

А.М. Медведев, Г.В. Мылов, Кечиев Л.Н.

Проблемы технологического обеспечения параметров линий передачи в МПП

Рост производительности средств вычислительной техники и телекоммуникаций обуславливает использование режимов согласования линий связи, исключающий многократные отражения сигнала от конца и начала линии. Режим согласования предъявляет жесткие требования к стабильности волнового сопротивления межсоединений, как одному из главных параметров линий связи. Для гарантий обеспечения этого требования в состав конструкций многослойных печатных плат (МПП) предлагается вводить тест-элемент, содержащий длинную линию, по результатам тестирования которой предполагают оценивать соответствие МПП этому требованию. Однако отбраковка готовых плат по результатам этого тестирования создает крайне неблагоприятную ситуацию для производства, связанную с неопределенностью выхода годных, с отсутствием уверенности в благополучном исходе оценки качества готового продукта по этому параметру. В связи с этим возникает настоятельная потребность в упреждающем управлении производством, направленном на обеспечение заданных параметров линий связи на промежуточных этапах изготовления МПП, так чтобы на заключительном этапе гарантированно получить нужный результат.

линии передачи, волновое сопротивление, многослойные печатные платы

Конструкции современных многослойных печатных плат (МПП) подчинены основному фактору – обеспечение быстродействия печатного узла, собранного на МПП. При этом основным параметром является волновое сопротивление линий передачи МПП, значение которого влияет на согласование линий и на уровень перекрестных помех в них. Для систем сверхвысокого быстродействия волновое сопротивление должно быть около 90 Ом, а для снижения перекрестных помех это значение должно быть около 40 Ом. В международной практике принято компромиссное значение волнового сопротивления – 50 Ом, которое удовлетворяет требованиям как быстродействия, так и помехозащищенности. От стабильности и однородности волнового сопротивления в значительной мере зависит целостность сигнала в узлах цифровой техники. Непременным условием сохранения целостности сигнала является согласование электрически длинных линий, для которых и определяется параметр волнового сопротивления. При этом могут использоваться способы согласования параллельным резистором на выходе линии или последовательным резистором на входе линии. В любом случае коэффициент отражения k от нагрузки не должен превышать 0,05–0,1 [1]. Коэффициент отражения в общем виде определяется по формуле

$$k = \frac{R_l - Z}{R_l + Z}, \quad (1)$$

где R_l – сопротивление нагрузки, Z – волновое сопротивление линии передачи.

Из выражения (1) видно, что с учетом допусков на значения сопротивления, требования к выполнению волнового сопротивления на плате очень жесткие.

Для анализа требований к линиям передачи используем для примера реально выдвинутые требования в одном из проектов информационно-вычислительной техники:

- номинальные значения волновых сопротивлений линий 50 Ом при отклонении от назначенного номинала не более чем на 10 %;
- сопротивление постоянному току линий связи (при последовательном способе согласования) не должно превышать 5 Ом/м;
- коэффициент перекрестных помех в соседней линии передачи при групповой передаче

информации – не более 0,18 [2].

Анализ геометрических характеристик линий связи в МПП

Взаимосвязь между вышеприведенными требованиями и геометрическими характеристиками межсоединений как линий передачи можно установить, рассмотрев известные выражения волнового сопротивления Z_0 и отношение наведенной помехи U_{II} в пассивной линии к сигналу U_C в активной линии применительно к схеме согласования, показанной на рис. 1, и трассировке печатных проводников в МПП, показанной на рис. 2 и рис. 3.

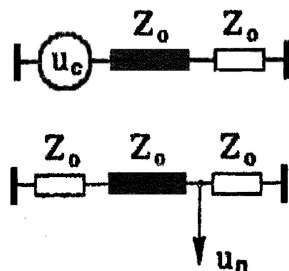


Рис. 1. Схема наведения помехи УП в линии-приемнике.

Приближенные соотношения для определения параметров линий передачи следующие:

$$U_{II}/U_C = K_1(K_2 + 1)/4 < 0,18, \quad (2)$$

$$K_1 = C_{12}/C_0, \quad K_2 = (M/L_0)(1/K_1),$$

где C_{12} – частичная взаимная емкость между линиями, C_0 – частичная емкость сигнального проводника линии передачи на возвратный слой, $C_{10} = C_{20} = C_0$ (см. рис. 2), L_0 – индуктивность линии передачи, $L_{10} = L_{20} = L_0$, M – взаимная индуктивность линий передачи.

