

**Заключение.** В работе представлены результаты моделирования четырехслойного ЗС МФ в системе ADS. С помощью встроенного функционала программы создана проектируемая структура, проведено электродинамическое моделирование для снятия частотных характеристик, получен временной отклик на воздействие СКИ.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FEWM-2022-0001).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Weber T. Linear and non-linear filters suppressing UWB pulses / T. Weber, R. Krzikalla, J.L. Ter Haseborg // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – Vol. 46, No. 3. – P. 423–430.
2. Заболоцкий А.М. Использование зеркальной симметрии для совершенствования модальной фильтрации // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2 (36). – С. 41–44.
3. Пат. на изобретение №2624465 РФ. Четырехпроводная зеркально-симметричная структура, защищающая от сверхкоротких импульсов / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, С.П. Куксенко. – Заявка № 2015137546; приоритет 02.09.2015; опубли. 04.07.2017; Бюл. № 19.
4. Начало работы с системой проектирования Advanced Design System (ADS) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-05088/technical-overviews/5992-1309.pdf>, свободный (дата обращения: 18.02.2022).

УДК 621.391

#### **ПОЛУЧЕНИЕ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ВРЕМЕНИ ТРАВЛЕНИЯ Н.О. Кузьмин, студент; Е.С. Жечев, ассистент**

*Проект ГПО ТУ-1903. Проектирование и разработка фильтров  
подавления электромагнитных помех  
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, nikita.kuzjmin@tu.tusur.ru*

На примере одиночной и связанной микрополосковых линий передачи рассматривается влияние времени травления на их характеристики. С помощью квазистатического анализа получены первичные параметры рассматриваемых структур при различном времени травления.

**Ключевые слова:** квазистатический анализ, микрополосковая линия передачи, печатная плата.

При проектировании микрополосковых пассивных устройств, например копланарных линий передачи, линий задержки и т.п., необ-

ходимо учитывать технологические особенности производства печатных плат (ПП). Так, общее время травления ПП может существенно изменить геометрию торцов печатных проводников [1]. Основными характеристиками ПП являются LC-параметры (первичные), из которых можно получить вторичные параметры. Данные характеристики напрямую зависят от качества травления, поскольку это самый простой и распространённый метод изготовления ПП. Поскольку каждая структура индивидуальна, необходимо проводить моделирование, опираясь на поперечную структуру объекта. Цель данной работы – проведение квазистатического анализа влияния времени травления печатных плат на характеристики микрополосковых линий передачи.

При травлении ПП зазоры между рельефом резиста сначала удаляются ровно, но потом боковая поверхность проводящей дорожки приобретает форму чашевидной кривой. Такой дефект может доходить вплоть до центра проводника. Также травятся боковые стенки в области верхнего основания проводника, при этом сильнее обнажается селективная защита. Описанный выше процесс травления ПП представлен на рис. 1, *а*, а фото реальной структуры, связанной микрополосковой линии (МПЛ), – на рис. 1, *б*.

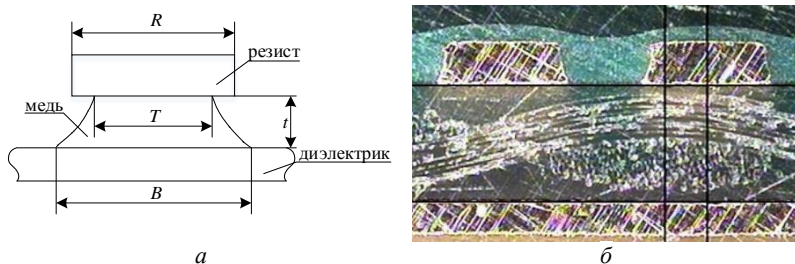


Рис. 1. Поперечное сечение проводника при травлении (*а*) и фотография реальной связанной микрополосковой линии (*б*) из [2]

На рис. 1 используются обозначения:  $R$  – ширина резиста,  $B$  – нижняя часть проводника,  $T$  – верхняя часть проводника,  $t$  – толщина проводящего слоя. Введены два параметра, характеризующие травление: подтравливание  $U$  и коэффициент бокового подтравливания  $F$ , для оценки  $U$ . Они определяются по формулам (1), (2):

$$U = \frac{(R-T)}{2}, \quad (1)$$

$$F = \frac{2t}{(B-T)}. \quad (2)$$

Подтравливание характеризует провисание селективной защиты при уменьшении ширины проводящего слоя верхнего основания. Коэффициент бокового подтравливания характеризует внутреннее сужение чашевидных дефектов на единицу толщины. Можно утверждать, что необходимо достигать малого значения  $U$  и большего значения  $F$ . Прогрессия значений травления для связанной линии из [3] и формирование топологии представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Прогрессия травления связанной МПЛ**

Время травления $S$ , с	Подтравливание $U$	Коэффициент бокового подтравливания $F$	Величина травления $R/B$
90	0,05	0,90	0,5
110	0,30	1,75	0,75
125	0,45	2,33	0,9
140	0,525	2,67	1,0

Моделирование структур одиночной и связанной МПЛ выполнено в системе квазистатического анализа TALGAT [4]. Были построены структуры одиночной и связанной МПЛ со следующими исходными параметрами:  $w$  – ширина проводника (400 мкм);  $t$  – толщина проводника (35 мкм);  $s$  – расстояние между проводниками (100 мкм);  $h$  – толщина диэлектрической основы (50 мкм) и  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость основы (4,5). Длина линии составила 1 м. Схематичное изменение геометрических параметров поперечных сечений структур одиночной и связанной МПЛ представлено на рис. 2.

