

# Экспериментальная проверка метода диагностического контроля электрических соединений

А. Домени<sup>1</sup>

УДК 620.1.052:658.562.4:621.3.049.75:621.315.21 | ВАК 05.11.14

Метод диагностического контроля заключается в воздействии на проводники кратковременными импульсами тока большой величины, что позволяет диагностировать скрытые дефекты, недоступные для выявления другими методами электрического контроля.

Для подтверждения состоятельности метода необходимо разработать и изготовить платы с имитацией дефектов. Статья описывает процесс проектирования тестовых дорожек печатной платы, удовлетворяющих требованиям к проводникам со встроенным искусственным аналогом скрытого дефекта.

**В**опросы контроля электрических соединений остаются актуальными на протяжении уже многих лет. Постоянное увеличение плотности компоновки аппаратуры, стремление обеспечить наименьшие габариты приводят к все более часто встречающимся отказам аппаратуры из-за качества электрических соединений. В производство внедряются эффективные и дорогие методы контроля, но значительную часть скрытых дефектов, то есть имеющих, но еще не проявившихся (например, обрыв нескольких жил в кабеле, микротрещины в дорожке печатной платы, непрой соединений) существующие системы контроля выявлять пока не позволяют. Это связано, в первую очередь, с размерами дефектов, что не дает эффективно выявлять их как косвенными методами контроля (оптическая, рентгеновская инспекция), так и прямыми (функциональный, параметрический, прецизионный контроль). В процессе эксплуатации деструктивные факторы (вибрация, перепады температур, протекающий через соединение ток) могут привести к повышенной нагрузке на дефектный участок проводника и, как следствие, к разрушению соединения и выходу устройства из строя.

Одним из методов выявления скрытых дефектов электрических соединений является метод диагностического контроля [1], суть которого заключается в пропускании в течение короткого времени через контролируемую цепь тока, заведомо превышающего рабочий для этой цепи. При этом дефектный участок проводника нагревается значительно быстрее и сильнее, что приводит к резкому росту его сопротивления, которое может быть зафиксировано специальной аппаратурой. При использовании

данного метода возможны три варианта развития процесса нагрева (рис. 1): 1 – процесс развивается до установления теплового баланса, и температура устанавливается в значении  $T_{\infty}$ ; 2 – проводник нагревается с постоянным приростом температуры; 3 – лавинообразное нарастание температуры проводника, при этом за время  $t_p$  проводник достигнет температуры разрушения  $T_p$  [1].

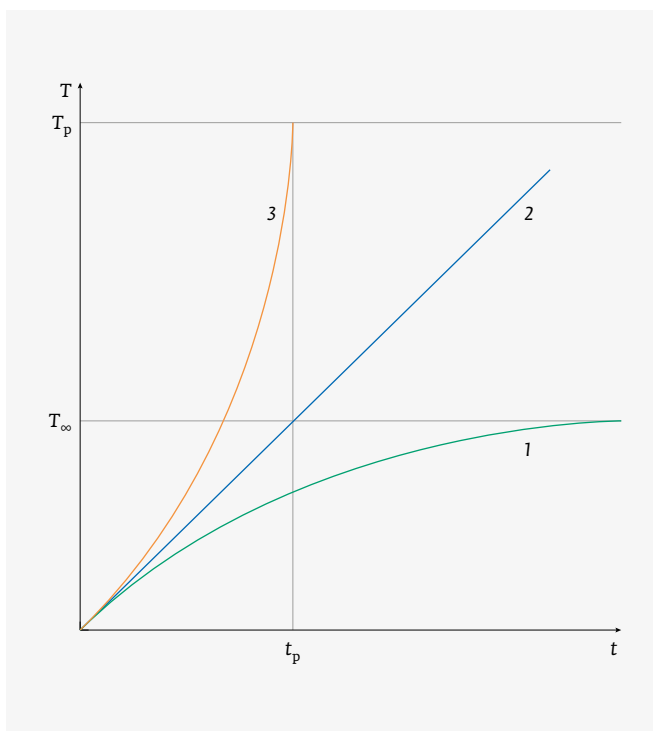


Рис. 1. Качественные характеристики нагружения цепей током

<sup>1</sup> МАИ (НИУ), аспирант, domeni.anton@mail.ru.

