

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.17>

УДК: 621.372.2

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЯЗАННОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

Н.О. Кузьмин, М.С. Мурманский, Е.С. Жечев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Статья поступила в редакцию 8 августа 2024 г.

**Аннотация.** Проведена оценка влияния производственных дефектов на характеристики связанной микрополосковой линии. Результаты квазистатического анализа показали, что при изменении времени травления и значений  $\varepsilon_r$  изменяются значения матриц  $\mathbf{C}$  и  $\mathbf{L}$ , что в свою очередь оказывает влияние на частотные и временные характеристики линий передачи. Из результатов электродинамического анализа выявлено, что в зависимости от формы проводников изменяется линейность коэффициента передачи. Показано, что при изменении формы проводников связанных линий передачи с увеличением времени травления, резонансы сдвигаются в сторону больших частот. Анализ полученных матриц  $\mathbf{C}$  и  $\mathbf{L}$ , выявил, что с увеличением времени травления, собственные значения  $\mathbf{C}$  и  $\mathbf{Z}$  уменьшаются, а  $\mathbf{L}$  – увеличиваются. Это связано с уменьшением площади поперечного сечения проводника, а также изменением значений  $\varepsilon_r$  материалов. Выявлено, что увеличение времени травления приводит к изменению формы напряжения на дальнем конце активного проводника. Также получено, что 3 форма проводников обладает наилучшими характеристиками с точки зрения помехоподавления. Структура

с прямоугольной формой проводников обладает наименьшими значениями погонной емкости. Это оказывает влияние на характеристики связанной МПЛ.

**Ключевые слова:** квазистатическое моделирование, относительная диэлектрическая проницаемость, травление, электродинамическое моделирование.

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России.

**Автор для переписки:** Кузьмин Никита Олегович [kuzjmin.nikita23@gmail.com](mailto:kuzjmin.nikita23@gmail.com)

## Введение

Ввиду постоянного и стремительного развития радиоэлектронных систем (РЭС), их стабильная работа все больше зависит от выполнений требований электромагнитной совместимости [1, 2]. В состав РЭС входят множество электрических цепей, узлов и межсоединений. Основной сборочной единицей является печатная плата (ПП), широко применяемая из-за возможности гибкого конструирования, а также низкой стоимости. Помимо модернизации отдельных блоков и узлов РЭС, входящих в её состав, необходимо находить оптимальные методы их производства. В условиях повышенной плотности монтажа, требований к надежности и помехозащищенности, эффективность изготовленных систем и компонентов напрямую зависит от прогресса радиоконструирования [3-5]. Так, при производстве ПП необходимо учитывать дефекты, возникающие в процессе производства, поскольку их не учёт может привести к негативным последствиям работы РЭС, вплоть до оказания негативного влияния на окружающую среду и людей. Одним из основных производственных дефектов при изготовлении ПП является несоответствие размеров, расположения и проводимости проводящих дорожек. Неправильное расположение и размеры дорожек могут привести к короткому замыканию или разрыву цепи, что негативно скажется на работоспособности устройства. Также важно учитывать дефекты, связанные с качеством материалов, от которых зависят электрические характеристики ПП [6].

Игнорирование производственных дефектов при изготовлении ПП может привести к серьезным последствиям, таким как недостоверная передача данных, перегрев устройства, выход из строя целых узлов и т.д. [7].

Работы по тематике оценки влияния травления проводников на временные характеристики микрополосковых линий передачи уже публиковались [8, 9], однако там лишь проводилась оценка влияния травления проводников прямоугольной формы и формы проводников в виде правильной трапеции. В первой изменяется параметр подтравливания и, соответственно, геометрия проводника, а во второй проводится сравнение результатов моделирования по предложенной прогрессии, а также экспериментальных результатов. Дополнительно к этому, зная, что при производстве ПП заготовки проходят целый комплекс поэтапного изготовления, необходимо учитывать ряд факторов (например, электрофизические параметры подложки ПП), влияющих на качество изготовленного прототипа, и как следствие на устройство, в состав которого оно входит.

Научной новизной является, выявление зависимостей, временных и частотных характеристик, пассивных устройств, основанных на микрополосковых линиях при воздействии нескольких основных производственных факторов. Практической значимостью является учет изменения временных и частотных характеристик пассивных устройств на основе микрополосковых линий.

Таким образом, целью данной работы является оценка влияния травления проводников и изменения диэлектрической проницаемости подложки ПП на временные и частотные характеристики связанной микрополосковой линии.

## **1. Материалы, подходы и методы**

Если материал композитный, например армированный слоистый диэлектрик, значение относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_r$ ) может значительно изменяться в зависимости от долевого содержания каждой компоненты [10]. Однако при производстве ПП с подложкой из материала FR-4 изменение  $\epsilon_r$  наиболее вероятно из-за самой технологии изготовления. Неверная

ориентация стеклянных волокон вносит влияние в значение диэлектрической проницаемости [11], однако согласно стандарту [12], достигнутое значение  $\epsilon_r = 4.5$ . Если проводить сравнение с AD1000 (ламинат, армированный стекловолокном, то у FR-4 наблюдается низкая частотная стабильность  $\epsilon_r$  [12, 13]. Выбор данных материалов основывается, на том, что данные материалы повсеместно используются при проектировании РЭА [14, 15]. На рисунке 1 представлена частотная зависимость отклонения  $\epsilon_r$  материала AD1000 и FR-4.

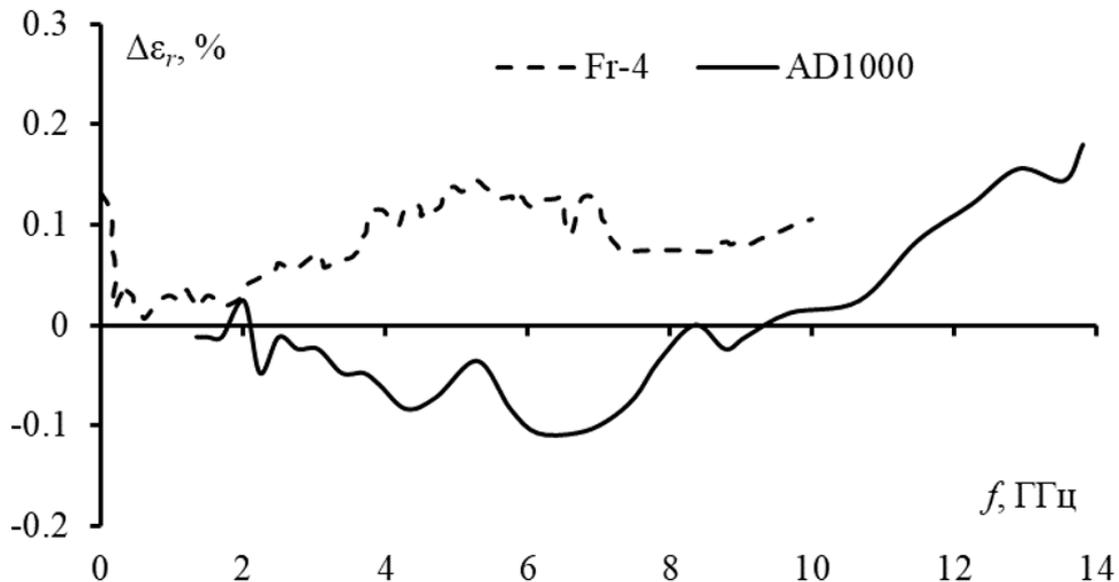


Рис. 1. Частотная зависимость  $\epsilon_r$  материалов AD1000 и FR-4.

Существует ряд методов изготовления ПП, наиболее распространенным из которых является субтрактивный метод [16, 17]. Упрощенная технология изготовления ПП включает в себя несколько следующих этапов: заготовка ПП покрывается селективной защитой на участках, где необходимо сохранить проводящий рисунок; подготовленная заготовка погружается в травильный раствор и находится в нем до тех пор, пока не стравятся излишки проводящего слоя, незащищенные селективной защитой. Таким образом, при травлении происходит стравливание меди, это неравномерный процесс, при котором проводники могут приобретать различные формы [18, 19], наиболее встречающиеся из которых представлены на рисунке 2.

