

Проектирование современных печатных плат.

Часть 3. Предельный ток печатной дорожки

Семен ТЮТЮКОВ
tusa@tavridasip.ru

Это третья статья из цикла, посвященного систематизированному изложению ключевых рекомендаций по проектированию современных печатных плат. В ней рассмотрены модели оценки предельного тока печатной дорожки, который в отдельных ситуациях является определяющим параметром при выборе толщины проводящих слоев печатной платы.

В предыдущей статье [1] говорилось о том, что при выборе толщины медных слоев печатной платы определяются, прежде всего, требуемые минимальные зазор и ширина проводника, а также максимальный ток, протекающий по проводнику. Эти параметры противоречат друг другу: чем тоньше проводящий слой, тем меньший топологический рисунок может быть получен, но тем меньший предельный ток выдержит печатная дорожка (при прочих равных условиях — ширина проводника, частота тока, теплоотвод и др.). Тепловая энергия Q , выделяющаяся на омическом сопротивлении R печатной дорожки (джоулево тепло $Q = I^2 R t$, где I — сила тока), вызывает повышение ее температуры относительно окружающей среды, приводя к перегреву самого проводника и связанных с ним компонентов или, в крайнем случае, к его перегоранию при предельном токе (англ. fusing current). Соотношение между током через печатную дорожку и приростом температуры зависит от многих параметров и в общем виде трудно представимо, однако существуют формулы, позволяющие сделать предварительные оценки.

Одна из первых попыток принадлежит У. Г. Прису (W. H. Preece). Свою эмпирическую зависимость он получил в лабораторном эксперименте, в котором постепенно увеличивал ток через проводник до момента его накала докрасна. Формула Приса связывает ток накала с диаметром проводника d для различных материалов:

$$I[A] = K \times d[\text{мм}]^{3/2},$$

где K — табличная константа, примерно равная 80 для меди. Используя соотношение

$S = \pi(d^2/4)$, можно переписать эту формулу для случая медного проводника с площадью сечения S :

$$I[A] = 96 \times S[\text{мм}^2]^{3/4}.$$

В эксперименте Приса проводник был подвешен в воздухе, в отличие от проводника на печатной плате, условия теплоотвода для которого совсем другие. Более близкими являются условия теплоотвода для случаев одиночного соединительного провода, а также для некоторых случаев микропроволочной разварки (когда для ее защиты не используется компаундирование), где эта формула может давать хорошую оценку для предельного тока.

Допустимым приростом температуры печатной дорожки обычно считается 10–30 °С. В зависимости от параметров проекта данное значение может быть и выше, однако во всем диапазоне рабочих температур изделия температура дорожки должна быть меньше температуры стеклования материала печатной платы (англ. glass transition temperature, T_g) и тем более температуры накала меди. Поэтому полезна зависимость прироста температуры ΔT от тока I печатной дорожки шириной w и толщиной фольги h ¹, приведенная Д. Бруксом в [2]:

$$\Delta T[^\circ\text{C}] = (C \times I[A]^\alpha) / (w[\text{мм}]^\beta \times h[\text{мм}]^\gamma),$$

где C , α , β , γ — константы, значения которых для внешних и внутренних слоев приведены в таблице.

Еще одной известной формулой расчета предельной токонесущей способности проводника является формула Ондердонка (I. M. Onderdonk), которая содержит такой важный параметр, как время. Она связывает

время t пропускания тока I через медный проводник сечением S и прирост температуры ΔT относительно начальной температуры T_0 :

$$8,6 \times 10^{-6} \times (I[A]/S[\text{мм}^2])^2 \times t[\text{с}] = \lg(1 + \Delta T[^\circ\text{C}] / (234 + T_0[^\circ\text{C}])).$$

Поскольку при выводе формулы исключается всякий теплоотвод [3], то в случае печатной дорожки эта формула применима для короткого импульса тока длительностью до 1–2 с. С увеличением времени и влияния теплоотвода точность оценки падает, в несколько раз занижая предельный ток. Графики зависимостей по всем трем приведенным формулам для различных параметров печатной дорожки показаны на рис. 1 и 2.