В общем случае указанные параметры можно определить по приближенным соотношениям:

$$C_0 = 2\pi\epsilon/\ln(8H/B), \quad C_{12} = \pi\epsilon/\ln(T/B), \quad L_0 = \mu_0 \ln(4H/B), \quad M = 2\mu_0 \ln(2B/T),$$

где H – расстояние между возвратными плоскостями полосковой линии, B – ширина проводника, T – расстояние между осями проводников – шаг трассировки, ϵ – абсолютная диэлектрическая проницаемость материала основания платы, μ_0 – магнитная постоянная (рис. 3).

Подставив электрические параметры в (2) и отбросив для анализа величины второго порядка, получим выражение

$$U_{II}/U_C = \ln(8H/\pi T) < 0,18,$$

из которого определим соотношение между шагом трассировки проводников T и изоляционным промежутком между экранными слоями и для полосковой линии, характерной для большинства конструкций МПП высокопроизводительных ЭВМ: $H < 0,6 T$.

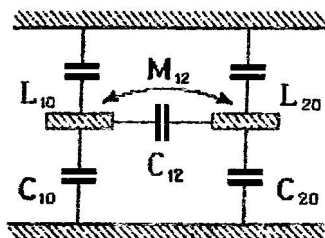


Рис. 2. Электрические взаимосвязи соседних линий передачи

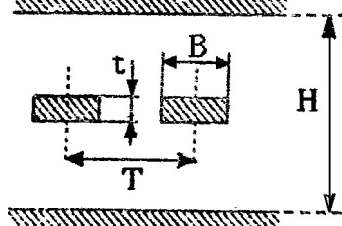


Рис. 3. Обозначения геометрические параметров линий передачи в МПП

В интересующем нас диапазоне конструктивных и электрофизических параметров печатных плат с достаточной точностью можно использовать следующие соотношения [1]: для микрополосковых линий:

$$Z_0 = k_H \frac{60}{\sqrt{0,47\varepsilon_r + 0,67}} \ln \left[\frac{4H}{0,67(0,8B + t)} \right], \quad (2)$$

для полосковых –

$$Z_0 = k_C q \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \left[\frac{4H}{0,67\pi(0,8B + t)} \right], \quad (3)$$

где B и t – ширина и толщина плоских проводников, H – толщина диэлектрика, k_H и k_C – коэффициенты, учитывающие своеобразие конструкций экранов, q – коэффициент учитывающий эксцентricность положения печатного проводника относительно экранных слоев в полосковых линиях, ε'_r – приведенная (эффективная) диэлектрическая проницаемость, равная для полосковых линий

$\varepsilon'_r = \varepsilon_r$; для микрополосковых – $\varepsilon'_r = (\varepsilon_r + 1)/2 + [(\varepsilon_r - 1)/2] [1 + 10H/B]^{-1/2}$.

Определим, например, соотношение между шириной проводника B и расстоянием H между опорными слоями для $Z_0 = 60$ Ом, воспользовавшись (3): $H/B = 2,5$.

Ограничения по погонному сопротивлению линий установлены из соотношения:

$$r = R/l = \rho/S < 5 \text{ Ом/м,}$$

где S – площадь поперечного сечения печатного проводника.

Результаты анализа для Z_0 , приведение в табл. 1, показывают, что увеличение плотности трассировки неизбежно приводит к уменьшению ширины проводников и для поддержания заданного соотношения U_H/U_C – уменьшению толщины межслойной изоляции в конструкциях МПП. Вместе с тем, уменьшение размеров элементов конструкций линий передачи усложняет проблемы технологического обеспечения стабильности значений волнового сопротивления.

Таблица 1

Оптимальные элементы конструкций линий передачи в МПП

| Шаг трассировки $T_{ПР}$, мм | H , мм | B , мм | t , мкм | Толщина диэлектрического основания слоя, мм |
|----------------------------------|----------|----------|-----------|--|
| 1,25 | 0,6 | 0,25 | 35^2 | 0,2–0,25 |
| 0,625 | 0,4 | 0,15 | 35^2 | 0,13 |
| 0,5 | 0,3 | 0,12 | 35^1 | 0,10 |
| 0,33 | 0,2 | 0,08 | 45 | 0,08 |

В табл. 2 приведены результаты статистической обработки данных, устанавливающих значения коэффициентов k_H и k_C для типовых конструкций экранных слоев МПП.

