

2017 IV International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye). – 2017. – P. 1–3.

3. IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures: IEEE Std 299-2006 (Revision of IEEE Std 299-1997). – New York: IEEE, 2006. – 52 p.

4. Лукас К.С. Разреженные электромагнитные экраны из проводной сетки / К.С. Лукас, Т.Ф. Данг, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2025. – № 4 (28). – С. 13–19.

5. Generation of sparse antennas and scatterers based on optimal current grid approximation / T.P. Dang, M.T. Nguyen, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // Algorithms. – 2025. – Vol. 18, No. 3. – 171 p.

6. Нгуен М.Т. Инновационные подходы к проектированию разреженных проводно-сеточных антенн: разработка алгоритмов и оценка их эффективности // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – Т. 16, № 4. – С. 1–47.

7. Данг Т.Ф. Угловой отражатель и основные методы моделирования электромагнитного рассеяния: обзор за 10 лет // Системы управления, связи и безопасности. – 2025. – № 3. – С. 35–120.

8. Ott H.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009. – 872 p.

УДК 621.396.669

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАЯЛЬНОЙ МАСКИ НА ПЕРЕКРЁСТНЫЕ НАВОДКИ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПЕЧАТНЫХ ТРАССАХ МИКРОПОЛОСКОВОЙ СТРУКТУРЫ

Д.А. Мазунов, аспирант

Научный руководитель Е.Б. Черникова, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, dmitriy.mazunov@mail.ru

Исследовано влияние паяльной маски на уровень перекрёстных наводок между двумя параллельными печатными трассами микрополосковой структуры, расположенными над опорной плоскостью. Рассмотрена структура печатной платы с фиксированными геометрическими и диэлектрическими параметрами, для которой выполнено моделирование при наличии и отсутствии слоя паяльной маски. В качестве критериев оценки использованы коэффициенты перекрёстных наводок на ближнем и дальнем концах линии. Установлено, что введение паяльной маски существенно изменяет уровень перекрёстных наводок и характер электромагнитной связи между проводниками. Полученные результаты показывают, что влияние паяльной маски должно учитываться при проектировании печатных плат.

Ключевые слова: печатная плата, паяльная маска, перекрёстные наводки, линии передачи, электромагнитная совместимость, целостность сигнала.

Перекрыстные наводки в печатных трассах определяются не только расстоянием между проводниками, но и свойствами среды, в которой распространяется электромагнитное поле. Для поверхностных микрополосковых линий существенное влияние оказывают параметры диэлектрика, расстояние до опорной плоскости, геометрия проводников и наличие дополнительных покрытий над трассой. Поэтому паяльная маска должна рассматриваться не только как технологический защитный слой, но и как фактор, влияющий на электрические параметры межсоединения [1–3].

Согласно литературным данным, наличие паяльной маски изменяет эффективную диэлектрическую проницаемость среды вокруг проводника, что отражается на волновом сопротивлении и характере распространения сигнала. Кроме того, при плотной трассировке изменение краевых полей приводит к изменению электромагнитной связи между соседними линиями. Это особенно важно для высокоскоростных печатных плат, где даже сравнительно малое изменение геометрии и материалов может заметно влиять на уровень NEXT (перекрыстной наводки на ближнем конце) и FEXT (перекрыстной наводки на дальнем конце). Для оценки перекрыстных наводок использованы коэффициенты NEXT и FEXT:

$$\text{NEXT} = \frac{V_b}{V_a} \cdot 100\% = \frac{1}{4} \left(\frac{C_{mL}}{C_L} + \frac{L_{mL}}{L_L} \right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$\text{FEXT} = \frac{V_f}{V_a} \cdot 100\% = \frac{1}{2} \left(\frac{C_{mL}}{C_L} - \frac{L_{mL}}{L_L} \right) \cdot \frac{Len}{v \cdot RT} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где V_b – напряжение помехи на ближнем конце неактивной линии, В; V_f – напряжение помехи на дальнем конце неактивной линии, В; V_a – амплитуда сигнала на активной линии, В; C_{mL} – взаимная погонная ёмкость, пФ/мм; C_L – собственная погонная ёмкость линии, пФ/мм; L_{mL} – взаимная погонная индуктивность, нГн/мм; L_L – собственная погонная индуктивность линии, нГн/мм; Len – длина участка взаимной связи, м; v – скорость распространения сигнала по линии, м/с; RT – длительность переднего фронта сигнала, с.

Геометрическая модель исследуемой структуры и схема электрических соединений, использованная при моделировании, приведены на рис. 1. Параметры структуры печатной платы приведены в табл. 1. В работе выполнено моделирование пары параллельных печатных трасс при наличии и отсутствии паяльной маски. В качестве основных параметров исследования выбраны толщина паяльной маски, ширина проводника, расстояние между проводниками, толщина диэлектрика, длина участка связи, а также параметры возбуждающего импульса.

