

ЛИТЕРАТУРА

1. Документация по библиотеке Keras [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru-keras.com/home> (дата обращения: 16.12.2023).
2. Документация по библиотеке TensorFlow [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tensorflow.org/> (дата обращения: 16.12.2023).
3. AEG Mesher: An Open Source Structured Mesh Generator for FDTD Simulations [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/flintoftid/aegmesher>, свободный (дата обращения: 16.12.2023).
4. OpenEMS: OpenEMS is a free and open electromagnetic field solver using the FDTD method [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.openems.de/>, свободный (дата обращения: 16.12.2023).

УДК 621.315

АНАЛИЗ МАТРИЦЫ РАССЕЯНИЯ И ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ, ПРОХОДЯЩЕЙ ЧЕРЕЗ ЭКРАН ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

А.О. Зайков, магистрант

*Научный руководитель А.А. Иванов, к.т.н., с.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС»
г. Томск, ТУСУР, artem.o.zaikov@tusur.ru*

Представлены результаты анализа матрицы рассеяния для микрополосковой линии (МПЛ), проходящей через апертуру в типовом экране печатной платы. Также с помощью квазистатического моделирования оценено влияние экрана на погонные параметры (R , L , C , G) МПЛ. Полученные результаты показывают, что при перекрытии МПЛ экраном её коэффициент отражения может сильно увеличиться (на 35 дБ на частоте 10 ГГц).

Ключевые слова: целостность сигнала, микрополосковая линия, печатная плата, экранирование, электромагнитный экран.

Обеспечение целостности сигналов является важным аспектом проектирования печатных плат (ПП) для современной высокоскоростной электронной техники [1, 2]. Вместе с тем не менее значима защита ПП и расположенных на ней компонентов от воздействия электромагнитных помех. Поэтому на ПП часто устанавливаются электромагнитные экраны, обычно выполненные в виде замкнутых металлических оболочек [3–5]. При этом влияние экрана ПП на целостность проходящих по ней сигналов ранее не исследовалось. Цель данной работы – оценить влияние экрана ПП на погонные параметры микрополосковой линии передачи (МПЛ), а также на матрицу рассеяния.

Исследуемая структура. Для исследования выбрана 50-омная МПЛ общей длиной l , половина которой находится внутри

прямоугольного экрана толщиной $\tau = 1,5$ мм, шириной a , высотой b и глубиной c . Подложка МПЛ имеет следующие параметры: высоту h , ширину d , относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_r = 4,4$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 0,035$. Проводник МПЛ характеризуется толщиной $t = 35$ мкм и шириной w . Апертура экрана характеризуется шириной x и высотой y . Все размеры исследуемой структуры указаны на рис. 1.

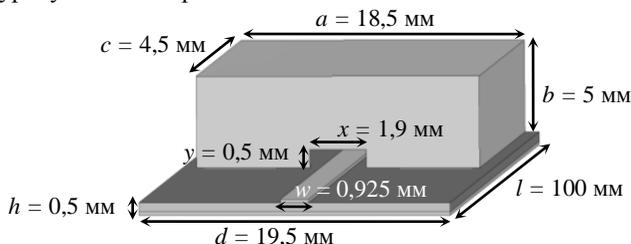


Рис. 1. Исследуемая структура ПП в виде МПЛ, наполовину перекрытой экраном

Анализ погонных параметров МПЛ. Используя квазистатическое моделирование в системе TALGAT [6], определены погонные параметры МПЛ в трех её регулярных частях: снаружи (случай 1) и внутри (случай 2) экрана, а также в области апертуры (случай 3). Вычисления выполнялись на частоте $f = 10$ ГГц. Результаты представлены в таблице, где также приведены изображения всех поперечных сечений каждой регулярной части МПЛ.

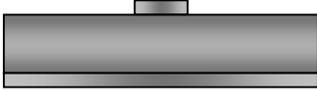
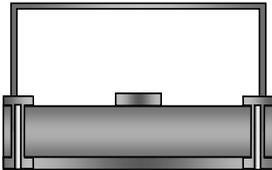
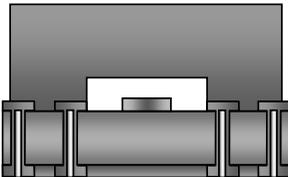
Из таблицы видно, что в случае 3 погонные параметры L и C сильно изменяются. В результате этого исходное значение Z для МПЛ уменьшается почти на 10 Ом.

Анализ матрицы рассеяния. Используя рассчитанные значения R , L , C , G , выполнено моделирование коэффициентов передачи $|S_{21}|$ и отражения $|S_{11}|$ для МПЛ с экраном и без него в диапазоне частот 0–40 ГГц. Для этого оба анализируемых варианта МПЛ заменялись эквивалентными схемами, которые показаны на рис. 2. Схема для МПЛ, наполовину помещенная в экран, состояла из трех каскадно-соединенных двухполюсников, а схема без экрана – из одного элемента, характеризующегося R_1 , L_1 , C_1 , G_1 . Результаты моделирования $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$ для МПЛ с экраном и без него представлены на рис. 3.