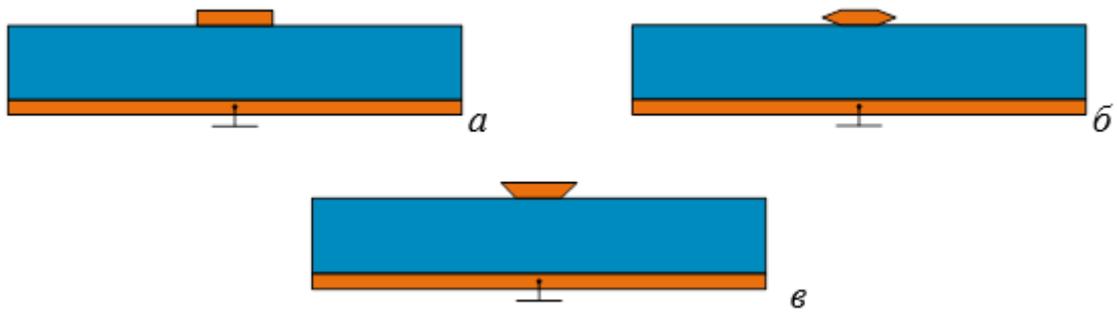


Рис. 2. Поперечные сечения трапецевидной (а), овальной (б) и Т-образной (в) форм проводников.

Форма проводника зависит от нескольких основных факторов: толщина меди, циркуляция травильного раствора, время травления [20]. В данной работе рассматривается влияние времени травления на характеристики линии передачи на примере связанной микрополосковой линии (МПЛ). Данная линия выбрана в следствии простоты реализации и частоты использования таких линий передачи. Поперечное сечение рассматриваемых структур, и её эквивалентная схема включения представлены на рисунке 3.



Рис. 3. Поперечное сечение связанной МПЛ (а) и её эквивалентная схема включения (б).

Выполнен анализ характеристик связанной МПЛ, при этом первый проводник являлся сигнальным, второй – нагруженным на резисторы с обоих концов. Параметры поперечного сечения связанной МПЛ: ширина проводника  $w = 0.03$  мм, высота проводника  $t = 0.005$  мм, расстояние между проводниками  $s = 0.33$  мм, высота диэлектрической подложки  $h = 0.1$  мм, длина линии  $l = 5$  см. Рассмотрены структуры с диэлектрическими подложками из керамики AD1000 и стеклотекстолита FR-4, со значениями  $\epsilon_{rAD1000} = 10.2$  и  $\epsilon_{rFR-4} = 4.5$ . Номинал резисторов в эквивалентной схеме включения составил 50 Ом. Оценка временных откликов выполнена на примере трапецеидального импульса с параметрами: время нарастания, длительности и спада фронта по 50 пс, общей

длительностью воздействия – 150 пс. Такое воздействие выбрано, потому что его спектр лежит в исследуемом частотном диапазоне.

Рассмотрены три случая: два промежуточных времени травления и эталонный случай, у которого проводники имеют прямоугольную форму (далее обозначается, как 1). При травлении рассмотрены структуры с проводниками трапецевидной формы, у которых нижнее основание, находящееся на диэлектрической подложке, больше верхнего основания (далее обозначается, как 2) и обратный этому случаю (далее обозначается, как 3). Все исследуемые структуры представлены на рисунке 4.

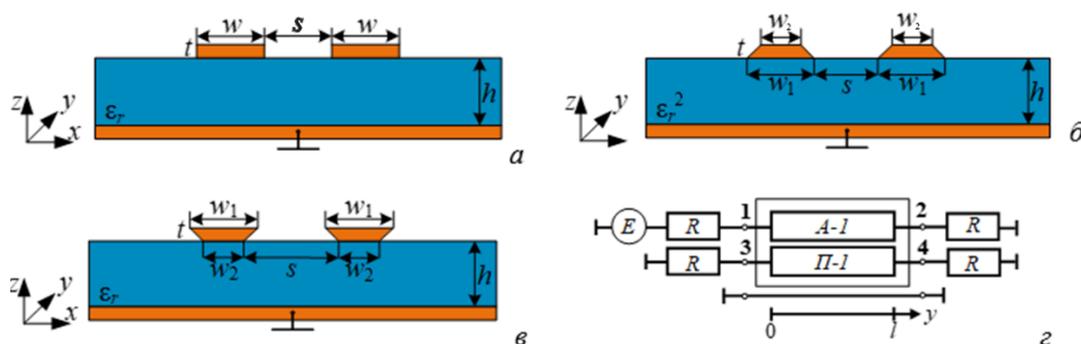


Рис. 4. Поперечные сечения связанных МПЛ с формами проводников 1 (а), 2 (б), 3 (в) и их эквивалентная схема включения (г).

Предполагалось, что каждому случаю соответствуют индивидуальные значения геометрических параметров с постоянным значением  $\epsilon_r$  диэлектрических подложек 4.5 и 10.2 для FR-4 и AD1000 соответственно. Далее для частного случая при времени травления  $t = 110$  с, изменялись значения  $\epsilon_r$  диэлектриков FR-4 и AD1000. Брались значения  $\epsilon_r$ , равные 3.6, 5.4 и 9.85, 10.55 (в соответствии с их техническими документациями) для FR-4 и AD1000 соответственно. Прогрессия травления и значения погрешности  $\epsilon_r$  диэлектриков, используемых в работе, представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1. Геометрические значения проводников при различном времени травления для рассматриваемых структур.

Время травления $t$ , с	Форма проводника и их геометрические параметры				
	1	2		3	
	$w$ , МКМ	$w_1$ , МКМ	$w_2$ , МКМ	$w_1$ , МКМ	$w_1$ , МКМ
110	30	40	30	40	30
140	30	30	15	30	15

Таблица 2. Значения  $\varepsilon_r$  при различном времени травления для рассматриваемых структур.

Время травления $t$ , с	Материал и их $\varepsilon_r$	
	FR-4	AD1000
110	3.6	9.85
140	5.4	10.55
Эталон	4.5	10.2

## 2. Результаты квазистатического моделирования

В данном разделе приведены результаты исследования связанной МПЛ во временной области. Моделирование проведено в системе квазистатического анализа TALGAT [21]. Она позволяет получить точные рассчитанные значения коэффициентов матриц электростатической ( $\mathbf{C}$ ) и электромагнитной индукции ( $\mathbf{L}$ ) с минимальными ресурсными затратами, поскольку предполагается, что в исследуемой структуре распространяется только квази-поперечная Т-волна. Проведено моделирование каждой структуры при различном времени травления  $t$  с эталонными значениями  $\varepsilon_r$ . Подавалось воздействие в форме трапециевидного импульса с амплитудой ЭДС 1 В. Сегментация задавалась согласно  $t/5$ . Получены временные отклики на помеховый импульс и погонные значения коэффициентов матриц  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{Z}$  (таблицах 3, 4), где собственные значения матриц выделены жирным шрифтом.

Таблица 3. Значения коэффициентов матриц  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{Z}$  для рассматриваемых структур с диэлектриком FR-4 при различных  $t$ .

Структура	$t$ , с	$\mathbf{C}$ , пФ/м		$\mathbf{L}$ , мкГн/м		$\mathbf{Z}$ , Ом/м	
2	110	<b>69.298</b>	-28.456	<b>0.564</b>	0.267	<b>98.860</b>	43.765
		-28.456	<b>69.298</b>	0.267	<b>0.564</b>	43.765	<b>98.860</b>
2	140	<b>58.844</b>	-20.806	<b>0.627</b>	0.259	<b>110.321</b>	42.326
		-20.806	<b>58.844</b>	0.259	<b>0.627</b>	42.326	<b>110.321</b>
3	110	<b>83.869</b>	-26.668	<b>0.565</b>	0.269	<b>88.641</b>	34.268
		-40.477	<b>89.867</b>	0.269	<b>0.565</b>	41.024	<b>85.706</b>
3	140	<b>79.624</b>	-20.584	<b>0.630</b>	0.262	<b>93.438</b>	31.067
		-30.720	<b>83.090</b>	0.262	<b>0.630</b>	36.700	<b>91.511</b>
1	-	<b>59.298</b>	-22.558	<b>0.602</b>	0.262	<b>108.915</b>	44.478
		-22.558	<b>59.298</b>	0.262	<b>0.602</b>	44.478	<b>108.915</b>

Таблица 4. Значения коэффициентов матриц  $L$ ,  $C$ ,  $Z$  для рассматриваемых структур с диэлектриком AD1000 при различных  $t$ .

