

7. Amemiya H. Time-domain analysis of multiple parallel transmission lines // RCA Review. – 1967. – P. 241–276.
8. Djordjevic A.R. Time-domain response of multiconductor transmission lines / A.R. Djordjevic, T.K. Sarkar, R.F. Harrington // IEEE Proceedings. – 1987. – Vol. 75, No. 6. – P. 743–764.
9. Paul C.R. Literal solutions for time-domain crosstalk on lossless transmission lines // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1992. – Vol. 34, Iss. 4. – P. 433–444.
10. Park S.W. Analytical approach for crosstalk characterization of multiconductor transmission lines using mode decomposition technique in the time domain / S.W. Park, F. Xiao, Y. Kami // IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility. – 2010. – Vol. 52. – P. 436–446.
11. Xiao F. Analytical solution for two parallel traces on PCB in the time domain with application to hairpin delay lines / F. Xiao, K. Murano, Y. Kami // IEICE Transactions on Communications. – Jun. 2009. – P. 1953–1959.
12. Chai, C. Simple time-domain expressions for prediction of crosstalk on coupled microstrip lines / C. C. Chai, B. K. Chung, H. T. Chuah // Progress in Electromagnetics Research. – 2003. – Vol. 39. – P. 147–175.
13. Gu-Yan N. Time-domain analytic solutions of two-wire transmission line excited by a plane-wave field / N. Gu-Yan, Y. Li, Y. Nai-Chang // Chin. Phys. Soc. and IOP Publishing Ltd. – 2008. – Vol. 7. – P. 3629–3634.
14. Soleimani N. Crosstalk analysis at near-end and far-end of the coupled transmission lines based on eigenvector decomposition / Mohammad G.H. Aljani, Mohammad H. Neshati // International Journal of Electronics and Communications. – 2012. – Vol. 12. – P. 1–8.
15. Soleimani N. Analysis and Calculation of Crosstalk in Multi Conductor Transmission Lines (MTL) Coated by a Thin Dielectric Insulator [MSc thesis]. Ferdowsi University of Mashhad; September 2016.

УДК 519.612

НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д.В. Клюкин, магистрант каф. ТУ

Научный руководитель С.П. Куксенко, доцент каф. ТУ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, yuhoo11@mail.ru

Представлены результаты реализации новых функциональных возможностей программного модуля электростатического анализа методом конечных элементов. Выполнено тестирование нового функционала.

Ключевые слова: электростатический анализ, метод конечных элементов, напряженность электрического поля, распределение потенциала.

С увеличением сложности радиоэлектронных средств (РЭС) увеличиваются и затраты на их проектирование. Одним из ключевых элементов РЭС являются линии передачи (ЛП). Контроль характеристик ЛП при проектировании РЭС очень важен, так как из-за рассогласования в значении волнового сопротивления ЛП и нагрузки возникают помехи отражения сигнала, влияющие на его целостность. Моделирование в системах автоматического проектирования (САПР) обладает преимуществами над натурными испытаниями за счет ускорения и дешевизны. Поэтому в настоящее время при проектировании ЛП часто используются САПР, основанные на электростатическом анализе.

Электростатический анализ ЛП состоит из следующих этапов: построение геометрической модели; задание граничных условий; дискретизация области решения; решение задачи; вывод и визуализация результатов. Ранее разработан программный модуль электростатического анализа методом конечных элементов [1, 2]. Однако целесообразно расширение его функциональных возможностей.

Цель работы – реализовать новые функциональные возможности модуля электростатического анализа методом конечных элементов (МКЭ).

В современных САПР на этапе построения геометрических моделей пользователю доступно «дерево» проекта, которое содержит описание геометрических объектов и их параметры. Данное «дерево» позволяет наглядно структурировать составляющие сложных геометрических моделей и корректно задавать граничные условия задачи.

В ранее разработанном программном модуле переработан графический интерфейс пользователя для добавления подобного «дерева». В результате справа от графического редактора располагается «дерево» модели (рис. 1). Двойное нажатие на «ветвь дерева» подсвечивает выбранный объект на графической сцене. Для его редактирования требуется нажать по объекту правой кнопкой мыши и в сплывающем меню выбрать раздел «Edit». После этого в открывшемся окне редактирования можно изменить требуемые параметры.

После построения геометрических моделей и решения задачи в разработанном модуле результаты вычисления предоставляются в текстовом виде. Но этого не всегда достаточно для корректной оценки полученных характеристик. Для этого в современных САПР доступна возможность визуализации полученных результатов. Поэтому в модуль добавлена возможность визуализации результатов вычисления распределения потенциала, напряженности электрического поля и эквипотенциальных линий. Далее рассмотрим особенности разработанных вычислительных алгоритмов.

