

УДК 621.365.5+621.397+621.37.037

ТЕПЛОВИЗИОННАЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ ТОПОЛОГИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПЛОСКОГО ВЧ-ИНДУКТОРА

М. С. Костин, Д. С. Воруничев

**Московский технологический университет (МИРЭА),
119454, Москва, проспект Вернадского, 78**

Статья поступила в редакцию 5 сентября 2017 г.

Аннотация. Исследована возможность применения индукционного метода тепловизионной электротермии (ТВЭТ) топологии печатных плат в целях проведения технических мероприятий неразрушающей дефектоскопии и спецпроектного реинжиниринга. Показано, что ТВЭТ-технология отличается избирательностью, безынерционностью, хорошей проникающей способностью, и при этом мало уступает техническим средствам рентгенографического анализа. Рассмотрены тепло- и радиофизические принципы ТВЭТ-технологии. Установлено, что варьируя геометрическим положением плоского индуктора относительно платы, временем теплоиндукционной выдержки, а также частотой и подводимой мощностью ВЧ-сигнала, можно добиться четкой и устойчивой термограммы топологии токопроводящих слоев в инфракрасном диапазоне 8...9,5 мкм.

Ключевые слова: ТВЭТ, ВЧ-индуктор, печатная плата, дефектоскопия, спецпроектный реинжиниринг.

Abstract. The possibility of using the induction method of termovision electrothermy (TVET) for the topology of printed circuit boards for the purpose of nondestructive testing and special design reengineering is investigated. It is shown that TVET-technology is distinguished by its selectivity, inertia, good penetrating ability, and at the same time it is inferior to the technical means of X-ray analysis. Thermal and radiophysical principles of TVET-technology are considered. It is established that by adjusting the geometrical position of the inductor relative to the board, the time of thermal induction holding, as well as the frequency and the input power of the HF-

signal, it is possible to achieve a clear and stable thermogram of the topology of conducting layers in the infrared range 8...9,5 μm .

Keywords. TVET, HF-inductor, PCB, defectoscopy, special design reengineering.

Введение

Решение целевого круга конструкторско-технологических задач современной диагностики в радиоэлектронной отрасли активно сопряжено с техническими средствами визуализации, требующей развития новых способов представления и обработки изображений в различных спектральных диапазонах, распознавания отдельных элементов и их высокоточной параметризации. Поэтому в высокотехнологичном производстве, эксплуатации и модификации радиоэлектронных средств (РЭС) одно из ключевых мест занимают идентификационная дефектоскопия и спецпроектный реинжиниринг изделий многослойных печатных плат (МПП).

Идентификационная диагностика направлена исключительно на обеспечение надежности и качества производства изделия техническими методами и средствами активного контроля. Спецпроектное исследование заключается в технической экспертизе печатного образца радиоэлектронного изделия и разворачивается обратным ходом в логическом порядке для выявления дефектов конструктивной топологии и ошибок технологических процессов, представляя реинжиниринг печатного узла по функционально-логическим, физическим и объемно-топологическим характеристикам, путем многопараметрического исследования, измерения и системно-целевого анализа конструктивных элементов для сбора и корректировки технических параметров и характеристик с целью создания модернизированного прототипного изделия на базе оригинального образца. При этом важно отметить, что функциональная идентификация схмотехнической топологии печатных модулей также является ключевым моментом при попутной реализации задач спецпроектного исследования и обеспечения технических мер защиты РЭС от преднамеренного копирования, поскольку без знания актуальных и потенциально возможных способов обратного

инжиниринга невозможна эффективная организация его техническому противодействию [1].

Экспертный реинжиниринг МПП позволяет не только послойно повторить оригинальность топологии рисунка, но и в высоковероятной степени воссоздать принципиальную схему радиоэлектронного узла. При этом наличие печатной платы в сборе с электроэлементной базой является необязательным условием, поскольку типизация посадочных мест электронной компонентной базы (ЭКБ) с определяемым числом выводов, топологией цепей обвязки по питанию, сигнальных шин, посадочных мест под дискретные элементы позволяют безошибочно определить принадлежность печатного узла к конкретному функциональному типу изделия по разводке МПП [1,2].