Структура	$t$ , с	$C$ , пФ/м		$L$ , мкГн/м		$Z$ , Ом/м	
2	110	<b>140.330</b>	-55.338	<b>0.564</b>	0.267	<b>68.905</b>	29.963
		-55.338	<b>140.330</b>	0.267	<b>0.564</b>	29.963	<b>68.905</b>
2	140	<b>119.519</b>	-40.488	<b>0.627</b>	0.259	<b>76.936</b>	28.963
		-40.488	<b>119.519</b>	0.259	<b>0.627</b>	28.963	<b>76.936</b>
3	110	<b>188.512</b>	-50.603	<b>0.565</b>	0.269	<b>58.303</b>	21.134
		-91.128	<b>204.609</b>	0.269	<b>0.565</b>	26.840	<b>56.036</b>
3	140	<b>193.230</b>	-40.958	<b>0.630</b>	0.262	<b>59.252</b>	18.400
		-71.377	<b>202.440</b>	0.262	<b>0.630</b>	22.780	<b>57.926</b>
1	1	<b>117.868</b>	-43.265	<b>0.602</b>	0.262	<b>76.787</b>	30.860
		-43.265	<b>117.868</b>	0.262	<b>0.602</b>	30.860	<b>76.787</b>

Из таблиц 3 и 4 видно, что с увеличением времени травления значения коэффициентов матриц  $C$  и  $Z$  уменьшаются, а  $L$  – увеличиваются. Изменение рассматриваемых параметров связано с изменением формы проводника. Площадь поперечного сечения проводника уменьшается, что приводит к результату, описанному выше. Видно, что у структуры с диэлектрическим наполнением из FR-4 наблюдается большее изменение рассматриваемых параметров между структурами с трапециевидными и прямоугольными проводниками. Так, для структуры из материала FR-4 значение  $C_{11}$  увеличилось в 1.17 раза (между случаем  $t = 110$  с при формах проводников 1 и 2). Значения  $L_{11}$  и  $Z_{11}$  уменьшились в 1.07 и 1.1, соответственно. Для дополнительного анализа формы напряжений использовались  $N$ -нормы [22]. Вычисления  $N$ -нормы основаны на применении математических операторов ко всей форме сигнала. Краткое описание  $N$ -норм представлено в таблице 5. Также в ходе моделирования получены зависимости выходных напряжений для рассматриваемых структур, представленные на рисунке 5.

Таблица 5. Краткое описание  $N$ -норм.

№	Формула	Наименование	Обозначение
$N_1$	$ U(t) _{\max}$	Пиковое (абсолютное) значение	Сбой схемы / электрический пробой / дуговые эффекты
$N_2$	$\left  \frac{\delta U(t)}{\delta t} \right $	Пиковая (абсолютная) производная	Искрение компонента / сбой схемы
$N_3$	$\left  \int_0^t U(t) \right _{\max}$	Пиковый (абсолютный) импульс	Диэлектрический пробой (если $R$ обозначает поле $E$ )
$N_4$	$\int_0^{\infty}  U(t)  dt$	Выпрямленный общий импульс	Повреждение оборудования
$N_5$	$\left\{ \int_0^{\infty}  U(t) ^2 dt \right\}^{1/2}$	Квадратный корень интеграла действия	Выгорание компонента

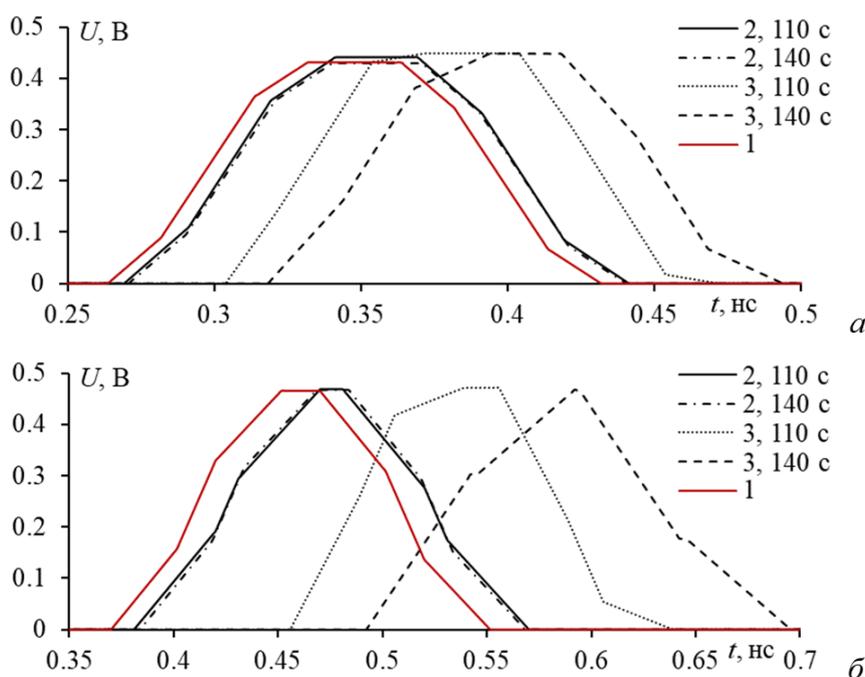


Рис. 5. Зависимости выходных напряжений для структур связанной МПЛ с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при  $t = 110$  с (—); 2 при  $t = 140$  с (— ·); 3 при  $t = 110$  с (···); 3 при  $t = 140$  с (- -) и формы 1 (—) (квазистатический анализ).

Из рисунка 5 видно, что форма проводников 1 характеризуется минимальным временем задержки  $T$ , которое составило 0.263 и 0.431 нс, соответственно. Также следует, что 3 форма проводников характеризуется максимальным значением  $T$ , которое соответствует 0.318 и 0.495 нс для FR-4 и

AD1000, соответственно. Выявлено, что форма 2 характеризуется средними значениями  $T$ , которые составили 0.263 и 0.44 нс. Значение  $T$  структуры с проводниками формы 2 находится между значениями  $T$  структур с проводниками форм 1 и 3. Также в структурах с материалом AD1000 значение напряжения изменяется незначительно. Однако с материалом FR-4 видно изменение напряжения у структуры с проводниками формы 3. Наибольшая разница амплитуд напряжений на выходе активной линии наблюдается между сигналами структур с проводниками формы 1 и 3 (разница составила 0.044 В). Также видно, что длительности сигналов отличаются. В случае структур с материалом AD1000, сигнал имеет треугольную форму, что связано с потерями, которые больше в таких структурах. Отличие  $T$  между структурами с проводниками трапецевидных форм является наибольшим и составляет 0.11 и 0.12 нс, соответственно. В таблице 6 представлены вычисленные  $N$ -нормы для рассматриваемых структур с диэлектриком FR-4 при различном  $t$ .

Таблица 6. Значения вычисленных  $N$ -норм для рассматриваемых структур с диэлектриком FR-4 при различных  $t$ .

Структура	$t$ , с	$N_1$	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
2	110	0.442	9.248	5	5.013	3.952
2	140	0.431	9.014	5	5.01	3.877
3	110	0.397	5.786	5	5	3.569
3	140	0.398	5.485	5	5	3.565
1	-	0.432	9.026	4.999	5.029	3.897

Видно, что изменение формы проводника и времени травления влияет на значения всех  $N$ -норм. Минимальное значение  $N_1$  наблюдается при 3 форме проводника и времени травления 110 с. Так же видно, что 3 форма проводника позволяет уменьшить значение  $N_2$  по сравнению с 1 и 2 формой в 1.557 раз. Дополнительно к этому изменение формы и времени травления практически не оказывает влияние на значение  $N_3$  и  $N_4$ . Минимальное значение  $N_5$  составило  $3.565 \cdot 10^6$ . В таблице 7 представлены вычисленные  $N$ -нормы для рассматриваемых структур с диэлектриком AD1000 при различном  $t$ .

Таблица 7. Значения вычисленных  $N$ -норм для рассматриваемых структур с диэлектриком AD1000 при различных  $t$ .

Структура	$t$ , с	$N_1$	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
2	110	0.386	7.864	5	5.245	3.522
2	140	0.468	9.339	5	5	4.035
3	110	0.285	6.319	5	5.075	3.172
3	140	0.272	5.47	5	5.025	3.181
1	-	0.466	9.301	5	5.001	4.058

Видно, что минимальные значения  $N_1$  и  $N_2$  наблюдаются для структуры с 3 формой проводников и временем травления 140 с. Форма проводников и изменение времени травления не оказывают никакого влияния на значения  $N_3$ . Максимальное значение  $N_4$  наблюдается при 2 форме проводников и времени травления 110 с. Максимальное значение  $N_5$  наблюдается для эталонного случая и составляет  $4.058 \cdot 10^6$ .

