50	4–5
Печатная плата	80–100	30–75	3–6
Печатная плата с теплоотводящими конструкциями	80–120	25–65	3–5

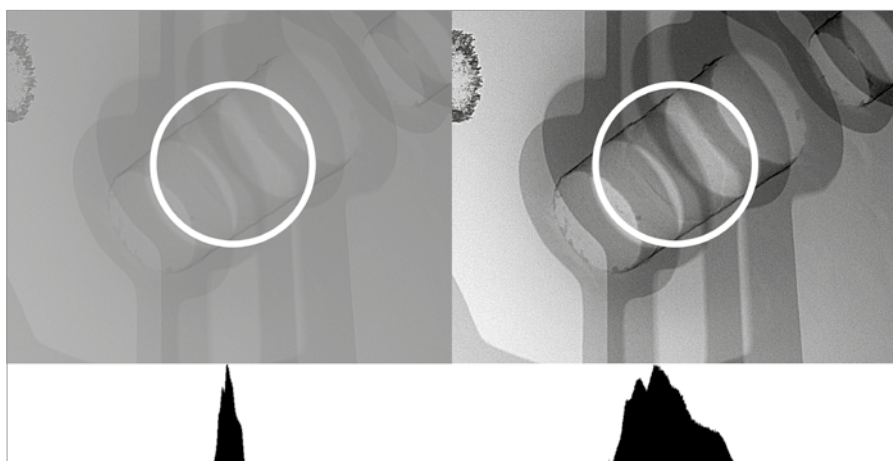


Рис. 4. Рентгеновские изображения дефекта с различными гистограммами

тока) увеличивает плотность потока излучения. На рис. 5 [8] представлены графики зависимости излучения рентгеновской трубки установки для напряжений 80 и 160 кВ и мощностей 10 и 20 Вт. Рентгеновское излучение с большей энергией предпочтительнее для исследования объектов с большей толщиной или из материала большей плотности, однако оно представляет опасность для компонентов и приборов, чувствительных к радиационным излучениям.

После загрузки платы в рентгеновскую установку для достижения оптимального масштаба и распределения яркости рентгеновского изображения необходимо подготовить режим снятия снимка согласно следующим правилам:

Необходимо помнить, что отсутствие дефекта на одном снимке с видом сверху не означает, что исследуемый элемент является бездефектным. Для исследования одного элемента соединения требуется сделать несколько рентгеновских снимков данного элемента в различных информативных проекциях. Выбор информативных проекций («вид сверху» и «вид под углом») достигается посредством наклона/поворота детектора установки, как показано на рис. 6 [9].

Рекомендуемыми значениями углов наклона/поворота детектора для проекции «вид под углом» элементов соединений (переходного отверстия, контактной площадки, печатного проводника) являются 30° и 45°.

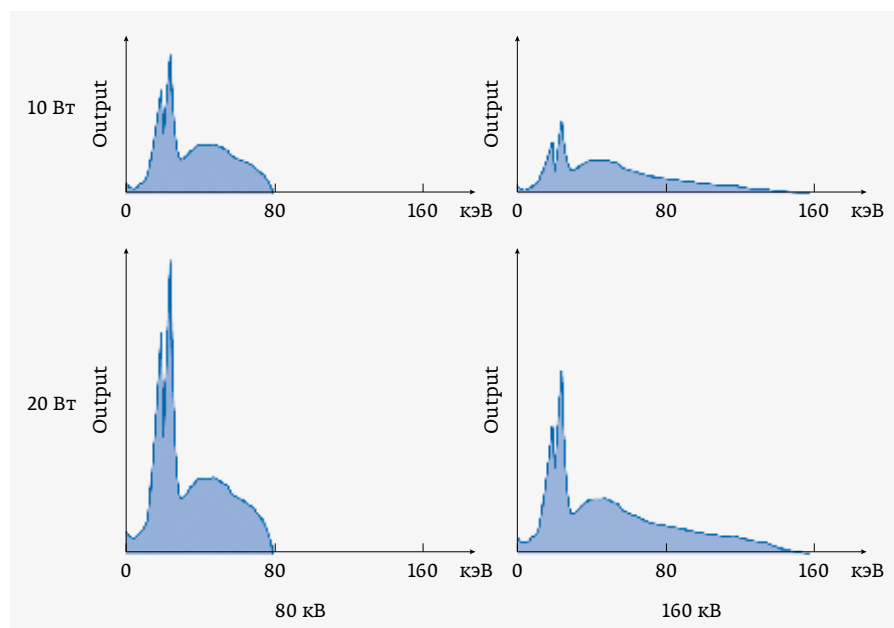


Рис. 5. Графики рентгеновского излучения для различных настроек рентгеновской трубки

- поле зрения должно полностью включать контролируемый элемент проводящего рисунка ПП;
- поле зрения должно включать минимальное возможное количество лишних объектов;
- масштаб поля зрения должен быть достаточен для однозначного определения наличия или отсутствия дефекта определенного размера;
- напряжение и мощность рентгеновской трубки должны быть выставлены в соответствии с рекомендациями, приведенными ранее, для нормализации гистограммы.