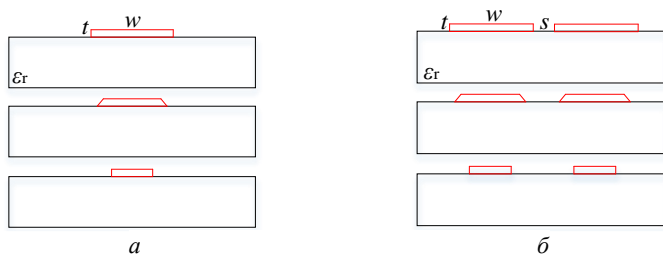
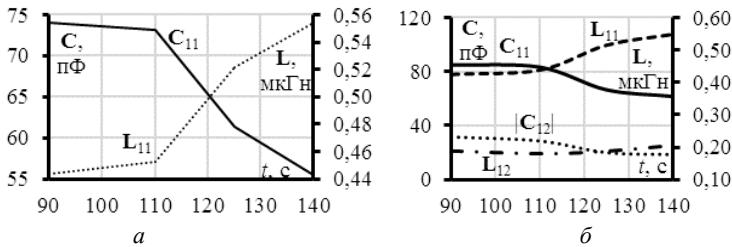


Рис. 2. Схематичное изменение геометрических параметров поперечных сечений одиночной (а) и связанной (б) МПЛ

Стоит отметить, что построенная структура ПП соответствует четвертому классу точности [5]. Получены погонные значения коэффициентов электростатической  $C$  и электромагнитной  $L$  индукций для двух структур (табл. 2). Зависимости  $C$  и  $L$  одиночной и связанной МПЛ представлены на рис. 3.

Значения погонных  $C$  и  $L$  для одиночной и связанной МПЛ

МПЛ	Параметр	$t$			
		90 с	110 с	125 с	140 с
Одиночная	$C_{11}$ , пФ	60,59	60,04	54,79	51,53
	$L_{11}$ , мкГн	0,44	0,45	0,52	0,55
Связанная	$C_{11}$ , пФ	85,00	83,19	66,47	61,56
	$L_{11}$ , мкГн	0,42	0,44	0,51	0,55
	$C_{21}$ , пФ	-31,38	-28,42	-19,83	-18,42
	$L_{21}$ , мкГн	0,19	0,18	0,19	0,20

Рис. 3. Зависимости  $C$  и  $L$  одиночной (а) и связанной (б) МПЛ

Из результатов видно, что при достижении качественного травления достигается уменьшение  $C$ . Это объясняется тем, что данное значение зависит от площади проводящего контура. В данной работе изменялись геометрические параметры проводящего слоя, соответственно изменялась и величина  $C$ . Значение  $L$  мало изменяется при изменении геометрических параметров проводящего слоя, поскольку первичным параметром, влияющим на эту характеристику, является длина линии. Таким образом, данная работа открывает возможности для изучения изменений параметров различных структур от времени травления с применением квазистатического и электродинамического анализа.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FEWM-2022-0001).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Брусницына Л.А. Технология изготовления печатных плат: учеб. пособие / Л.А. Брусницына, Е.И. Степановских. – Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 200 с.
2. Xiaoning Ye., Chunfei Ye. Transmission Lines and Basic Signal Integrity // IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity. – October 2018. – P. 1–51.

3. Технология формирования проводящего рисунка. Сайт разработчика печатных плат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pcbdesigner.ru/travlenie-pechatnykh-plat/tehnologiya-formirovaniya-provodyashhego-risunka.html>, свободный (дата обращения: 15.02.2022).

4. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.

5. ГОСТ 53429–2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. Взамен ГОСТ 23751–2009. Введ. С 30. 06. 2010. – М.: Изд-во стандартов, 2009. – 3 с.

УДК 519.612

### **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА BLOCK-IDR(s) ПРИ МНОГОВАРИАНТНОМ АНАЛИЗЕ МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ**

***В.А. Ижболдина, студентка; А.Е. Максимов, ассистент***

*Научный руководитель С.П. Куксенко, проф. каф. ТУ, д.т.н.*

*Проект ГПО ТУ-1502. Вычислительная ЭМС*

*г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, vikaIzhboldina01@gmail.com*

Выполнено исследование по уменьшению вычислительных затрат на решение последовательности матричных уравнений, возникающей при многовариантном анализе многопроводных линий передачи, при использовании метода Block-IDR(s).

**Ключевые слова:** многопроводные линии передачи, диагональное предобуславливание, LU-предобуславливание, Block-IDR(s).

При анализе методом моментов многопроводных линий передачи (МПЛП) с числом сигнальных проводников  $m$  формируется  $m$  систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с одинаковой матрицей и разными правыми частями [1]. Поэтому для решения полученного матричного уравнения вида  $\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B}$  целесообразно использовать блочные версии итерационных методов, одним из которых является Block-IDR(s) [2]. Если необходим многовариантный анализ с  $N_{\text{var}}$  вариациями изменяемых параметров МПЛП, то требуется решать последовательность матричных уравнений  $\mathbf{A}_i\mathbf{X}_i = \mathbf{B}_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_{\text{var}}$ , где размер матрицы  $\mathbf{A} - N \times N$ , а  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{B} - N \times m$ ,  $N$  – число подынтервалов, полученных при сегментации границ МПЛП. Поэтому вычислительные затраты существенно возрастают. Полученные матрицы  $\mathbf{X}$  далее используются для вычисления матриц погонных параметров МПЛП, из которых самой вычислительно-затратной является матрица коэффициентов электростатической индукции (ёмкостная матрица  $\mathbf{C}$ ) [3].