Отклонение проводников от номинального положения по плоскости слоя приводит к смещению осей сигнальных проводников относительно проводников сетки экранных слоев. Исследования показали, что смещение проводников порядка 0,1 мм не сказывается на стабильности значений Z_0 .

Печатные проводники полосковой линии в МПП, расположенные на двух сторонах диэлектрического основания внутреннего слоя, оказываются смещенными относительно центра симметрии линии, по крайней мере, на половину толщины основания слоя. Установлены количественные характеристики зависимости волнового сопротивления от смещения проводников.

Дисперсия волнового сопротивления

Задача повышения качества согласования линий передачи решается конструктивно-технологическим обеспечением воспроизведения заданного значения их волнового сопротивления, т.е. нормированием всех дестабилизирующих факторов, свойственных производству МПП. По результатам анализа влияния этих факторов можно сделать заключение о приемлемости дисперсий волнового сопротивления печатных проводников, реализуемых в готовых МПП, или принять

решение о необходимости дополнительного контроля всех или отдельных конструктивных параметров МПП, оказывающих наибольшее влияние на разброс волнового сопротивления, если отклонения больше приемлемых значений.

Используя аналитические выражения волнового сопротивления Z_0 линий (2) или (3) и продифференцировав их, получим уравнения для определения погрешностей Z_0 через коэффициенты влияния каждого из основных параметров, определяющих Z_0 :

$$dZ_0 = (\partial Z_0 / \partial \varepsilon) d\varepsilon + (\partial Z_0 / \partial H) dH + (\partial Z_0 / \partial D) dD, \quad (3)$$

где $D = (0,8B + t)$ для полосковых линий; $D = B$ для микрополосковых линий.

Принимая во внимание вероятностный характер значений погрешностей и обнаруженную в ходе исследований корреляцию между ε_r и H , дисперсию волнового сопротивления $\sigma_{Z_0}^2$ можно выразить через дисперсии исходных параметров следующим образом:

$$\sigma_{Z_0}^2 = A_\varepsilon^2 \sigma_\varepsilon^2 + A_H^2 \sigma_H^2 + A_D \sigma_D^2 + 2r A_H A_\varepsilon, \quad (4)$$

где r – коэффициент корреляционной связи взаимозависимых параметров ε и σ_H

В общем случае

$$A_\varepsilon = -0,5; A_H = [\ln(6H/D)]^{-1}; A_D = -[\ln(6H/D)]^{-1}; \sigma_D^2 = (B/D)^2 \sigma_B^2 + (A/D)^2 \sigma_A^2$$

В табл. 2 приведены измеренные значения волнового сопротивления для МПП с различной конструкцией потенциальных слоев.

Таблица 2

Измеренные значения Z_0 (Ом) для различных конструкций МПП

| Конструкции экранных слоев | Микрополосковые линии | | | | Полосковые линии | |
|--|--|-------|----------|-------|------------------|-------|
| | Отношение ширины линии B к толщине межслойной изоляции H | | | | | |
| | 0,2/0,25 | | 0,3/0,38 | | 0,2/0,75 | |
| | Z_0 | k_H | Z_0 | k_H | Z_0 | k_H |
| Сплошной экран | 52,0 | 1,00 | 56,0 | 1,00 | 58,0 | 1,00 |
| Экранный слой с круглыми перфорациями по местам сквозных отверстий | 56,0 | 1,08 | 60,0 | 1,07 | 60,5 | 1,04 |
| Сетчатый экран с шагом сетки 1,25 мм из проводников шириной 0,3 мм | 57,0 | 1,10 | 62,0 | 1,11 | 61,5 | 1,06 |
| Сетчатый экран с шагом сетки 2,5 мм из проводников шириной 0,3 мм | 66,0 | 1,27 | 71,0 | 1,26 | 64 | 1,10 |

Дисперсии параметров линий передачи в МПП

Статистические и корреляционные исследования количественных характеристик дисперсий исходных параметров Z_0 линий передачи проводились на тестовых структурах МПП, прогнозируемых в перспективных разработках высокопроизводительных информационно-вычислительных средств [3].

