

ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И МНОГОСЛОЙНОСТЬ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Арнольд Вимерс (Arnold Wiemers)
© ILFA GmbH (Germany)

©Перевод ELLWEST KG (Austria)
Переводчики:
М.И. Василенко,
Я. В. Василенко

Предисловие

Разработчики и дизайнеры высокочастотных схем хорошо знают, что они должны рассчитывать волновое сопротивление печатных проводников и принимать его во внимание при проектировании топологии печатных плат. В меньшей степени обращается внимание на то, что волновое сопротивление сигнальных печатных проводников и система подводки электропитания играет сегодня всё возрастающую роль, также, для многих обычных цифровых схем. Это связано, в первую очередь, с тенденцией ко всё более короткому времени переключения (крутизны нарастания фронта сигнала) в современных компонентах и модулях.

Тактовые частоты сигналов в печатных схемах нередко приближаются к 100МГц диапазону, а у микросхем - даже к гигагерцевому диапазону, хотя это и не всегда оправдано требованиями практического применения. Время переключения интегральных микросхем упало до 1 или 2 наносекунд, иногда даже ниже этого. Как следствие, возникает высокочастотная схемотехника, требующая принятия в расчет таких физических условий и величин, которые до настоящего времени не принимались во внимание.

Для надежного функционирования разрабатываемых модулей должны соблюдаться элементарные правила проектирования. Они включают плоские слои питания, обеспечивающие широкополосную развязку с помощью емкостных свойств. Так же должны применяться строгие стратегии разводки, позволяющие избегать возникновения щелевых антенн (которые могли бы быть причиной высокочастотных помех от взаимно влияющего излучения плоскостей) и обеспечивающие оптимальное прохождение сигналов. Схемотехнические решения и выбор комплектующих изделий должны гарантировать прохождение сигнала в гомогенном электрическом поле с использованием схем с контролируемым волновым сопротивлением.

Предпосылкой для решения этой задачи является реализация этих технических требований в печатной плате, являющейся основой модуля и играющей всё более функционально возрастающую роль.

Нет оснований сомневаться в том, что печатная плата не сможет удовлетворить необходимые требования времени. Однако, САПР-дизайнеры и производители печатных плат должны быть осведомлены об этих

технических требованиях и о возможном влиянии на них технологии производства.

Настоящая статья информирует о важнейших параметрах волнового сопротивления, которые должны быть известны как разработчикам, так и представителям производства.

Волновое сопротивление: термины и геометрия

Сопротивление сигнальных проводников зависит от двух параметров:

1. Класса (вида) сопротивления и его типа;
2. Геометрического строения печатной платы.

Известны 4 вида волнового сопротивления:

Простое волновое сопротивление: волновое сопротивление образуется благодаря взаимодействию одиночного печатного проводника и одной или двух плоскостей питания.

Дифференциальное волновое сопротивление: волновое сопротивление образуется благодаря взаимодействию противоположных (инверсных) сигналов в двух параллельно расположенных печатных проводниках, которые могут взаимодействовать с одной или двумя плоскостями питания.

Копланарное волновое сопротивление: волновое сопротивление образуется благодаря одному печатному проводнику вложенному (окруженному) в находящиеся под потенциалом проводники или плоскости. Сигнал и потенциал могут взаимодействовать с одной или двумя плоскостями питания.

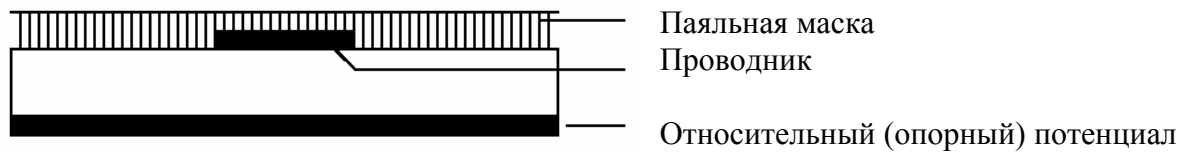
Дифференциальное копланарное волновое сопротивление: волновое сопротивление образуется благодаря взаимодействию инверсных сигналов в двух параллельно расположенных печатных проводниках, вложенных в находящиеся под потенциалом плоскости и взаимодействующих с одной или двумя плоскостями питания.

