

# К вопросу о формировании эталонных значений сопротивлений печатных проводников контролируемых цепей многослойных печатных плат

**Появились средства прецизионного контроля печатных плат, которые позволяют выявлять «скрытые» дефекты (перетравы, микротрещины в проводниках и переходных отверстиях), что потребовало решить задачу формирования достоверных эталонных значений сопротивлений контролируемых цепей [1].**

**Дмитрий Сывороткин  
Михаил Гусынин**

skb@kz.ryazan.ru

## Введение

Ранее на практике применялись различные методы контроля сопротивлений. В первую очередь это контроль по пороговому значению, при котором сопротивление всех соединений проверялось на не превышение некоторой величины, общей для всей платы.

Отраслевой стандарт устанавливал порог отбраковки:

- для «функционального» контроля (двусторонние платы, слои многослойных печатных плат) — 300 Ом;
- для «параметрического» контроля (многослойные печатные платы) — 4 Ом.

Повышение плотности монтажа и ужесточение требований к качеству плат обеспечили развитие методов индивидуального контроля сопротивления каждого соединения ПП. Оригинальные технические решения, применение двустороннего контактирующего устройства со стандартными контактирующими элементами, электроизмерительная модульная структура системы, электронный коммутатор, 4-зондовый метод измерения — все это позволило не только обеспечить прецизионную точность измерения, но и добиться высокого уровня контроля. На рис. 1 показан один из вариантов 4-зондового измерения сопротивления переходного металлизированного отверстия с использованием стандартных контактных элементов.

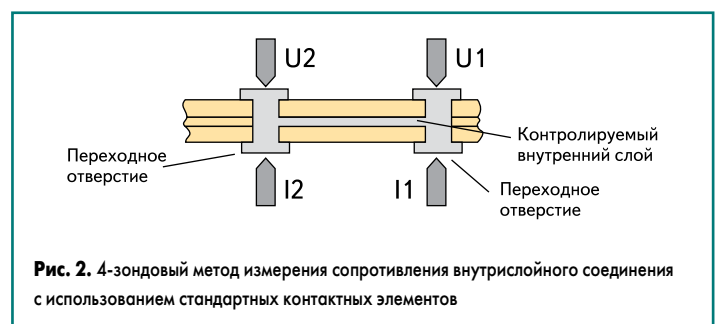
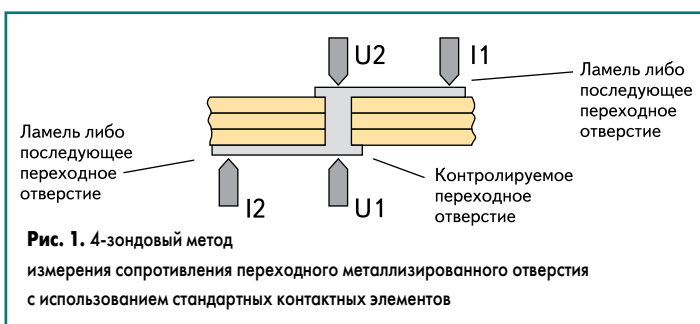
На рис. 2 показан один из вариантов 4-зондового измерения сопротивления внутрислойного соединения с использованием стандартных контактных элементов.

По аналогичной схеме можно измерить сопротивление и других элементарных участков внутрислойных соединений многослойной печатной платы.

Конечно, нельзя забывать, что применению подобных систем повышенной точности сопутствуют соответствующие требования. Что касается метрологического обеспечения, то необходима многоуровневая метрологическая аттестация, включающая периодическую поверку измерителей системы с использованием магазинов сопротивлений, а также самодиагностику узлов системы — коммутаторов, измерителей и контактирующего устройства — перед контролем каждой платы.

Также в процессе измерений становится очевидной необходимость индивидуального контроля каждого элемента платы — переходных отверстий, соединительных линий, полигонов, поскольку иначе подобная точность, предлагаемая методом, окажется незаметна на фоне сопротивления составной цепи.

