

Из рис. 2 видно, что увеличение s от 1 до 10 мм приводит к уменьшению значений собственных и взаимных ёмкостей. При этом собственная ёмкость сквозного переходного отверстия уменьшается в 1,5 раза (от 0,32 до 0,21 пФ), собственная ёмкость проводника уменьшается в 1,2 раза (от 1,1 до 0,96 пФ), а взаимная ёмкость уменьшается в 2,2 раза (от 0,13 до 0,06 пФ). Вычисление с использованием МКЭ выявило разницу, значений вычисленных результатов по сравнению с ММ, не превышающую 10%.

Таким образом, выполнено моделирование фрагмента ПП, содержащей сквозное переходное отверстие и печатный проводник, которые расположенные в непосредственной близости друг от друга, с целью оценки паразитной емкости при изменении расстояния между ними. Выполнено сравнение полученных ёмкостных матриц двумя численными методами: ММ и МКЭ, максимальная разница составляет 10%. Полученные результаты показали, что при изменении расстояния от 1 до 10 мм взаимная ёмкость уменьшается в 2,2 раза, с 0,13 до 0,06 пФ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-79-10162-П, <https://rscf.ru/project/19-79-10162/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: учеб. пособие. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – 256 с.
2. Журавлев В.Я. Паразитные параметры печатного монтажа / В.Я. Журавлев, О.И. Подгайко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 3, № 7 (45). – С. 49–52.
3. Куксенко С.П. 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.

УДК 621.391.823

ВЛИЯНИЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ПРОВОДНИКАМИ, РАСПОЛОЖЕННЫМИ НА РАЗНЫХ СЛОЯХ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ, НА МАТРИЦУ ЁМКОСТЕЙ

К.Н. Абрамова, Т.И. Третьяков, студенты;

А.А. Дроздова, аспирант каф. ТУ

Научный руководитель М.Е. Комнатнов, доцент каф. ТУ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, akn@tu.tusur.ru

Выполнена оценка влияния расстояния между проводниками, расположенными на разных слоях печатной платы, на матрицу ёмкостей. Представлены модели с параллельно и перпендикулярно расположенными проводниками на разных слоях печатной платы. Вы-

числены значения взаимной ёмкости для обоих случаев при изменении расстояния между проводниками, используя методы моментов и конечных элементов. Максимальная разница между значениями, вычисленными, используя метод моментов и конечных элементов, составляет не более 9,8%.

Ключевые слова: матрица ёмкостей, взаимная ёмкость, печатная плата.

Повышение степени интеграции компонентов и применение технологий для поверхностного монтажа позволило увеличить число выводов микросхем и уменьшить размеры компонентов, что привело к снижению расстояний между проводниками и повышению значений индуктивных и ёмкостных связей [1]. При этом несовершенство в проектировании печатных плат (ПП) может оказать серьёзное влияние на производительность РЭС, которая существенно зависит от паразитных параметров. Оценку производительности компонентов РЭС проводят, учитывая паразитные индуктивные и ёмкостные связи [2]. Некорректный анализ взаимных ёмкостных связей проводников, расположенных на ПП, может привести к серьёзным последствиям и негативно повлиять на работу РЭС в целом [3]. В работе [4] выполнен анализ индуктивности проводников, расположенных на разных слоях ПП, однако не была исследована ёмкость. Цель работы – оценить влияние расстояния между проводниками, расположенными на разных слоях печатной платы, на матрицу ёмкостей.

Оценка взаимной ёмкости двух проводников выполнена на модели ПП размером $100 \times 100 \text{ мм}^2$, содержащей проводники шириной $w = 5 \text{ мм}$, высотой $t = 105 \text{ мкм}$ и длиной $l = 70 \text{ мм}$, расположенные на разных слоях ПП с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 4,5$ на расстоянии h_1 . При этом расстояние (h_2) до плоскости земли оставалось постоянным ($h_2 = 1 \text{ мм}$). Созданы модели на основе геометрических параметров ПП при расположении проводников перпендикулярно (рис. 1, а) и параллельно (см. рис. 1, б) друг другу. Модели созданы в ПО TALGAT [5] с применением модулей для параллельного (MOM2D) и перпендикулярного (MOM3D) расположения проводников друг другу. Модули MOM2D и MOM3D основаны на методе моментов (ММ) и позволяют выполнить электростатический анализ двухмерных и трёхмерных структур за счёт вычисления матриц коэффициентов электростатической индукции с заданным диэлектрическим заполнением.