В целом, все варианты волнового сопротивления отличаются еще и тем, находится ли печатные сигнальные проводники между двумя плоскостями питания (= полосковая линия) или над плоскостью питания (= микрополосковая линия) без дальнейшего планарного покрытия.

Для каждого этого вида волнового сопротивления возможны несколько геометрических решений на печатной плате, которая обычно имеет многослойный дизайн. Далее типы волновых сопротивлений подразделены в

зависимости от геометрической конструкции на примере «простого волнового сопротивления» и отображены на рисунках 1, 2, 3, 4, 5 и 6.

Рисунок 1. Покрытая микрополосковая линия



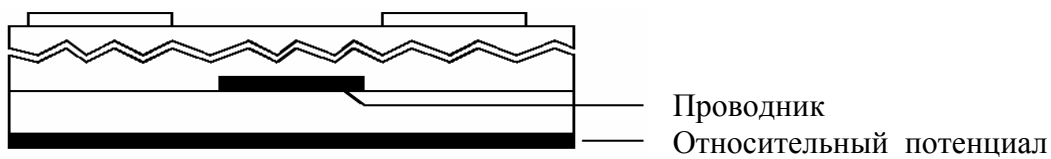
Уровень проводников расположен над потенциалом во внешнем слое и покрыт паяльной маской.

Рисунок 2. Поверхностная микрополосковая линия



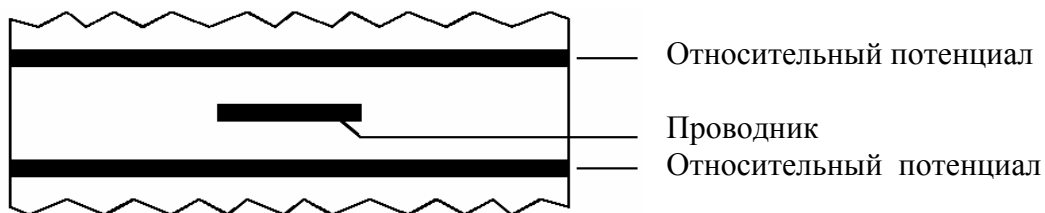
Уровень проводников расположен над потенциалом во внешнем слое без покрытия паяльной маской.

Рисунок 3. Вложенная микрополосковая линия



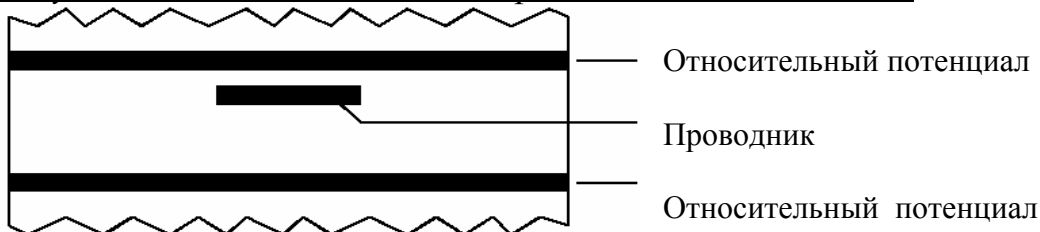
Уровень проводников расположен во внутренних слоях относительно опорного потенциала.

Рисунок 4. Одиночная симметричная полосковая линия



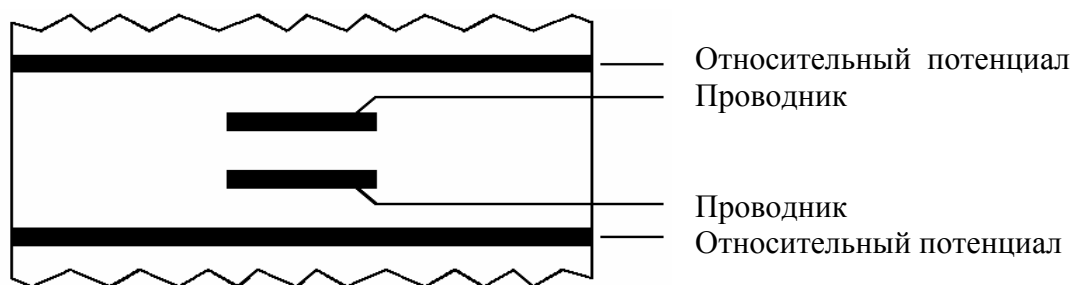
Уровень проводников расположен в центре между двумя потенциалами

Рисунок 5. Одиночная несимметричная полосковая линия



Уровень проводников расположен не в центре между двумя потенциалами.