Третья, но не менее важная особенность длительного времени представляла проблему получения эталонного значения, точность которого могла бы соответствовать точности контроля. Так называемые физические эталоны, получаемые усреднением сопротивлений нескольких изготовленных плат имеют, по крайней мере, одну слабую сторону: усредняемые значения снимаются с нескольких плат, зачастую из одной партии и имеющих схожие дефекты. В любом случае некачественность данных изделий будет принята за эталон, и последующие бракованные платы успешно пройдут испытание сравнением. При небольшой партии плат снятие физических эта-



лонов и вовсе теряет смысл. Таким образом, долгое время оставался открытым вопрос получения значений сопротивлений, на которые можно было бы полагаться как при контроле дефектов, так и при отладке технологического процесса изготовления плат, сравнение с которыми являлось бы полезной и действенной обратной связью для технологов предприятия. Ведь каким бы ни был выбран допуск разброса сопротивлений, производителю в любом случае требуется знать превышаемую эталонную величину.

Предложенная в статье методика представляет собой инструмент, позволяющий получить такие значения.

С точки зрения разработчика процесс получения эталонных значений сопротивлений печатных проводников интересен и во многом не очевиден. Мы предлагаем вашему рассмотрению последовательность методов, не претендующих на оптимальность, но хорошо зарекомендовавших себя на практике:

- получение исходных данных;
- обработка полученных данных, составление цепей;
- расчет цепей.

### Получение исходных данных

Получение исходных данных, как правило, сводится к считыванию перечня элементов, входящих в состав печатной платы, из какого-либо формата. Спектр применяемых на производстве форматов сейчас чрезвычайно широк. Одни форматы удобны для разработчика печатной платы, другие — для изготовителя. У изготовителя в распоряжении далеко не всегда есть данные об электрических цепях. Чаще всего дело ограничивается наличием данных, необходимых для создания фотомаски. Таким образом, процесс получения исходных данных, несмотря на свою важность, не может быть проанализирован в рамках данной статьи. Каждый формат достоин отдельного глубокого рассмотрения.

Но каким бы ни был исходный формат и, соответственно, процедура его обработки, в качестве результата должны быть получены данные об элементах рисунка металлизации и переходных отверстиях:

- Соединительные линии характеризуются длиной и шириной, а также толщиной применяемой фольги.
- Переходные отверстия характеризуются набором параметров, описывающих внешние и внутренние диаметры переходной трубы (диаметр отверстия и толщина слоя металлизации), высотой перехода, внешними диаметрами верхней и нижней контактных площадок.
- Полигоны, полностью или частично залитые многоугольники описываются координатами вершин, а также несколькими параметрами степени заливки.

Кроме того, важно помнить, что наружные слои могут быть дополнительно покрыты металлом (например, оловом-свинцом), а в составе переходных отверстий присутствует сразу несколько типов металлов, от-



Рис. 3. Пример наложения линий печатных проводников



Рис. 4. Частный случай преобразования сочетания двух проводников в последовательное соединение трех

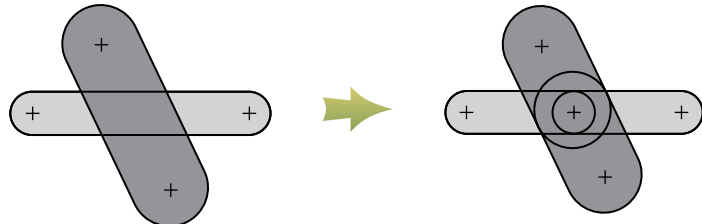


Рис. 5. Частный случай преобразования сочетания двух проводников в последовательное соединение четырех



Рис. 6. Меньший по толщине и длине проводник полностью поглощен большим

личающихся проводимостью (проводимость напыления, как правило, отличается от проводимости фольги и от проводимости дополнительного металлического покрытия наружных слоев).

### Обработка полученных данных

Обработка полученных данных сводится к устранению некорректностей, возникающих как в процессе конструирования, так и при последующих переводах конструкторской документации из одного формата данных в другой. Некорректности, о которых здесь идет речь, не отражаются на полученной печатной плате и чаще всего даже не видны с первого взгляда на конструкторскую документацию. Можно сильно удивиться, узнав, насколько много их на самой обычной схеме. Но они недопустимы при расчете эталонных значений сопротивлений проводников (рис. 3).

