

3. Селиванова Е.С. Проектирование и разработка веб-приложения для анализа данных трудоустройства обучающихся и выпускников / Е. С. Селиванова, А. П. Клишин [Текст]// Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 21–25 марта 2022 г.)/ Томский политехнический университет. – Томск, 2022. – С. 87-89.

4. Селиванова Е.С., Газизов Т.Т. Веб-приложение для построения графика оптимальной траектории обучения [Текст] // Научно-педагогическое обозрение. 2022. Вып. 4 (44). С. 135-143.

5. Иванов П.Д., Лопуховский А.Г. Технологии Big Data и различные методы представления больших данных // Инженерный журнал: наука и инновации, 2014. Вып. 9. [Электронный ресурс]. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/asu/1229.html> .

6. Борисова А.А., Ряполова К.В. Информационное сопровождение трудоустройства выпускников вузов [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnoe-soprovozhdenie-trudoustroystva-vypusknikov-vuzov> (дата обращения: 20.04.2022).

7. Создание динамического веб-сайта на языке программирования Python с применением фреймворка django [Электронный ресурс]. – URL: https://dspace.kpfu.ru/xmlui/bitstream/handle/net/108796/iton2016_117_119.pdf

8. Matplotlib: Visualization with Python [Электронный ресурс]. – URL: <https://matplotlib.org/>

© Селиванова С.Е., Клишин А.П., 2023

УДК 537.2:621.372.2

О ВЛИЯНИИ ЗАКРУГЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ МНОГОПРОВОДНОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ НА МАТРИЦЫ ЕЕ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Снетков П.П., Максимов А.Е.

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Россия*

Аннотация. Исследовано влияние типов закругления торцов проводников трехпроводной микрополосковой линии передачи на ее матрицы погонных параметров. Рассмотрено 2 типа закругления торцов проводников и 8 вариаций геометрических параметров. Показано, что при увеличении толщины и уменьшении ширины проводников линии закругления их торцов приводят к большим изменениям в матрицах.

Ключевые слова: многопроводная линия передачи, закругление торцов проводников, метод моментов.

При создании современных радиоэлектронных средств (РЭС) особое внимание уделяется вопросам их стабильного функционирования в различных климатических и электромагнитных условиях. Надежность и электромагнитная совместимость РЭС могут быть исследованы аппаратно с использованием

опытных образцов, что требует высоких затрат средств и времени, а также наличия высококвалифицированных специалистов. Поэтому для замены затратных испытаний математическим моделированием используются различные системы автоматизированного проектирования, такие как Ansys Q3D Extractor, FasterCap, LINPAR, TALGAT [1, 2] и др.

Математическое моделирование РЭС в целом и линий передачи (ЛП), как основного элемента РЭС, в частности, выполняется, преимущественно, с применением различных численных методов. Метод моментов (МоМ) является одним из таковых.

Известно, что заряд в проводниках распределен неравномерно, а именно концентрируется на их границах, причем такое поведение усиливается в углах [3]. При проектировании ЛП их активные проводники, как правило, имеют прямоугольную форму, однако при рассмотрении реальных печатных плат возникает противоречие. Так, реальная форма проводников не является прямоугольной в поперечном сечении из-за особенностей технологических процессов производства печатных плат, а их торцы оказываются закругленными. Поэтому при моделировании возникает резкий рост плотности заряда в углах проводников, что неконтролируемо искажает значение емкости (поскольку она является суммой плотности заряда по периметру проводника), внося определенный вклад в погрешность ее вычисления.

В результате, актуален поиск подходов к устранению неточности при вычислении плотности заряда. При этом наиболее рациональным вариантом представляется закругление торцов проводников.

Рассмотрены три варианта трехпроводной микрополосковой ЛП (далее в тексте ЛП 1, 2 и 3 соответственно). Поперечные сечения представлены на рис. 1, они различаются типами закругления проводников. Так, в ЛП 2 проводники закруглены только в верхней части, а в ЛП 3 – верхней и нижней частях. В ЛП 1 проводники имеют прямоугольное сечение.