На рисунке 6 представлены частотные зависимости  $|S_{21}|$  для связанной МПЛ с диэлектриками из FR-4 и AD1000.

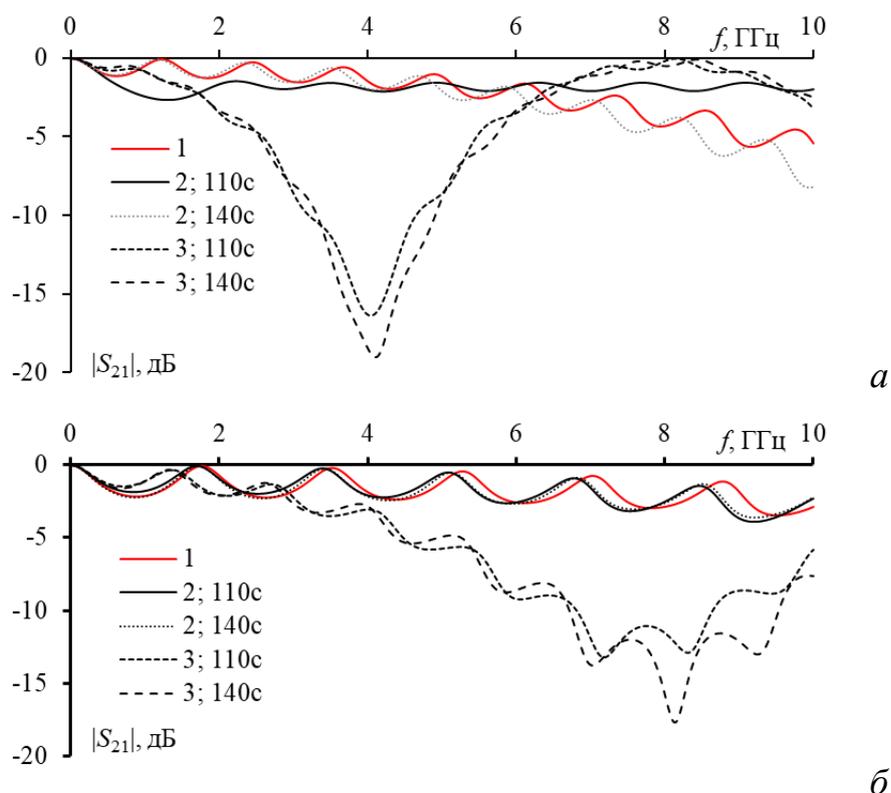


Рис. 6. Частотные зависимости модуля коэффициента передачи с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при  $t = 110$  с (—); 2 при  $t = 140$  с (- ·); 3 при  $t = 110$  с (···); 3 при  $t = 140$  с (- -) и формы 1 (—) (квазистатический анализ).

Из рисунка. 6а видно, что формы проводников 3 с различным временем травления обладают наибольшим ослаблением, которое достигает -18 дБ. Такое ослабление вызвано формой проводников. Из рисунка 6б видно, что минимальное ослабление составляет -18 дБ. Таким образом можно сделать вывод, что форма проводников с различным временем травления оказывает значительно влияние на частотные характеристики связанной МПЛ.

После рассматривались структуры с геометрическими значениями, соответствующими  $t = 110$  с. Проведено моделирование каждой структуры при различных  $\epsilon_r$  при  $t = 110$  с. Получены временные отклики на помеховый импульс и погонные значения коэффициентов матриц **L**, **C**, **Z** (таблица 8, 9), где собственные значения матриц выделены жирным шрифтом.

Таблица 8. Значения коэффициентов матриц **L**, **C**, **Z** для рассматриваемых структур при  $t = 110$  с при различных  $\epsilon_r$  (FR-4).

Структура	Структура; $\epsilon_r$	C, пФ/м		L, мкГн/м		Z, Ом/м	
2	3.6	<b>58.437</b>	-23.744	<b>0.564</b>	0.267	<b>107.418</b>	47.330
		-23.744	<b>58.437</b>	0.267	<b>0.564</b>	47.330	<b>107.418</b>
2	5.4	<b>81.182</b>	-31.882	<b>0.564</b>	0.267	<b>90.521</b>	39.292
		-31.882	<b>81.182</b>	0.267	<b>0.564</b>	39.292	<b>90.521</b>
3	3.6	<b>68.006</b>	-22.900	<b>0.565</b>	0.269	<b>98.975</b>	39.211
		-32.753	<b>72.416</b>	0.269	<b>0.565</b>	45.897	<b>95.982</b>
3	5.4	<b>100.013</b>	-30.441	<b>0.565</b>	0.269	<b>80.857</b>	30.710
		-48.323	<b>107.604</b>	0.269	<b>0.565</b>	37.369	<b>78.030</b>
1	4.5	<b>59.298</b>	-22.558	<b>0.602</b>	0.262	<b>108.915</b>	44.478
		-22.558	<b>59.298</b>	0.262	<b>0.602</b>	44.478	<b>108.915</b>

Таблица 9. Значения коэффициентов матриц **L**, **C**, **Z** для рассматриваемых структур при  $t = 110$  с с различных при различных  $\epsilon_r$  (AD1000).

Структура	$\epsilon_r$	C, пФ/м		L, мкГн/м		Z, Ом/м	
2	9.85	<b>137.355</b>	-52.026	<b>0.564</b>	0.267	<b>69.128</b>	29.545
		-52.026	<b>137.355</b>	0.267	<b>0.564</b>	29.545	<b>69.128</b>
2	10.55	<b>146.188</b>	-55.197	<b>0.564</b>	0.267	<b>66.969</b>	28.584
		-55.197	<b>146.188</b>	0.267	<b>0.564</b>	28.584	<b>66.969</b>
3	9.85	<b>181.979</b>	-49.132	<b>0.565</b>	0.269	<b>59.366</b>	21.562
		-87.977	<b>197.456</b>	0.269	<b>0.565</b>	27.335	<b>57.066</b>
3	10.55	<b>195.053</b>	-52.075	<b>0.565</b>	0.269	<b>57.294</b>	20.729
		-94.283	<b>211.769</b>	0.269	<b>0.565</b>	26.371	<b>55.059</b>
1	10.2	<b>117.868</b>	-43.265	<b>0.602</b>	0.262	<b>76.787</b>	30.860
		-43.265	<b>117.868</b>	0.262	<b>0.602</b>	30.860	<b>76.787</b>

Видно, что с увеличением времени травления значения коэффициентов матриц  $\mathbf{C}$  и  $\mathbf{Z}$  уменьшаются, а  $\mathbf{L}$  – увеличиваются. Изменение рассматриваемых параметров связано с изменением формы проводника. Площадь поперечного сечения проводника уменьшается, что приводит к результату, описанному выше. Также видно, что у структуры с диэлектрическим заполнением из FR-4 наблюдается большее изменение рассматриваемых параметров между структурами с трапецевидными и прямоугольными проводниками. Так, для структуры с диэлектрической подложкой из FR-4 значение  $C_{11}$  увеличилось в 1.17 раза (между случаем  $t = 110$  с при формах проводников 1 и 2). Значения  $L_{11}$  и  $Z_{11}$  уменьшились в 1.07 и 1.1, соответственно. Также в ходе моделирования получены зависимости выходных напряжений для рассматриваемых структур, представленные на рисунке 7.