Глядя на фотомаску или готовую плату, невозможно заметить такую мелочь, как частичное или полное наложение отдельных линий. Имея одинаковые значения толщины, они полностью наложены друг на друга и создают сплошную линию. Можно сказать, что математически участки их наложения образуют параллельное соединение двух проводников, хотя на практике оно не отразится на проводимости данного соединения. Все подобные участки печатного рисунка требуется выявить и привести к последовательному соединению неналоженных линий.

Встречаются и значительно более сложные в анализе случаи частичного или полного наложения и пересечения проводников. В общем виде два проводника всегда можно привести

к корректному сочетанию одного, двух, трех либо четырех проводников (рис. 4–6).

Обработка этих и множества других возможных сочетаний не представляет большой сложности и требует лишь знакомства с математическим уравнением прямой. Но при обработке необходимо проверить взаимное сочетание каждого проводника с каждым другим проводником. При общем количестве проводников в пять-семь десятков тысяч на эту процедуру среднему бытовому компьютеру может потребоваться до полутора часов рабочего времени. При этом обязательно следует уделить внимание оптимизации алгоритмов.

На практике подобные проблемы частичного и полного наложения свойственны также полигонам и переходным отверстиям.

Для переходных отверстий решение довольно просто и очевидно: для каждого двух отверстий, имеющих одинаковые координаты X и Y, нужно выполнить проверку наличия общих слоев, через которые они проходят. При наличии общих слоев два отверстия следует объединить в одно, при этом в качестве диаметров контактных площадок и внутренних диаметров отверстий на общих слоях выбрать больший из двух (рис. 7).

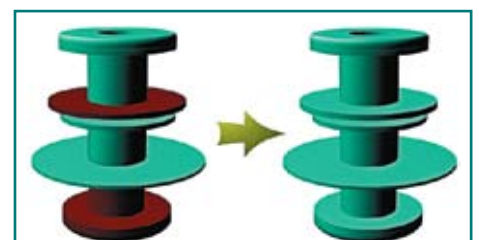


Рис. 7. Объединение переходных отверстий

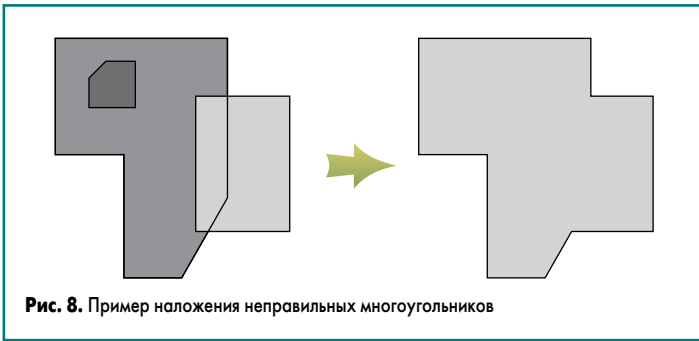


Рис. 8. Пример наложения неправильных многоугольников



Рис. 12. Примеры замены печатных проводников эквивалентами пассивных сопротивлений

Для полигонов алгоритмы несколько сложнее (рис. 8).

Но в целом опять для решения ситуации требуется лишь знать математическое уравнение прямой и по возможности отсеивать пары полигонов: если ни одна линия периметра одного из полигонов не имеет ни одной точки пересечения ни с одной линией периметра другого полигона, то один из полигонов полностью поглощен другим либо не имеет с ним ни одной общей точки. Данное условие позволит исключить из дальнейшего рассмотрения значительную часть пар полигонов. Те же полигоны, что имеют общие точки, нужно объединить.

**Этап составления цепей**

На этапе составления цепей не следует полагаться на наличие сведений об электрических соединениях. Они, как правило, отсутствуют, либо не полны и не точны. При наличии корректных обработанных данных цепи составляются исходя из условий совпадения слоев и координат отдельных элементов. Иными словами, для каждой линии будущего печатного проводника выявляются те линии, полигоны и контактные площадки отверстий, которые имеют с ней общие точки.

Отдельного внимания заслуживают случаи частичного несоответствия координат, которые также есть практически в любой КД. На рис. 9 и 10 показаны некоторые случаи подобных несоответствий.