Так, среди методов активной диагностики и реинжиниринга МПП различают методы разрушающего и неразрушающего воздействия. К разрушающим методам относится послойная механообработка образца шлифованием. Данная технология не гарантирует отсутствие повреждений и фрагментарной утраты топологии рисунка МПП при плотной разводке, потому не является прогрессивной и применяется только в особых случаях, где исключается эффективность применения методов неразрушающего (бесконтактного) воздействия: ультразвуковое, оптическое, радиоволновое, рентгеновское [1,3].

Казалось бы, представленная классификация методов неразрушающего контроля является исчерпывающей. Однако разработка тепловизоров высокого разрешения послужила отличным поводом для применения ранее не изученного и впервые рассмотренного в данной работе метода тепловизионной электротермии (ТВЭТ) топологии МПП с целью реинжиниринга печатной топологии. Метод индукционной ТВЭТ отличается высокой избирательностью (точной локализацией), безынерционностью, хорошей проникающей способностью, является относительно дешевым и при этом мало уступает техническим средствам дорогостоящего оборудования рентгенографического анализа.

1. Тепло- и радиофизические принципы ТВЭТ-технологии

Тепловизионные камеры широко применяются в радиоэлектронной про-

мышленности, их эффективность доказана как на производстве, так и в системной диагностике. Так, инженеры и исследователи используют тепловизоры для различения небольших объектов неправильной формы и определения тепловых характеристик и температур на расстоянии. Поскольку многие процессы проектирования и производства РЭС характеризуются определенной тепловой картиной, проектировщики и контролеры качества используют инфракрасные камеры для быстрого выявления дефектов и контроля предельных параметров. Будь то печатные платы или даже целые радиоэлектронные устройства, инфракрасные камеры на производстве позволяют добиться максимальной производительности, избежать дорогостоящих отзывов изделия и проблем с техническим обслуживанием.

Основная задача ТВЭТ-технологии заключается в создании индукционного нагрева медных проводников МПП с целью термографического проявления рисунка печатной топологии, скрытой в слоях диэлектрического основания платы, в инфракрасном диапазоне при помощи тепловизора высокого чувствительного и матрично-пиксельного разрешения. Побочным электротермическим процессом здесь будет являться диэлектрический нагрев изолирующего основания МПП, инфракрасное излучение которого будет образовывать аддитивный тепловой шумовой фон.

Индукционный и диэлектрический электронагревы основаны на выделении тепловой энергии непосредственно в нагреваемом образце МПП, помещенном в переменное высокочастотное электромагнитное поле. Принцип индукционного нагрева проводников базируется на поглощении ими электромагнитной энергии при возникновении в нагреваемом образце наведенных вихревых токов Фуко и выделении тепла по закону Джоуля-Ленца в проводниках и токов смещения в диэлектриках с выделением тепловой энергии из-за влияния диэлектрических потерь.

Эквивалентная схема индуктора с облучаемым образцом образуют двухконтурный трансформатор: первичная обмотка эквивалентного трансформатора по отношению к нагреваемому образцу является индуктором переменного маг-

нитного поля; нагреваемый образец является вторичной обмоткой трансформатора, которая имеет один короткозамкнутый виток. Основным требованием, предъявляемым к ВЧ-индукторам в ТВЭТ-технологии, является применение конструкций открытого типа с целью нагрева МПП с одной стороны платы и тепловизионной термографии – с противоположной стороны диэлектрического основания. В качестве таковых могут использоваться два варианта конструкции маломощных индукторов открытого типа: магнитопроводные катушечные и плоские спиральные.