Основная идея метода диагностического контроля: используя кривую нарастания  $3$ , за время, значительно меньшее  $t_p$ , успеть выявить дефектный проводник по признаку более быстрого роста температуры, чем на бездефектном проводнике. Более подробно метод диагностического контроля описан в [1–4], где приводятся модели, подтверждающие его работоспособность.

Экспериментальное подтверждение работоспособности диагностического контроля требует разработки «эталонных дефектов». Методы намеренного получения скрытых дефектов, таких как микротрещины в печатных проводниках или перебитые жилы в кабелях, не являются очевидными и в литературе не описаны. Производить большое количество плат с проводниками в надежде на то, что некоторые из них окажутся с требующимися скрытыми дефектами в результате несовершенной технологии производства, представляется не самым эффективным подходом. Следовательно, для изготовления дефектного тестового проводника целесообразно спроектировать проводник (например, проводник на печатной плате) с искусственно встроенным аналогом (имитатором) скрытого дефекта.

Российский стандарт ГОСТ Р 56251-2014 и зарубежный IPC-A-600H-RU [5, 6] описывают различные дефекты печатных плат, включая дефекты подложки, покрытия, травления, металлизации, пайки и т. д. В рамках обсуждаемой темы нас, в первую очередь, интересуют скрытые дефекты в проводящем рисунке и электрических соединениях печатных плат, то есть в печатных дорожках, контактных площадках и переходных отверстиях. Для экспериментального подтверждения метода можно взять наиболее просто воспроизводимые дефекты печатных дорожек.

Основной отличительной чертой скрытых дефектов является тот факт, что размер дефектного участка во много раз меньше размера всего проводника. Согласно рис. 2, суммарное сопротивление проводника  $R_n$  со скрытым дефектом представляется в виде суммы сопротивления дорожки «до» дефектного участка ( $r_1$ ), сопротивления дефектного участка ( $r_d$ ) и сопротивления дорожки «после» дефектного участка ( $r_2$ ), приведенной в формуле (1) [4]:

$$R_n = r_1 + r_d + r_2. \quad (1)$$

Сопротивление медного проводника / участка  $R_0$ , Ом, рассчитывается по формуле (2) и формуле (3):

$$R_0 = \rho_{уд} \frac{l}{S}, \quad (2)$$

$$S = wh, \quad (3)$$

где  $l$  – длина проводника, м;  $S$  – площадь поперечного сечения,  $m^2$ ;  $\rho_{уд}$  – удельное сопротивление материала

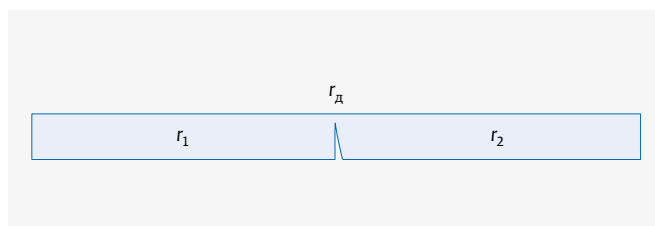


Рис. 2. Схематичное изображение печатного проводника с дефектом (трещиной)

проводника, Ом·м (для меди  $\approx 0,0175 \cdot 10^{-6}$  Ом·м);  $w$  – ширина проводника, м;  $h$  – толщина проводника, м.