Здесь с помощью математики не составит труда определить, что опорная точка (начало либо конец) одной из линий находится от второй линии на расстоянии, меньшем, чем большая

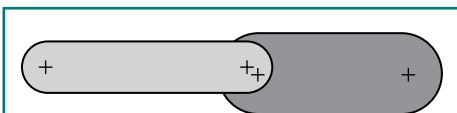


Рис. 9. Предположительно, две линии должны составлять последовательное соединение

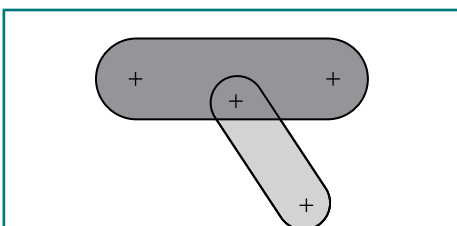


Рис. 10. Похоже, что по задумке конструктора одна из линий должна образовать соединение со второй линией

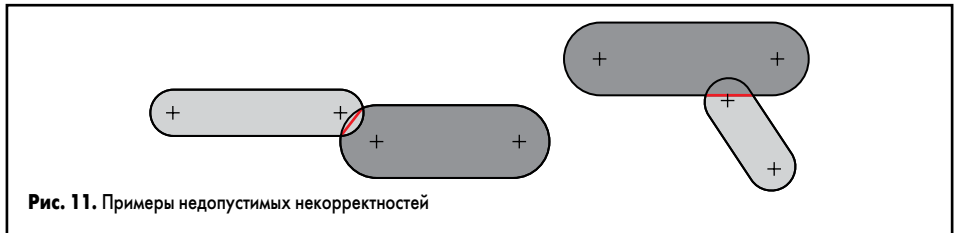


Рис. 11. Примеры недопустимых некорректностей

толщина этих линий. В данном случае более тонкую линию следует «довести» до ближайшей точки оси более толстой линии. Нетрудно понять, что «доводящая» линия будет иметь толщину более толстой линии.

Гораздо труднее решаются ситуации, в которых ни одна из опорных точек линий не входит в покрываемую площадь другой линии (рис. 11).

Самым узким местом (в буквальном смысле) подобных соединений является отрезок, длина которого в общем случае отличается от толщины обеих линий. Математика позволяет рассчитать его длину, но этого недостаточно для определения переходного сопротивления. При обнаружении таких ситуаций обязательно следует обратить на это внимание разработчика: здесь явная ошибка. Линии следует вручную либо «довести», либо «расцепить». К дальнейшему расчету в таком виде они не должны быть допущены.

Конечно, все сказанное относится и к частичным, и полным взаимным наложениям линий с полигонами и контактными площадками переходных отверстий.

**Расчет цепей**

Расчет цепей, возможно, является наиболее нетривиальным этапом получения математического эталона.

В первую очередь соединительные линии, переходные отверстия и полигоны должны быть представлены сочетаниями самых обычных резисторов.

Действительно, для большинства печатных проводников, не содержащих элементы сверхвысокочастотной передачи сигнала, зная длину, ширину проводника, толщину и проводимость применяемой фольги, а также среднюю толщину и проводимость дополнительных поверхностных слоев металлизации, любую соединительную линию можно заменить теоретическим эквивалентом пассивного сопротивления (рис. 12).

Но уже здесь становится ясно, что в результате подобных преобразований в схему вносится некоторая, чаще всего совершенно незначительная неточность. Ведь сопротивление

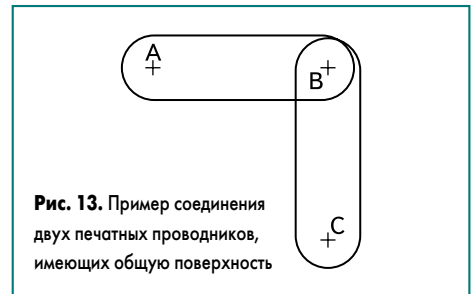


Рис. 13. Пример соединения двух печатных проводников, имеющих общую поверхность

между точками А и С всегда несколько меньше, чем сумма сопротивлений отрезков АВ и ВС (рис. 13).

Само сопротивление отрезков АВ и ВС для абсолютной точности результата следует рассчитывать с учетом скругленного периметра покрываемой поверхности.

