

Д.М. Мочалов, Д.В. Ключкин

Алгоритмы визуализации результатов моделирования линий передачи методом конечных элементов

Усовершенствованы алгоритмы визуализации распределения потенциалов и напряженности электрического поля в поперечном сечении линии передачи программы FEM2D. Проведенное тестирование алгоритмов показало, что полученные результаты согласуются с результатами из других программ электростатического анализа, основанных на методе конечных элементов.

Ключевые слова: метод конечных элементов, алгоритм визуализации, линия передачи, напряженность электрического поля, распределение потенциалов, FEM2D.

При проектировании печатных плат и кабелей одной из важных задач является контроль характеристик линий передачи (ЛП). Так, точное вычисление матриц погонных параметров ЛП позволяет разработчикам выполнить их оптимальное проектирование. Использование систем автоматического проектирования (САПР) обладает преимуществами над физическим моделированием за счет ускорения и дешевизны. Поэтому при проектировании ЛП часто используются САПР.

Ранее разработана программа для электростатического анализа ЛП методом конечных элементов FEM2D [1]. Программа позволяет вычислять матрицы погонных параметров ЛП произвольной сложности в поперечном сечении.

Процесс моделирования в программе состоит из следующих этапов: создание модели, построение треугольной сетки (триангуляция Делоне), вычисление матриц погонных параметров, обработка и вывод результатов вычисления. Результаты расчета матриц погонных параметров выводятся в текстовом формате, а визуализация распределения потенциалов и напряженности электрического поля – в виде цветового отображения [2]. Однако визуализация не всегда выполняется корректно. Поэтому целесообразно провести модернизацию алгоритмов визуализации. Цель данной работы – выполнить эту модернизацию.

Ранее в программе реализованы алгоритмы визуализации распределения потенциалов и напряженности электрического поля [2], однако они имеют ряд недостатков. Так, визуализация напряженности электрического поля выполнялась не совсем корректно из-за отображения только по треугольной сетке (рис. 1). Кроме того, алгоритм визуализации распределения потенциалов некорректно отображал уровни низкого потенциала для близко расположенных проводников. Для унификации программного кода разработан обобщенный алгоритм визуализации.

Разработка алгоритма

Дадим краткие пояснения по особенностям вычислений в программе. Сначала производится подготовка данных для работы алгоритма. Так, при выборе визуализации распределения потенциалов φ входными данными являются значения потенциалов в узлах сетки, доступные после этапа вычислений. При визуализации напряженности электрического поля

надо вычислить значения напряженности в узлах сетки. Для этого сначала вычисляются значения напряженности электрического поля E в каждом треугольнике сетки как

$$E = -\nabla\varphi. \quad (1)$$

Полученные значения E используются для вычисления напряженности электрического поля для каждого узла сетки как среднее арифметическое значение напряженности всех треугольников, содержащих данный узел. Далее выполняется визуализация.

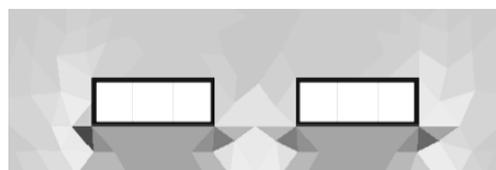


Рис. 1. Визуализация распределения потенциалов в предыдущей версии программы FEM2D

Первый этап алгоритма визуализации заключается в масштабировании выбранных значений (напряженности электрического поля или потенциалов) в узлах сетки. Масштабирование проводится для сопоставления значений в узлах сетки со значениями цветовой карты, в которой каждому цвету присвоен свой номер. В результате значения в вершинах каждого треугольника преобразуются в значение цветовой карты C как

$$C_i = N_C(V_i - V_{\min}) / (V_{\max} - V_{\min}), \quad (2)$$

где N_C – число цветов в карте (задается пользователем), V_{\max} и V_{\min} – максимальное и минимальное значения искомой величины в структуре, i – индекс вершины треугольника. Результат масштабирования при $N_C = 20$ показан на рис. 2 ($I-III$ – ребра треугольника, а $1-3$ – его вершины).