Рисунок 6. Парная полосковая линия



Два уровня проводников расположены между двумя потенциалами.

Простое волновое сопротивление в парной полосковой линии не надо путать с дифференциальным волновым сопротивлением с параллельными печатными проводниками. Здесь, печатные проводники в соседних сигнальных уровнях должны быть ортогональны друг другу (X-Y трассировка).

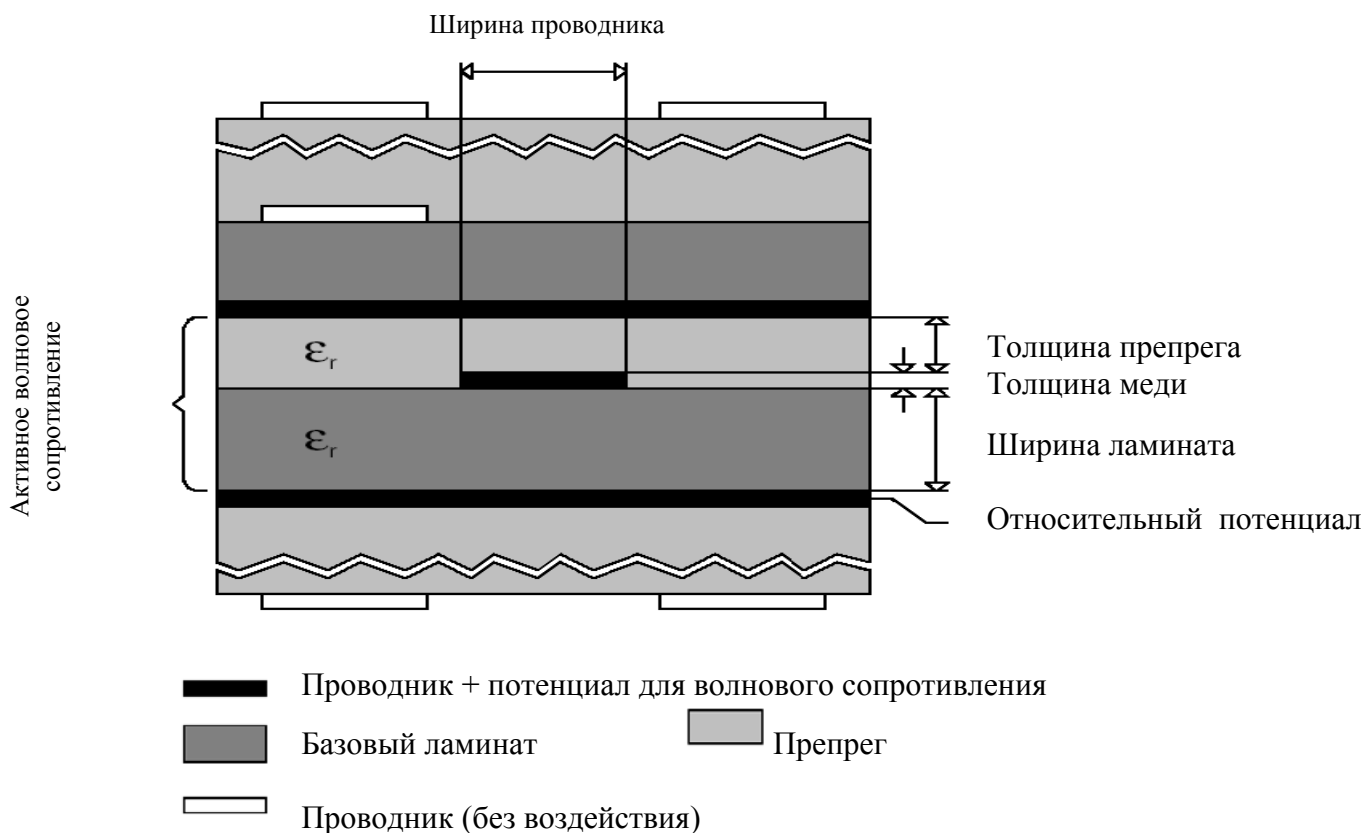
Волновое сопротивление: одиночная несимметричная полосковая линия

