

Обзор методов электрического контроля печатных плат

А. Домени¹

УДК 621.3.049.75::620.179.14.02::658.562.4 | ВАК 05.11.14

Обеспечение надежности электронной аппаратуры уже много лет остается одним из важнейших вопросов при ее проектировании и производстве. Увеличение объемов производства, усложнение устройств приводят к росту выявляемых случаев брака при эксплуатации. Для минимизации связанных с этим потерь в производство внедряются все более интеллектуальные и высокотехнологичные виды контроля. Одним из наиболее уязвимых с точки зрения производственного брака компонентов электронной аппаратуры являются печатные платы (ПП). В статье рассматриваются различные методы электрического контроля, направленные на выявление дефектов электрических соединений ПП, и их особенности.

Большая часть применяемых на практике методов контроля качества печатных плат классифицирована и описана в нормативной литературе, в частности, в российских стандартах ГОСТ 23752.1-92, ГОСТ Р 55744-2013 и в зарубежном стандарте IPC-TM-650 [1, 2, 3]. Стандарты классифицируют различные виды контроля по принципу взаимодействия с тестовым образцом (оптическое, механическое, электрическое, химическое и т. д.). Согласно ГОСТ Р 56542-2019, электрический неразрушающий контроль – это вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с объектом контроля или возникающего в объекте контроля в результате внешнего воздействия [4]. Одним из наиболее важных достоинств электрического контроля является возможность его применения для испытаний многослойных печатных плат (МПП), в то время как большинство близких к электрическому видов контроля (например, магнитопорошковый) такой возможности не дает.

В современном производстве плат наиболее распространены функциональный и параметрический электрический контроль. Функциональный контроль проверяет логику работы устройства, то есть способность устройства выполнять свои целевые функции. Применительно к печатным платам такой метод контроля проверяет соответствие или несоответствие монтажных соединений заданной электрической схеме – то, что на профессиональном сленге электриков называется «прозвонкой». Функциональный контроль позволяет проверить исключительно способность устройства выполнять заданные электрической схемой функции и выявить грубые дефекты производства, фактически, только короткие замыкания или

обрывы проводников. Данный метод контроля не нуждается в сложном программном обеспечении, так как результатом проверки является простейшее бинарное соответствие или несоответствие ожидаемому наличию или отсутствию соединения между точками контакта измерительного инструмента с тестируемой платой.

В отличие от функционального, параметрический контроль проверяет не выполнение устройством функций, а соответствие параметров устройства (от простых статических характеристик – например, уровня выходных сигналов, до динамических – например, сдвига фаз или задержки сигнала) техническим требованиям. Основным параметром, контролируемым в платах, является сопротивление проводников (для высокочастотных цепей часто требуется измерение волнового сопротивления, или импеданса). Параметрический контроль требует значительно больше времени и более сложного оборудования, чем функциональный. Частным случаем параметрического контроля является прецизионный контроль, который за счет современных дорогостоящих измерительных систем (например, установок, реализующих четырехзондовый метод измерения Кельвина) способен измерять сопротивление порядка микроом, что существенно точнее большинства устройств обычного параметрического контроля.

Параметрический и прецизионный контроль позволяют выявлять значительно больше дефектов печатных проводников и переходных отверстий, чем функциональный контроль, таких как утонения (углубление, вмятина, царапина, раковина), заужения, неметаллизированные участки (вырыв, протрав, трещина) и т. д. Однако даже высокоточные установки прецизионного контроля не способны выявлять скрытые дефекты – дефекты, которые в момент испытания не фиксируются с достаточной достоверностью как несоответствие электрической

¹ МАИ, аспирант, domeni.anton@mail.ru.

схеме или изменение характеристик соединений существенно установленных для них производственных допусков. Возможности установок электрического контроля по выявлению дефектов представлены в табл. 1 [5].