Дисперсия геометрии печатных проводников (σ_B)

Результаты исследований технологических процессов формирования токопроводящего рисунка, показанные в табл. 3, позволили установить статистические характеристики точности воспроизведения геометрии печатных проводников внутренних слоев МПП, на которые можно ориентироваться для реализации в серийном производстве.

Таблица 3

Дисперсии ширины проводников линий связи

| Вариант технологии внутренних слоев | Номинальное значение ширины, мм | Пределы изменений, мм | Среднеквадратический разброс | |
|---|---------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----|
| | | | мм | % |
| Химическое травление фольги 35 мкм по рельефу СПФ | 0,08 | $\pm 0,010$ | 0,003 | 3,7 |
| | 0,12 | $\pm 0,010$ | 0,003 | 3,5 |
| | 0,15 | $\pm 0,015$ | 0,005 | 3,3 |
| | 0,25 | $\pm 0,020$ | 0,007 | 2,8 |
| Селективное травление по металлорезисту | 0,08 | $\pm 0,015$ | 0,005 | 8,5 |
| | 0,12 | $\pm 0,015$ | 0,005 | 5,0 |
| | 0,15 | $\pm 0,020$ | 0,007 | 4,5 |

Разброс толщины межслойной изоляции

Анализ результатов статистических исследований процессов воспроизведения межслойной изоляции МПП на стеклоэпоксидной основе позволил установить, что с вероятностью 0,9–0,97 значение $\sigma_H = \pm 10\%$ (реально полученные значения на выборке с недостаточной репрезентативностью от 4,1 до 6,2 %).

Дисперсия диэлектрической проницаемости σ_ϵ

Отклонения значения диэлектрической проницаемости от ожидаемых часто ошибочно связывают с полнотой полимеризации используемых электроизоляционных материалов. Однако в технологии МПП полнота полимеризации эпоксидного связующего обеспечивается за счет многочисленных термообработок, дополняющих процесс прессования слоев в многослойную структуру МПП.

Специально проведенные аналитические и экспериментальные исследования показали, что разброс значений диэлектрической проницаемости композиционных материалов (стеклоэпоксидные основания слоев и прокладочных склеивающих тканей МПП) обусловлен в первую очередь неустойчивостью соотношений связующего (эпоксидной смолы) и армирующего наполнителя (стеклянной ткани). Притом, что каждый отдельно взятый компонент в соответствии с техническими условиями должен иметь относительно стабильные характеристики диэлектрической проницаемости: стеклоткань из бесщелочного алюмоборосиликатного стекла имеет $\epsilon_r = 9,2$, эпоксидная смола $\epsilon_r = 3,7$ [4].

Аналитические исследования проводились, исходя из представлений о композиционном материале, как о беспорядочной смеси двух компонентов, на которую распространяется логарифмический закон смешения Лихтенекера [4]. Его интерпретация для нашей задачи:

$$\ln \epsilon_C = V_1 \ln \epsilon_1 + V_2 \ln \epsilon_2,$$

где ϵ_C – диэлектрическая проницаемость смеси компонентов; ϵ_1 и ϵ_2 – диэлектрические проницаемости компонентов; V_1 и V_2 – их объемное содержание в смеси.

Введя обозначения $a = \ln \epsilon_1 / 2$ и $b = \ln \epsilon_2$, получим выражение для анализа разброса результирующей проницаемости диэлектрика МПП от соотношения компонентов:

$$\epsilon_C = \exp(aV_1 + b).$$

Наличие существенной зависимости диэлектрической проницаемости оснований МПП от содержания связующего позволило предположить ее зависимость от толщины межслойной изоляции МПП поскольку содержание связующего в стеклоткани зависит не только от первоначального нормированного наноса смолы, но и от вытечки смолы в процессе горячего прессования. Проведенные исследования корреляционной связи между отклонением толщины межслойной изоляции A_H от расчетных значений и значениями диэлектрической проницаемости ϵ_C композиционного диэлектрика позволило установить эмпирическую зависимость вида:

$$\epsilon_C = \epsilon_{Cp} - rA_H,$$

где ϵ_{Cp} – среднее значение относительной проницаемости, обозначенное в ТУ на материал ($\epsilon_C = 6$); r – коэффициент корреляционной связи.