Волновое сопротивление в этой конструкции возникает благодаря электромагнитному полю между печатным проводником и двумя плоскостями питания, экранирующими его. С точки зрения конструирования печатных плат следует заметить, что волновое сопротивление полностью зависит от механических параметров: от ширины печатного проводника и расстояния между слоями. На практике это толщина слоистого материала (ламината) и препрега (предварительно пропитанной смолами стеклоткани). Другим существенным параметром является диэлектрическая характеристика (проницаемость) (ϵ_r -величина) материала (рисунок 7).

Если расстояние между слоями в многослойном дизайне и ϵ_r -величина (говорят «Ипсилон-Р») материала известны, то не составляет проблем рассчитать результирующее волновое сопротивление для печатного проводника заданной ширины и толщины (=толщина медного материала) с помощью соответствующего программного обеспечения. К сожалению, на практике этот метод расчета волнового сопротивления не приводит к желаемому результату. Так как на деле приходится решать обратную задачу: вместо определения волнового сопротивления должно быть рассчитано, какой должна быть многослойная структура для достижения требуемой величины волнового сопротивления.

Требуемое волновое сопротивление для гомогенных систем печатных проводников, как правило, составляет 50, 75 или 100 Ом. Для достижения такого результата могут варьироваться расстояние между слоями, ширина и толщина печатного проводника и, конечно же, величина ϵ_r .

Рисунок 7. Многослойная структура с волновым сопротивлением типа одиночная несимметричная полосковая линия




При использовании стандартного программного обеспечения необходимо вычислять множество переменных параметров, удлиняя процесс проб и ошибок. Когда же, наконец, ожидаемый результат будет достигнут, возникает другая проблема. Необходимо гарантировать, что материал заданной толщины, как и ламинат для внутренних слоев платы, будут фактически доступны или могут быть набраны из препрега. Учитывая, что цена на модули, за редким исключением, является лимитируемой величиной, всегда следует быть уверенным в доступности материалов по экономической цене, а также в том, что при производстве печатных плат можно будет использовать стандартные технологии.

По этой причине логика настоящей статьи следует реверсивной процедуре, дающей предварительно вычисленное волновое сопротивление в табличном виде в зависимости от стандартных технологических процессов и от возможных стандартных комбинаций материалов при многослойном дизайне платы (рисунки 8 и 9).

В таблицах приведены печатные проводники различной ширины, обычно используемые в настоящее время, а также медная фольга стандартных толщин, которые идентичны высоте печатного проводника.

Рисунок 8. Волновое сопротивление модуля с внутренним слоем ламината толщиной 200мкм и двумя слоями препрега толщиной 60 мкм каждый

Материал : FR4	Волновое сопротивление, Ом			
ϵ_r : 4.5	Ширина проводника	Толщина меди		
Препрег : 2x1080		5мкм	17мкм	35мкм
	300мкм	29.4	27.0	23.6
	200мкм	38.1	34.8	30.3
	150мкм	44.8	40.8	35.5
	120мкм	50.2	45.5	39.5
	100мкм	54.7	49.3	
	80мкм	60.2		

В настоящее время границы диапазона ширины проводников могут быть обозначены как РВП (=Разводка Высокой Плотности), которая обычно начинается с ширины проводников 150 мкм и РСП (=Разводка Сверхвысокой Плотности), которая обычно начинается со 100 мкм и ниже. По производственно-техническим причинам большинство требований диапазона РВП не могут быть в дальнейшем выполнены для стандартной (в настоящее время) фольги толщиной 35мкм, что, естественно, также применимо и для РСП. Конструкция этих проводников может иметь толщины меди 17мкм, 9мкм или 6мкм, и рассчитана, соответственно, для них.

В начальной стадии вычислений волнового сопротивления исходят, прежде всего, из идеальных условий. Это означает, что толщина материала и отклонение допуска на толщину в процессе прессования, равно как и изменение геометрии поперечного сечения проводника в результате подтравливания, не учитываются.