Выбраны следующие параметры поперечных сечений: расстояние между проводниками $s = 0,6$ мм, расстояния от проводников до границ ЛП $d = 1,5$ мм, толщина диэлектрической подложки $h = 0,5$ мм, ее относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 4,4$. Радиус закругления торцов проводников принимался равным $r = 0,5 t$, $0,55 t$ и $0,8 t$, где t – толщина проводников.

В ходе работы исследовалось влияние толщины t и ширины w проводников, а также радиуса r на точность расчета матриц электростатической (\mathbf{C}) и электромагнитной (\mathbf{L}) индукции. Ширина проводников принимала значения $w = 0,2$ и $0,4$ мм, а их толщина – $t = 18, 35, 70$ и 105 мкм. Использовалась густая равномерная сегментация границ ЛП с длиной сегментов $t/3$ для $t = 18$ мкм и 35 мкм, и $t/5$ для $t = 70$ мкм и 105 мкм, аналогично [4]. На рис. 2 приведены примеры сегментации границ ЛП.

Для определения влияния радиуса закругления на элементы матриц погонных параметров при равных t вычислены различия Δc и Δl с использованием нормы Фробениуса:

$$\Delta c = \frac{\|C_1 - C_{2(3)}\|}{\|C_1\|}, \Delta l = \frac{\|L_1 - L_{2(3)}\|}{\|L_1\|},$$

где нижние индексы указывают на моделируемую ЛП.