Значения r в зависимости от количества склеивающих прокладок, предусматриваемых конструкцией МПП, находится в диапазоне 0,26–0,30.

При специальном отборе тонких фольгированных диэлектриков по приведенной емкости отклонение ϵ_C подчиняется закону равной вероятности, а ее значения укладываются в диапазон $5 \pm 0,5$. Соответствующая этому диапазону характеристика дисперсии: $\sigma_\epsilon = \delta^{-1/2} \Delta \epsilon = 5,6\%$.

Выводы

Практические результаты использования установленных границ отклонений параметров конструкций линий передачи в МПП, показывают, что отклонения значений Z_0 в пределах одного слоя не превышают 8 %, а полное поле допуска Z_0 для МПП в целом составляет $\pm 10\%$.

Результаты аналитических и статистических исследований демонстрируют возможность получения требуемой стабильности характеристик элементов конструкций электрических соединений в МПП и тем самым надежность функционирования линий передачи в системе межсоединений высокопроизводительных электронных устройств информационно-вычислительной техники.

Список литературы.

1. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / – М.: ООО "Группа ИДТ", 2007 – 616 с.: ил. - (Библиотека ЭМС).
2. Медведев А.М. Обеспечение надежности межсоединений при проектировании печатных плат. – Технологии приборостроения. – 2003. – №4. – С. 3–12.
3. Медведев А.М. Современное состояние и перспективы развития производства электроники в России. – Технологии приборостроения. – 2008. – №1. – С. 3–15.
4. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т. 1/ Под ред. Ю.В. Корицкого. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.: ил.

*Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) – МАИ, Производственный технический комплекс «Печатные платы» ОАО «Государственный Рязанский приборный завод» (ПТК ПП ГРПЗ),
Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (МИЭМ НИУ ВШЭ).
Статья поступила 17.02.2012.*

Medvedev A.M., Mylov G.V., Kechiev L.N.

Problems of Technological Maintenance of Parameters of Transmission Lines in multilayer PCB

Growth of productivity of computer and telecommunications causes use of modes of the coordination of the transmission lines, excluding repeated reflections of a signal from the end and the beginnings of a line. The mode of the coordination makes rigid demands to stability impedance, as to one of the main parameters of transmission lines. For guarantees of maintenance of this requirement (MLB) it is offered to enter the test-element containing a long line by results of which testing assume to estimate conformity MLB to this requirement into structure of designs of multilayered printed-circuit-boards. However rejection of ready payments by results of this testing creates the extremely adverse situation for the manufacture, connected with uncertainty of an output suitable, with absence of confidence of happy end of an estimation of quality of a ready product on this parameter. In this connection there is a crying need in the anticipatory production management directed on maintenance of set parameters of transmission lines at the intermediate stages of manufacturing MLB so that on the final stage guaranteed to receive the necessary result.

transmission line, impedance, multilayer printed boards

Moscow aviation institute, Moscow

Ryazan State Instrument-making Enterprise (RSIE)

Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Higher School of Economics (MIEM HSE)



Серия «Библиотека ЭМС»

КЕЧИЕВ Л.Н. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ

В книге рассматривается полный комплекс вопросов проектирования печатных плат. Дается характеристика современной и перспективной элементной базы, рассматриваются электрофизические параметры печатных плат и линий передач в их составе. Большое внимание уделено методам анализа помех в цифровых узлах и обеспечению целостности сигнала (signal integrity) в них. Подробно рассмотрены важнейшие вопросы проектирование шин питания и заземления в составе плат.

Детально представлен материал по проектированию дифференциальных пар, которые все шире применяются в печатных платах.

Книгу можно рассматривать как развернутый справочник по проектированию печатных плат. Она может быть полезна разработчикам печатных плат, студентам и аспирантам соответствующих специальностей, а также её можно рекомендовать в качестве учебного пособия в системе повышения квалификации и профессионального мастерства.

616 стр., 2007 г. Тираж 2000 экз. ISBN 978-5-94833-024-2.

Книгу можно приобрести в издательстве или *заказать по Интернету: www.techizdat.ru*