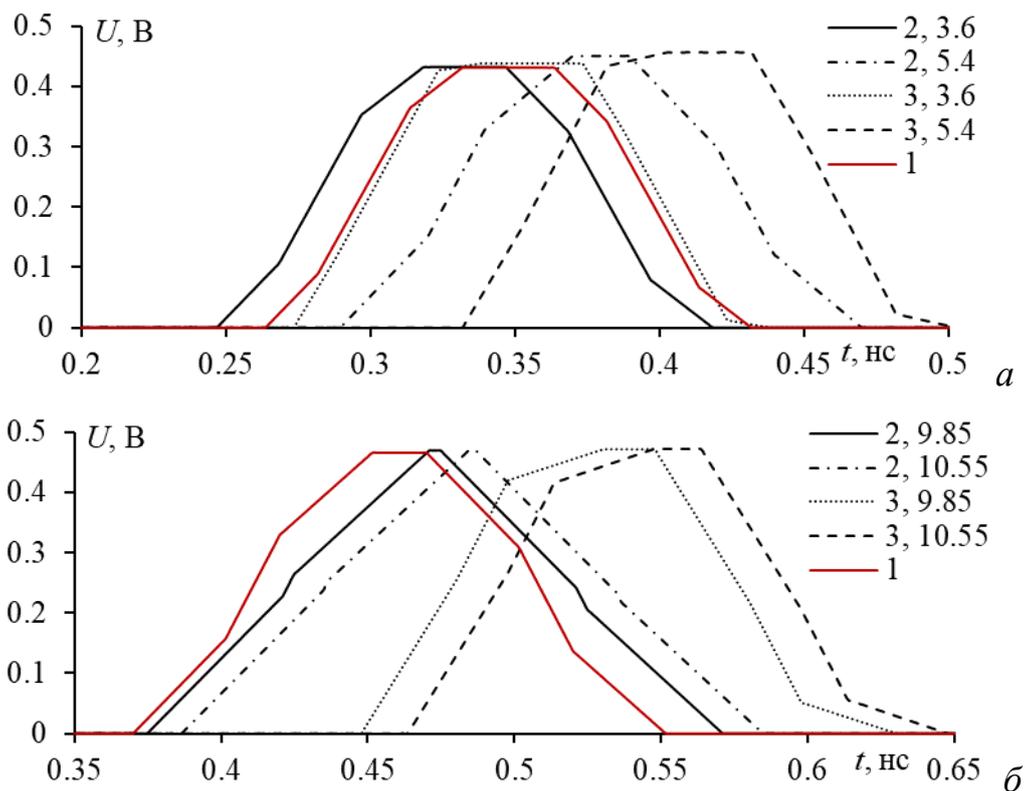


Рис. 7. Зависимости выходных напряжений для структур связанной МПЛ с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при  $\epsilon_r = 3.6$ , 9.85 (—); 2 при  $\epsilon_r = 5.4, 10.55$  (- ·); 3 при  $\epsilon_r = 3.6, 9.85$  (···); 3 при  $\epsilon_r = 5.4, 10.55$  (- -) и формы 1 (—) (квазистатический анализ).

Видно, что форма проводников 2 характеризуется минимальным временем задержки  $T$  для FR-4, которое составило 0.249 нс при  $\epsilon_r = 3.6$ . Также следует,

что 3 форма проводников характеризуется максимальным значением времени задержки  $T$ , которое соответствует 0.332 и 0.464 нс для FR-4 и AD1000, соответственно. Выявлено, что форма 2 характеризуется средними значениями  $T$ , которые составили 0.376 и 0.391 нс для AD1000. Также в структурах с материалом AD1000 значение напряжения изменяется незначительно. Однако с материалом FR-4 видно изменение напряжения у структуры с проводниками формы 3. Наибольшая разница амплитуд напряжений на выходе активной линии наблюдается между сигналами структур с проводниками формы 1 и 3 (разница составила 0.016 В). Также видно, что длительности сигналов отличаются. В случае структур с материалом AD1000, сигнал имеет треугольную форму, что связано с потерями, которые больше в таких структурах. В таблице 10 представлены значения вычисленных  $N$ -норм для рассматриваемых структур с диэлектриком FR-4 при различном  $\epsilon_r$ .

Таблица 10. Значения вычисленных  $N$ -норм для рассматриваемых структур с диэлектриком FR-4 при различных  $\epsilon_r$ .

Структура	$\epsilon_r$	$N_1$	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
2	3.6	0.435	8.871	5	5.023	3.882
2	5.4	0.451	8.995	5	5	3.943
3	3.6	0.435	5.772	5	5	3.66
3	5.4	0.365	5.785	5	5.001	3.473
1	4.5	0.432	9.026	4.999	5.028	3.897

Из таблицы 10 видно, что минимальное значение  $N_1$  наблюдается при 3 форме проводников с  $\epsilon_r$  равным 5.4. Так же выявлено, что 3 форма проводников обладает наименьшими значениями среди всех  $N$ -норм. Дополнительно, к этому видно, что на значения  $N_3$  не оказывает влияния ни форма проводников, ни изменение диэлектрической проницаемости. В таблице 11 представлены вычисленные значения  $N$ -норм для рассматриваемых структур с диэлектриком AD1000 при различном  $t$  и  $\epsilon_r$ . Видно, что минимальным значением  $N_1$  обладает 3 форма проводников со значением относительной диэлектрической проницаемости 9.85. Так же видно, что значения  $N_3$  и  $N_4$  практически не изменяются при различных формах проводников и  $\epsilon_r$ . Максимальное значение  $N_3$

соответствует 3 форме проводников с  $\epsilon_r = 10.55$  и временем травления 140 с. На рисунке 8 представлены частотные зависимости модуля коэффициента передачи с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б).

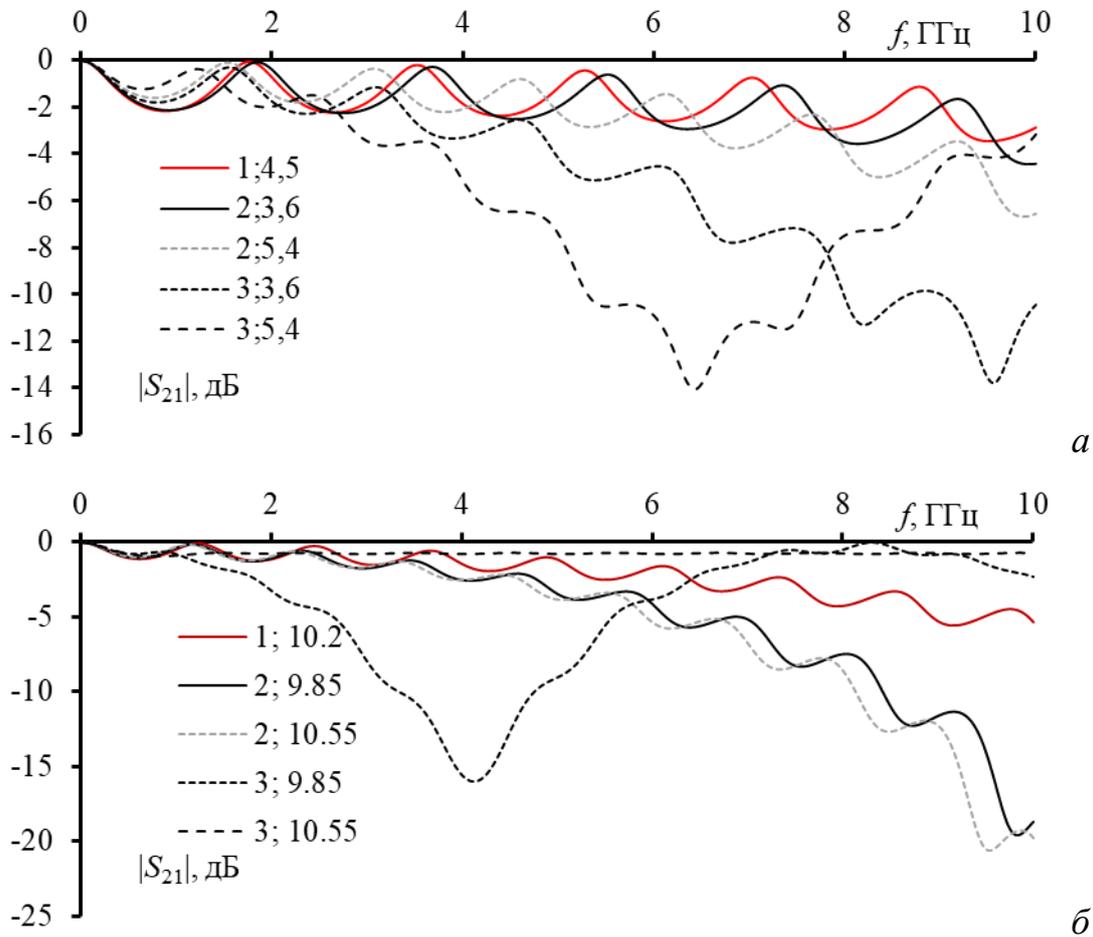


Рис. 8. Частотные зависимости модуля коэффициента передачи с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при  $t = 110$  с (—); 2 при  $t = 140$  с (- ·); 3 при  $t = 110$  с (···); 3 при  $t = 140$  с (- -) и формы 1 (—) (квазистатический анализ).

Из рисунка 8а видно, что изменение  $\epsilon_r$  для 3 формы проводников приводит к уменьшению ослабления с 18 до 14 дБ. Также выявлено, что изменение диэлектрика приводит к увеличению вносимого ослабления. Дополнительно к этому выявлено, что структура с проводниками формы 1 вносит небольшое ослабление на высоких частотах.