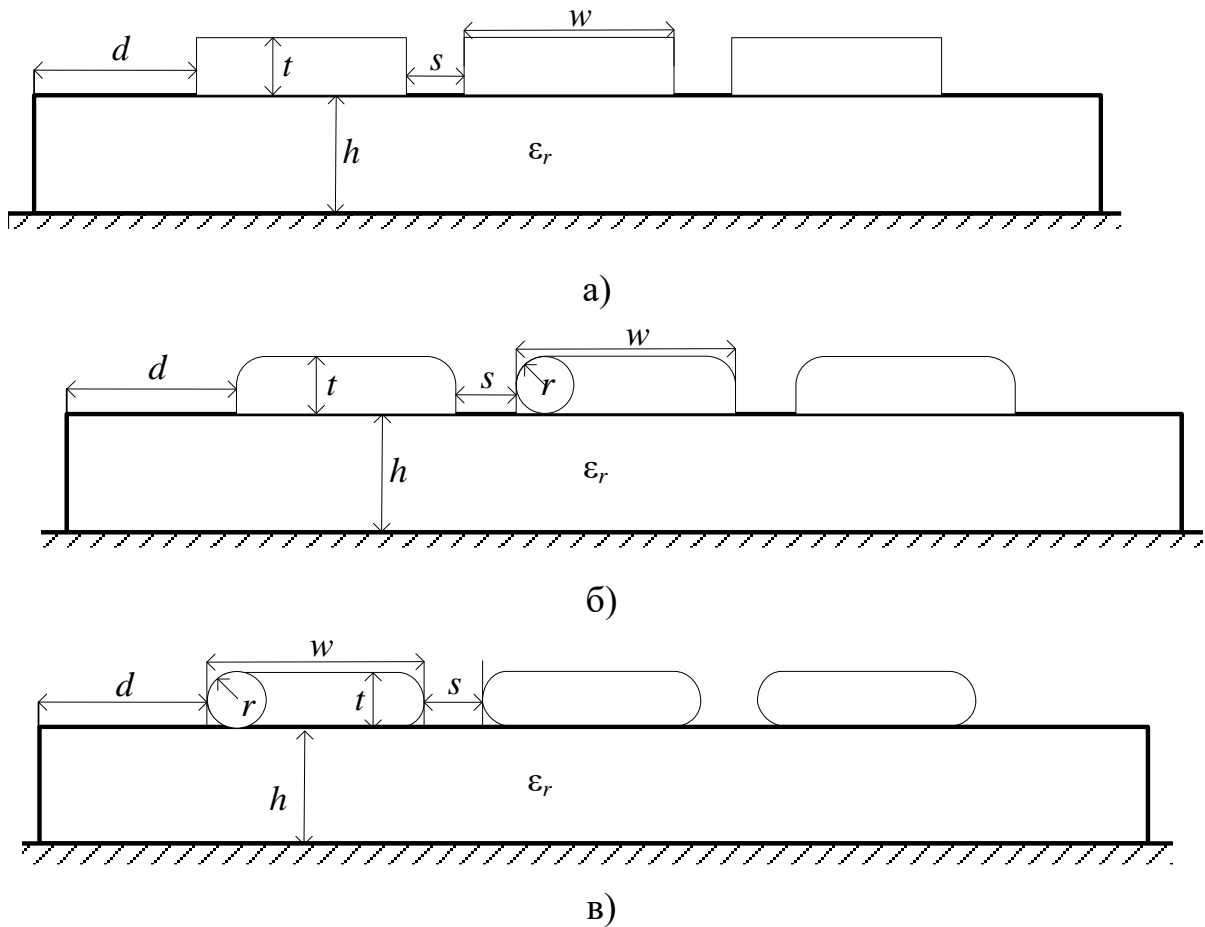


Рис. 1. Поперечные сечения ЛП 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

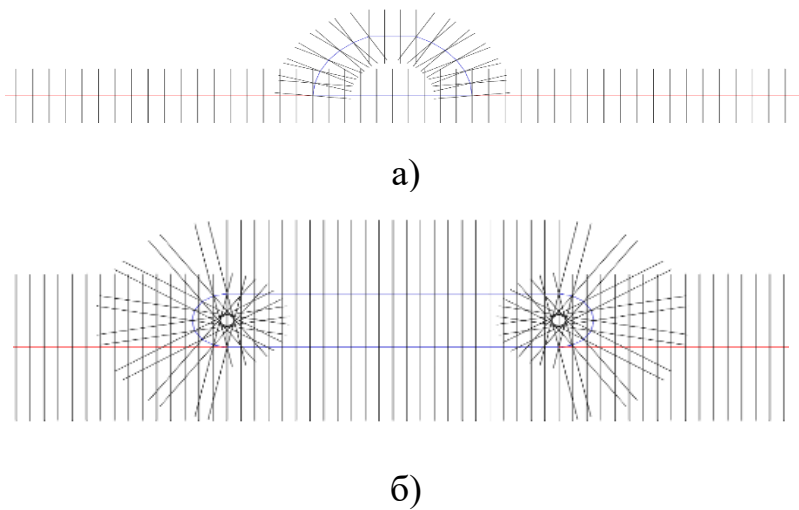


Рис. 2. Примеры сегментации части границ ЛП 2 (а) и ЛП 3 (б)

Получены различия в матрицах для ЛП 2 и 3 относительно ЛП 1. Так, результаты при $w = 0,2$ мм сведены в табл. 1, а при $w = 0,4$ мм – в табл. 2. Отметим, что расчеты для $w = 0,2$ мм при $r = 0,5 t$ и $t = 105$ мкм произведены не были, т.к. двойной радиус закругления в данном случае превышает ширину проводников.

Таблица 1. Влияние формы и радиуса закругления торцов проводника на матрицы С и L при $w = 0,2$ мм