Но практика показала, что все эти допущения отражаются на точности результата даже в меньшей степени, чем неточность сведений о толщине используемой фольги, ее проводимости и множестве прочих параметров. Кроме того, расчетное значение сопротивления проводника в любом случае окажется чуть выше абсолютно точного. Из этого следует, что чаще всего, когда ширина проводника пренебрежимо меньше длины, его можно представить расчетным элементарным резистором. В противном случае поверхность, покрываемую проводником, следует рассматривать как выпуклый полигон (представление полигонов будет рассмотрено далее).

Переходные отверстия также можно представить в виде сочетания элементарных сопротивлений. Рассматриваемый в данной статье метод рекомендует следующее преобразование (рис. 14).



Рис. 14. Сегментирование переходного отверстия



Рис. 15. Представление сегмента переходного отверстия

Каждое переходное отверстие в составе переходного цилиндра и контактных площадок разбивается на некоторое количество сегментов, радиусом закругления которых можно пренебречь. Ясно, что от размера и количества сегментов напрямую зависит точность последующих расчетов, а также их ресурсоемкость. Как правило, достаточным является разбиение на 12–16 сегментов (рис. 15).

Далее каждый сегмент представляется в виде сочетания нескольких сопротивлений. Каждое из них рассчитывается отдельно и, как говорилось выше, зависит от индивидуальных параметров толщины и проводимости фольги и дополнительного поверхностного слоя металла, диаметра сквозного отверстия, толщины и проводимости наращиваемого слоя металлизации (рис. 16).

В результате каждое переходное отверстие с той или иной степенью точности может быть представлено как «цилиндр с ребрами в виде резисторов».

Описанию способа представления полигонов можно было бы посвятить отдельную статью и даже книгу. Но мы отметим лишь, что в рамках рассматриваемого метода в общем случае полигон представлен в виде сетки сопротивлений (рис. 17).



Рис. 17. Вариант представления полигона

Значения же данных сопротивлений зависят от толщины и проводимости фольги, дополнительного поверхностного слоя металлизации, а также от степени заполненности полигона, ведь он может быть как сплошным, так и заполненным линиями определенной толщины с определенными промежутками.

В итоге мы получим трехмерный каркас из десятков тысяч резисторов, образующих огромное количество контуров, участков последовательного, параллельного соединения и более сложных узлов. На этом этапе еще невозможно точно назвать сопротивление между какими-либо контрольными точками. Цепь нуждается в упрощении.

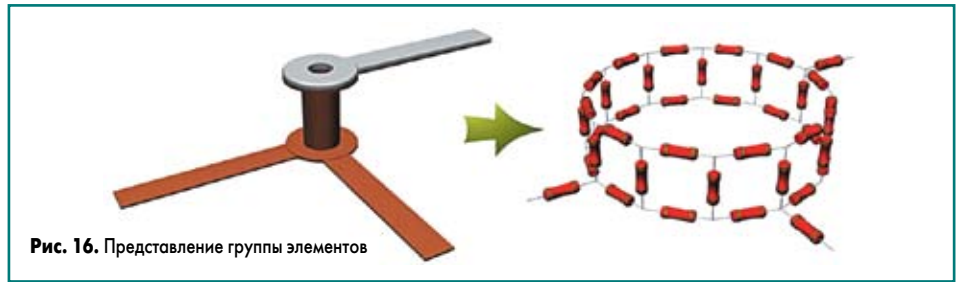


Рис. 16. Представление группы элементов

Для этого удобно программно задать соединительные сопротивления в виде следующих элементов:

```
TLine = record
  ToNum, ToCont: Int;
  Resistance: Real;
end;
```

Здесь величины *ToNum* и *ToCont* хранят номер узла, к которому направлено данное соединение, и порядковый номер контакта в нем. Значение *Resistance* представляет сопротивление данного соединения.

Подобные соединения в свою очередь удобно объединить в массив следующей структуры:

```
TNode = record
  x, y, z: Integer;
  lines: array of TLine;
  fixed: Boolean;
end;
```

Здесь *x*, *y* и *z* содержат координаты узла на плате (*z* содержит номер слоя для многослойных плат). Необходимость хранения данных значений обусловлена тем, что в процессе упрощения схема претерпит весьма значительные видоизменения. В случае обнаружения каких-либо дефектов в изготовленной плате их потребуется соотнести с данной схемой, и гораздо проще это выполнить, опираясь на географическое расположение узлов.

Параметр *lines* представляет массив элементов *TLine*.