### 3. Результаты электродинамического моделирования

Использование среды электродинамического анализа позволяет провести тщательное исследование изучаемого объекта за счет учета распространения как квази Т-волн, так и высших типов волн. Характеристики структур получены в среде электродинамического моделирования COMSOL Multiphysics. Получены частотные зависимости характеристик рассматриваемых структур (рисунок 9).

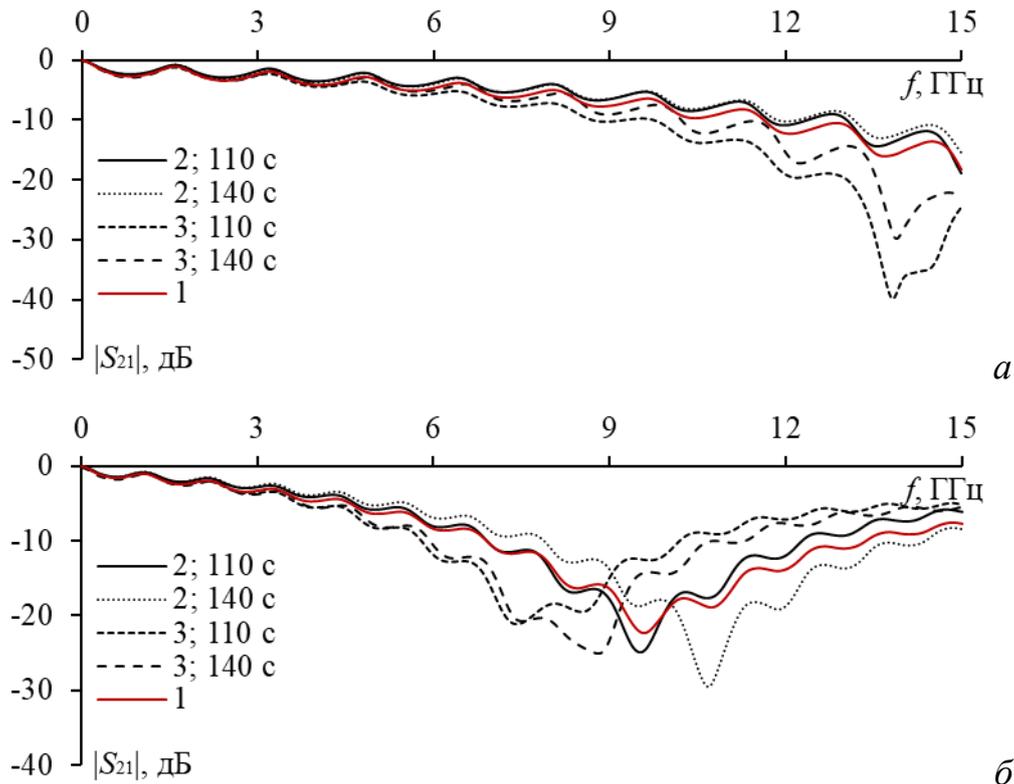


Рис. 9. Частотные зависимости модуля коэффициента передачи с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при  $t = 110$  нс (—); 2 при  $t = 140$  нс (· · ·); 3 при  $t = 110$  нс (— · —); 3 при  $t = 140$  нс (- -) и формы 1 (—) (электродинамический анализ).

При электродинамическом моделировании получено значительно большее ослабление относительно результатов, представленных на рисунке 9. Наблюдаемые расхождения результатов двух видов моделирования связаны с тем, что в квазистатическом моделировании рассматривается структура при распространении квази Т-волны, а в электродинамическом моделировании помимо нее распространяются более высокие типы волн. Из-за разницы форм проводников и значений  $\epsilon_r$  увеличивается вносимое затухание после 5 ГГц. При увеличении времени травления резонансы сдвигаются в сторону больших

частот. При этом увеличение времени травления приводит к незначительному увеличению вносимого ослабления на высоких частотах (2 и 3 формы проводников).

На рисунке 10 показаны результаты электродинамического моделирования во временной области.

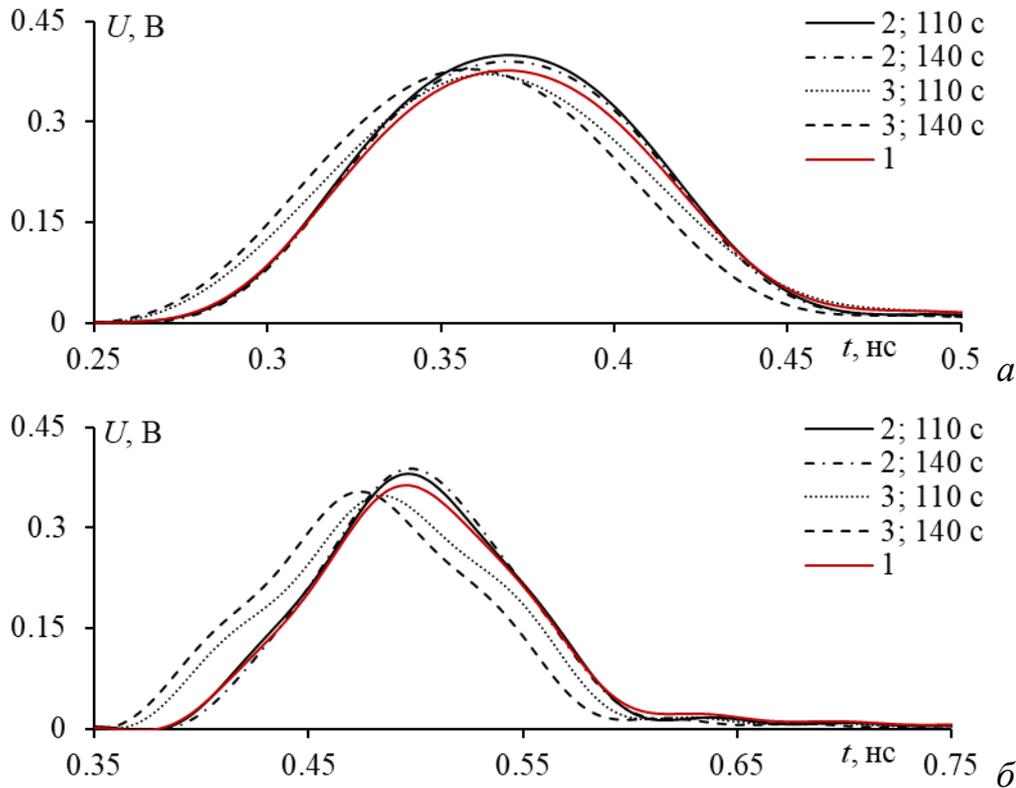


Рис. 10. Зависимости выходных напряжений для структур связанной МПЛ с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при  $t = 110$  нс (—); 2 при  $t = 140$  нс (---); 3 при  $t = 110$  нс (···); 3 при  $t = 140$  нс (---) и формы 1 (- -) (электродинамический анализ).

Видно, что формы напряжения на дальнем конце сигнального проводника различаются по времени прихода импульсов. Также наблюдается незначительное отличие в пиковом значении. Дополнительно к этому выявлено, что изменение диэлектрика с FR-4 на AD1000 приводит к сдвигу импульса во временной области. Это вызвано тем, что увеличивается задержка 2 моды, которая распространяется преимущественно в диэлектрике. Из-за этого импульс приходит позже по времени (на 0.139 нс). Также из рисунка 10 видно, что структуры с проводниками 3 формы имеют минимальную задержку.

В таблице 12 представлены вычисленные  $N$ -нормы временных откликов в конце активной линии, полученных при помощи электродинамического моделирования для структуры с диэлектриком из материала с FR-4.

Таблица 12. Вычисленные  $N$ -нормы временных откликов в конце активной линии, полученных при электродинамическом анализе для структуры с диэлектриком FR-4.

Структура	$t, c$	$N_1$	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
1	-	0.378	6.245	4.897	4.905	3.375
2	110	0.401	6.787	4.922	4.939	3.556
2	140	0.39	6.782	4.908	4.91	3.474
3	110	0.371	5.386	4.906	4.927	3.33
3	140	0.379	5.852	4.903	4.907	3.366

Из таблицы 12, видно, что минимальным значением  $N_1$  обладает структура с 3 формой проводников и временем травления 110 с. Так же видно, что все структуры обладают незначительным расхождением в значениях  $N_4$  и  $N_5$ . Однако так же видно, что 3 форма проводников при различном времени травления обладает наименьшими значениями  $N_2$ . В таблице 13 представлены вычисленные  $N$ -нормы временных откликов в конце активной линии полученных при помощи электродинамического моделирования для материала с AD1000.

