

амплитуда импульсов после разложения составляет 0,23 В. В случае когда LC-звенья подключены на оба конца пассивного проводника, амплитуды импульсов составляют 0,21 и 0,29 В.

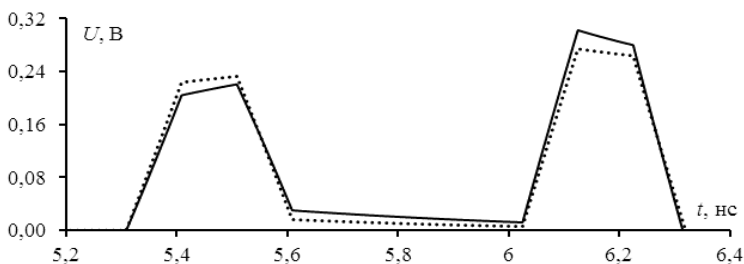


Рис. 4. Отклик на СКИ, полученный для схем подключения МФ с LC-фильтрами на ближнем конце (...); обоих концах пассивного проводника (—)

Включение LC-звена в цепь с пассивным проводником МФ не даёт особых результатов, данные звенья необходимо включать в цепь активного проводника.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FEWM-2022-0001).

ЛИТЕРАТУРА

1. Заболоцкий А.М. Электромагнитная совместимость: модальные технологии: учеб. пособие / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во ТУСУР. – 2018. – 132 с.
2. Белоусов А.О. Многопроводная микрополосковая линия как модальный фильтр для защиты от сверхкоротких импульсов / А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3(37). – С. 124–128.
3. Zhechev Y.S., Kosteletskii V.P. A modal filter with a parallel oscillatory circuit in a passive conductor // Сб. избран. статей научной сессии ТУСУР. – 2020. – № 1-2. – С. 323–326.

УДК 519.688

СРАВНЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОГРАММНЫХ БИБЛИОТЕК ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ СЕТОК

Д.М. Мочалов, студент; Д.В. Ключин, магистрант
 Научный руководитель С.П. Куксенко, проф. каф. ТУ, д.т.н.
 Проект ГПО ТУ-1502. Вычислительная ЭМС
 г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, dm_mochalov@tu.tusur.ru

Представлены результаты сравнительного анализа производительности программных библиотек построения расчетных сеток CGAL

и GMSH. Показано, что библиотека CGAL производит вычисления быстрее, несмотря на использование большего числа элементов.

Ключевые слова: расчетная сетка, библиотека CGAL, библиотека GMSH.

Растущая сложность современных радиоэлектронных средств (РЭС) приводит к повышению требований при их проектировании с использованием компьютерного моделирования. При этом на практике часто необходимо моделировать системы, имеющие неоднородную структуру и сложную геометрию. Поэтому используют численные методы, основанные на разбиении исследуемой системы на простые элементы для построения расчетных сеток. Так, для двухмерных областей используются треугольники или прямоугольники, расчетная сетка из которых получается с использованием различных программных библиотек.

Цель работы – сравнить производительность программных библиотек построения расчетных сеток.

Критериями для сравнения программных библиотек являются простота программного кода, наличие подробной документации, возможность построения треугольных и прямоугольных расчетных сеток двухмерных и трехмерных структур.

Первоначально выбраны библиотеки SDK Open CASCADE Mesh Framework (OMF), libMESH, VCG Lib, OpenMesh, CGAL, GTS и GMSH. Установлено, что наилучшим образом выбранным критериям соответствуют библиотеки CGAL [1] и GMSH [2]. Однако построение треугольных сеток производится при помощи обеих библиотек, а прямоугольных – только GMSH. При этом библиотека CGAL, в отличие от GMSH, позволяет настраивать минимальный угол между ребрами треугольников для построения сетки.

Для сравнения библиотек разработан программный модуль построения расчетных сеток, реализованный на языке C++ в среде Qt Creator. Сравнение производительности выполнено на примере линии передачи из рис. 1, *a*. Параметры линии: h_1 – высота экрана (5 мм), w_1 – ширина экрана (5 мм), h_2 – высота проводника (3 мм), w_2 – ширина проводника (3 мм). На рис. 1, *б*, *в* приведены примеры расчетных сеток при $l = 0,5$ мм, полученные с помощью указанных библиотек. Результаты работы программного модуля, при изменении максимальной длины ребер элементов (l) и минимального угла между ребрами в CGAL сведены в табл. 1 и 2 (где Δ обозначает треугольную, а \square – прямоугольную сетки).