Анализ таблицы на рисунке 8 позволяет увидеть следующие результаты. Во-первых, эта структура выполнена как часть многослойной платы и реализуема на практике, так как применен ламинат толщиной 200 мкм с вполне доступной ценой. То же самое относится и к обоим типам препрега 1080 (толщина 60мкм). Оба компонента являются стандартным стеклотекстолитом FR4 и покрыты медью стандартной толщины.

Далее, вышеупомянутая таблица позволяет проследить тенденцию изменения волнового сопротивления при уменьшении ширины печатного проводника (=волновое сопротивление возрастает) или увеличении (=волновое сопротивление уменьшается). В таблице 8 можно, также, увидеть размерность изменений, то есть, имеет ли волновое сопротивление тенденцию к возрастанию или убыванию резко или умеренно.

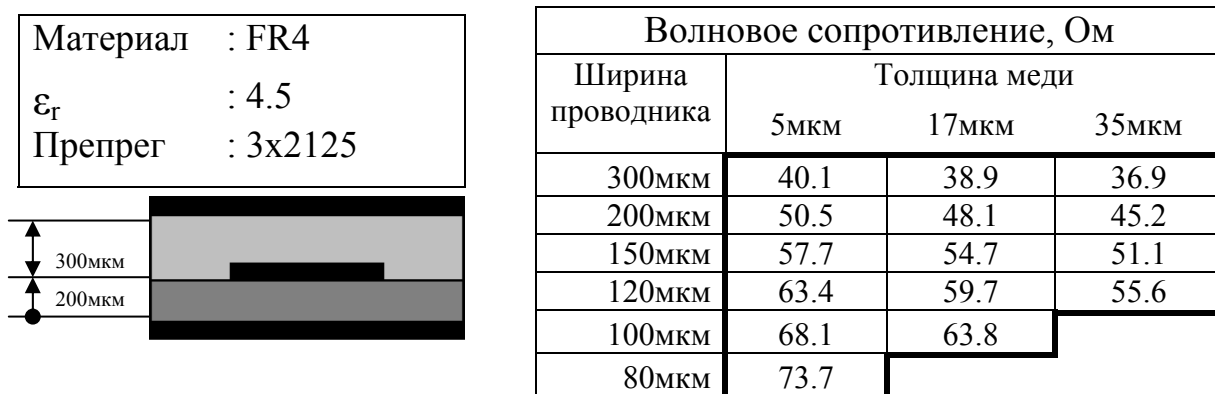
Таблица 8 показывает искомую величину волнового сопротивления в омах, достижимую при комбинации всех этих материалов и соответствующем выборе ширины печатного проводника и толщины меди. Отсюда ясно, что сопротивление в 100 Ом или 75 Ом в такой конструкции недостижимо.

Видно, также, что, сопротивление в 50.2 Ом соответствует значению толщины меди в 5мкм, при ширине печатного проводника в 120 мкм. Толщина меди в 5 мкм была бы, в принципе, возможным решением для коротких сигнальных цепей (при длинных сигнальных цепях следовало бы принимать во внимание вновь повышающееся омическое сопротивление).

При этом надо иметь ввиду, что изготовление печатной платы с шириной проводника в 120 мкм приведет к предложению производителем более высокой цены. Иными словами, решение о реализации определенного волнового сопротивления с шириной сигнальных проводников в 120мкм сделало бы печатную плату более дорогой. Такой вариант никак нельзя признать оптимальным, особенно, когда для решения других задач такая минимальная ширина проводников на данной печатной плате не требуется.

Приемлемые на практике результаты могут быть получены из таблицы, представленной на рисунке 9. Данные таблицы 9 показывают, что при стандартной конфигурации, использующей медь толщиной 17 мкм и печатный проводник толщиной 200 мкм, с хорошим приближением к желаемой величине (50 Ом- примечание переводчика) получается сопротивление 48.1 Ом. При ширине проводника в 150мкм мы получим волновое сопротивление в 54.7 Ом. Это означает, что при корректировке ширины печатного проводника до 180мкм на выходе должно получиться сопротивление в пределах от 50 до 51 Ом.