| t , мкм | ЛП | r | Δc , % | Δl , % |
|-----------|----|----------|----------------|----------------|
| 18 | 2 | $0,5 t$ | 0,763 | 1,470 |
| | | $0,55 t$ | 1,258 | 1,317 |
| | | $0,8 t$ | 1,458 | 0,824 |
| | 3 | $0,5 t$ | 0,369 | 1,180 |
| | | $0,55 t$ | 2,987 | 1,073 |
| | | $0,8 t$ | 3,037 | 0,634 |
| 35 | 2 | $0,5 t$ | 1,288 | 2,602 |
| | | $0,55 t$ | 1,947 | 2,334 |
| | | $0,8 t$ | 2,143 | 1,427 |
| | 3 | $0,5 t$ | 1,724 | 2,418 |
| | | $0,55 t$ | 5,193 | 2,079 |
| | | $0,8 t$ | 4,780 | 1,177 |
| 70 | 2 | $0,5 t$ | 1,888 | 4,391 |
| | | $0,55 t$ | 2,545 | 3,998 |
| | | $0,8 t$ | 7,310 | 2,518 |
| | 3 | $0,5 t$ | 5,563 | 4,573 |
| | | $0,55 t$ | 7,111 | 4,039 |
| | | $0,8 t$ | 2,589 | 2,462 |
| 105 | 2 | $0,55 t$ | 1,884 | 5,509 |
| | | $0,8 t$ | 1,943 | 3,424 |
| | 3 | $0,55 t$ | 11,256 | 5,835 |
| | | $0,8 t$ | 8,155 | 4,019 |

Таблица 2 – Влияние формы и радиуса закругления торцов проводника на матрицы С и L при $w = 0,4$ мм

| t , мкм | ЛП | r | Δc , % | Δl , % |
|-----------|----|----------|----------------|----------------|
| 18 | 2 | $0,5 t$ | 0,484 | 1,960 |
| | | $0,55 t$ | 0,837 | 2,054 |
| | | $0,8 t$ | 0,995 | 2,359 |
| | 3 | $0,5 t$ | 0,173 | 2,115 |
| | | $0,55 t$ | 2,002 | 2,196 |
| | | $0,8 t$ | 2,077 | 2,465 |
| 35 | 2 | $0,5 t$ | 0,811 | 1,591 |
| | | $0,55 t$ | 1,286 | 1,431 |
| | | $0,8 t$ | 1,461 | 0,881 |
| | 3 | $0,5 t$ | 0,992 | 1,419 |
| | | $0,55 t$ | 3,430 | 1,262 |
| | | $0,8 t$ | 3,245 | 0,758 |

| t, МКМ | ЛП | r | Δc , % | Δl , % |
|--------|----|--------|----------------|----------------|
| 70 | 2 | 0,5 t | 1,147 | 2,682 |
| | | 0,55 t | 1,637 | 2,460 |
| | | 0,8 t | 4,920 | 1,573 |
| | 3 | 0,5 t | 3,521 | 3,010 |
| | | 0,55 t | 4,674 | 2,665 |
| | | 0,8 t | 1,734 | 1,636 |
| 105 | 2 | 0,5 t | 0,429 | 3,724 |
| | | 0,55 t | 1,109 | 3,380 |
| | | 0,8 t | 1,263 | 2,150 |
| | 3 | 0,5 t | 5,865 | 4,460 |
| | | 0,55 t | 6,938 | 3,897 |
| | | 0,8 t | 5,360 | 2,374 |

Из таблиц 1 и 2 можно сделать вывод, что при увеличении толщин проводников различия Δc и Δl увеличиваются, а при увеличении их ширин – уменьшаются. Из таблиц также видно, что различия для ЛП 3 более существенны, чем для ЛП 2, кроме того, они возрастают при увеличении радиуса скругления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-79-00101 в ТУСУР.

Список использованных источников

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

2. Моделирование элементов критичной радиоэлектронной аппаратуры: новые подходы, модели и алгоритмы, их реализация и применение / Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Газизов Т.Т., Квасников А.А., Комнатнов М.Е., Суровцев Р.С. // Наноиндустрия. 2020. Т. 13, № S5-2(102). С. 425–432.

3. Dworsky L.N. Introduction to numerical electrostatics using MATLAB. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2014. 452 p.

4. Maksimov, A. E. Accurate capacitance matrices for multiconductor transmission lines / A. E. Maksimov, S. P. Kuksenko // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2022. – Vol. 64, no. 5. – P. 1514–1521. – DOI 10.1109/TEMC.2022.3175717.

© Снетков П.П., Максимов А.Е., 2023