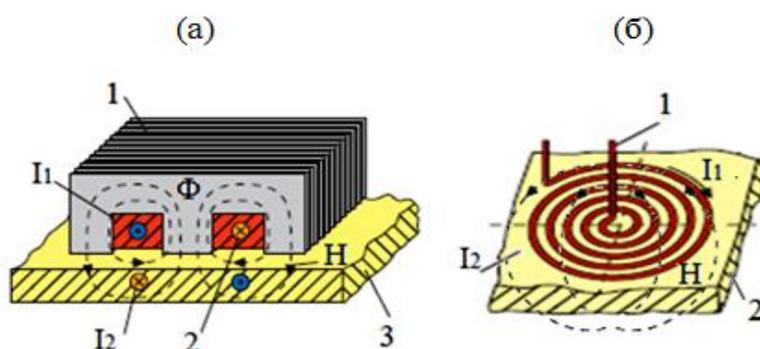


Рис.1. Конструкции ВЧ-индукторов открытого типа: (а) – магнитопроводный катушечный: 1 – магнитопровод, 2 – сечение катушки индуктора, 3 – образец; (б) – плоский спиральный: 1 – катушка плоского индуктора, 2 – образец. Здесь I_1 , I_2 – контурные токи соответственно, H – магнитная напряженность.

Так, используя магнитопровод конструкции типа швеллер, можно создать высокую концентрацию и локализацию силовых линий поля на заданной токопроводящей поверхности МПП. Однако применение плоского ВЧ-индуктора поверхностного нагрева обеспечивает более равномерное по площади нагревание образца облучаемого печатного изделия. Кроме того, конструкция является более облегченной и отличается простотой изготовления.

Таким образом, индукционный нагрев основан на использовании трех физических явлений: электромагнитной индукции, эффекте Джоуля и поверхностном эффекте. Так, магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой индуктора пропорционален его МДС и обратно пропорционален сопротивлению

магнитной цепи. При этом, возникающая в нагреваемом плоским индуктором образце ЭДС [4]:

$$E = 4,44\Phi n f \cdot 10^{-8}, \quad (1)$$

где Φ – магнитный поток, Вб; n – число витков плоского индуктора; f – частота электромагнитного колебания, Гц.

ЭДС вызвана изменяющимся во времени магнитным потоком Φ , который создается ближнем магнитным полем индуктора, проходя через образец МПП. Этот поток индуцирует напряжение и вихревые токи в проводящих слоях МПП. При известном значении сопротивления R нагреваемого образца МПП ЭДС обеспечивает возникновение в нем вихревого тока I_2 и выделение соответствующей мощности

$$P = I^2 R = E^2 R / z^2, \quad (2)$$

где z – полное сопротивление, Ом.

Глубина зоны циркуляции вихревых токов и, следовательно, зоны выделения энергии зависит не только от времени действия электромагнитного поля, но и от частоты тока индуктора (увеличивается при низких частотах и уменьшается с повышением частоты). Эффективность передачи энергии от индуктора к нагреваемому образцу также зависит от величины зазора между ними и повышается при его уменьшении.

Согласно поверхностному эффекту плотность вихревых токов внутри проводящего образца аналитически определяется выражением [4]:

$$S_x = S_0 \exp(-x / \delta), \quad (3)$$

где S_0 – плотность тока на поверхности, мА/мм²; δ – толщина «скин-слоя» или глубина проникновения вихревых токов; x – переменная координата.

Поскольку мощность нагрева пропорциональна квадрату плотности тока, ее распределение в медных слоях МПП по толщине будет иметь вид:

$$P_x = P_0 \exp(-2x / \delta), \quad (4)$$

Из приведенной зависимости можно заключить, что около 80% мощности нагрева создается именно в поверхностном слое печатной топологии δ , глуби-

на которого зависит от частоты f ВЧ-тока, удельного электрического сопротивления ρ и магнитной проницаемости μ медных проводников [4]:

$$\delta = \sqrt{\rho f \mu_0 \mu} / \pi, \quad (5)$$

где μ_0 – магнитная постоянная поля.

Как было отмечено ранее, побочным процессом индукционной ТВЭТ МПП является диэлектрический нагрев, обусловленный диэлектрическими потерями, связанными со сквозной электропроводностью и релаксационными видами поляризации.