Рисунок 9. Волновое сопротивление модуля с внутренним слоем ламината толщиной 200 мкм и тремя слоями препрега толщиной 100 мкм каждый



Данные, приведенные в таблицах 8 и 9, не совсем корректны, так как для точного вычисления волнового сопротивления требуется применение математических моделей с логарифмическими функциями. Однако, для

практических целей приблизительная оценка является достаточной, так как для конечного значения волнового сопротивления, как правило, вполне допустимо его отклонение $\pm 10\%$ без отрицательного влияния на функционирование модуля. В тех же случаях, когда требуется обеспечение вполне определенного значения сопротивления (*например, 50 Ом-примечание переводчика*) для исчисления ширины печатного проводника в соответствующую программу должны быть заложены некоторые исходные значения ширины проводника и толщины меди. При этом, из таблицы можно увидеть, что в нашем случае параметр ширины проводника в 200 мкм должен изменяться в сторону 180 мкм до тех пор, пока не будет достигнуто совершенно точное значение.

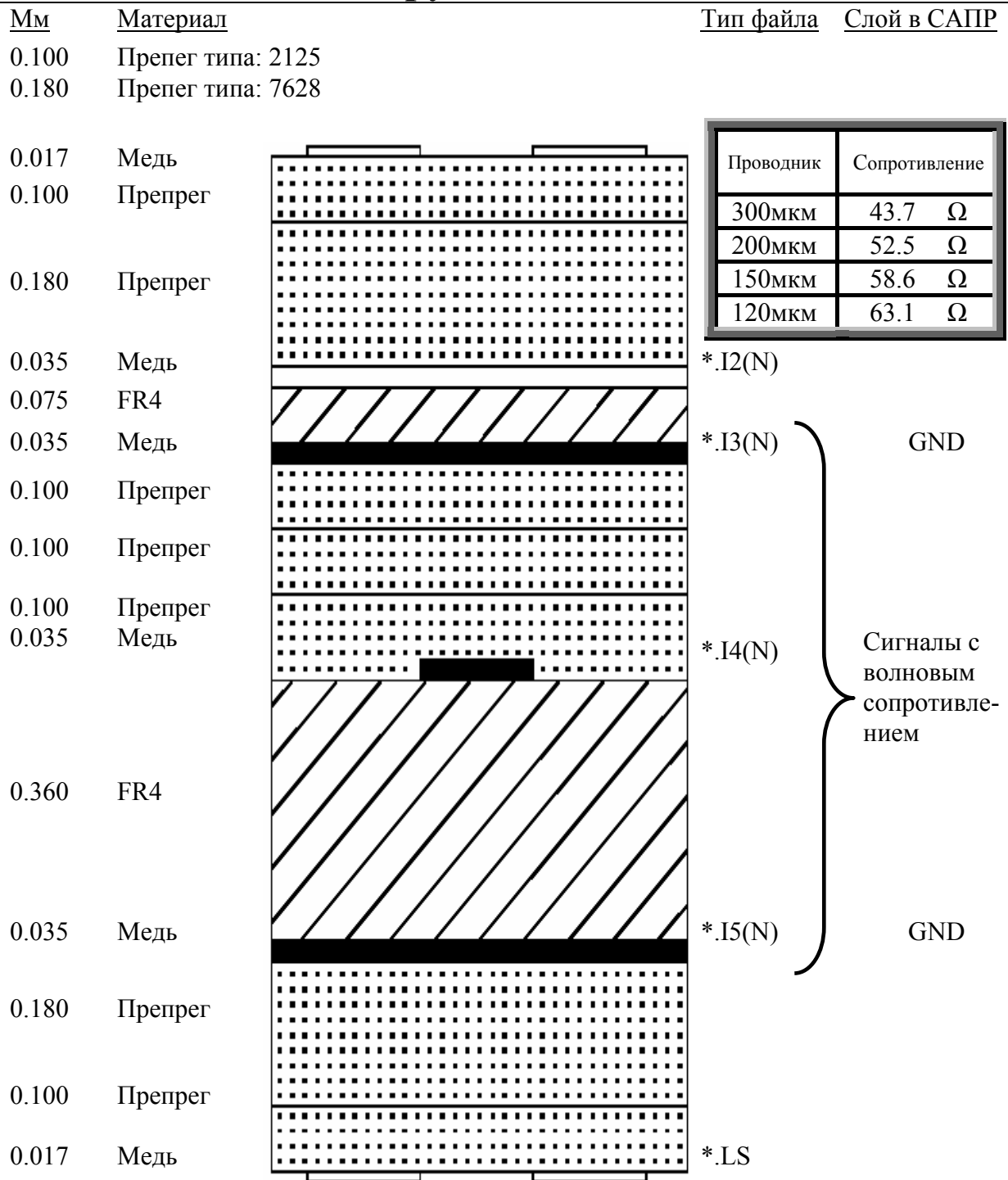
Отметим, также, что толщина меди, конечно же, изменяться не должна. Оценка по таблице 9 показывает, что толщина меди около 7 мкм могла бы быть приемлемым решением, однако на практике не существует внутренних слоев ламината такой толщины. Следовательно, разработчику остается возможность корректировать волновое сопротивление только посредством регулировки ширины печатного проводника, но при этом следует принимать во внимание, что теоретически идеальная величина в 181.5 мкм (для достижения волнового сопротивления в 50 Ом), в реальности при производстве печатных плат является иллюзорной по технологическим причинам.

