

# Выявление скрытых дефектов соединений

Ф. Васильев, к. т. н.<sup>1</sup>, А. Медведев, д. т. н.<sup>2</sup>

УДК 620.1.052, 658.562.4 | ВАК 05.11.00

Существующие методы неразрушающего контроля не позволяют с достаточной степенью уверенности диагностировать некоторые виды скрытых дефектов межсоединений, что ведет к непрогнозируемому выходу из строя электронных модулей. В статье рассматривается применение метода диагностического контроля, позволяющего повысить эффективность контроля соединений в выявлении скрытых дефектов.

Уплотнение компоновки радиоэлектронных блоков, повышение требований к массогабаритным показателям бортовой аппаратуры приводят к увеличению плотности элементов межсоединений печатных плат, усложнению межблочной коммутации и, как следствие, снижению «запаса прочности», с которым выполняются печатные платы и межблочные соединения. В связи с этим большое внимание уделяется контролю соединений, как на печатных платах, так и в кабельных системах.

Существующие системы контроля, как правило, основаны на двух методах: функциональном и параметрическом [1]. Системы функционального контроля проверяют, по сути, наличие соединения в нужном месте («есть контакт») и отсутствие соединения в ненужном («нет замыкания»). Такие системы просты как сами по себе, так и в использовании, имеют невысокую стоимость и широко распространены на бытовом уровне в виде различных «прозвонков».

Системы параметрического контроля проверяют соответствие параметров эталонным с заданной погрешностью. В качестве эталонов могут выступать как физические линии, так и расчетные параметры. Системы параметрического контроля позволяют обнаружить большое количество дефектов, недоступных для выявления системами функционального контроля: несоответствие сечения провода (изменение сопротивления), паразитные связи (изменение частотных характеристик) и т. п. Тем не менее, даже самые совершенные системы параметрического контроля не могут выявить скрытые дефекты, не

влияющие в процессе тестирования на параметры соединений: обрыв одной или нескольких жил в кабеле, микротрещины в проводнике, непропаи соединений и т. п. Такие дефекты (рис. 1) не вносят значительных изменений в параметры цепи, но в процессе работы устройства могут привести к выходу его из строя.

Действительно, общее сопротивление проводника, представленного на рис. 1, составляет

$$R = r_1 + r_d + r_2, \quad (1)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – сопротивления участков проводника «до дефекта»,  $r_d$  – сопротивление участка цепи непосредственно в месте дефекта.

Поскольку по сравнению с общим сопротивлением проводника величина  $r_d$  чрезвычайно мала, она влияет на общее (контролируемое) сопротивление проводника весьма незначительно: изменение общего сопротивления проводника при наличии дефекта меньше погрешности измерений и меньше допустимых отклонений параметров проводника. Даже если остался 1% ширины проводника, то изменение сопротивления будет (для проводника длиной 10 см и шириной трещины 0,1 мм) не более 0,1%.

Аналогичная ситуация происходит в кабелях с изолированными жилами. Поскольку контакт есть по всей длине, то одно узкое место не приводит к достаточному для выявления изменению сопротивления.

Подобные дефекты можно выявить при помощи системы рентгеновского контроля (пример на рис. 2), однако такой контроль является дорогостоящим и весьма трудоемким, и при этом все равно не дает высокой степени вероятности обнаружения дефектов.

В процессе работы устройства на соединение воздействуют различные факторы, влияющие на его надежность: вибрации, перепады температур, токовая нагрузка. Если допустить к эксплуатации содержащее скрытый дефект устройство, то рано или поздно это может привести к его выходу из строя. Для устройств ответственного назначения, например авионики, проводятся климатические и механические испытания, которые позволяют

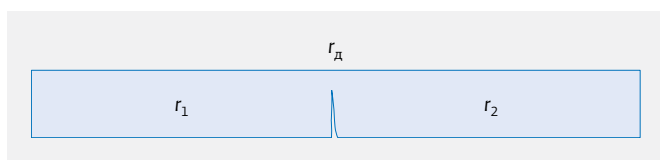


Рис. 1. Проводник с микротрещиной

<sup>1</sup> МАИ (НИУ), заведующий кафедрой, fedor@niit.ru.