Диэлектрические потери за счет эффекта электропроводности возникают в результате выделения тепла Джоуля при прохождении через диэлектрик сквозного тока. Причиной возникновения релаксационных диэлектрических потерь служат медленные виды поляризации: дипольно-релаксационная, ионно-релаксационная, миграционная, спонтанная. В результате энергия электрической компоненты переменного поля переходит в кинетическую энергию, что изменяет амплитуду и частоту колебания поляризующихся частиц, а избыточная энергия передается окружающим атомам среды, что эквивалентно нагреву диэлектрического основания МПП. Таким образом, при каждом изменении направления поля внутри диэлектрика генерируется некоторое количество тепла. Причем, чем выше частота и напряженность электрического поля электромагнитного колебания, тем больше тепла выделяется в диэлектрике за единицу времени. Так, удельная мощность (Вт/см^3), выделяемая в единице объема диэлектрика, может быть определена следующим образом [4]:

$$P_0 = 5,53 \cdot 10^{-11} E^2 f \varepsilon \operatorname{tg} \delta, \quad (6)$$

где E – электрическая напряженность поля, В/м; f – частота, Гц; ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала основания МПП; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь. Нетрудно заметить, что увеличение напряженности электрической компоненты поля в два раза ведет к увеличению выделяемой активной мощности в четыре раза. Поэтому электрическая напряженность поля является наиболее существенным параметром электротермического

воздействия на диэлектрические материалы, что возможно обеспечить только конденсаторной системой. Вследствие этого диэлектрический нагрев в индуктивной ТВЭТ-технологии будет носить, скорее, вторичный кодуктивный теплофизический характер.

Глубина проникновения электромагнитной волны в диэлектрическую среду δ_o определяется следующим соотношением [4]:

$$\delta_o = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{\varepsilon(\sqrt{1+tg^2\delta}-1)}}, \quad (7)$$

где λ – длина волны ВЧ-генератора, м.

Таким образом, побочный нагрев диэлектриков в ВЧ электромагнитном поле зависит от частоты, а также от величины электрической компоненты поля и диэлектрических свойств материала. При этом увеличение скорости нагрева диэлектрика достигается путем повышения электрической напряженности поля и частоты ВЧ-генератора. Поэтому ТВЭТ-технология МПП осуществляется питанием индуктора ВЧ-током малой мощности до 0,5 Вт и ограничивается частотой 30 МГц, в то время, как штатный диэлектрический нагрев проводится, обычно, с применением частот свыше 30 МГц. Отсюда топология МПП, идентифицируемая тепловизором, имеет четко очерченные контуры печатного рисунка в каждом слое и в явном виде выделяется на слабо выраженном тепловом фоне диэлектрического основания [1].

Для детального рассмотрения фрагментарных элементов топологии может быть использован способ нагревания печатных проводников контактным методом ВЧ-токами малой мощности.

Длину волны, регистрируемую камерой тепловизора и испускаемую нагретой поверхностью медного слоя образца МПП, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, можно оценить по закону смещения Вина: $\lambda_{max} = b/T$, где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$, T – излучаемая температура, К . Отсюда регистрация ИК-излучения образца МПП осуществляется в среднем диапазоне 8...9,5 мкм с чувствительностью $0,03^0\text{С}$, что соответ-

ствует температурному интервалу $+30\dots+80^{\circ}\text{C}$ при среднем нагреве образца около $+55^{\circ}\text{C}$, фоновом диэлектрическом нагреве до $+26^{\circ}\text{C}$ и температуре окружающего пространства $+22^{\circ}\text{C}$.

2. Реинжиниринговая диагностика печатных плат методом ТВЭТ в ближнем поле ВЧ-индуктора

Применение технологии ТВЭТ в задачах топологического реинжиниринга МПП априори исключает применение специальных средств разрушающего контроля и позволяет вести высокоточную диагностику в рамках аналитической дефектоскопии внутрислойных соединений и металлизированных отверстий МПП, как в ближнем магнитном поле ВЧ-индуктора, так и при помощи метода контактной генерации проводников ВЧ-токами. При этом интенсивность и длина инфракрасного свечения позволяют не только вести параметрическое прототипирование топологии печатного образца, но и оценивать такие дефекты МПП, как утоньшение проводников и внутренней боковой поверхности сквозных металлизированных отверстий, отсутствие контакта, нарушение геометрии в проводящем слое, обрыв проводника и т.д.