В случае определения волнового сопротивления по варианту «Одиночная несимметричная полосковая линия», приходится, также, решать задачу интеграции полученного узла сопротивления в многослойный дизайн. Схема возможного геометрического распределения слоев в многослойной системе из 6 слоев показана на рисунке 10. В процессе компоновки фотошаблонов, следует обращать внимание на то, что сигналы с требуемым волновым сопротивлением расположены в слое «I4». Слои «I3» и «I5» должны иметь потенциал, либо 2xGND, либо 2xVCC или GND и VCC. В нашем примере GND (земля) задана в слоях «I3» и «I5».

Оставшиеся три слоя («BS», «I2» и «LS») не оказывают влияния на волновое сопротивление. Они могут быть использованы в зависимости от потребностей разработчика. К примеру, если имеются дополнительные схемотехнические требования по электромагнитной совместимости (ЭМС), тогда слой 2 может быть выполнен как VCC (питание), результатом чего явится дополнительная широкополосная развязка в схемном решении. Тогда внешние слои BS и LS были бы свободны для сигнальных печатных проводников и, конечно, для соединения SMD площадок компонентов.

Рисунок 10. Дизайн шестислойной печатной платы с узлом, имеющим волновое сопротивление типа одиночная несимметричная полосковая линия

Многослойная конструкция типа 6M15FR4I7I36K35



Проводник	Сопротивление
300мкм	43.7 Ω
200мкм	52.5 Ω
150мкм	58.6 Ω
120мкм	63.1 Ω

Конечная толщина (включая паяльную маску)	После прессования	1.34–1.52	мм
	Олово-свинец	1.43–1.62	мм
	Горячий воздух	1.46–1.64	мм
	Золото	1.42–1.60	мм

Опытный разработчик, конечно же, обратит внимание на то, что в нашем примере за счет слоя GND, включенного в состав многослойной платы, может быть увеличено доступное пространство для разводки схемы, которого, как правило, всегда не хватает. Этот эффект типичен для схем с контролируемым волновым сопротивлением. Для обеспечения заданных технических требований, в состав печатной платы вводятся дополнительные слои, особенно в тех случаях, когда некоторые из слоев в многослойном проекте имеют контролируемое волновое сопротивление. Это обстоятельство позволяет высказать предположение, что число слоев в стандартном многослойном проекте в будущем будет увеличиваться попарно и что многослойные платы в 8 или 10 слоев будут скоро повседневной реальностью.

Несмотря на то, что многослойный проект с контролируемым волновым сопротивлением относительно несложен в разработке, теоретические расчеты должны быть обязательно проверены на практике. Проверка волнового сопротивления на печатных платах в большинстве случаев занимает много времени, дорогостояща и простыми средствами выполнена быть не может.

Исключение же этапа проверки сопротивления сопряжено с опасностью, что модули будут собраны, однако надлежащим образом работать не будут. Не редкость, что при анализе причин неправильного функционирования модулей выявляется, что заданное волновое сопротивление не было обеспечено при производстве печатной платы. Осознание этого факта фатально, так как неработоспособность модуля, как правило, в таких случаях неисправима и большой или меньший экономический ущерб налицо.

Вывод: печатные платы необходимо проверять на предмет их правильного функционирования непосредственно у производителя.

(продолжение следует)