Всегда важно учитывать условия эксперимента или аналитические допущения при выводе, чтобы понимать границы применимости той или иной формулы. Ни одна из приведенных формул не даст точное и оптимальное соотношение между предельным током и требуемым сечением проводника для реальных приложений. То же касается и простых калькуляторов, которые можно найти в Интернете², потому что они основаны на этих или аналогичных формулах. Влияние соседних проводников и компонентов как источников и приемников тепла, излучения, активного или пассивного охлаждения может быть учтено только при термоэлектрическом моделирова-

Таблица. Значения констант для различных параметров проводящего слоя

Условие	C	α	β	γ
Внешний слой	80	2	1,15	1
Внутренний слой:				
18 мкм	264–312	2	1,1	1,52
35 мкм	480	1,9	1,1	1,52
70 мкм	600	2	1,15	1,52
105 мкм	450–600	1,9	1,15	1,52

¹ Следует учитывать, что на внешних слоях толщина фольги обычно больше на 20–40 мкм относительно базового значения в связи с дополнительным осаждением при создании переходных отверстий. Также влияние финишного покрытия на платах без маски может быть значительным. Это используют в силовых приборах, когда на вскрытую от маски печатную дорожку паяют дополнительное олово.

² Например, www.circuitcalculator.com/wordpress/2006/01/31/pcb-trace-width-calculator/.

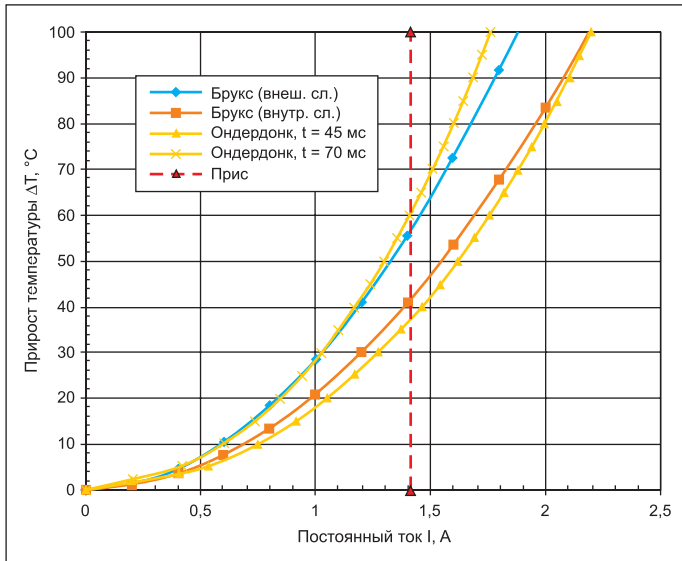


Рис. 1. Токонесущая способность печатной дорожки шириной 0,2 мм для слоя медной фольги толщиной 18 мкм

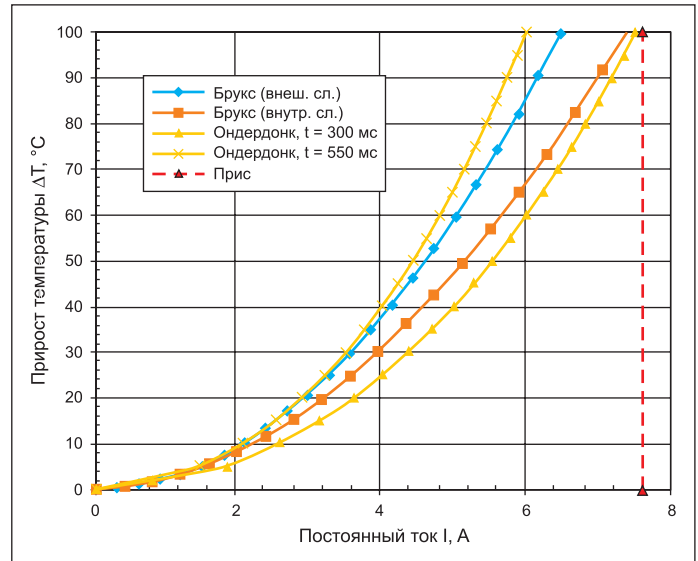


Рис. 2. Токонесущая способность печатной дорожки шириной 1 мм для слоя медной фольги толщиной 35 мкм

нии в специализированных САПР (таких как Cadence, ANSYS и других). Однако даже в этом случае результаты моделирования и эксперимента могут значительно различаться. Дело в том, что печатная дорожка имеет не прямоугольное сечение, а близкое к трапецевидному (рис. 3), а ее ширина и значение проводимости медной фольги могут не только отличаться от расчетных по модели, но и иметь некоторый разброс от образца, от партии к партии, от изготовителя к изготовителю и т. д. Влияние отклонений ширины усиливается с ее уменьшением. Тем не менее расчетные результаты по формулам и рекомендации стандартов чаще всего будут представлять наихудший случай, обеспечивая тем самым запас прочности системы. Если разработчику необходимо оптимизировать соотношение между предельным током и требуемым сечением печатной дорожки, то к этой цели необходимо идти итеративным путем моделирования и эксперимента.