<sup>2</sup> МАИ (НИУ), профессор, medvedevam@bk.ru.



**Рис. 2.** Рентгеновский снимок трещины в проводнике на печатной плате

выявить часть дефектов. Однако некоторое их количество остается незамеченным, что приводит к отказам аппаратуры в процессе эксплуатации.

Для выявления подобных дефектов можно использовать метод диагностического контроля [2, 3], 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.

Процесс изменения температуры проводника под действием электрического тока происходит в три этапа: нагрев материала проводника; передача тепла за счет теплопроводности в подложку (в случае печатного проводника) или изоляцию (для кабелей); передача тепла конвекцией в окружающую среду (при наличии среды, в которой возможна конвекция). Теплопередача излучением мала, и ею можно пренебречь.

Если ограничить время тестирования первым этапом, то можно пренебречь условиями использования узла в целом и соединения в частности, что позволит достаточно точно рассчитать параметры роста температуры исправного проводника [2, 4]. Для нагрева проводника необходимо использовать источник тока, в этом случае контролируемым параметром может стать напряжение на соединении.

Мощность, подаваемая в проводник, равна

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

где  $I$  – ток, протекающий по проводнику,  $R$  – сопротивление проводника.

При нагреве сопротивление проводника увеличивается, и формула (2) приобретает вид:

$$P(t) = I^2 R_0 [1 + \alpha \Delta T(t)], \quad (3)$$

где  $I$  – ток, протекающий по проводнику,  $R_0$  – начальное сопротивление проводника,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала проводника (для меди –  $0,004 \text{ K}^{-1}$ ),  $\Delta T(t) = T(t) - T_0$  – перегрев проводника относительно начальной температуры  $T_0$ .

Таким образом, в проводник за время  $t$  подается теплота

$$Q(t) = \int_0^t P(t) dt. \quad (4)$$

При отсутствии передачи тепла во внешнюю среду проводник «потребляет»

$$Q_{\text{пр}}(t) = m \cdot C \cdot \int_0^t \Delta T(t) dt, \quad (5)$$

где  $C$  – удельная теплоемкость материала проводника,  $m$  – масса проводника. Изменением теплоемкости при изменении температуры также можно пренебречь.

Таким образом, уравнение теплового баланса в начальный момент времени (пока процесс адиабатический) будет:

$$\int_0^t P(dt) = m \cdot C \cdot \int_0^t \Delta T(t) dt. \quad (6)$$

Решение уравнения относительно изменения температуры проводника дает:

$$\Delta T(t) = \frac{I^2 R_0 t}{Cm - I^2 R_0 t \alpha}. \quad (7)$$

Как видно, уравнение имеет смысл только на начальном этапе нагрева, так как при увеличении времени  $t$  знаменатель стремится к 0, после чего приобретает отрицательный знак.

Пример графиков развития нагрева печатного проводника шириной 1 мм и толщиной 35 мкм для токов 30, 40, 50, 75, 100, 200 А представлен на рис. 3.

Для целей диагностического контроля нас интересует начальный этап – время до 20 мс, так как при дальнейшем развитии процесса тепло от проводника начинает передаваться в окружающую среду. Ограничив в процессе контроля температуру перегрева и контролируя время достижения этой температуры, можно делать вывод о соответствии реального соединения «идеальному» (расчетному).

Исходя из формулы (7) и зная параметры проводника, легко получить значение тока, позволяющего за заданное время достичь заданной температуры перегрева «идеального» проводника  $\Delta T$ . Эта температура может

отличаться для разных соединений. Чем она выше, тем лучше для процедуры контроля, так как это позволит повысить точность диагностирования дефекта. Для дефектного проводника тот же ток вызовет значительное локальное увеличение температуры, что приведет к увеличению сопротивления и, тем самым, к сокращению фактического времени достижения заданной температуры, что и является признаком, по которому проводник будет отмечен как дефектный.

В любом случае, максимальная задаваемая температура не может быть выше температуры разрушения контактирующих с проводником материалов: для печатных плат – клея и стеклотекстолита, для проводов – их изоляции. В общем случае кратковременное повышение температуры соединения на 100–150 °С не влечет за собой каких-либо отрицательных последствий для аппаратуры.