С помощью приведенных выше формул можно представить условие для удовлетворительного сопротивления имитатора в формуле (4):

$$r_d \ll r_1 + r_d + r_2. \quad (4)$$

Выражение (4) означает, что сопротивление проектируемого имитатора скрытого дефекта должно быть во много раз меньше сопротивления проводника. Но формулировка «во много раз меньше» без дополнительных уточнений хотя бы о порядке разницы значений между левой и правой частью делает выведенное условие слишком нечетким. Стандарты ГОСТ 23752.1-92 и ГОСТ Р 55744-2013 [7, 8], представляющие классификацию методов электрического контроля по контролируемому компоненту печатных плат, задают максимальную суммарную погрешность измерения сопротивления проводника, равную 5%, стандарт ГОСТ Р 53429-2009 [9] дает допустимую погрешность параметров печатных проводников вплоть до 10 и даже более процентов. По сути это означает, что если сопротивление проводника лежит в пределах 5% от эталонного, то системами контроля проводник будет признан годным независимо от возможного наличия в нем скрытых дефектов. Выявление таких дефектов и является основной задачей диагностического контроля.

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) 940-6244, (499) 943-8780



**Рис. 3.** Рентгеновский снимок микротрещины в области перехода печатной дорожки в контактную площадку

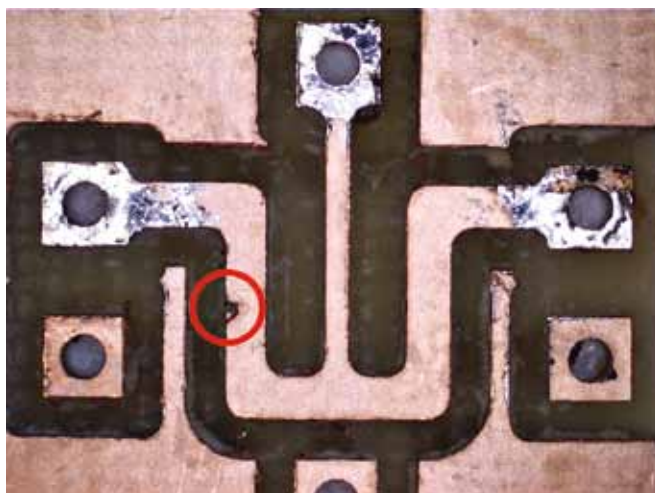
Дефекты дорожек печатных плат также можно разделить по видам [10]. Отфильтровав из общей классификации виды дефектов, которые не являются скрытыми для визуального осмотра (например, протрав/разрыв), можно выделить два основных вида скрытых дефектов дорожек по происхождению:

- вызванные внешними повреждениями – вмятина, царапина, вырыв, трещина;
- вызванные огрехами технологического процесса – утонение, утолщение, заужение, расширение.

При этом нужно понимать, что, в отличие от систем параметрического контроля, системы диагностического контроля не способны выявлять дефекты, «улучшающие» электрические характеристики проводника (утолщение, расширение и т. п.). Следовательно, можно сделать вывод, что имитаторы дефектов должны быть спроектированы и изготовлены таким образом, чтобы уменьшение сопротивления проводника за счет наличия дефекта не превышало 5% от эталонного сопротивления проводника.

Для проверки метода необходимо изготовить не только проводники с дефектами, но и бездефектные. Для признания тестового проводника бездефектным необходимо исследовать проводник с помощью существующего метода контроля, способного подтвердить отсутствие скрытых дефектов. Одним из таких методов является рентгеновский контроль. Данный вид контроля способен выявлять скрытые дефекты при высоком уровне квалификации и внимательности оператора, анализирующего рентгеновские снимки печатной платы. Пример рентгеновского снимка дефекта приведен на рис. 3 [4].