Таблица 13. Вычисленные  $N$ -нормы временных откликов в конце активной линии полученных при электродинамическом анализе для структуры с диэлектриком AD1000.

Структура	$t, c$	$N_1$	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
1	-	0.364	4.823	4.913	4.935	3.317
2	110	0.382	4.951	4.92	4.953	3.435
2	140	0.388	5.014	4.908	4.95	3.472
3	110	0.348	4.27	4.923	4.947	3.273
3	140	0.355	4.2	4.902	4.921	3.281

Из таблицы 13 видно, что 3 форма проводников обладает также минимальными значениями  $N$ -норм. Минимальное значение  $N_1$  составило 0.348, а максимальное – 0.388 для структуры с 2 формой проводников. Таким образом, видно, что формы проводников и время травления влияют на временные характеристики.

После рассматривались структуры с геометрическими значениями, соответствующими  $t = 110$  с. Изменялись значения  $\epsilon_r$  для материалов FR-4, AD1000. Проведено моделирование каждой структуры при различных  $\epsilon_r$  при  $t = 110$  с. Получены частотные зависимости характеристик рассматриваемых структур (рисунок 11).

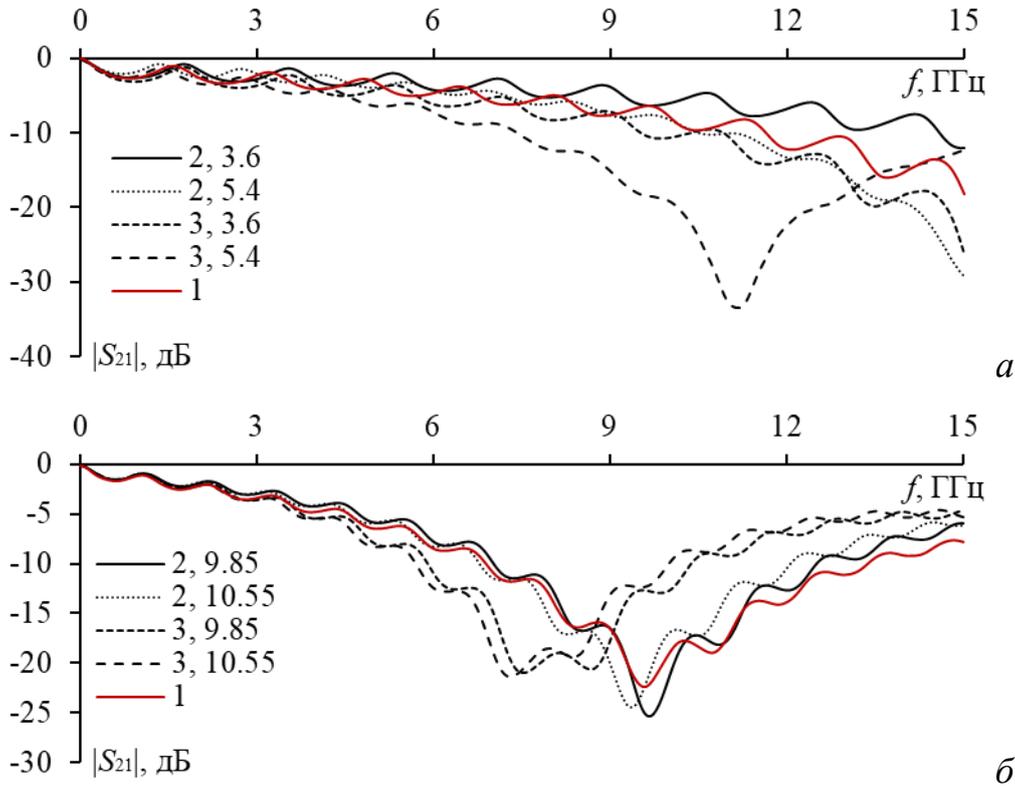


Рис. 11. Частотные зависимости связанной двухпроводной МПЛ с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при  $t = 110$  с (—); 2 при  $t = 140$  с (···); 3 при  $t = 110$  с (- -); 3 при  $t = 110$  с (—) и формы 1 (—) (электродинамический анализ).

Из рисунка 11а видно, что структуры обладают большим ослаблением, чем при квазистатическом моделировании. Так же видно, что максимальное ослабление для материала FR-4 составляет -32 дБ и, что соответствует 3 структуре и  $\epsilon_r = 5.4$ . Из рисунка 11б видно, что максимальное ослабление для материала AD1000 составляет -27 дБ, что соответствует 2 структуре и  $\epsilon_r = 9.85$ . Для дополнительного анализа приведем результаты электродинамического моделирования во временной области (рисунок 12) при изменении  $\epsilon_r$ .

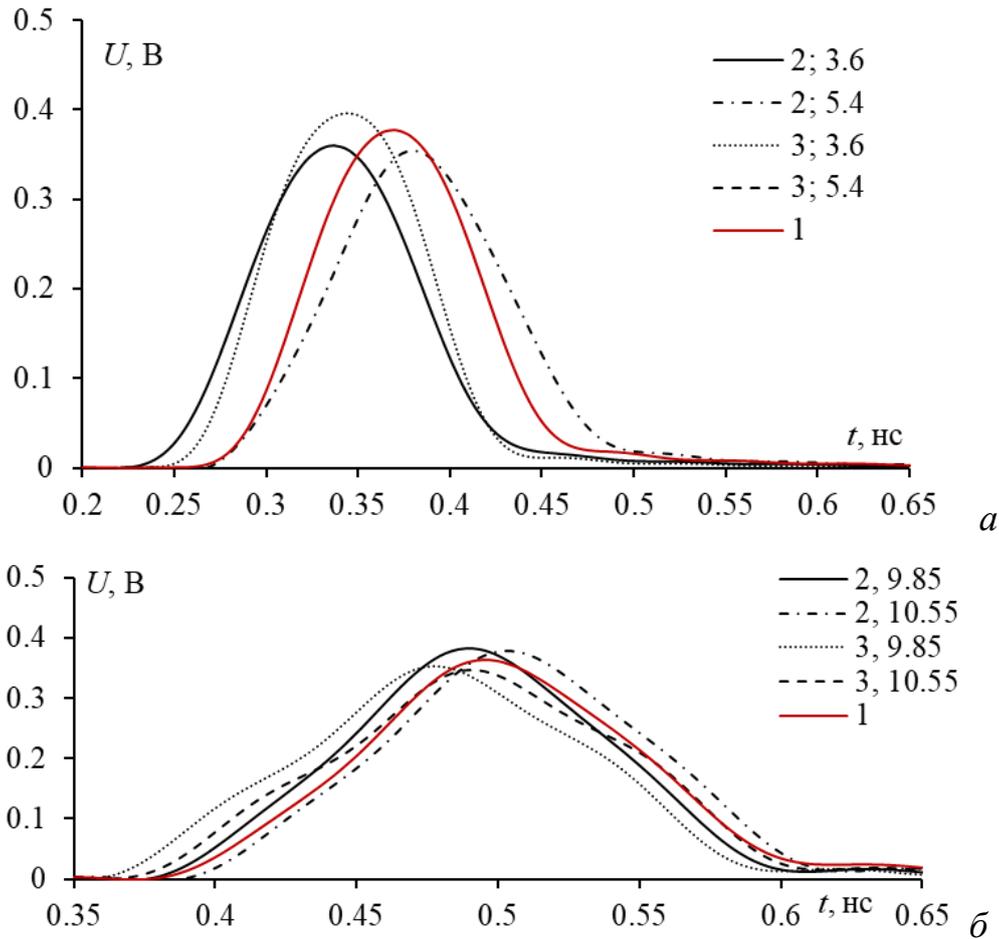


Рис. 12. Зависимости выходных напряжений для структур связанной МПЛ с диэлектриками из FR-4 (а) и AD1000 (б) с проводниками формы 2 при  $t = 110$  нс (—); 2 при  $t = 140$  нс (- · -); 3 при  $t = 110$  нс (···); 3 при  $t = 110$  нс (- -) и формы 1 (—) (электродинамический анализ).