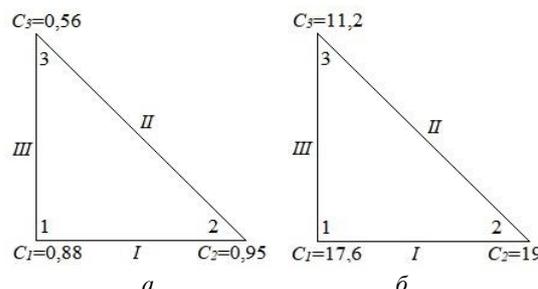


Рис. 2. Значения в узлах треугольника до (а) и после (б) масштабирования при $N_C = 20$

После масштабирования при помощи интерполяции определяются места на ребрах треугольника, в которых происходит изменение цвета. Для этого попарно сравниваются значения в вершинах треугольника, определяется число целых значений между ними (число точек n на каждом ребре) и вычисляются их координаты. Так, для треугольника из рис. 2, б на ребре I будет всего одна точка ($n = 1$, $C = 18$), координаты которой (x, y) вычисляются по

$$\begin{aligned} x &= x_1 + (x_2 - x_1)l, \\ y &= y_1 + (y_2 - y_1)l, \end{aligned} \quad (3)$$

где x_1, y_1 и x_2, y_2 – координаты вершин 1 и 2, а l – величина, определяемая как

$$l = (C - C_1) / (C_2 - C_1). \quad (4)$$

Аналогичным образом определяются точки на двух оставшихся ребрах. Пример определения промежуточных точек на ребрах треугольника из рис. 2, б представлен на рис. 3.

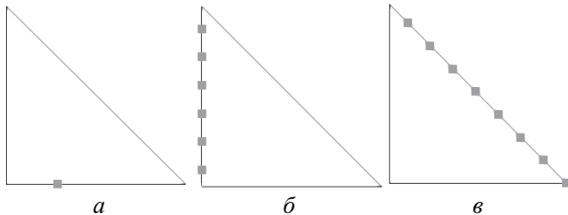


Рис. 3. Определение промежуточных точек на первом (а), втором (б) и третьем (в) ребрах треугольника из рис. 2, б

По всем полученным точкам производится построение вспомогательных треугольников. Вначале выбираются три точки с минимальными значениями, через которые производится построение вспомогательного треугольника. После чего точка с наименьшим значением далее игнорируется. Процесс повторяется до тех пор, пока общее число точек больше двух. Цвет вспомогательных треугольников выбирается согласно номеру из цветовой карты, который определяется как среднее арифметическое значение в вершинах вспомогательных треугольников. Пример процесса закрашивания треугольника представлен на рис. 4. Аналогичным образом рассматриваются остальные треугольники сетки.

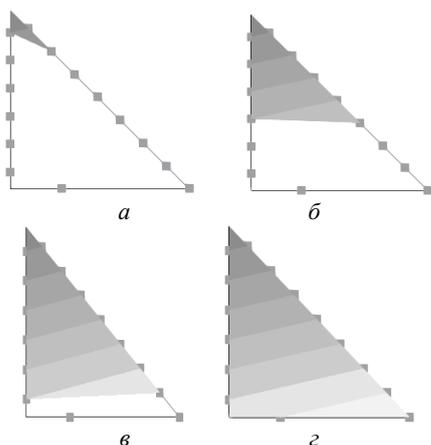


Рис. 4. Этапы 1–4 (а–д) раскрашивания треугольника из рис. 3

Блок-схема обобщенного алгоритма представлена на рис. 5.