С точки зрения расчета сопротивления такие типы дефектов, как вмятины, вырывы, царапины, технически не

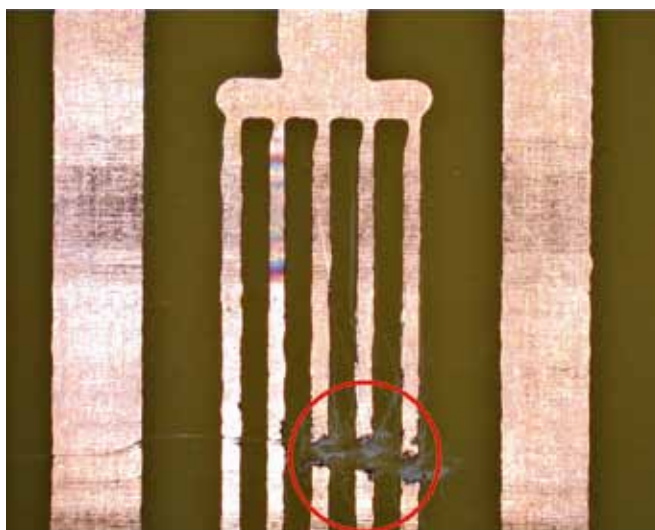


**Рис. 4.** Имитация скрытого дефекта дорожки (надрез)

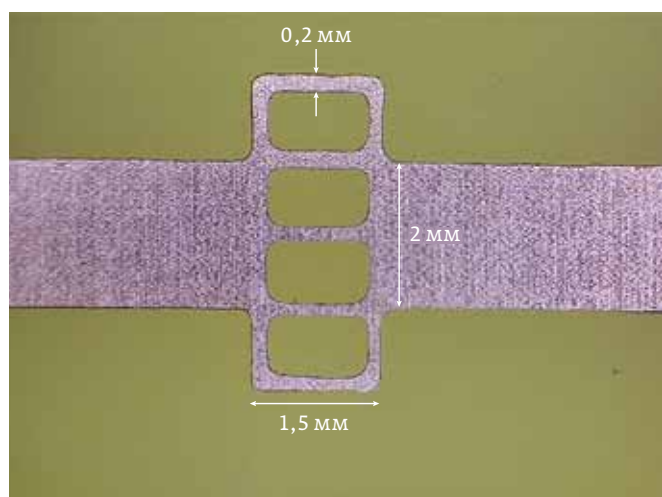
отличаются от трещин; таким образом, трещину можно использовать в качестве единого образца для имитации скрытого дефекта дорожки, вызванного повреждением.

Первым и очевидным подходом для имитации трещины является ручное нанесение физических повреждений (царапин) на дорожку с помощью любого острого предмета, например, скальпеля. Пример подобного имитатора представлен на рис. 4. Достоинство данного подхода лишь одно – простота в реализации. Основными его недостатками являются нестабильность результата и невозможность гарантированного соответствия требованиям к характеристикам дефекта.

Вторым подходом для имитации трещины является проектирование части дорожки в виде «гребенки» – разделение участка дорожки на несколько параллельных



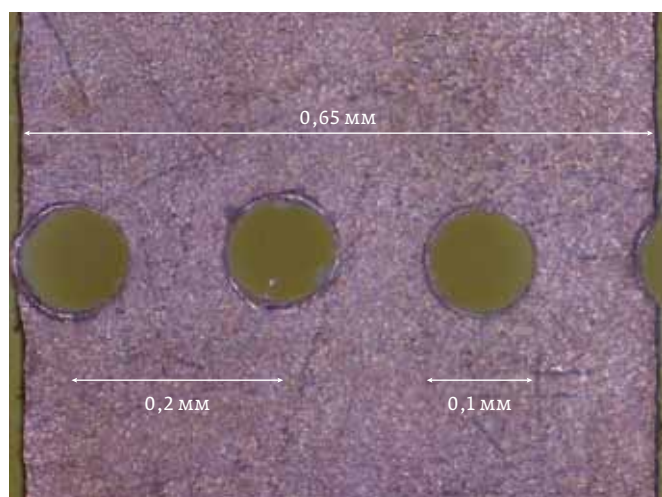
**Рис. 5.** Имитация скрытого дефекта дорожки («гребенка»)



**Рис. 6.** Тестовый проводник с «гребенкой», выполненный травлением

тонких дорожек с суммарной шириной, равной ширине остальной части дорожки. Пример подобного имитатора представлен на рис. 5. Эффект дефекта достигается с помощью ручного перерезания одной или нескольких тонких дорожек в «гребенке» [11].