Выявлению скрытых дефектов посвящено множество исследований, однако промышленной реализации ни одно из них пока не получило. Выявление подобных дефектов может быть основано на разных принципах, например на измерении неравномерности амплитудно-частотной характеристики проводника, импеданса, на эхо-тестах и т.д. Главная проблема подобных реализаций – невозможность выявления дефектов на малой длине проводника, например при проверке перемычки, соединяющей две соседние контактные площадки для поверхностного монтажа интегральных микросхем. Другим подходом для выявления скрытых дефектов является рентгеновский контроль, однако в качестве способа 100%-ной проверки МПП он требует больших затрат; кроме того, он слабо поддается автоматизации и вследствие этого малопроизводителен и требует высокой квалификации оператора [6].

Таблица 1. Технические возможности установок электрического контроля печатных плат

Тип выявляемого дефекта	Установки функционального контроля	Установки параметрического и прецизионного контроля ¹
Обрывы	+	+
Короткие замыкания	+	+
Микротрещины в переходных отверстиях	-	0-100%
Перетравы проводников	-	0-100%
Микротрещины и ослабленные места проводников	-	~2-70%

¹ Выявляемость таких дефектов, как микротрещины или перетравы, зависит от размеров дефекта в каждом конкретном случае и от точности измерительного оборудования конкретной рассматриваемой установки.

Таблица 2. Параметры печатных плат и испытания, установленные нормативными документами для их контроля

Контролируемый параметр	Испытания элементов печатной платы	
	ГОСТ 23752.1-92	ГОСТ Р 55744-2013
Сопротивление	Сопротивление проводников	Контроль сопротивления проводников
	Сопротивление межслойного соединения	Контроль сопротивления межслойного соединения
	Изменение сопротивления сквозных металлизированных отверстий	Контроль сопротивления сквозного металлизированного отверстия
Электрическая целостность	Короткое замыкание	Контроль коротких замыканий
	Целостность цепи	Контроль целостности электрической цепи
Испытание током	Испытание током на сквозных металлизированных отверстиях	Испытание током сквозных металлизированных отверстий
	Испытание током на проводниках	Испытание током проводников
Сопротивление изоляции	Сопротивление изоляции на наружных слоях	Сопротивление изоляции на наружных слоях печатной платы
	Сопротивление изоляции на внутренних слоях	-
	Сопротивление изоляции между слоями	Сопротивление изоляции между слоями печатной платы
Электрическая прочность	Электрическая прочность наружных слоев	Электрическая прочность изоляции наружных слоев печатной платы
	Электрическая прочность между слоями	Электрическая прочность изоляции между слоями печатной платы
Уход частоты	Полное входное сопротивление (импеданс) схемы	Импеданс

Еще одним методом электрического контроля, который в данный момент находится в разработке в МАИ и пока не доведен до промышленного производства, является диагностический контроль. Диагностический контроль изначально создавался как технология для выявления скрытых дефектов, не поддающихся детектированию с помощью функционального, параметрического и прецизионного контроля. Основанный на общих принципах и алгоритме работы электрического контроля, он пригоден для тестирования проводников любой длины и легко поддается автоматизации. Идея диагностического контроля состоит в нагружении контролируемого соединения мощным импульсом тока, заведомо превышающим предельно допустимые для проводника значения. Такой импульс вызовет мгновенный и сильный разогрев дефектного участка, что увеличит его сопротивление, падение напряжения на проводнике в целом и таким образом позволит выявить дефект в случае его наличия [7, 8].

Для создания промышленной установки диагностического контроля были проанализированы существующие классификации и используемые алгоритмы испытаний, структуры установок и технологии систем электрического контроля с целью определить и использовать отработанные основные общие черты функционального, параметрического и прецизионного контроля.