Рис. 6. Схема наклона/поворота детектора изоцентрической рентгеновской установки

В случае возникновения сомнений у оператора о наличии или отсутствии дефекта возможен выбор другого угла для более эффективного осмотра контролируемого элемента. Исоцентрическая система выбранной установки позволяет достигать значений углов наклона / поворота до 70°.

С учетом описанных особенностей рентгеновского контроля возможно получить изображения большинства описанных ранее дефектов электрических соединений ПП; примеры представлены на рис. 7–13.

В ходе исследования дефекты выявляются оператором путем визуального изучения рентгеновских изображений,

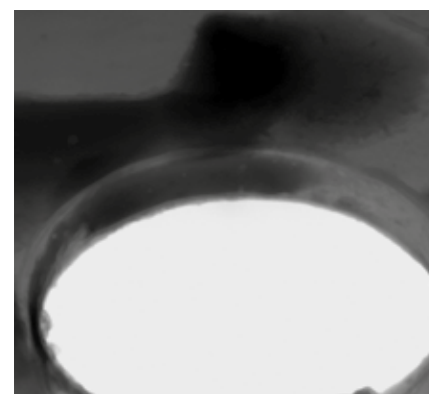
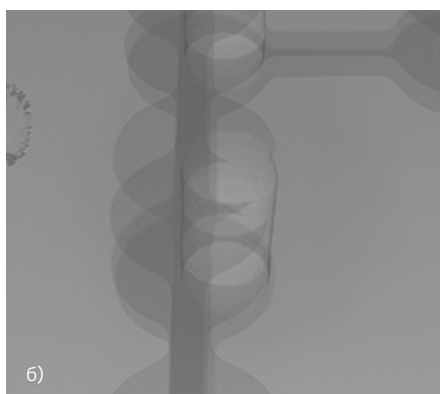
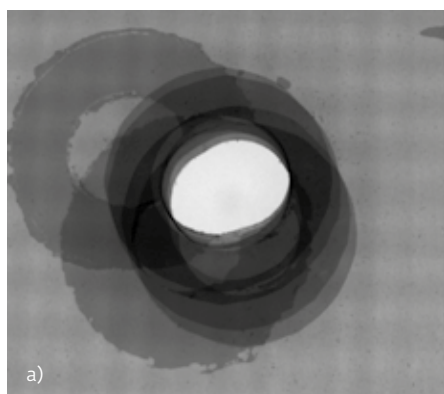


Рис. 7. Смещение отверстий: а – в результате сдвига слоев; б – в результате сверления

Рис. 8. Неровность металлизации отверстия

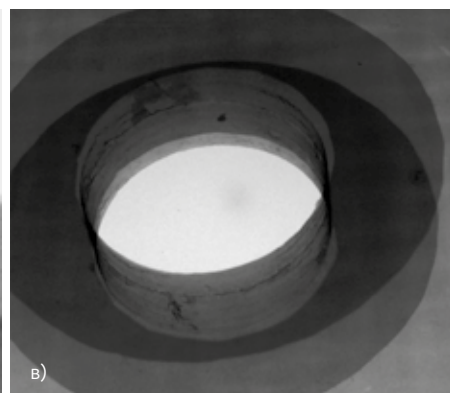
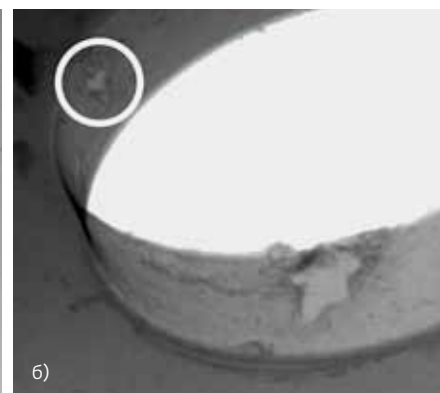
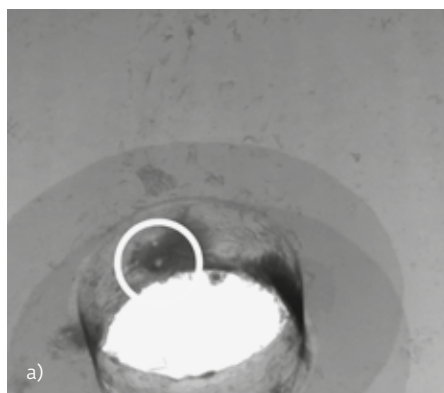