Кроме того, очень важен параметр *fixed*, указывающий, является ли данный узел фиксированным. Более подробно его значение будет рассмотрено далее.

В итоге будет получен массив элементов, в котором каждый элемент имеет одну и более ссылок на какие-либо другие элементы с указанием переходных сопротивлений. Для получения конкретного значения сопротивления между какими-либо двумя его узлами требуется выполнить ряд упрощений, заключающийся в чередовании следующих операций:

- 1) Преобразование последовательно соединенных резисторов. Здесь требуется в цикле обойти каждый элемент цепи и проверить, сколько соединительных линий из него исходит. Если этих линий две, то узел может быть удален из цепи, а два его соседних узла соединены эквивалентным сопротивлением.
- 2) Преобразование параллельных соединений. Здесь для каждого узла цепи требуется проверить, есть ли в его списке соединений два или более, направленных к одному другому узлу. Данные соединения могут считаться параллельными и быть заменены одним эквивалентным.

3) Преобразование «звезда–треугольник». В этой операции для каждой точки определяется количество соединительных линий, и если их ровно три, то данный узел представляет собой соединение «звезда», которое по известным правилам может быть преобразовано в соединение «треугольник».

4) Преобразование «треугольник–звезда». На этом этапе чуть более сложным методом выявляются тройки узлов, образующих соединение типа «треугольник», и преобразуются в «звезду».

5) Выявление и устранение «одиноких» узлов, имеющих одно соединение или без соединений.

6) Выявление и устранение соединений, имеющих чрезвычайно большое либо пренебрежимо малое сопротивление. Такие соединения часто возникают при преобразованиях «звезда–треугольник» и обратно. На практике можно рекомендовать ликвидировать соединения с сопротивлением выше 10 кОм, а сопротивления ниже 0,01 мОм считать нулевыми и объединять соответствующие узлы.

Чтобы последовательность двух взаимно обратных видов преобразований «звезда–треугольник» и «треугольник–звезда» не обращала схему в исходную, между ними следует выполнять тесты параллельных, последовательных соединений и другие, описанные выше.

Кроме того, нельзя забывать, что цель процедуры упрощения — это расчет сопротивления между двумя конкретными точками цепи (узлами). Данные узлы не могут участвовать в преобразованиях последовательного соединения двух резисторов, а также в преобразовании «звезда–треугольник», так как в таком случае они будут удалены из цепи. Для реализации данного ограничения и рекомендованы описанные выше значения *fixed*. Выставлять этот флаг следует для верхней и нижней точки переходных отверстий и для контактных площадок.

Упрощение группы из десяти и более тысяч резисторов на компьютере средней мощности может занять до нескольких секунд. При наличии в данной группе десятков фиксированных точек потребуются выполнить упрощения, выставляя фиксированными попарно разные контрольные узлы. Это потребует множества одинаковых операций над одинаковыми цепями. Общее время расчета группы может занять несколько часов. Поэтому рекомендуется выполнять предварительное упрощение, выставив фиксированными сразу все контрольные узлы, а затем провести конечные упрощения для парных контрольных точек.

### Заключение

Рассмотренный в данной статье метод, как показала практика, позволяет очень точно выявлять перетравы и микротрещины печатного проводника и переходных отверстий, ограничивая допустимые значения сопротивлений изготовленных проводников с нижней стороны. Расчетные эталонные значения сопротивлений в сравнении с полученными на практике могут многое сказать и об отдельных этапах изготовления платы. Но нельзя забывать, что при расчете используются данные, получаемые от раз-

ных подразделений организации-изготовителя, и данный метод контроля окажется полезен, только если все работники, через чьи руки проходит плата при изготовлении, будут заинтересованы в качестве продукции.

Ошибочно также относиться к методу как к панацее: он, как и любой другой, не лишен ограничений и недостатков.

Данный метод внедрен в промышленную эксплуатацию на заводе «Красное Знамя» при финансовой поддержке Министерства промышленности и наукоемких технологий Рязанской области в рамках договора о предо-

ставлении субсидии по теме «Станция подготовки таблиц расчетных эталонных значений сопротивлений печатных проводников контролируемых плат для рабочих программ систем автоматизированного прецизионного контроля печатных плат».

### Литература

1. Карпов С. В. Развитие средств прецизионного контроля печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 7.