Из табл. 1 видно, что при уменьшении l время работы программного модуля возрастает, а при изменении минимального угла между

ребрами в CGAL время работы меняется незначительно. При этом различие времени работы библиотек CGAL и GMSH достигает 40 раз.

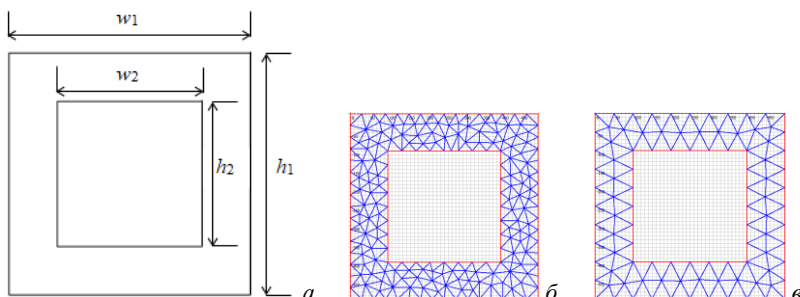


Рис. 1. Поперечное сечение линии передачи (а), расчетные сетки CGAL (б) и GMSH (в) при $l = 0,5$ мм

Таблица 1

Время работы (мс) программного модуля при изменении l					
l , мм	CGAL (Δ , 10°)	CGAL (Δ , $20,7^\circ$)	CGAL (Δ , 30°)	GMSH (Δ)	GMSH (\square)
1	1	1	1	31	41
0,5	2	3	3	67	93
0,1	43	34	40	1380	1782
0,05	159	149	150	5767	7632
0,01	3920	3926	3919	159307	262061

Таблица 2

Число элементов расчетной сетки при изменении l					
l , мм	CGAL (Δ , 10°)	CGAL (Δ , $20,7^\circ$)	CGAL (Δ , 30°)	GMSH (Δ)	GMSH (\square)
1	140	140	150	64	20
0,5	524	524	536	136	64
0,1	12393	12393	12506	3890	1600
0,05	49937	49937	50127	14930	6400
0,01	1252660	1252660	1253260	371340	160000

Из табл. 2 видно, что при уменьшении l число элементов увеличивается. При этом число элементов при углах 10 и $20,7^\circ$ не изменяется. Увеличение угла до 30° приводит к росту числа элементов, а максимальное различие составляет 7% . Различие в числе элементов в результате работы библиотек достигает $3,9$ раза. На рис. 2 приведены зависимости работы программного модуля от числа элементов расчетной сетки.

Из рис. 2 видно, что с увеличением числа элементов сетки пропорционально растёт время вычисления, что характерно для обеих библиотек. При любых настройках библиотека CGAL выполняет по-

строение расчетной сетки быстрее, чем GMSH. При этом прямоугольная расчетная сетка строится дольше, так как алгоритм основан на триангуляции, с последующим преобразованием ее в прямоугольную сетку [3].

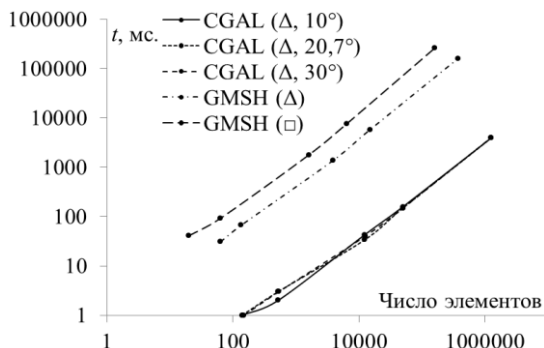


Рис. 2. Зависимость времени работы программного модуля от числа элементов сетки

Таким образом, выполнен сравнительный анализ производительности программных библиотек построения расчетных сеток CGAL и GMSH. Показано, что библиотека CGAL производит вычисления до 40 раз быстрее и оперируя до 3,9 раза большим числом элементов, чем GMSH. При этом показано, что библиотека GMSH, в отличие от CGAL, позволяет строить прямоугольные расчетные сетки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2022-0001.

ЛИТЕРАТУРА

1. The Computational Geometry Algorithms Library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.graphics.rwth-aachen.de/software/openmesh/intro/>, свободный (дата обращения: 10.02.2022).
2. Gmsh [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gmsh.info/>, свободный (дата обращения: 10.02.2022).
3. A frontal Delaunay quad mesh generator using the L^∞ norm / J.-F. Remacle, F. Henrotte, T. Carrier-Baudouin, E. Bechet, E. Marchandise, C. Geuzaine, T. Mouton // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2013. – Vol. 94. – P. 494–512.