

## 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](mailto: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.

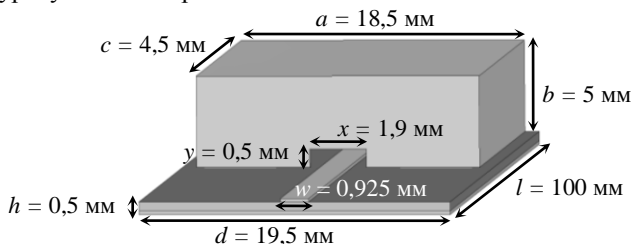


Рис. 1. Исследуемая структура ПП в виде МПЛ, наполовину перекрытой экраном

**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.

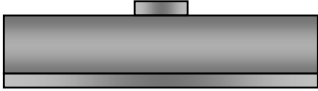
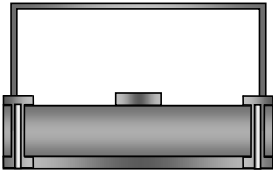
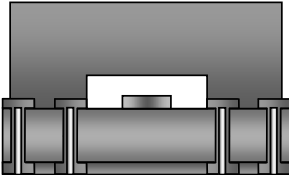
Из таблицы видно, что в случае 3 погонные параметры  $L$  и  $C$  сильно изменяются. В результате этого исходное значение  $Z$  для МПЛ уменьшается почти на 10 Ом.

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

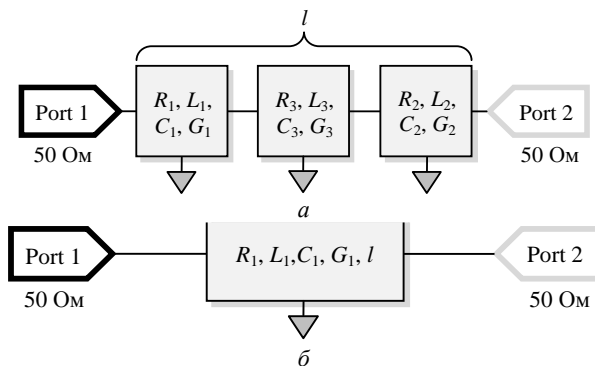


Рис. 2. Эквивалентные схемы МПЛ, наполовину помещенной в экран (а), и без экрана (б), используемые для узлового анализа

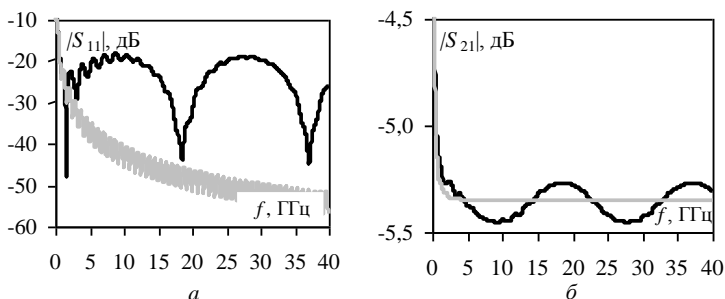


Рис. 3. Частотные зависимости  $|S_{11}|$  (а) и  $|S_{21}|$  (б) для МПЛ, наполовину помещенной в экран (—), и без экрана (---)

**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.