Список параметров печатных плат, проверяемых средствами электрического контроля, в сопоставлении с перечнем электрических испытаний плат, установленным нормативными документами, приведен в табл. 2; возможности каждого из описанных выше методов контроля по проверке этих параметров – в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что функциональный, параметрический и диагностический методы позволяют проверить все параметры печатной платы, контроль которых предусмотрен нормативными документами. Анализ этих методов показывает, что алгоритм проведения электрического контроля можно в упрощенном виде представить как последовательность универсальных шагов, показанную на рис. 1. Наличие упрощенного универсального алгоритма

Таблица 3. Возможности методов электрического контроля по проверке параметров печатной платы

Метод контроля	Контролируемый параметр
Функциональный	Электрическая целостность
	Сопротивление
Параметрический	Сопротивление изоляции
	Уход частоты
Диагностический	Испытание током
	Электрическая прочность

означает, что архитектура установок, реализующих любой метод электрического контроля соединений ПП, может быть также представлена в упрощенном универсальном виде (рис. 2).

Такие элементы обобщенной архитектуры установки электрического контроля, как система управления и источник импульса, с точки зрения реализации достаточно просты. Под импульсом в данном случае понимается любое воздействие на проводник: переменным или постоянным током, короткое или продолжительное. Характер воздействия зависит от применяемого метода контроля. Так, например, для функционального контроля можно использовать постоянное напряжение с контролем факта протекания тока, а для диагностического контроля потребуется воздействие на цепь постоянным током большой величины, но малой длительности с контролем падения напряжения на проводнике.