Крупным достоинством данного подхода является возможность использования одного дефектного тестового проводника несколько раз, перерезая дополнительные тонкие дорожки в «гребенке», тем самым изменяя габариты и сопротивление дефекта. Данный подход позволяет исключить недостатки предыдущего – производство подобных проводников поддается автоматизации и позволяет точно контролировать размер повреждения дорожки, что удобно для проверки правильности математической модели метода диагностического контроля.



**Рис. 7.** Тестовый проводник с «гребенкой», выполненный сверлением

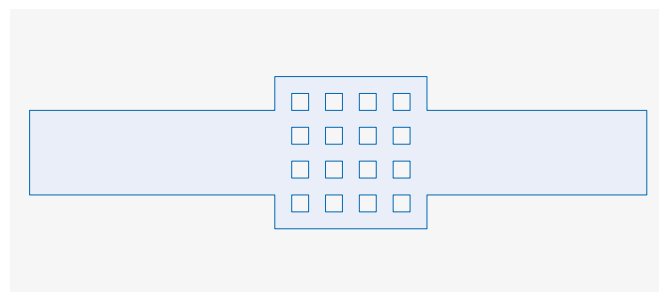
Однако за счет крайне малой длины трещина дорожки при перегреве имеет возможность отводить излишки тепла в окружающие участки проводника. С другой стороны, «гребенка» подобной длины при перегреве в первую очередь будет отводить излишки тепла в участки подложки между дорожками «гребенки». Следовательно, конструкция имитатора с подобными габаритами более характерна для локального утонения проводника в результате перетрава, чем для трещины. Для использования «гребенки» в качестве имитации трещины необходимо стремиться к максимальному уменьшению длины дефектного участка. Пример подобного имитатора представлен на рис. 6. При этом следует понимать, что, несмотря на соответствие требованиям по сопротивлению дефекта, длина дефектного участка значительно больше длины реально встречающихся трещин в проводниках и, значит, такие имитаторы не могут рассматриваться как полный эквивалент микротрещин в проводниках.

Травление дорожек с меньшими габаритами для приближения к габаритам реальных микротрещин в лабораторных условиях представляется затруднительным. Дополнительным улучшением процесса изготовления подобных имитаторов является использование сверления вместо травления. На рис. 7 приведен пример «гребенки», изготовленной с помощью автоматизированного сверления на программируемом станке.

Изготовление «гребенки» с помощью сверлильного станка позволяет получить длину «гребенки», сопоставимую с длиной реальных микротрещин (до 100 мкм), при этом она удовлетворяет условиям, предъявляемым к имитатору скрытого дефекта (микротрещины) дорожки печатной платы.

Для имитации дефектов типа утонения и заужения можно воспользоваться одним из имитаторов трещины, представленных на рис. 5, 6 и 7, увеличив длину «гребенки».

В свою очередь, удлинение «гребенки» позволит добавить поперечные соединения. Благодаря этому можно регулировать не только ширину (перерезая продольные



**Рис. 8.** Схема имитатора скрытого дефекта дорожки «решетка»



дорожки), но и длину имитатора дефекта (перерезая поперечные дорожки). Итоговая схема имитатора скрытого дефекта (заужения) дорожки печатной платы представлена на рис. 8.