Увеличение сечения печатной дорожки пропорционально снижает ее омическое сопротивление на единицу длины, что уменьшает тепловые потери при протекании постоянного тока. Ситуация с переменным током не так проста из-за существования скин-эффекта (англ. skin effect), который приводит к тому, что плотность переменного тока неравномерно распределена по сечению проводника, экспоненциально убывая до нуля от поверхности проводника к центру. Для удобства расчетов применяется понятие эффективного сечения проводника с глубиной, определяемой соотношением:

$$\delta = 1/\sqrt{f\pi\sigma\mu},$$

где f — частота тока, σ — проводимость металла, μ — магнитная проницаемость. На глубине, равной δ , плотность тока становится меньше в e раз относительно плотности тока на поверхности J_s . Математически можно показать верность следующего приближенного равенства для плотности тока $J(x, y)$ в проводнике:

$$I = \iint J(x, y) dx dy \approx J_s \times l \delta.$$

То есть для приближенных вычислений можно принять, что ток течет только в граничном слое проводника периметра l глубиной δ , причем с равномерным распределением (рис. 4).

3 На рисунке схематично показано, что распределение высокочастотного тока в проводнике в реальности носит очень сложный характер. На экспоненциально затухающее распределение плотности тока накладывается влияние возвратного тока противоположного направления, а также токов в соседних проводниках. Точное решение рекомендуется получать с использованием специализированных САПР моделирования ЭМ-поля. Тем не менее даже упрощенные модели при соблюдении их границ применимости позволяют получать предсказуемый и контролируемый результат.

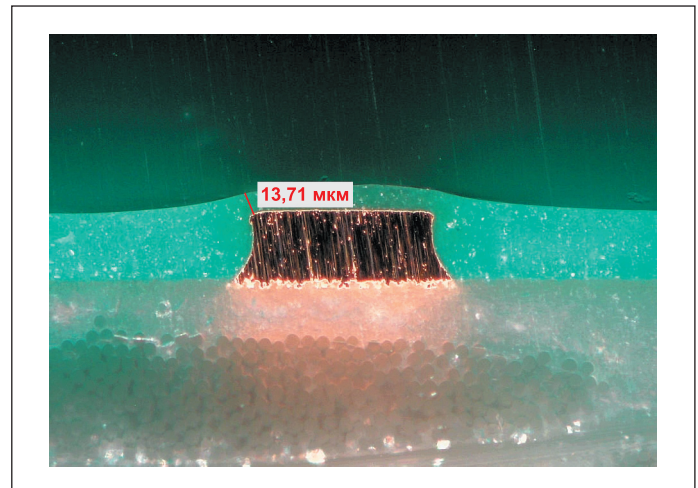


Рис. 3. Сечение печатной платы, на котором видна неидеальность геометрии дорожки

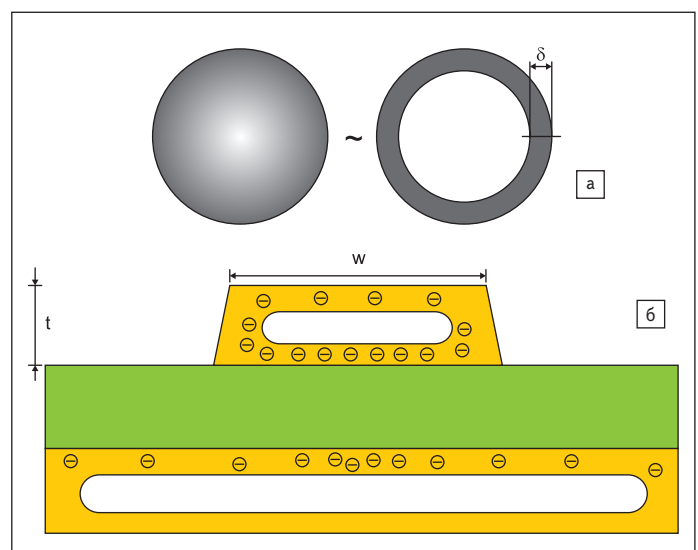


Рис. 4. Модель влияния скин-эффекта на распределение переменного тока высокой частоты: а) в круглом одиночном проводнике; б) в печатной дорожке³