В качестве тепловизора в работе использовалась инфракрасная камера среднего спектрального диапазона $7,5\dots14$ мкм RAZ-IR PRO-2 с тепловой чувствительностью не хуже $0,03^{\circ}\text{C}$ (рис.2).



Рис.2. Тепловизионная камера RAZ-IR PRO-2 (вид общий).

Отличительной особенностью данного тепловизора является возможность подключения устройства к ноутбуку или планшетному устройству через ин-

терфейс USB 2.0 и штатное многофункциональное программное обеспечение, взаимодействующее со средой MatLab [5].

Экспериментальная установка, реализующая ТВЭТ-технологию, состоит из плоского индуктора катушечного типа из медной проволоки ММ-1 (1500 витков), ВЧ-генератора DS345, ВЧ-усилителя мощности, тепловизионной камеры RAZ-IR PRO-2, экспериментального образца МПП и планшета (рис.3).



Рис.3. Экспериментальная установка ТВЭТ: 1 – ВЧ-генератор, 2 – плоский индуктор, 3 – исследуемый образец МПП, 4 – тепловизор, 5 – планшет.

В результате воздействия магнитных полей, наводимых ВЧ-токами, происходит индукционный нагрев проводящих слоев на поверхности и внутри диэлектрического основания испытуемого образца МПП (рис.4).

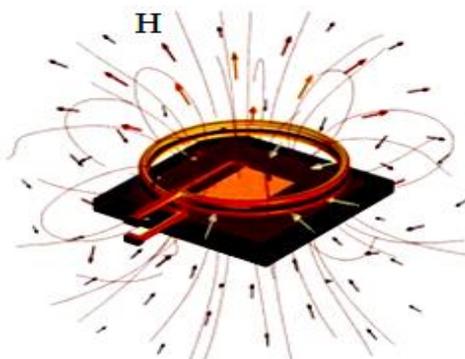


Рис.4. Образец МПП в магнитном поле плоского ВЧ-индуктора.

Исследования могут проводиться в двух режимах термографической регистрации: в фоновом и инверсном (рис.5). Инверсный режим является более

предпочтительным, поскольку катушка индуктора, а также диэлектрическое основание так или иначе образуют тепловое излучение, мешающее контрастному восприятию и распознаванию термографического изображения.

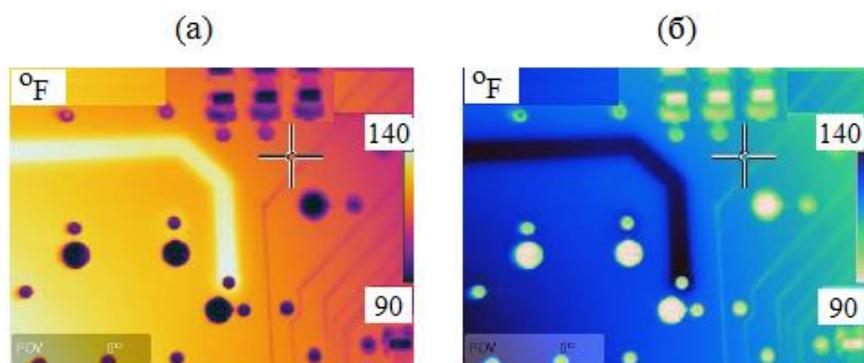


Рис.5. Графическое представление режимов термографической регистрации скрытого в диэлектрике участка печатного проводника контактным методом ТВЭТ: (а) – фоновый; (б) – инверсный.

На рис.6 представлены результаты ТВЭТ исследования образца 4-х слойной печатной платы в режиме инверсной тепловизионной регистрации.