Падение напряжения  $U$  на участке проводника печатной платы и разница падений напряжения между бездефектным тестовым проводником и дефектным тестовым проводником  $\Delta U$  рассчитываются по формулам (5) и (6):

$$U(l, S, I, t) = \frac{I \rho_{уд} l}{S} \left( 1 + \frac{\alpha I^2 \rho_{уд} t}{C_p S^2 - \alpha I^2 \rho_{уд} t} \right), \quad (5)$$

$$\Delta U = U_6(l_6, S_6, I, t) + U_d(l_d, S_d, I, t) - U_3(l_3, S_3, I, t), \quad (6)$$

где  $\rho_{уд}$  – удельное сопротивление материала проводника, Ом·м (для меди  $\approx 0,0175 \cdot 10^{-6}$  Ом·м);  $\alpha$  – температурный коэффициент электрического сопротивления материала проводника,  $K^{-1}$  (для меди  $\approx 0,004 K^{-1}$ );  $C_p$  – удельная теплоемкость материала проводника, Дж/(кг·К) (для меди  $\approx 385$  Дж/(кг·К));  $\rho$  – плотность материала проводника, кг/м<sup>3</sup> (для меди  $\approx 8940$  кг/м<sup>3</sup>);  $U_6$  – напряжение на бездефектном участке тестового дефектного проводника, В;  $l_6$  – длина бездефектного участка тестового дефектного проводника, м;  $S_6$  – площадь поперечного сечения бездефектного участка тестового дефектного проводника, м<sup>2</sup>;  $U_d$  – напряжение на дефектном участке тестового дефектного проводника, В;  $l_d$  – длина дефектного участка тестового дефектного проводника, м;  $S_d$  – площадь поперечного сечения дефектного участка тестового дефектного проводника, м<sup>2</sup>;  $U_3$  – напряжение на тестовом бездефектном (эталонном) проводнике, В;  $l_3$  – длина тестового бездефектного (эталонного) проводника, м;  $S_3$  – площадь поперечного сечения тестового бездефектного (эталонного) проводника, м<sup>2</sup>;  $I$  – сила тока, А;  $t$  – длительность импульса, с.

Результаты (расчетные и экспериментальные) измерения разницы падений напряжения при испытаниях прототипа устройства диагностического контроля на тестовых проводниках, изготовленных согласно представленным ранее условиям и схемам, приведены на рис. 9. Расчеты и эксперименты проводились на трех тестовых проводниках, изготовленных по описанным выше схемам, со следующими параметрами:

1. Дорожка с имитатором «надрез»:
  - габариты бездефектной части дорожки:  $l_6$  = неизвестно;  $S_6 = 0,07$  мм<sup>2</sup>;
  - габариты дефектной части дорожки:  $l_d$  = неизвестно;  $S_d$  = неизвестно;
  - габариты эталонной дорожки:  $l_3 = 500$  мм;  $S_3 = 0,07$  мм<sup>2</sup>.

Так как надрез производится вручную, достаточно точно измерить его габариты для проведения расчета невозможно, поэтому на рис. 9 для данного имитатора представлены только экспериментальные результаты.

2. Дорожка с имитатором «гребенка» (травление):
  - габариты бездефектной части дорожки:  $l_6 = 499,1$  мм;  $S_6 = 0,07$  мм<sup>2</sup>;
  - габариты дефектной части дорожки:  $l_d = 0,9$  мм;  $S_d = 0,027$  мм<sup>2</sup>;
  - габариты эталонной дорожки:  $l_3 = 500$  мм;  $S_3 = 0,07$  мм<sup>2</sup>.
3. Дорожка с имитатором «гребенка» (сверление):
  - габариты бездефектной части дорожки:  $l_6 = 499,7$  мм;  $S_6 = 0,07$  мм<sup>2</sup>;
  - габариты дефектной части дорожки:  $l_d = 0,3$  мм;  $S_d = 0,009$  мм<sup>2</sup>;
  - габариты эталонной дорожки:  $l_3 = 500$  мм;  $S_3 = 0,07$  мм<sup>2</sup>.

Все расчеты и эксперименты проводились при силе тока  $I$ , равной 42,6 А, и длительности импульса  $t$ , равной 5 мс.