Аналогично по указанным геометрическим размерам созданы трёхмерные модели в программе, позволяющей вычислить матрицы коэффициентов электростатической индукции, используя метод ко-

нечных элементов (МКЭ). Они необходимы для подтверждения результатов вычисления ММ.

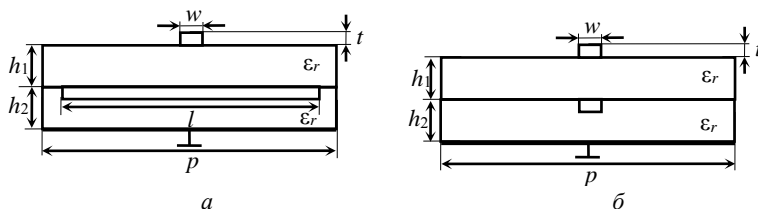


Рис. 1. Геометрические модели ПП при расположении проводников перпендикулярно (а) и параллельно (б) друг другу

Выполнено вычисление матриц ёмкостей при изменении расстояния между проводниками h_1 от 1 до 10 мм, используя ММ и МКЭ. На рис. 2 представлены зависимости значений элементов матрицы ёмкостей при изменении h_1 . На рис. 2, а, б представлены значения собственных ёмкостей C_{11} и C_{22} при параллельном расположении проводников, а на рис. 2, в, з – перпендикулярном. Значения взаимных ёмкостей ($C_{12}=C_{21}$) при параллельном расположении проводников представлены на рис. 2, д, а перпендикулярном – на рис. 2, е.

Из рис. 2, а, б видно, что увеличение h_1 приводит к увеличению собственной ёмкости C_{11} и C_{22} проводников, расположенных параллельно, в 1,3 раза (от 2,2 до 3 пФ) и в 1,2 раза (от 16,5 до 19,2 пФ) соответственно. При этом взаимная ёмкость C_{12} уменьшается в 12,7 раза (см. рис. 2, д). Также из рис. 2, д видно, что после увеличения h_1 от 1 до 2 мм C_{12} быстро уменьшается в 2 раза (от 16,7 до 7,9 пФ). При дальнейшем увеличении h_1 C_{12} медленно убывает.

При перпендикулярном расположении проводников C_{11} уменьшается в 2,4 раза (от 8,9 до 3,7 пФ) (см. рис. 2, в), а C_{22} увеличивается в 1,1 раза (от 19,6 до 21,6 пФ) (см. рис. 2, з). При этом C_{12} уменьшается в 3,3 раза (см. рис. 2, е). Примечательно, что увеличение h_1 приводит к увеличению C_{11} при параллельном расположении проводников и к уменьшению C_{11} при перпендикулярном. Разница значений, вычисленных ММ и МКЭ, составляет не более 9,8%.

Таким образом, выполнена оценка собственных и взаимных ёмкостей между двумя проводниками, расположенными на разных слоях ПП, при изменении расстояния между ними.

Проанализировано два случая расположения проводников: перпендикулярное и параллельное. В случае параллельного расположения связь между проводниками сильнее и при $h_1=1$ мм C_{12} составляет

16,7 пФ, а при перпендикулярном $C_{12}=1,47$ пФ, что в 10 раз меньше. При $h_1=10$ мм разница взаимной ёмкости двух структур уменьшается, так, при параллельном расположении $C_{12}=1,3$ пФ, а при перпендикулярном – $C_{12}=0,5$ пФ, что в 2,6 раза меньше. Стоит отметить, что увеличение h_1 приводит к увеличению C_{11} при параллельном расположении проводников и к уменьшению C_{11} при перпендикулярном. Таким образом, при проектировании РЭС необходимо учитывать данные особенности расположения проводников.