Рис. 9. Отсутствие металлизации отверстия: а – пустота; б – разрыв; в – трещина

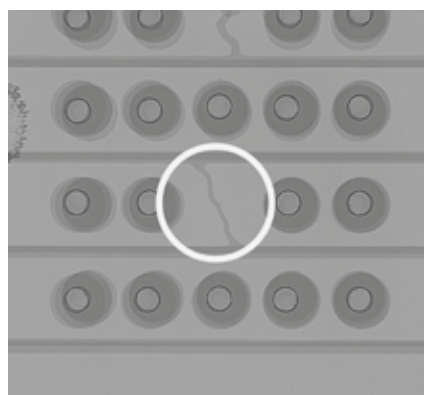


Рис. 10. Уменьшение зазора между проводниками

Рис. 11. Короткое замыкание проводников

Рис. 12. Заужение проводника

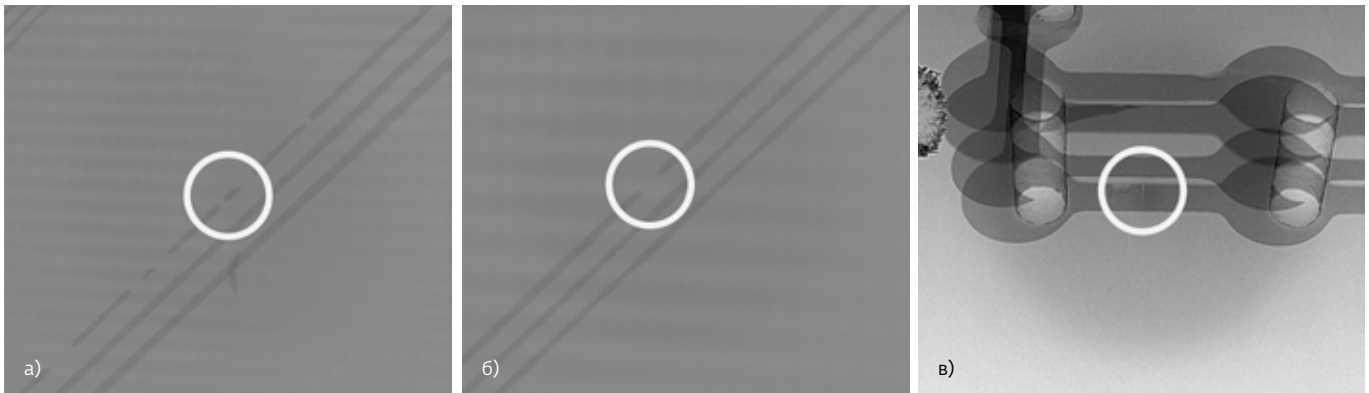


Рис. 13. Отсутствие металлизации проводника: а – протрав; б – разрыв; в – трещина

что потенциально вносит в процесс контроля возможность человеческой ошибки. Уровень квалификации, внимания, усталости оператора существенно влияет на такие факторы, как:

- способность оператора находить дефектные элементы среди большого количества объектов на снимке платы;
- способность оператора замечать малые дефекты;
- скорость обработки оператором одной платы (производительность контроля).

Процесс рентгеновского контроля достаточно длителен и трудоемок. Как упоминалось ранее, исследовать плату приходится не только отдельными участками, размер которых может составлять 1/100 всей платы и меньше, но и в нескольких проекциях. Например, для выявления микротрещины дорожки, представленной на рис. 14 [10], оператору необходимо сфокусировать внимание на данном соединении, увеличить масштаб и осмотреть проводник под нестандартным углом.

Программное обеспечение использованной установки рентгеновской инспекции предоставляет возможность частично автоматизировать процесс контроля, например, составить процедуру обхода ПП снимками по карте навигации или проанализировать снимок на наличие пустот в пайке шариков BGA-компонентов. Однако

функциональность полностью автоматизированного контроля дефектов контактных площадок, переходных отверстий и печатных проводников в данной системе не реализована.