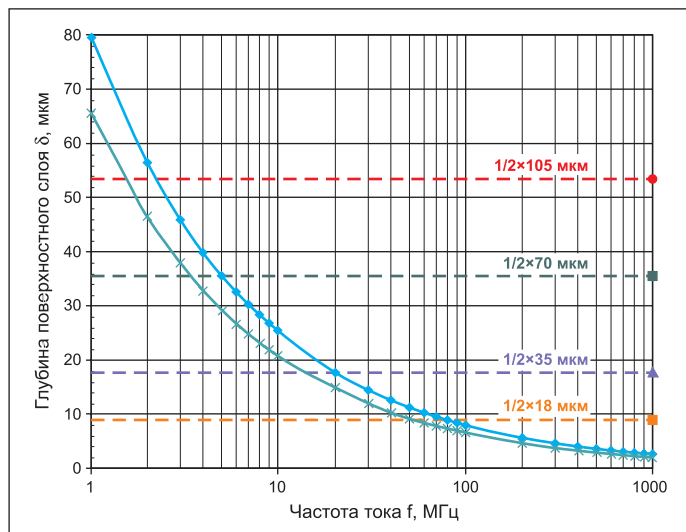


Рис. 5. Глубина скин-эффекта в меди в зависимости от частоты для значений проводимости $\sigma = 40 \text{ МСм/м}$ и $\sigma = 58,8 \text{ МСм/м}$

Если глубина поверхностного слоя меньше половины толщины печатной дорожки, то импеданс печатной дорожки на данной частоте будет определяться именно этим эффективным сечением⁴, приводя

⁴ Это лишь упрощенная наглядная модель; зависимость между граничной частотой, начиная с которой скин-эффект становится значимым, и геометрией проводника носит более сложный характер. Для прямоугольного сечения Д. Брукс приводит [4] формулу $f = 27 \times ((w+h)/wh)^2$, где ширина w и высота h выражены в дюймах (1 дюйм = 25,4 мм).

⁵ Напомним, что реальная толщина внешних слоев может составлять на 20–40 мкм больше базовой.

⁶ В электронном виде статьи доступны по ссылке www.ultracadm.com/article_temperature.htm.

⁷ В том числе и переходных отверстий, основной вывод по результатам расчетов для которых заключается в том, что их температура определяется прежде всего температурной подводящей печатной дорожки.

к увеличению омического сопротивления и незначительному снижению индуктивности. На рис. 5 представлена зависимость глубины поверхностного слоя от частоты тока с учетом разброса проводимости осажденной меди. Из него видно, что для слоев меди толщиной 18 мкм граничная частота (выше которой скин-эффект играет роль) находится в пределах 50–70 МГц, а для слоев толщиной 35 мкм — в районе 15–20 МГц⁵. Отметим, что на частотах свыше 100 МГц глубина скин-эффекта меняется незначительно, это позволяет пренебрегать его зависимостью от частоты при расчетах для высокочастотных сигналов.

При проектировании печатных плат с постоянно действующими токами величиной в несколько ампер необходимо выполнять тепловые расчеты как для электрических компонентов, так и для проводников. Представленные модели и аналитические соотношения позволяют выполнить оценку предельного тока печатных дорожек и на ее основании выбрать необходимую толщину медных слоев и топологию проводников. Для получения точного решения следует использовать специализированные САПР, при этом желательно задавать геометрию с учетом технологических погрешностей изготовления и данные по проводимости меди, полученные от производителя печатных плат. Читателю рекомендуется ознакомиться со статьями Д. Брукса⁶, посвященными подробному анализу методов оценки температуры печатных проводников⁷, где представлены наглядные результаты моделирования температурных полей. ■

Литература

1. Тютюков С. А. Проектирование современных печатных плат. Часть 2. Выбор структуры печатной платы // Компоненты и технологии. 2017. № 11.
2. Brooks D. G., Adam J. Trace Currents and Temperatures Revisited. UltraCAD, 2015.
3. Adam J., Brooks D. G. In Search For Preece and Onderdonk. UltraCAD, 2015.
4. Brooks D. G. Skin Effect. UltraCAD, 2010.