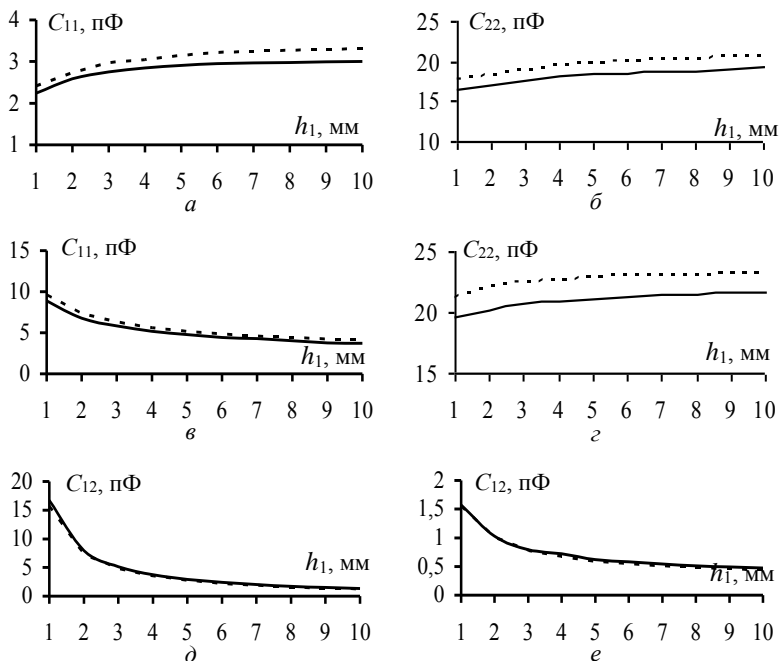


Рис. 2. Зависимости значений собственных (а–в) и взаимных (д, е) ёмкостей от h_1 , вычисленные, используя ММ (—) МКЭ (---)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-79-10162-П, <https://rscf.ru/project/19-79-10162/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атопшев Ю.С. Методика проектирования помехоустойчивых высокоскоростных монтажных плат / Ю.С. Атопшев, М.Н. Ушкар // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2011. – Т. 9, № 12. – С. 134–141.
2. Иванов В.Г. Анализ взаимной ёмкости и индуктивности печатного монтажа // Электротехника и электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 22–24.

3. Комнатнов М.Е. Предварительный анализ причин аномальной работы автогенератора Пирса / М.Е. Комнатнов, М.И. Почуев // Научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «ИСС». – 2014. – С. 90–92.

4. Заболоцкий А.М. Индуктивность цепи земля–питание в печатных платах бортовой аппаратуры космических аппаратов / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, И.Ф. Калимулин // Авиакосмическое приборостроение. – 2011. – № 11. – С. 11–15.

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

УДК 621.396.677

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ НА ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МЕТОДОМ МОМЕНТОВ

*Д.М. Мочалов, студент каф. ТУ; Д.В. Клюкин, ассистент каф. ТУ
Научный руководитель С.П. Куксенко, д.т.н., проф. каф. ТУ
г. Томск, ТУСУР, dm_mochalov@tu.tusur.ru*

Выполнена оценка влияния качества расчетной сетки на параметры и характеристики прямоугольной спиральной антенны при моделировании методом моментов. Сетки построены с помощью программных библиотек CGAL и GMSH. Показано, что качество расчетной сетки оказывает значительное влияние на расчет входного импеданса, однако слабо сказывается на коэффициенте усиления антенны.

Ключевые слова: прямоугольная спиральная антенна, метод моментов, расчетная сетка.

В настоящее время для моделирования антенн широкое распространение получил метод моментов [1–4]. Согласно методу, проводящие поверхности проектируемой антенны заменяются эквивалентными поверхностными электрическими токами, после чего решается задача возбуждения электромагнитного поля этими токами для заданных граничных условий. Для аппроксимации криволинейных границ поверхностей геометрических моделей антенн часто используется их представление в виде треугольной полигональной сетки, а для описания тока в ячейках сетки – базисные функции RWG [5]. При этом одним из основных факторов, влияющих на точность вычисления, является качество расчетной сетки. Также для выполнения точного моделирования генераторы расчетных сеток должны предоставлять воз-