Рентгеновский контроль действительно позволяет выявить многие дефекты электрических соединений плат, в том числе те, которые недоступны прямому или инструментальному осмотру и автоматической оптической инспекции. Однако у данного вида контроля имеется и ряд недостатков:

- анализ ПП целиком не выявляет множество малых дефектов, в то время как анализ ПП по участкам многократно увеличивает время контроля;
- рентгеновский контроль выявляет настолько малые дефекты элементов проводящего рисунка ПП, насколько позволяет точность установки (расстояние



Рис. 14. Рентгеновский снимок микротрещины в области перехода печатной дорожки в контактную площадку

ООО СМП

ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru

электронные компоненты для поверхностного монтажа

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Керамические конденсаторы до 100 мкФ
- Синфазные дроссели на ток 10 А

Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32; e-mail: sale@smd.ru
Тел.: (499) 158-7396, (495) 948-6244, (499) 943-8780

между трубкой и детектором, расстояние между трубкой и образцом, разрешение матрицы);

- тщательный анализ каждого элемента ПП требует индивидуальной настройки (использование различных информативных проекций, выбор параметров трубки, нормализация гистограммы);
- полноценная автоматизация процесса рентгеновского контроля в настоящее время невозможна, следовательно, производительность и эффективность рентгеновского контроля напрямую зависят от субъективного состояния оператора, ответственного за расшифровку полученных рентгеновских снимков;
- системы рентгеновской инспекции являются одним из самых дорогостоящих видов оборудования для контроля ПП.

Для задач, требующих высокой производительности при гарантированной надежности контроля и сравнительно небольшой стоимости оборудования, хорошей альтернативой рентгеновским установкам могут стать системы, также сфокусированные на металлических компонентах платы, с сопоставимой эффективностью в выявлении дефектов и с возможностью полной автоматизации – например, системы электрического контроля. В настоящее время в МАИ ведется разработка метода электрического диагностического контроля, нацеленного на ускорение за счет автоматизации процесса выявления крайне малых (скрытых) дефектов соединений ПП без задействования рентгеновской установки [10, 11]. Использование диагностического контроля для проверки плат на выходе с линий серийного/массового производства и рентгеновского контроля как средства углубленного исследования при запуске нового продукта и появлении брака позволит сократить трудозатраты и повысить надежность изготавливаемой продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Петров С.** Современный рентгеновский контроль электронных узлов // Печатный монтаж. 2009. № 4–5. С. 37–39.
2. ГОСТ Р 56251-2014. Платы печатные. Классификация дефектов. – М.: Стандартинформ, 2014. 107 с.
3. IPC-A-600H-RU: Критерии приемки печатных плат. – 157 с.
4. **Домени А. С., Новиков Н. А.** Диагностический контроль электрических межсоединений в электронных системах // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2013». Сборник тезисов докладов. – М.: МАИ, 2013. С. 225–226.
5. XD7600NT Ruby FP. X-ray Inspection System – New Specification / <http://www.nordson.com/~media/Files/Nordson/dage/Products/X-Ray-Inspection-Systems/XD7600NT-Ruby-FP/new-spec-ruby-fp.pdf>
6. **Гафт С.** Рентгеновский контроль – мощное средство для диагностики и локализации дефектов современных печатных узлов // Компоненты и технологии. 2004. № 6. С. 198–200.
7. **Зарипова Л. Д., Назипов Р. А., Храмов А. С.** Основы радиационного неразрушающего контроля. Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета. – Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2008. 66 с.
8. X-ray Dose Considerations – Application Note / <https://azcscxpprodcn.azureedge.net/~media/Files/Nordson/dage/Products/X-Ray-Inspection-Systems/Quadra%20Series/X-ray%20Dose%20DataSheet%202017.pdf>
9. **Krastev E., Scott P.** 2D X-Ray inspection With Materials and Thickness Identification // Proceedings of SMTA International. – SMTA, 2016. С. 470–475.
10. **Васильев Ф., Медведев А.** Выявление скрытых дефектов соединений // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2018. № 10. С. 94–97.
11. **Домени А.** Экспериментальная проверка метода диагностического контроля электрических соединений // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 2. С. 92–98.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1600 руб.

НАСТОЛЬНАЯ КНИГА ИНЖЕНЕРА

**ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСТРОЙСТВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДОВЫХ МЕТОДИК ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ**

Дансмор Джоэль П.

Издание осуществлено при поддержке компании Keysight Technologies

Пер. с англ. и науч. ред. Е. Ю. Харитонова, Е. В. Андропова, А. С. Бондаренко

Автор книги – инженер-разработчик векторных анализаторов цепей с более чем тридцатилетним стажем, работал над широчайшим кругом измерительных задач в СВЧ-диапазоне – от компонентов сотового телефона до спутниковых мультиплексоров. Задача этой книги – передать читателю знания и опыт автора, чтобы инженеры смогли повысить качество и эффективность выполнения научно-исследовательских и конструкторских работ, а также облегчить работу инженеров-метрологов.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2019. – 736 с.,
ISBN 978-5-94836-505-3

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphere.ru, sales@technosphere.ru