Формула (7), преобразованная для расчета тестового тока (тока для тестирования конкретной цепи), выглядит следующим образом:

$$I = \sqrt{\frac{Cm\Delta T}{R_0 t (1 + \alpha \Delta T)}}. \quad (8)$$

Масса проводника:  $m \text{ (кг)} = l \cdot s \cdot \rho \cdot 10^{-6}$ , где  $l$  – длина проводника,  $m$ ,  $s$  – площадь поперечного сечения,  $\text{мм}^2$ ,  $\rho$  – плотность меди,  $8930 \text{ кг/м}^3$ .

Сопротивление проводника:  $R_0 \text{ (Ом)} = R_{\text{уд}} \cdot l / s \cdot \rho \cdot 10^{-6}$ , где  $l$  – длина проводника,  $m$ ,  $s$  – площадь поперечного сечения,  $\text{мм}^2$ ,  $R_{\text{уд}}$  – удельное сопротивление меди,  $0,018 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ .

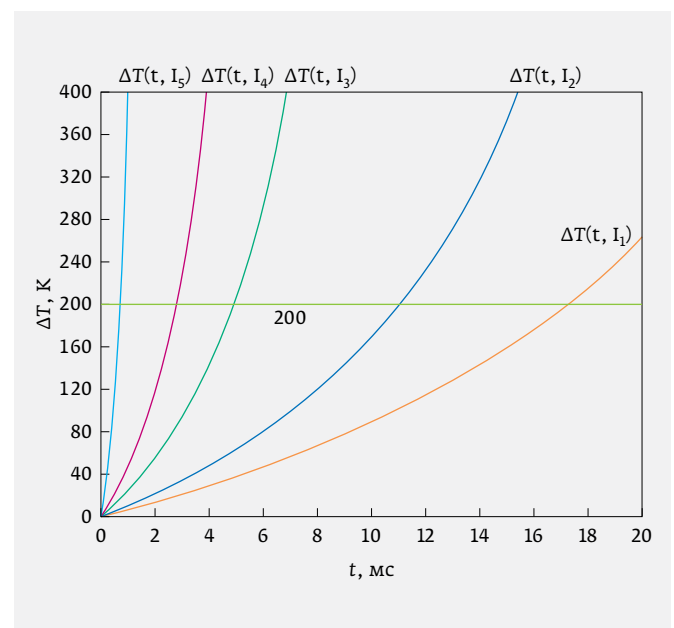


Рис. 3. Изменение температуры проводника при воздействии различными токами

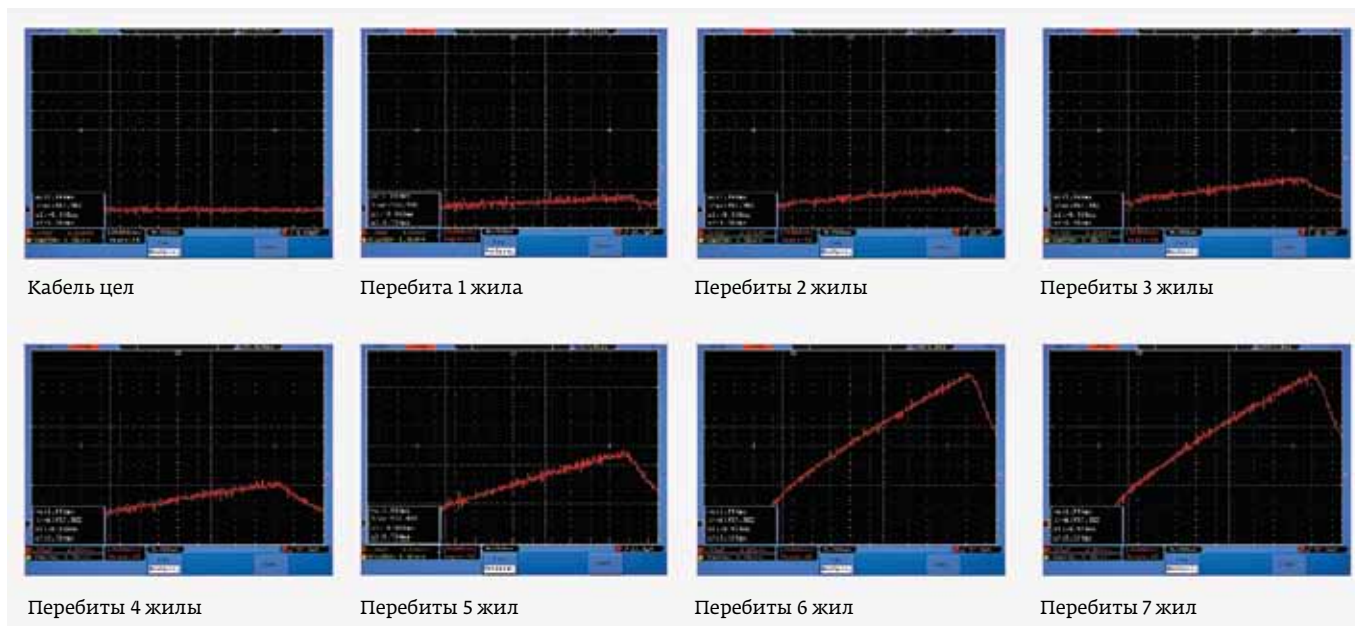


Рис. 4. Тестирование кабеля с перебитыми жилами

Удельная теплоемкость меди  $C$  равна 381 Дж/кг·К. Подставив в формулу (8) и проведя элементарные преобразования, получим:

$$I = 13,75 \cdot s \sqrt{\frac{\Delta T}{t(1+0,004 \cdot \Delta T)}} \quad (9)$$

Формула (9) может использоваться для расчета необходимого тестового тока для достижения температуры  $\Delta T$  за время  $t$ . Из формулы видно, что требуемый ток прямо пропорционален сечению проводника и не зависит от его длины. Пример токов для печатных проводников различной ширины при толщине 50 мкм, температуре перегрева 200 °С и времени достижения температуры 5 мс представлен в табл. 1.

Для проводников круглого сечения расчет аналогичен. При этом тестирование проводов большого сечения в соответствии с приведенным расчетом потребует весьма значительных токов (для провода сечением 2,5 мм<sup>2</sup> – более 5000 А!). Однако для круглых проводов, в связи с меньшей площадью поверхности и, соответственно, худшим