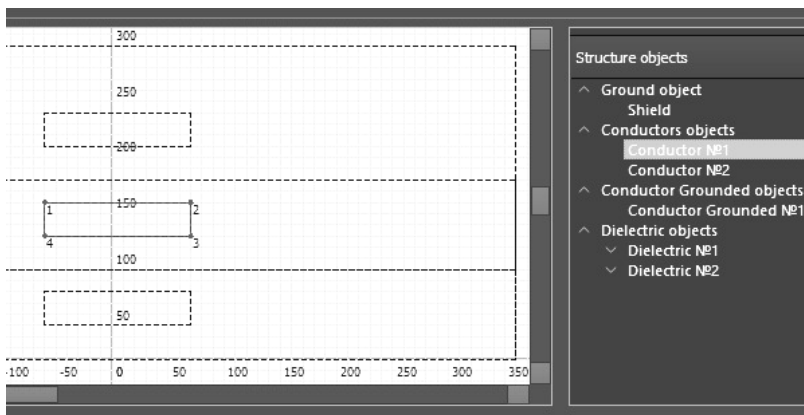


Рис. 1. Основное окно модуля электростатического анализа с открытым «деревом» модели

Алгоритм построения распределения потенциала и эквипотенциальных линий:

1. Задать шаг эквипотенциальных линий и цвет для диапазонов значений потенциала.
2. Найти треугольники, через которые проходят эквипотенциальные линии.
3. Определить точки со значением искомого потенциала на ребрах найденных треугольников.
4. Соединить найденные точки для образования эквипотенциальных линий.
5. Отобразить соответствующим цветом пространство между эквипотенциальными линиями.

Алгоритм построения напряженности электрического поля:

1. Вычислить значение потенциала φ в каждом узле сетки.
2. Вычислить значения напряженности электрического поля \mathbf{E} в каждом треугольнике сетки, как $\mathbf{E} = -\nabla\varphi$.
3. Отобразить соответствующим цветом каждый треугольник.

Для тестирования разработанных алгоритмов использовалась модель коаксиальной структуры со следующими параметрами: ширина и высота экрана 3 мм; ширина и толщина проводника 1 мм. На рис. 2 и 3 приведены результаты визуализации картины поля в разработанном модуле и в программах ELCUT [3] и FEMM [4].

Из рис. 2 и 3 видно, что результаты сходятся. Это подтверждает корректность разработанных алгоритмов и их программную реализацию.

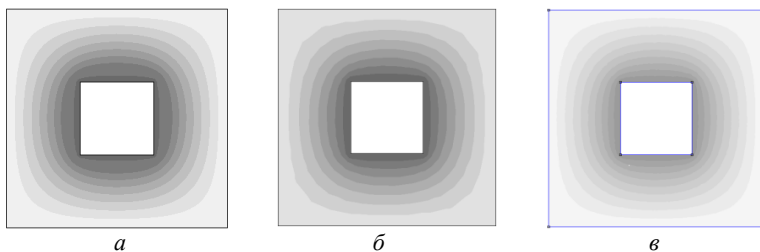


Рис. 2. Визуализация распределения потенциала в разработанном программном модуле (а), в программах ELCUT (б) и FEMM (в)

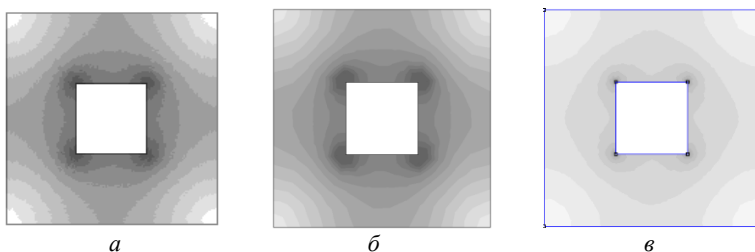


Рис. 3. Визуализации напряженности электрического поля в разработанном программном модуле (а), в программах ELCUT (б) и FEMM (в)

Таким образом, реализованы новые функциональные возможности программного модуля электростатического анализа МКЭ. Так, разработано «дерево» проекта, разработаны вычислительные алгоритмы построения распределения потенциала и напряженности электрического поля, реализована возможность их визуализации.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Клюкин Д.В. Расчет погонных параметров линий передачи методом конечных элементов / Д.В. Клюкин, А.А. Квасников // Научная сессия ТУСУР–2020: сб. избр. статей научной сессии ТУСУР по матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, Россия, 13–30 мая 2020 г. – Т. 1. – С. 251–254.
2. Клюкин Д.В. Вычисление погонных параметров многопроводных линий передачи методом конечных элементов / Д.В. Клюкин, С.П. Куксенко // 26-я. Междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-26–2020». – Томск, Россия, 24.11.2020 г. – С. 107–111.
3. ELCUT – программа моделирования [Электронный ресурс]. – URL: <https://elcut.ru/> (дата обращения: 12.03.2021).
4. FEMM – Finite Element Method Magnetics [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.femm.info/wiki/HomePage> (дата обращения: 12.03.2021).