Рис. 1. Универсальный алгоритм электрического контроля печатных плат

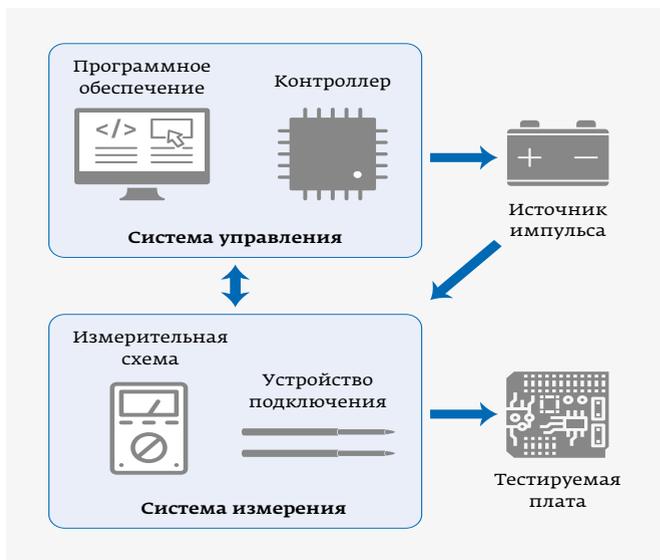


Рис. 2. Обобщенная архитектура установки электрического контроля печатных плат

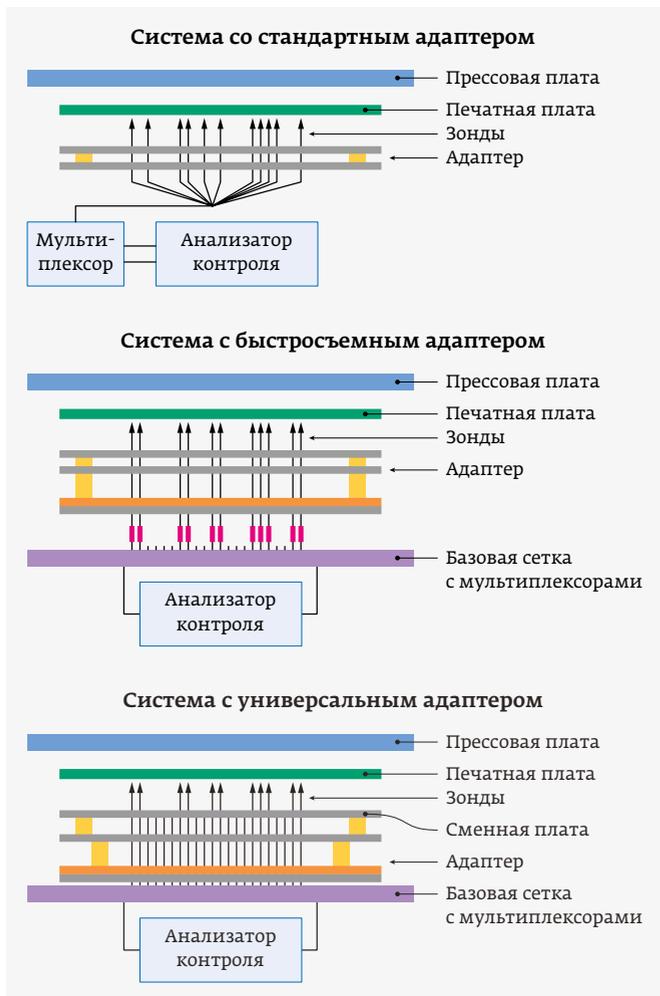


Рис. 3. Схема контакта «ложе гвоздей»

Одним из самых ответственных компонентов установки контроля являются система измерения и особенно входящее в нее устройство подключения / контакта с ПП: контакт должен обеспечить требуемые для соответствующего метода контроля параметры – например, минимальное падение напряжения или пропускание тока достаточной силы. Основными задачами устройства подключения являются:

- подача импульса тока на тестируемую плату;
- замер необходимых для контроля электрических характеристик во время импульса.

Исходя из этого, основными требованиями к испытательным щупам (зондам/тестерам), с помощью которых реализуется на практике устройство подключения, являются:

- обеспечение достаточно надежного контакта с поверхностью платы;
- возможность контакта с платой в точках с заданными координатами.

Обеспечение достаточно надежного контакта зондов с поверхностью платы описано в стандартах ГОСТ 23752.1-92 и ГОСТ Р 55744-2013 в форме указания необходимого усилия прижатия (для большинства методов порядка 1 Н) и предложения возможной схемы средств подключения. При этом, в зависимости от вида

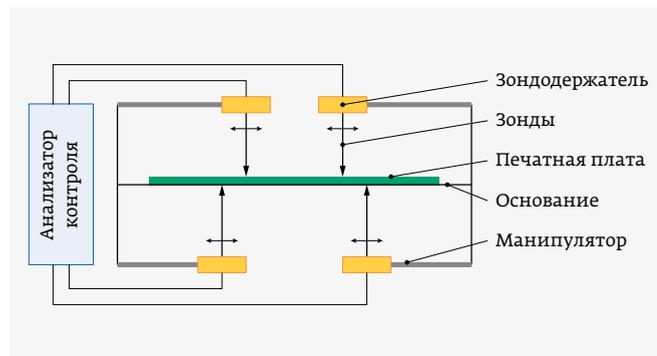


Рис. 4. Схема контакта «летающие щупы»

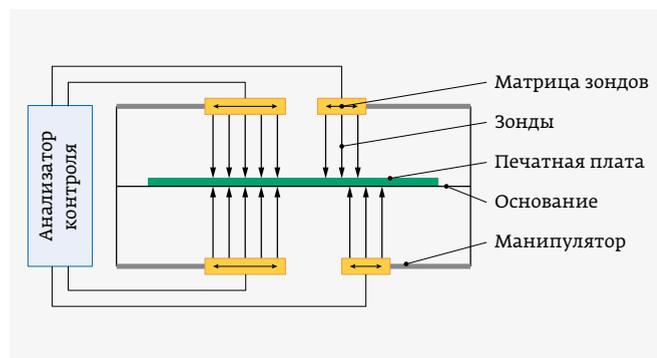


Рис. 5. Схема контакта «летающие матрицы»

контроля, требования к надежности контакта могут быть различными. Для осуществления контакта зондов с платой в точках с заданными координатами используется несколько технологий [9]:

- ручная – оператор прикладывает зонды к контролируемым участкам;
- матричная («ложе гвоздей», bed of nails, рис. 3) – испытываемая плата располагается на соединительном устройстве (адаптере) с подпружиненными зондами во всех узлах координатной сетки с заданным стандартизированным интервалом и прижимается к зондам прессовой платой;
- последовательная («летающие щупы», flying probes, рис. 4) – зонды передвигаются по трем осям согласно командам от управляющего устройства и прижимаются к плате в координатах, задаваемых программой тестирования;
- комбинированная («летающие матрицы», flying grids, рис. 5) – технология, аналогичная «летающим щупам», однако вместо одиночных зондов на подвижных манипуляторах смонтированы матрицы зондов, каждый из которых также имеет независимый привод по оси Z.

Производительность электрического контроля зависит от уровня автоматизации и скорости переналадки используемого устройства подключения. Например, подключение с помощью «ложе гвоздей» позволяет установке контроля контактировать с тестируемой платой во множестве контрольных точек адаптера одновременно, обеспечивая возможность подачи импульсов тока в различные соединения с минимальными паузами. Однако для контроля платы с топологией, расходящейся с картой контрольных точек, адаптер требует длительной переналадки. В противоположность этому, подключение с помощью «летающих щупов» не требует переналадки при переходе между платами с различной топологией, но его производительность гораздо меньше вследствие необходимости перемещения щупов между заданными точками контакта с платой.

Для установок диагностического контроля, подающих импульсы тока большой силы, требования к контакту с платой особенно жесткие. Плохое соединение между щупами и контактными площадками может быть ошибочно распознано как дефект; кроме того, оно может вызвать сильный нагрев и, как следствие, повреждение контактной площадки.

Измерительная схема должна быть способна не только пропускать ток большой силы, но и измерять падение напряжения на контролируемом соединении с высокой точностью и скоростью. Одним из возможных решений для проектирования системы измерения установки диагностического контроля является использование технологии «ложе гвоздей» в комбинации с мостовой схемой измерения.

Дополнительной сложностью диагностического контроля, отличающей его от функционального и параметрического, является риск разрушения контролируемого соединения и окружающих материалов. Дефектный участок при испытании способен нагреться до разрушающих температур, а при перегорании контролируемого соединения есть вероятность, что ток пойдет по другой цепи, не предназначенной для подобных нагрузок. Чтобы предотвратить такие ситуации, необходимо проектировать систему управления установки диагностического контроля (программное обеспечение и контроллер) с учетом обратной связи от системы измерения и возможности немедленного прекращения подачи тока при получении с измерительной схемы значений, приближающихся к критическим.

Если выполнены приведенные выше ужесточенные требования, то установка диагностического контроля способна работать согласно общим основам и принципам электрического контроля. Создание установки диагностического контроля возможно благодаря существующей теоретической и аппаратной базе, и доведение такого метода электрического контроля до промышленной реализации позволит существенно улучшить глубину выявления дефектов электрических соединений печатных плат и повысить надежность аппаратуры в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 23752.1-92. Платы печатные. Методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1992. 58 с.
2. ГОСТ Р 55744-2013. Платы печатные. Методы испытаний физических параметров. – М.: Стандартинформ, 2014. 24 с.
3. IPC-TM-650: Руководство по испытательным методам. 1306 с.
4. ГОСТ Р 56542-2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.
5. **Карпов С. В.** Прецизионный контроль печатных плат. Что это? // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 7. С. 36–40.
6. **Васильев Ф. В., Домени А. С.** Особенности рентгеновского контроля дефектов электрических соединений печатных плат // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 4. С. 138–145.
7. **Васильев Ф. В., Медведев А. М., Сокольский М. Л.** Диагностический контроль электрических соединений в авионике // Практическая силовая электроника. 2013. № 1 (49). С. 42–44.
8. **Васильев Ф. В., Медведев А. М.** Выявление скрытых дефектов соединений // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2018. № 10. С. 94–97.
9. **Городов В. А.** Методы электрического контроля печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 1. С. 17–22.