

K. Jia, G. Wang, Q. Ge // 17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). – 2016. – P. 656–660.

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

4. BFU590G, NXP Semiconductors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BFU590G.pdf>, свободный (дата обращения: 24.02.2022).

5. IRFZ46NPbF, HEXFET Power MOSFET [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRFZ46N-DataSheet-v01\\_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a40153563b734b2220](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRFZ46N-DataSheet-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a40153563b734b2220), свободный (дата обращения: 24.02.2022).

УДК 004.416.6

## РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМЫ TALGAT

*И.А. Онищенко, студент каф. КСУП;*

*Д.В. Клюкин, магистрант каф. ТУ*

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

*Проект ГПО ТУ-1502. Вычислительная ЭМС*

*г. Томск, ТУСУР, onishchenko1903@yandex.ru*

Реализовано вычисление распределения потенциалов и напряженности электрического поля методом моментов в системе TALGAT. Проведено тестирование новых функциональных возможностей.

**Ключевые слова:** напряженность электрического поля, разность потенциалов, система TALGAT.

Система TALGAT предназначена для решения широкого класса задач электромагнитной совместимости [1]. Система состоит из нескольких модулей, одним из которых является MOM2D, предназначенный для электростатического анализа двумерных конфигураций проводников и диэлектриков методом моментов. Развитие системы TALGAT ведёт к расширению существующих и внедрению новых функциональных возможностей. В настоящее время в системе отсутствует возможность отображения распределения потенциалов и напряженности электрического поля в поперечном сечении структур. Цель данной работы – внедрение в модуль MOM2D вычисления распределения потенциалов и напряженности электрического поля двумерных конфигураций.

Математическая модель вычисления распределения потенциалов и напряженности электрического поля на примере связанной микро-

полосковой линии передачи (МПЛ) представлена в работе [2]. Так, распределение потенциалов, при наличии в структуре бесконечной плоскости земли, определяется как

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{n=1}^N \int_{L_n} \sigma_T(\mathbf{r}') \ln \frac{|\mathbf{r} - \underline{\mathbf{r}}'|}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dl', \quad (1)$$

а напряженности электрического поля –

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{n=1}^N \int_{L_n} \sigma_T(\mathbf{r}') \left[ \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} - \frac{\mathbf{r} - \underline{\mathbf{r}}'}{|\mathbf{r} - \underline{\mathbf{r}}'|^2} \right] dl', \quad (2)$$

где  $\sigma_T$  – полная плотность заряда,  $\mathbf{r}$  – точка наблюдения,  $\mathbf{r}'$  – точка источника,  $\underline{\mathbf{r}}'$  – точка мнимого источника,  $dl'$  – элемент дифференцирования по подынтервалу.

Пошаговый алгоритм вычисления и графического отображения напряженности электрического поля и распределения потенциалов выглядит следующим образом:

1. Построение прямоугольной расчетной сетки в поперечном сечении структуры с заданным размером ячеек и их общим числом  $N$  (рис. 1). Ячейки сетки, для оптимизации графического вывода, могут увеличиваться в размере по мере отдаления от структуры.
2. Расчёт зарядов в центрах подынтервалов, на которые разбиты границы структуры.
3. Расчёт расстояний между центрами подынтервалов и центрами ячеек сетки. Пункты 2 и 3 алгоритма реализуются с помощью существующих функциональных возможностей системы TALGAT.
4. Вычисление распределения потенциалов и напряженности электрического поля структуры с помощью выражений (1) и (2).
5. Отображение вычисленных в п. 4 значений.

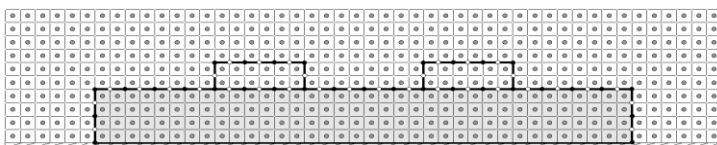


Рис. 1. Пример прямоугольной сетки в поперечном сечении МПЛ

Для графического вывода напряженности электрического поля и распределения потенциалов использована библиотека matplotlib [3]. Цветовая шкала отображаемой характеристики поля определяется минимальным и максимальным значением. Проводники выделяются белым цветом.