Видно, что формы напряжения на дальнем конце сигнального проводника различаются по времени прихода импульсов. Также наблюдается незначительное отличие в пиковом значении. Дополнительно к этому выявлено, что изменение диэлектрика с FR-4 на AD1000 приводит к сдвигу импульса во временной области. Это вызвано тем, что увеличивается задержка 2 моды, которая распространяется преимущественно в диэлектрике. Из-за этого импульс приходит позже по времени (на 0.139 нс). Также из рисунка 12 видно, что структуры с проводниками 3 формы имеют минимальную задержку.

В таблице 14 представлены вычисленные значения  $N$ -норм электродинамического моделирования для материала FR-4 при изменении  $\epsilon_r$ .

Таблица 14. Вычисленные значения  $N$ -норм при электродинамическом анализе для структуры с FR-4 при различных  $\varepsilon_r$ .

Структура	$\varepsilon_r$	$N_1$	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
1	4.5	0.378	6.245	4.897	4.905	3.375
2	3.6	0.396	7.278	4.925	4.938	3.533
2	5.4	0.354	4.682	4.784	4.827	3.212
3	3.6	0.359	5.651	4.707	4.738	3.224
3	5.4	0.398	6.223	4.928	4.938	3.525

Из таблицы 14 видно, что минимальными значениями  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_5$  обладает структура с проводниками в форме 2 при  $\varepsilon_r = 5.4$ . Однако минимальными значениями  $N_3$ ,  $N_4$  обладает уже структура с проводниками в форме 3 со значением  $\varepsilon_r = 3.6$ . В таблице 15 представлены вычисленные значения электродинамического моделирования для материала AD1000 при изменении  $\varepsilon_r$ .

Таблица 15. Вычисленные значения  $N$ -норм при электродинамическом анализе для структуры с AD1000 при различных  $\varepsilon_r$ .

Структура	$\varepsilon_r$	$N_1$	$N_2 \cdot 10^{-9}$	$N_3 \cdot 10^{11}$	$N_4 \cdot 10^{11}$	$N_5 \cdot 10^6$
1	10.2	0.364	4.823	4.913	4.935	3.317
2	9.85	0.384	4.964	4.918	4.95	3.447
2	10.55	0.379	4.874	4.92	4.97	3.447
3	9.85	0.354	4.324	4.923	4.948	3.447
3	10.55	0.347	4.179	4.924	4.943	3.447

Из таблицы 15 видно, что минимальным значением  $N_1$ ,  $N_2$  обладает структура с проводниками в форме 3 со значением  $\varepsilon_r = 9.85$ . Однако минимальными значениями  $N_3$ ,  $N_4$ ,  $N_5$  обладает уже структура с проводниками в форме 1 со значением  $\varepsilon_r = 10.2$ .

## Заключение

Проведен анализ влияния времени травления и изменения  $\varepsilon_r$  материалов на частотные и временные характеристики связанной МПЛ. Из результатов видно, что с увеличением времени травления, собственные значения  $\mathbf{C}$  и  $\mathbf{Z}$  уменьшаются, а  $\mathbf{L}$  – увеличиваются. Это связано с уменьшением площади поперечного сечения проводника, а также изменением значений  $\varepsilon_r$  материалов. Выявлено, что увеличение времени травления приводит к изменению формы

напряжения на дальнем конце активного проводника. Для структур с материалом FR-4 видно изменение напряжения у структуры с проводниками формы 3. Наибольшая разница амплитуд напряжений на выходе активной линии наблюдается между сигналами структур с проводниками формы 1 и 3 (разница составила 0.044 В). Увеличение времени травления в зависимости от формы проводников, как увеличивает, так и уменьшает значения  $N$ -норм. Так, в случае  $N_1$  выявлено, что максимальное ослабление соответствует проводникам в форме перевернутой трапеции (3).

Анализ частотных характеристик показал, что изменения времени травления и  $\epsilon_r$  материалов приводит к изменению  $f_{ср}$ , а также к увеличению максимального ослабления на 10 дБ, соответственно для FR-4 и 2 дБ для AD1000 при электродинамическом моделировании. Так же получено, что для 3 формы проводников сохраняется максимальное ослабление при электродинамическом и квазистатическом моделировании. Так же получено, что изменение диэлектрика в данном исследовании не повлияло на значение максимального ослабления коэффициента передачи.

Рекомендации к применению состоят в том, что при перетравлении проводников уменьшаются геометрические параметры, такие, как ширина проводников. В частности, получено, что при увеличении времени травления уменьшаются собственные значения погонной емкости и индуктивности. Также получено, что 3 форма проводников обладает наилучшими характеристиками с точки зрения помехоподавления. Структура с прямоугольной (1) формой проводников обладает наименьшими значениями погонной емкости. Это оказывает влияние на характеристики связанной МПЛ.

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России.

## Литература

1. Paul C.R., Scully R.C., Steffka M.A. Introduction to electromagnetic compatibility. John Wiley & Sons, Inc., 2022.
2. Violette N. Electromagnetic compatibility handbook. – Springer, 2013.
3. Evangelista J. et al. Radiated and Conducted EMI by RF Fields at Hospital Environment //2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). – IEEE, 2021. – С. 1-4.
4. Wei J. et al. NI-MWMOTE: An improving noise-immunity majority weighted minority oversampling technique for imbalanced classification problems // Expert Systems with Applications. – 2020. – Т. 158. – С. 113504.
5. Данилова Е.А. Классификация дефектов печатных плат // Труды международного симпозиума «Надежность и Качество». – 2013. – Т. 1. – С. 325-328.
6. ГОСТ Р 56251 – 2014. Платы печатные. Классификация дефектов. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ. 2014. С. 107.
7. Шихов С. Печатные платы с повышенными требованиями к надежности. Вопросы проектирования // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2013. – №. 2. – С. 164-169.
8. Уайтт К., Рентюк В. Особенности конструирования печатных плат с выполнением требований по ЭМС // Компоненты и технологии. – 2019. – №. 6. – С. 121-128.
9. Кузьмин Н.О., Жечев Е.С. Оценка влияния параметров травления на характеристики однопроводных и многопроводных линий передачи // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11.
10. Nikita K., Zhechev Y. Influence of Etching Time on Per-Unit-Length Parameters of Microstrip Lines // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2022. – С. 1-4.

11. Мурманский, М.С. Исследование влияния изменения относительной диэлектрической проницаемости подложки микрополоскового полосового фильтра на его частотные характеристики // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25–28 апреля 2023 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Том 7. 2023. – С. 94-96.
12. Djordjevic A.R. et al. Wideband frequency-domain characterization of FR-4 and time-domain causality // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2001. – Т. 43. – №. 4. – С. 662-667.
13. AD1000: High Dielectric Constant Laminate // RF Globalnet. URL: <https://www.rfglobalnet.com/doc/high-dielectric-constant-substrate-ad1000-0002>
14. Das P., Mandal K. Multiband Reflection and Transmission mode Linear to Circular Polarizer integrated Microstrip Patch Antenna // 2020 International Symposium on Antennas & Propagation (APSYM). – IEEE, 2020. – С. 7-10.
15. Bielik T., Adamec B., Hottmar V. Determination of FR-4 dielectric constant for design of microstrip band-stop filter purposes // 2019 29th International Conference Radioelektronika. – IEEE, 2019. – С. 1-6.
16. ГОСТ IEC61188-1-2–2013. Печатные платы и печатные узлы проектирование и применение часть1-2. 2014. С.39.
17. Галецкий Ф. Производство печатных плат. Современные технологии // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 1998. – №. 2. – С. 43-46.
18. Tang Y. et al. Study on Wet Chemical Etching of Flexible Printed Circuit Board with 16- $\mu$  m Line Pitch // Journal of Electronic Materials. – 2023. – Т. 52. – №. 6. – С. 4030-4036.
19. Noma H., Nakanishi T. Etching process analysis based on etchant flow for high-density build-up substrate // Proceedings of 6th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2004) (IEEE Cat. No. 04EX971). – IEEE, 2004. – С. 289-293.
20. Флеров В.Н. Химическая технология в производстве радиоэлектронных деталей. – Радио и связь, 1988.

21. Куксенко С.П. и др. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – №. 2 (36). – С. 45-50.
22. Baum C.E. Norms and eigenvector norms // Mathematics Notes. – 1979. – Т. 63. – С. 1-42.

**Для цитирования:**

Кузьмин Н.О., Мурманский М.С., Жечев Е.С. Оценка влияния производственных дефектов на характеристики связанной микрополосковой линии. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.17>