Из полученных графиков можно сделать следующие выводы:

- заданные габариты и сопротивление изготовленного имитатора «гребенка» (травление) оказались

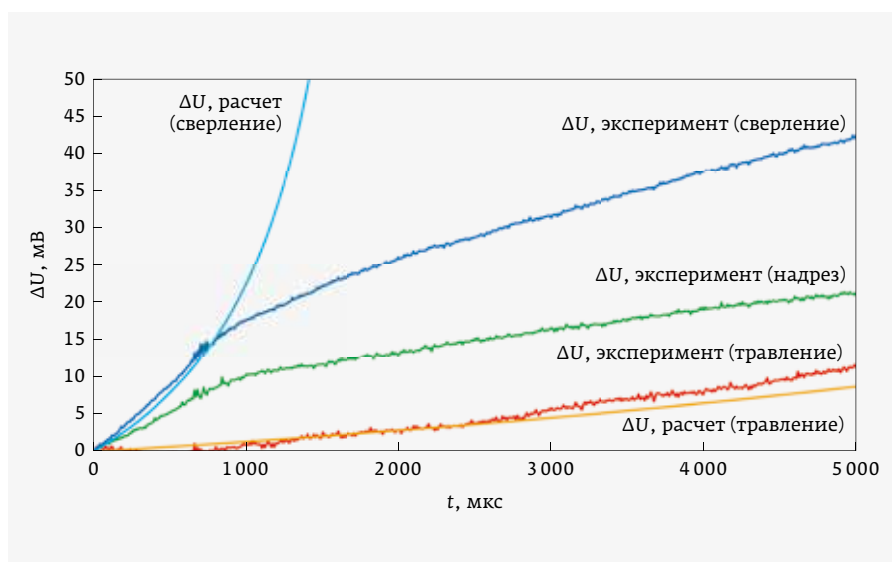


Рис. 9. Разница падений напряжения (расчетная и экспериментальная) для различных тестовых проводников



Международная выставка  
технологий, оборудования и материалов  
для производства изделий электронной  
и электротехнической промышленности

Ваш компонент успеха!



**14-16 апреля 2020**

Москва  
МВЦ «Крокус Экспо»



**457**

участников  
из 17 стран

**200+**

единиц  
технологического  
оборудования



Получите бесплатный билет  
по промокоду  
**ee20pAIEI**

\*Совместно с выставкой



**E-X-P-O  
ELECTRONICA**

[electrontechexpo.ru](http://electrontechexpo.ru)



+7 (499) 750-08-28  
[electron@hyve.group](mailto:electron@hyve.group)  
[www.hyve.group](http://www.hyve.group)

Только для специалистов

слишком малыми для наглядного выявления дефекта при данном значении силы тока;

- заданные габариты и сопротивление изготовленного имитатора «ребенка» (сверление) позволяют с легкостью выявить дефект при данном значении силы тока;
- использованный имитатор с простым надрезом имеет такой же характер роста температуры, сопротивления и падения напряжения, как и более сложные имитаторы;
- для всех использованных имитаторов приблизительно в районе 1 мс отчетливо видно изменение характера графика: смена лавинообразного нарастания температуры проводника по кривой 3 рис. 1 (по сути, адиабатического процесса нагрева) на более плавный рост температуры с отдачей тепла в окружающую среду;
- расчетные и экспериментальные значения (за исключением надреза) практически совпадают в течение адиабатической стадии процесса нагрева.

Полученные графики наглядно подтверждают следующие гипотезы:

- вид и габариты имитатора скрытого дефекта дорожки печатной платы не влияют на характер, но влияют на скорость прироста разницы падений напряжения (и, соответственно, падения напряжения, сопротивления и температуры) на тестовых проводниках;
- математическая модель диагностического контроля (формулы (5) и (6)) подтверждается данными, полученными эмпирическим путем, с допустимой погрешностью;
- адиабатический процесс, требующийся для осуществления диагностического контроля, заканчивается в районе 1 мс, что устанавливает новые временные ограничения, дополнительно к описанным в [4].