Апробация реализованного алгоритма вычисления напряженности электрического поля и распределения потенциалов проведена на примере биологической клетки, расположенной между двумя металлическими пластинами. Расстояние между пластинами равно 2,002 мм, их ширина – 2 мм, радиус клетки – 2 мм. Распределение напряженности и потенциалов электрического поля приведены на рис. 2, *a* и 3, *a*. Для проверки полученных результатов использована программа FEM2D [4], основанная на методе конечных элементов. Полученные в ней результаты приведены на рис. 2, *б* и 3, *б*. Видно, что в целом результаты согласуются, а отклонения обусловлены различием в вычислительных сетках.

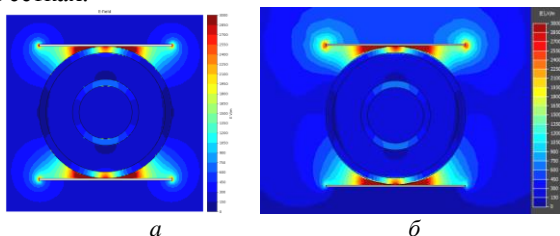


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в системе из биологической клетки, расположенной между металлическими пластинами: TALGAT (*a*) и FEM2D (*б*)

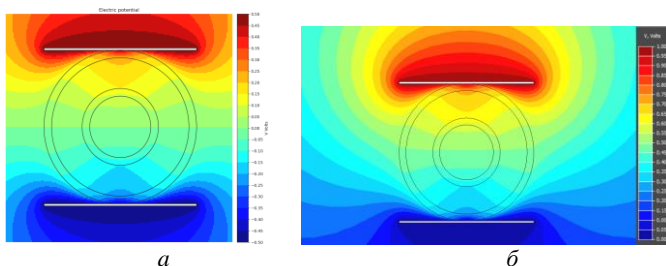


Рис. 3. Распределение потенциалов в системе из биологической клетки, расположенной между металлическими пластинами: TALGAT (*a*) и FEM2D (*б*)

Таким образом, расширены функциональные возможности системы TALGAT в части вычисления методом моментов распределения потенциалов и напряженности электрического поля двухмерных структур из проводников и диэлектриков. Выполненное сравнение с методом конечных элементов показало корректность разработанных вычислительных алгоритмов и их программной реализации.

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kuxsenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 1–7.

2. Отчет по НИР FEWM-2020-0041. Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости. № АААА-А20-120061890045-0. – Томск, 2020. – 317 с.

3. Matplotlib – Visualization with Python [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://matplotlib.org/>, свободный (дата обращения: 09.12.2021).

4. 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.

УДК 004.418

### РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КАЛЬКУЛЯТОРА ДЛЯ РАСЧЕТА ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ТИПОВЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

*А.Д. Бучинский, студент; А.А. Квасников, аспирант каф. ТУ;*

*И.А. Онищенко, студент каф. КСУП*

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

*Проект ГПО ТУ-1502. Вычислительная ЭМС*

*г. Томск, ТУСУР, [iasm752@gmail.com](mailto:iasm752@gmail.com)*

Разработан программный калькулятор для расчета погонных параметров линий передачи. Проведена верификация калькулятора и сравнение результатов с программными калькуляторами T<sub>x</sub>-LINE и AppCAD.

**Ключевые слова:** программный калькулятор, линия передачи, погонные параметры.

Одним из основных компонентов радиоэлектронных средств (РЭС) являются линии передачи (ЛП). Качественное проектирование РЭС невозможно без учёта погонных параметров ЛП. В связи с этим возникает необходимость в разработке программных средств, позволяющих рассчитать погонные параметры типовых ЛП. В настоящее время существуют два наиболее известных программных калькулятора, реализующих вычисление погонных параметров ЛП, – T<sub>x</sub>-LINE [1] и AppCAD [2]. Однако в T<sub>x</sub>-LINE отсутствуют двухпроводные ЛП, а в AppCAD – копланарные микрополосковые ЛП (МПЛ). Существенными недостатками обоих калькуляторов являются отсутствие возможности расчёта погонных индуктивности и ёмкости и отсутствие многовариантного анализа.