охлаждением, возможно увеличение времени тестирования до 50 мс и более. Кроме того, проводник в месте дефекта повышает свою температуру гораздо быстрее, что позволяет значительно снизить токи тестирования. Эксперименты с 8-жильным проводом с сечением жил 0,25 мм<sup>2</sup> показали, что при тестировании можно также значительно уменьшить требуемую температуру перегрева – до 50 °С (рис. 4).

Таким образом, внедрение системы диагностического контроля соединений требует предварительного расчета тока тестирования, подачи этого тока в тестируемую цепь и контроля роста напряжения. При достижении напряжением расчетного уровня, соответствующего заданному изменению температуры проводника, производится измерение времени и сравнение времени с эталонным, после чего выдается сообщение о соответствии соединения заданным параметрам.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Медведев А.М., Васильев Ф.В., Сокольский М.Л.** Диагностический контроль электрических соединений в авионике // Практическая силовая электроника. 2013. № 1 (49). С. 42–44.
2. **Медведев А.М., Васильев Ф.В., Сокольский М.Л.** Расчет токовой нагрузки для диагностического контроля электрических соединений в авионике // Практическая силовая электроника. 2013. № 2 (50). С. 42–44.
3. **Медведев А.М., Васильев Ф.В., Сокольский М.Л.** Источник тока для диагностического контроля электрических соединений в авионике // Практическая силовая электроника. 2013. № 3 (51). С. 54–56.
4. **Васильев Ф.В., Медведев А.М., Сергеев А.В.** Токонесущая способность печатных проводников // Практическая силовая электроника. 2015. № 4 (60). С. 52–54.

Таблица 1. Расчетные токи для диагностического тестирования проводников

Ширина печатного проводника, мм	Сила тока, А
0,1	10,25
0,3	30,75
0,5	51,24
1	102,49