Изготовление тестовых бездефектных и дефектных образцов является необходимостью для проверки

работоспособности любых методов контроля. Рассмотренный в статье процесс проектирования имитатора скрытых дефектов печатных проводников для проверки прототипа устройства диагностического контроля может быть использован в качестве примера при проектировании имитаторов соответствующих дефектов для других методов контроля.

В свою очередь, результат проектирования – итоговая схема имитатора скрытых дефектов проводников печатных плат – подтвердил свою состоятельность расчетным и экспериментальным способами, а значит, может быть использован не только при разработке новых, но и при проверке на достоверность уже существующих (например, прецизионного) методов контроля печатных плат.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Васильев Ф. В., Медведев А. М., Сокольский М. Л.** Диагностический контроль электрических соединений в авионике // Практическая силовая электроника. 2013. № 1 (49). С. 42–44.
2. **Васильев Ф. В., Медведев А. М., Сокольский М. Л.** Расчет токовой нагрузки для диагностического контроля электрических соединений в авионике // Практическая силовая электроника. 2013. № 2 (50). С. 45–48.
3. **Васильев Ф. В., Медведев А. М., Сокольский М. Л.** Источник тока для диагностического контроля электрических соединений в авионике // Практическая силовая электроника. 2013. № 3 (51). С. 54–56.
4. **Васильев В., Медведев А.** Выявление скрытых дефектов соединений // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2018. № 10. С. 94–97.
5. ГОСТ Р 56251-2014. Платы печатные. Классификация дефектов. – М.: Стандартинформ, 2014. 107 с.
6. IPC-A-600H-RU: Критерии приемки печатных плат. – 157 с.
7. ГОСТ 23752.1-92. Платы печатные. Методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1992. 58 с.
8. ГОСТ Р 55744-2013. Платы печатные. Методы испытаний физических параметров. – М.: Стандартинформ, 2014. 24 с.
9. ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. – М.: Стандартинформ, 2010. 11 с.
10. **Данилова Е. А.** Классификация дефектов печатных плат // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – П.: Изд-во ПГУ, 2013. Т. 1. С. 325–328.
11. **Домени А. С., Кочетков А. И.** Анализ результатов практического исследования метода диагностического контроля электронных соединений // XLIV международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения – 2018». Сборник тезисов докладов. – М.: МАИ, 2018. Т. 2. С. 155–156.

Санкт-Петербург, Россия  
ул. Матроса Железняка,  
д. 57, лит. А, пом. 126-Н  
Телефон: 7-812-3259192

Москва, Россия  
Лужнецкая набережная, 2/4,  
строение 19, офис 119  
Телефон: 7-095-7477590

**VITAL-IC**

Поставки электронных компонентов  
широкой номенклатуры  
Системы RFID: поставка и консультации

**XILINX** **Mini-Circuits**  
**ALTERA**





МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ



# ЭЛЕКТРО

29-я международная выставка  
«Электрооборудование. Светотехника.  
Автоматизация зданий и сооружений»

## 8–11.06.2020

Россия,  
Москва

ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»,  
Краснопресненская наб., 14

Павильон №2  
(залы 1, 2)

[www.elektro-expo.ru](http://www.elektro-expo.ru)



6G ЭКСПОЦЕНТР

12+



Реклама



ЭЛЕКТРО  
МАРКЕТ

ВАЖНЫЕ СВЯЗИ  
ДЛЯ ВАЖНЫХ ДЕЛ



ЭЛЕКТРО  
TALK

РАЗГОВОРЫ  
С ТОЛКОМ



ЭЛЕКТРО  
SKILLS

ПРОКАЧАЙ НАВЫКИ  
И КОМПЕТЕНЦИИ