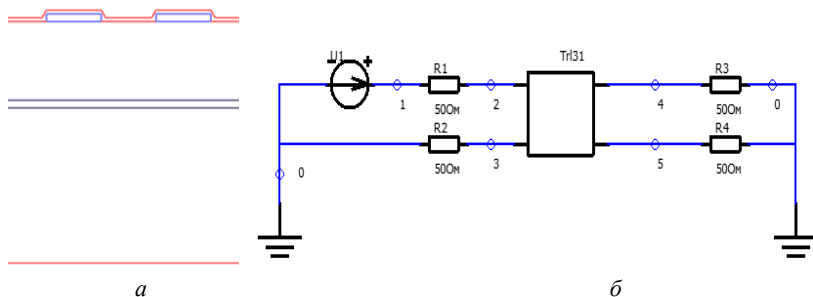


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема моделирования (б) исследуемой структуры с двумя параллельными печатными трассами над опорной плоскостью

Таблица 1
Основные параметры исследуемой структуры и воздействия

Параметры	Значение
Толщина паяльной маски	0,01 мм
Толщина диэлектрика	0,71 мм
Ширина проводника	0,25 мм
Расстояние между проводниками	0,25 мм
Длина участка связи	30 мм
Амплитуда сигнала	3,3 В
Длительность фронта	2,0 нс

Оценка влияния паяльной маски проводилась по выражениям (1) и (2) – коэффициентам перекрёстных наводок на ближнем конце NEXT и на дальнем конце FEXT соответственно. Формы напряжения сигналов и наведённых помех для исследуемой структуры представлены на рис. 2. При моделировании на вход активной линии подавался трапецидальный импульсный сигнал с амплитудой 3,3 В, длительностью переднего и заднего фронтов 2 нс, длительностью импульса 3,52 нс и периодом 15,04 нс [4, 5].

Результаты моделирования показали, что в исследуемой структуре наличие паяльной маски приводит к резкому снижению коэффициента NEXT. Коэффициент FEXT при этом увеличивается. Результаты приведены в табл. 2.

Таким образом, паяльная маска оказывает заметное влияние на перекрёстные наводки и должна учитываться при проектировании печатных плат с повышенными требованиями к электромагнитной совместимости и целостности сигнала.

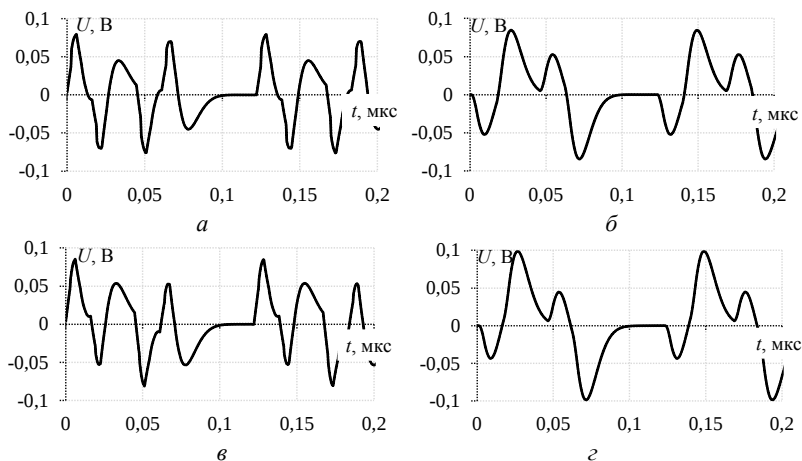


Рис. 2. Формы сигналов на входе и выходе печатных трасс:
сигнал на входе линии без паяльной маски (а); сигнал на выходе линии
без паяльной маски (б); сигнал на входе линии с паяльной маской (в);
сигнал на выходе линии с паяльной маской (г)

Т а б л и ц а 2

Результаты моделирования перекрестных наводок

Вариант структуры	NEXT, %	FEXT, %
Без паяльной маски	15,75	-0,142
С паяльной маской	1,21	0,583

ЛИТЕРАТУРА

1. Keller R.B. Design for Electromagnetic Compatibility – In a Nutshell: Theory and Practice. – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2023. – 423 p.
2. Bogatin E. Bogatin's Practical Guide to Transmission Line Design and Characterization for Signal Integrity Applications. – Norwood, MA: Artech House, 2020. – 604 p.
3. Hu R. PCB Design and Layout Fundamentals for EMC. – [Б. м.]: Independently published, 2019. – 198 p.
4. Bogatin E. Bogatin's Practical Guide to Prototype Breadboard and PCB Design. – Norwood, MA: Artech House, 2021. – 506 p.
5. Montrose M.I. EMC & the Printed Circuit Board: Design, Theory, & Layout Made Simple. – [Б. м.]: Wiley-IEEE Press, 1998. – 256 p.