

5. Пат. 2 850 908 РФ, МПК Н 04 В 15/00. Устройство защиты от сверхкоротких импульсов с проводниками в одной плоскости на диэлектрической подложке / Е.Б. Черникова (РФ), Т.Р. Газизов (РФ). – № 2 025 118 096; заявл. 01.07.25; опубл. 17.11.2025, Бюл. № 32. – 5 с.

6. Система TUSUR.EMC – Программный комплекс для моделирования задач электромагнитной совместимости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://emc.tusur.ru/>, свободный (дата обращения: 24.02.2026).

УДК 621.372.22

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА СВЯЗАННОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ В КОРПУСЕ НА АСИММЕТРИЮ МАТРИЦЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИИ

В.Д. Нгуен, аспирант каф. ТУ

г. Томск, ТУСУР, nguyen.d.2216-2023@e.tusur.ru

Проводятся численный анализ асимметрии матрицы коэффициентов электростатической индукции ($\mathbf{C}$) при изменении диэлектрической проницаемости диэлектрика связанной линии передачи в корпусе и значения автосегментации. Для оценки степени асимметрии используется значение максимального элемента матрицы ошибок $\mathbf{C}$. Показано, что изменение диэлектрической проницаемости среды при разной автосегментации может существенно влиять на асимметрию матрицы $\mathbf{C}$.

Ключевые слова: матрица погонных коэффициентов электростатической индукции, относительная диэлектрическая проницаемость, численный анализ, автосегментация, асимметрия.

В работе [1] выполнен квазистатический анализ связанной линии передачи, которая размещена внутри металлического корпуса. Анализ выполнен в программном обеспечении TUSUR.EMC [2]. В результате выявлена асимметрия вычисляемой матрицы погонных коэффициентов электростатической индукции ($\mathbf{C}$) между элементами C_{13} и C_{31} и C_{23} и C_{32} , несмотря на то, что теоретически такая матрица должна быть симметричной. Таким образом, возникла необходимость в выявлении причин возникновения асимметрии матрицы $\mathbf{C}$. Предполагается, что одной из возможных причин появления асимметрии может быть сегментация структуры, а также свойства среды, в которой находятся проводники. Цель работы – выполнить анализ влияния изменения относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика при разных значениях шага автосегментации на максимальный элемент матрицы ошибок $\mathbf{C}$.

Поперечное сечение исследуемой структуры показано на рис. 1.

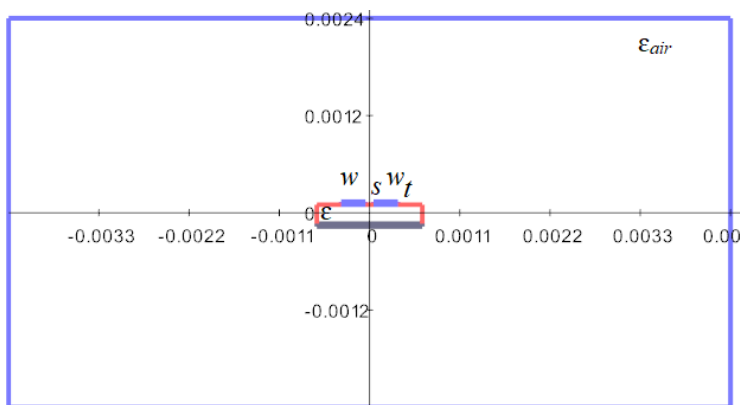


Рис. 1. Поперечное сечение исследуемой структуры

Её параметры: толщина подложки $h = 300$ мкм, ширина проводников $w=300$ мкм, толщина проводников и схемной земли $t = 35$ мкм, расстояние между проводниками $s = 100$ мкм. Структура расположена внутри корпуса шириной 8,9 мм и высотой 4,8 мм. Относительная диэлектрическая проницаемость заполнения корпуса $\epsilon_{\text{air}} = 1$.

При моделировании выбраны следующие значения шага автосегментации: 5, 7, 12, 17 мкм. Значение 5 мкм выбрано как исходный вариант при численных расчетах.

Для оценки асимметрии матрицы **C** использовался максимальный элемент матрицы ошибок **C** (maxδ), которая вычисляется в программе TUSUR.EMC. Для каждого значения ϵ_r выполнялось вычисление maxδ при разном шаге автосегментации. Полученные результаты приведены в таблице.

Значения максимального элемента матрицы ошибок **C maxδ (%)**

ϵ_r	Шаг автосегментации, мкм			
	5	7	12	17
1,1	0,08	0,05	0,07	0,41
1,3	0,25	0,23	0,53	0,46
1,5	0,44	0,43	1,03	0,48
1,7	0,65	0,66	1,56	0,49
2	0,99	1,04	2,41	0,47
3	2,35	2,53	5,5	0,18
5	5,64	6,26	12,4	1,21
7	9,46	10,7	19,6	3,9
10	16	18,8	30,5	13,4
13	23,5	28,6	41,6	59

Для наглядного представления построен график зависимости $\max \delta$ от ϵ_r при разном шаге автосегментации (рис. 2).

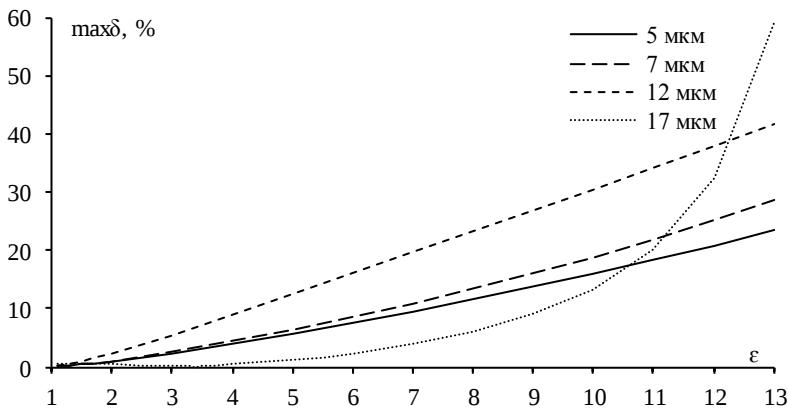


Рис. 2. Зависимость максимального элемента матрицы ошибок $\max \delta$ от ϵ_r

Анализ результатов показывает, что увеличение диэлектрической проницаемости приводит к росту ошибки, при этом характер зависимости существенно зависит от шага автосегментации. При значениях автосегментации 5, 7 и 12 мкм наблюдается практически линейное увеличение максимального элемента матрицы ошибок $\mathbf{C}$ при росте ϵ_r , а при 17 мкм ошибка резко увеличивается после $\epsilon_r=10$.

Таким образом, при увеличении ϵ_r среды выявлен рост асимметрии матрицы $\mathbf{C}$. Связанная линия передачи внутри металлического корпуса обладает повышенной чувствительностью к численным ошибкам. Шаг автосегментации оказывает существенное влияние на устойчивость численного решения. Наиболее стабильные результаты получены при автосегментации с шагом 5 мкм.

В дальнейшем планируется провести более подробный анализ распределения электрического поля и поверхностных зарядов в исследуемой структуре для более полного объяснения наблюдаемых эффектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gazizov T.R. Per-unit-length matrixes of shielded coupled microstrip lines with different grounds / T.R. Gazizov, V.D. Nguyen, A.A. Hasan // 2024 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON): Novosibirsk, Russian Federation. – 30 September – 02 October, 2024. – P. 500–503.
2. Официальный сайт системы TUSUR.EMC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://emc.tusur.ru/>, свободный (дата обращения: 24.01.2026).