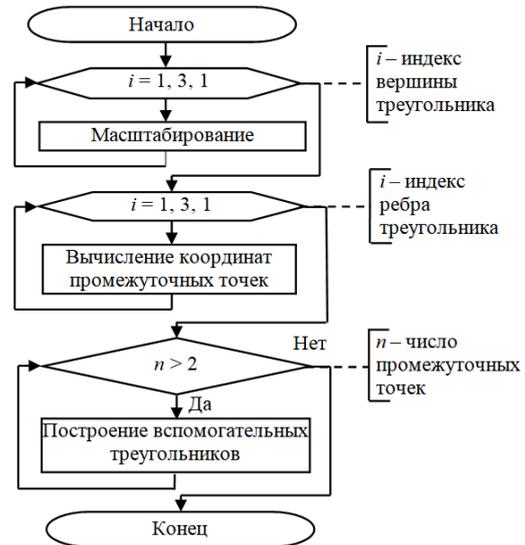


Рис. 5. Блок-схема обобщенного алгоритма визуализации распределения потенциалов и электрического поля в поперечном сечении ЛПП

Тестирование алгоритмов

Для верификации разработанных алгоритмов использована экранированная двухпроводная ЛПП, поперечное сечение которой приведено на рис. 6. Параметры структуры: относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r = 2$, h_1 – высота подложки 1 мм, h_2 – высота до ограничивающего экрана 22 мм, w – ширина проводников 3 мм, s – расстояние между проводниками 2 мм, t – толщина проводников 1 мм, d – расстояние от края структуры до проводника 16 мм.

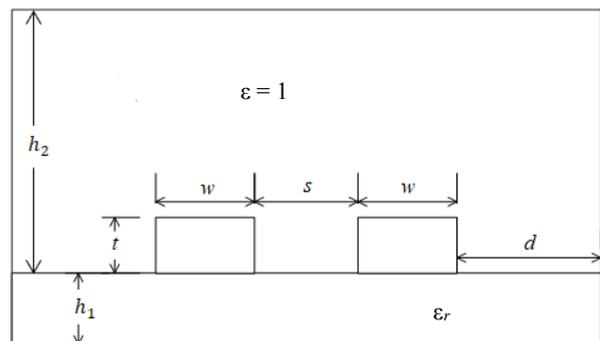


Рис. 6. Поперечное сечение экранированной двухпроводной ЛПП

Результаты визуализации распределения потенциалов приведены на рис. 7, а напряженности электрического поля – на рис. 8. На рисунках также приведены результаты, полученные в FEMM [3] и ELCUT [4]. Видно, что результаты хорошо согласуются.

Заключение

Выполнены усовершенствование алгоритмов визуализации программы FEM2D и их тестирование. Показана корректность разработанных алгоритмов и их программной реализации.

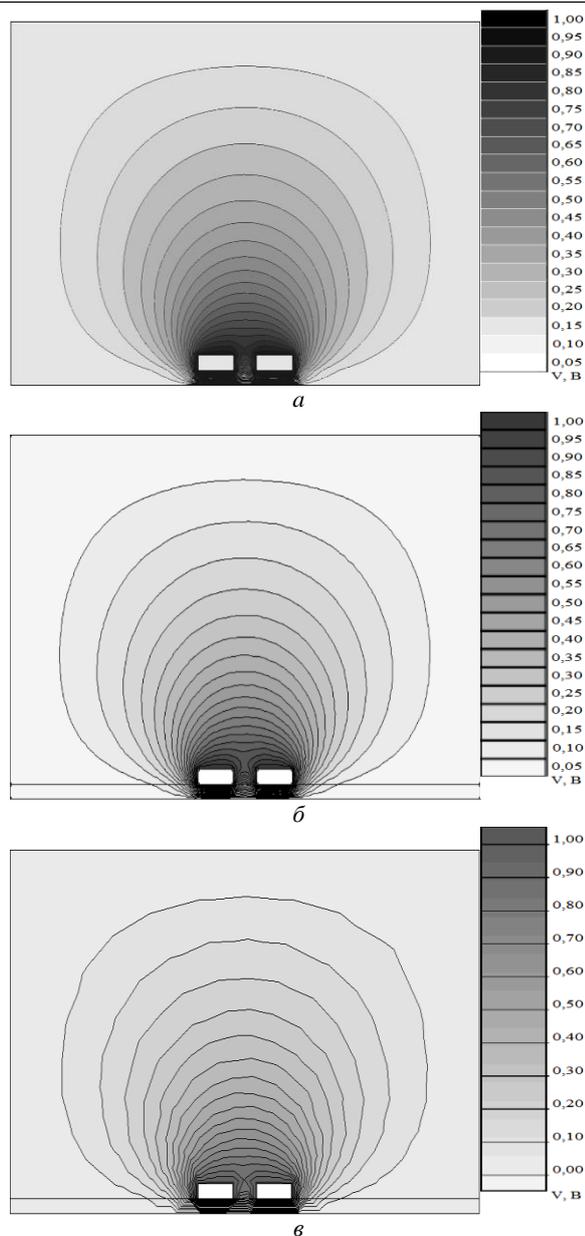


Рис. 7. Визуализация распределения потенциалов в FEM2D (а), FEMM (б) и Elcut (в)