Из рис. 3, а видно, что в отсутствие экрана $|S_{11}|$ экспоненциально убывает с ростом частоты. Уже на 10 ГГц значение $|S_{11}|$ составляет минус 40 дБ, а при 40 ГГц оно достигает -57 дБ. Однако если МПЛ перекрыта экраном, то $|S_{11}|$ сильно увеличивается. Так, значение $|S_{11}|$ на частоте 10 ГГц составляет $-18,6$ дБ, а максимальное различие меж-

ду двумя частотными зависимостями достигает 35 дБ. При добавлении экрана к МПЛ $|S_{21}|$ закономерно изменяется (см. рис. 3, б) обратно пропорционально $|S_{11}|$. Полученные результаты показывают, что корпус может оказать существенное влияние на погонные параметры и матрицу рассеяния МПЛ, а значит, и на целостность передаваемого по ней сигнала.

**Поперечные сечения регулярных частей МПЛ
и соответствующие им погонные параметры**

Случай 1 (Снаружи)		
	$R_1, \text{ Ом/м}$	29,87
	$L_1, \text{ нГн/м}$	300,50
	$C_1, \text{ пФ/м}$	120,22
	$G_1, \text{ См/м}$	0,2181
	$Z_1, \text{ Ом}$	49,99
Случай 2 (Внутри экрана)		
	$R_2, \text{ Ом/м}$	16,06
	$L_2, \text{ нГн/м}$	297,04
	$C_2, \text{ пФ/м}$	119,99
	$G_2, \text{ См/м}$	0,2308
	$Z_2, \text{ Ом}$	49,76
Случай 3 (В области апертуры)		
	$R_3, \text{ Ом/м}$	15,38
	$L_3, \text{ нГн/м}$	216,50
	$C_3, \text{ пФ/м}$	133,99
	$G_3, \text{ См/м}$	0,2341
	$Z_3, \text{ Ом}$	40,19

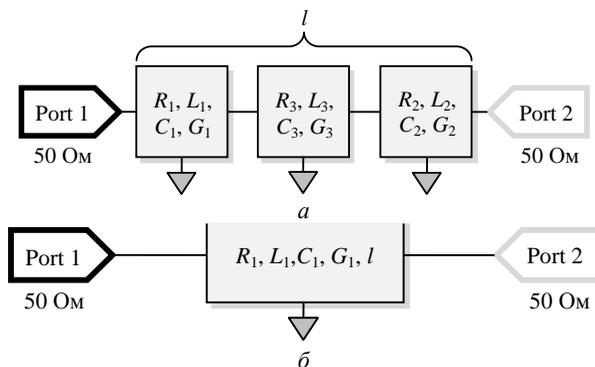


Рис. 2. Эквивалентные схемы МПЛ, наполовину помещенной в экран (а), и без экрана (б), используемые для узлового анализа

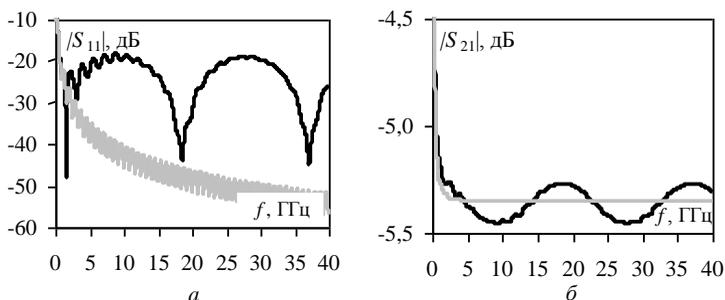


Рис. 3. Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $|S_{21}|$ (б) для МПЛ, наполовину помещенной в экран (—), и без экрана (---)

Заключение. Выполнен расчет погонных параметров МПЛ снаружи и внутри экрана, а также в его апертуре. Оценено влияние экрана на матрицу рассеяния МПЛ. Показано, что МПЛ, наполовину помещенная в экран, имеет заметно большее значение коэффициента отражения, чем МПЛ без экрана. Это говорит о том, что при прохождении МПЛ через апертуру экрана в ней могут возникать отражения, способные вызвать нарушения целостности сигналов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10165, <https://rscf.ru/project/23-79-10165/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bogtain E. Signal and power integrity Simplified. – 2nd ed. – Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR. – 2009.
2. Electromagnetic shielding: theory and applications / S. Celozzi, R. Araneo, P. Burghignoli, G Lovat. – Hoboken, NJ, USA: Willey-IEEE Press, 2022. – 560 p.
3. Montrose M.I. Printed circuit board design techniques for EMC compliance: a handbook for designers 2nd ed // Hoboken, NJ, USA: Willey-IEEE Press. – 2000.
4. Morrison R. Grounding and shielding: circuits and interference. – 6th ed. – Hoboken, NJ, USA: Willey-IEEE Press. – 2016.
5. Analysis of shielding effectiveness of enclosures with apertures and inner windows with TLM / J. Hao., P. Qi, J. Fan, Y. Guo // Prog. Electromagn. Res. M. – 2013. – Vol. 32. – P. 73–82.
6. Gazizov T.R. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations / T.R. Gazizov, I.Ye. Sagiyeva, S.P. Kuksenko // Complexity. – 2019.