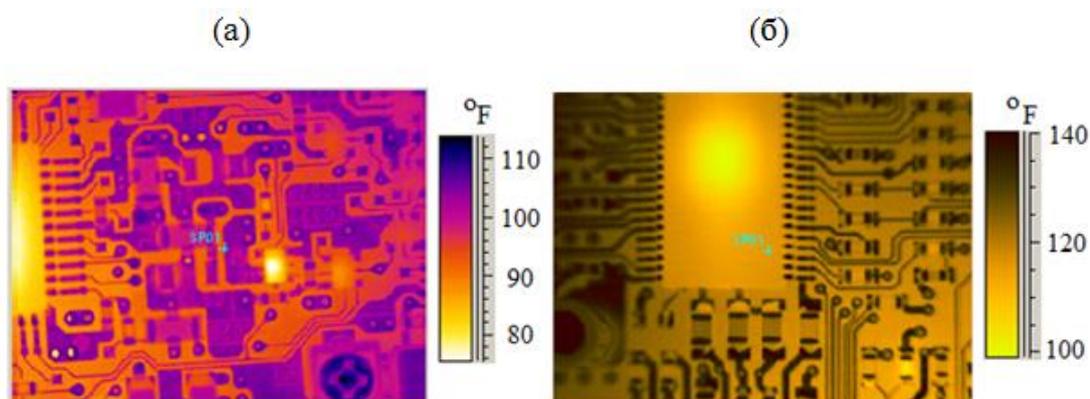


Рис.6. Инверсные термограммы топологии проводящих слоев МПП: (а) – ближний слой к индуктору; (б) – дальний слой к индуктору.

Регулируя положение индуктора относительно платы, время регистрации, а также подаваемую на него частоту и мощность ВЧ-сигнала, можно добиться термограммы, на которой нагретые слои МПП будут иметь высокоточное разделение, в том числе, достигаемое за счет средств термоградиентной фильтрации инфракрасного изображения [5].

Заключение

Тепловизионные камеры выполняют важную роль в производстве печатных плат на этапах проектирования, тестирования и репроектной модификации. При проектировании макетных изделий РЭС инфракрасные приборы находят применение для контроля тепловых характеристик ЭКБ. На этапе тестирования радиоинженеры применяют тепловидение для выявления отсутствующей или неправильной пайки, повреждения дорожек, флуктуаций между токоведущими проводниками, обратной полярности и неправильного размещения элементов, а также для исключения других недопустимых ошибок, вызывающих нагрев электрических цепей. Визуальное отображение и количественная оценка нагрева позволяют улучшать продукцию и применяемые технологии. ТВЭТ-технология, напротив, использует принцип побочного явления нагрева печатных проводников как положительную сторону с целью тепловизионного представления печатной топологии медных слоев, скрытых в диэлектрическом основании. ТВЭТ отличается избирательностью, безынерционностью, хорошей проникающей способностью, является относительно дешевым и при этом мало уступает техническим средствам дорогостоящего оборудования рентгенографического анализа. Кроме того, ТВЭТ-технология представляет научно-прикладной интерес, расширяя круг решаемых задач современных методов и средств технического противодействия спецпроектному прототипированию оригинальных конструкций печатных узлов РЭС.

Литература

1. Костин М.С., Воруничев Д.С. Спецпроектные реинжиниринговые исследования радиоэлектронных изделий // Российский технологический журнал [электронный ресурс], 2017. – Том 5, №4 – URL: https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/8bc/RTZH_4_2017_47_55.pdf . (дата обращения 01.09.2017).

2. Keng Tiong Ng. The Art of PCB Reverse Engineering (Standard Edition): Unravelling the Beauty of the Original Design. USA.: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. – 372 p.
3. Z. Guo, M. Tehranipoor, D. Forte , J. Di. Investigation of obfuscation-based anti-reverse engineering for printed circuit boards // Proceedings of the 52nd Annual Design Automation Conference (DAC). San Francisco, CA, USA. 8-12 June. T.Y.: IEEE, 2015. – pp. 93-98.
4. M.Vollmer. K.-P. Möllmann. Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications. – USA.: WILEY-VCH, 2011. – 612 p.
5. J. Varghese, T. Singh, S. Mohan. PCB Thermal Image Analysis using MATLAB // International Journal of Recent Advances in Engineering & Technology (IJRAET), Vol.2., №3, 2014, pp. 46-52.

Ссылка на статью:

М. С. Костин, Д. С. Воруничев. Тепловизионная электротермия топологии печатных плат в магнитном поле плоского ВЧ-индуктора. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/7/text.pdf>