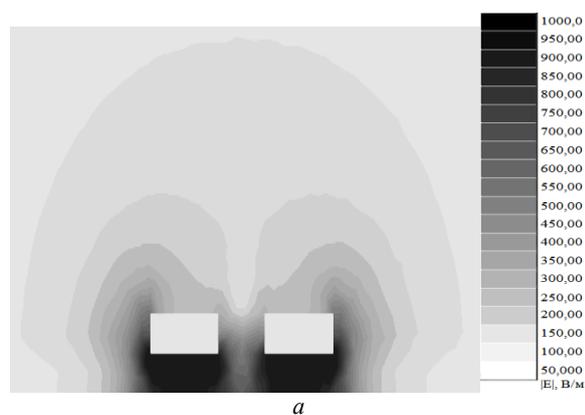


Рис. 8 (начало)

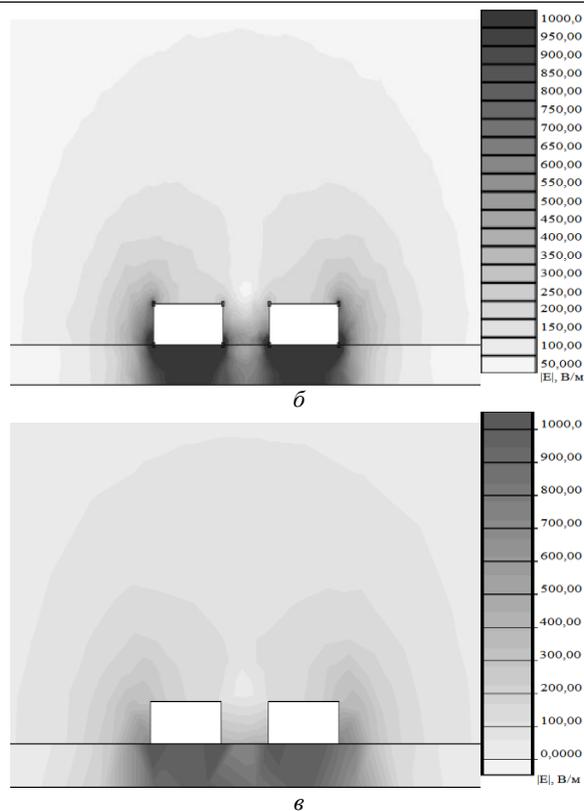


Рис. 8 (окончание). Визуализация напряженности электрического поля в FEM2D (а), FEMM (б) и Elcut (в)

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования (проект FEWM-2020-0041).

Литература

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660469 РФ. FEM2D 2021 / Д.В. Клюкин, А.А. Квасников, С.П. Куксенко, А.А. Иванов, М.Е. Комнатнов. – Заявка № 2021619672. Дата поступления 23.06.21. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.06.21.
2. Клюкин Д.В. Новые функциональные возможности программного модуля электростатического анализа методом конечных элементов // Сб. избр. статей междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2021». – Томск, Россия, 19–21 мая, 2021. – Ч. 2. – С. 64–67.
3. FEMM – Finite Element Method Magnetics [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.femm.info/> (дата обращения: 18.09.2021).
4. ELCUT – программа моделирования [Электронный ресурс]. – URL: <https://elcut.ru/> (дата обращения: 18.09.2021).

Мочалов Дмитрий Михайлович
 Студент каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРА
 Эл. почта: dmochalov3@gmail.com

Клюкин Дмитрий Владимирович
 Магистрант каф. ТУ ТУСУР
 Эл. почта: yuhool1@mail.ru