

ПОДСЕКЦИЯ 2.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Председатель – Заболоцкий А.М., зав. каф. СВЧиКР, д.т.н.;
зам. председателя – Белоусов А.О., доцент каф. ТУ, к.т.н.

УДК 519.612

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ С ЧАСТИЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В.С. Чебанов, студент каф. ТУ

Научный руководитель М.Е. Комнатнов, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, victorchebanov1@gmail.com

Рассмотрены основы численного метода эквивалентных схем с частичными элементами. Указаны особенности метода и приведены примеры его использования

Ключевые слова: численные методы, РЕЕС, электромагнитная совместимость, моделирование.

Задачи электромагнитной совместимости (ЭМС) зачастую требуют решения с использованием численных методов. Среди численных методов при решении задач ЭМС наиболее часто используют метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод моментов и пр. В последнее время особый интерес при решении задач ЭМС проявляется к численному методу эквивалентных схем с частичными элементами (РЕЕС – partial element equivalent circuit), изучение которого в настоящее время актуально. Цель работы – представить результаты изучения основ численного метода эквивалентных схем с частичными элементами.

Основой метода РЕЕС являются решения интегральных уравнений Максвелла, которые представлены в виде эквивалентных схем. Реализация метода РЕЕС заключается в расчете индуктивности элементарной ячейки произвольной трехмерной структуры (рис. 1). На рис. 1 изображена элементарная ячейка в двух плоскостях и трех направлениях оси (x, y, z) , $J_{x,y,z}$ представляет собой плотности токов по осям, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ отражают размеры прямоугольного проводника.

Используя генератор сетки, модель дискретизируется на элементарные ячейки, каждая из которых содержит сопротивление, индук-

тивность и ёмкость, а также управляемые источники тока и/или напряжения. Частичное взаимодействие между элементами эквивалентных схем каждой ячейки в сетке определило название метода.

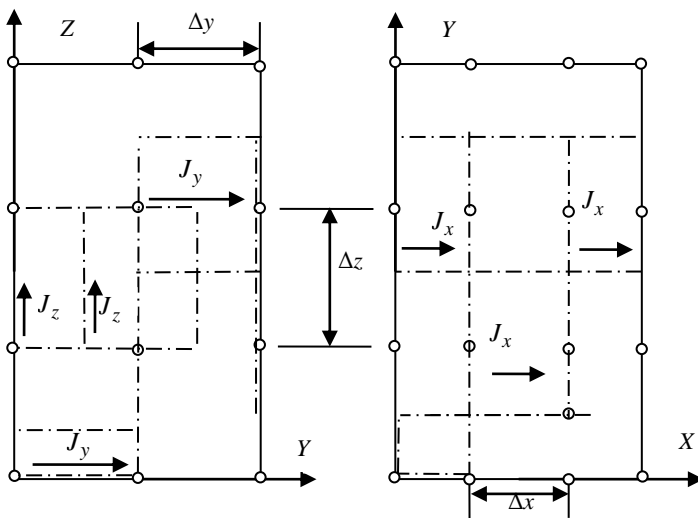


Рис. 1. Индуктивная элементарная ячейка для прямоугольного проводника в плоскостях ZY и ZX

Для нахождения значения индуктивности суммируется напряжение, получаемое через произведение тока, протекающего через элементарную индуктивность по времени [1]:

$$V_m^L(t) = \sum_{\forall n, n \neq m} L_{p_{mn}} \frac{\partial i_n(t - \tau_{mn})}{\partial t},$$

где $(t - \tau_{mn})$ – ток, протекающий через ячейку n в предыдущий момент времени $(t - \tau_{mn})$.

С начала 1970-х гг. по настоящее время имеется множество модернизированных методов РЕЭС, которые в основном отличаются меньшими вычислительными затратами. Изначально в методе использовались ортогональные ячейки [2–4], впоследствии были предприняты меры по улучшению возможностей моделирования с использованием неортогональных ячеек. Особое внимание при разработке метода РЕЭС уделяется стабильности во временной области. Например, включение скин-эффекта во временные и частотные области, а использование функции Грина для многослойных сред существенно расширило область применения РЕЭС-метода [5].

Использование различных моделей схем позволяет повысить производительность метода. Например, использование метода модифицированных узловых потенциалов (МУП) позволило решить задачи в области низких частотах и при постоянном токе. Также использование МУП позволило получить решения с использованием временной области и с частотно-зависимыми частичными элементами [6–7]. Совместное использование схемотехнического и численного анализов для печатных плат позволило вычислить погонную ёмкость проводников с учётом линейных и нелинейных элементов схемы [8]. Метод РЕЕС активно используется разработчиками в программном обеспечении CST [9] и Altair Flux [10] для моделирования низкочастотных электромагнитных полей электрических соединений.

Таким образом, можно отметить, что метод эквивалентных схем представляет собой практический интерес, его изучение является актуальным и в дальнейшем планируется его реализация в MATLAB.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10162-П) в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Combined Electric, Electromagnetic and Thermal Modeling based on a PEES Approach. Publications of Lulea Tekniska University [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ltu.diva-portal.org/smash/record.jsf?faces-redirect=true&aq2=%5B%5B%5D%5D&af=%5B%5D&searchType=SIMPLE&sortOrder2=title_sort_asc&query=&language=sv&pid=diva2%3A1019413&aq=%5B%5B%5D%5D&sf=all&aqe=%5B%5D&sortOrder=author_sort_asc&onlyFullText=false&noOfRows=50&dswid=-1606, свободный (дата обращения: 10.03.2023).

2. Ruehli A.E. Inductance calculations in a complex integrated circuit environment // IBM journal of research and development. – 1972. – Vol. 16, No. 5. – 470 p.

3. Ruehli A.E. Efficient capacitance calculations for three-dimensional multiconductor systems / A.E. Ruehli, P.A. Brennan // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1973. – Vol. 21, No. 2. – PP. 76–82.

4. Ruehli A.E. Equivalent circuit models for three-dimensional multiconductor systems // IEEE Transactions on Microwave theory and techniques. – 1974. – Vol. 22, No. 3. – PP. 216–221.

5. Nitsch J. Radiating nonuniform transmission-line systems and the partial element equivalent circuit method / J. Nitsch, F. Gronwald, G. Wollenberg. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. – 348 p.

6. Kochetov S.V. Stable and effective full-wave PEES models by full-spectrum convolution macromodeling / S.V. Kochetov, G. Wollenberg // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2007. – Vol. 49, No. 1. – PP. 25–34.

7. Antonini G. Broadband macromodels for retarded partial element equivalent circuit (rPEEC) method / G. Antonini, D. Deschrijver, T. Dhaene // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2007. – Vol. 49, No. 1. – PP. 35–48.

8. Shatri V. MATLAB Partial Element Equivalent Circuit Toolbox for Solving Coupled Electromagnetic-Circuit Problems / V. Shatri, R. Sefa, L. Kurtaj // International Journal of Current Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 3, No. 4.

9. Partial Element Equivalent Circuit (PEEC). CST Studio Suite Help [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://space.mit.edu/RADIO/CST_online/mergedProjects/PCB/pcbs/5_simulating_a_pcb/4_3dfefd.htm, свободный (дата обращения: 10.03.2023).

10. Altair Flux Цифровая трансформация предприятий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elm-c.ru/altair-flux>, свободный (дата обращения: 10.03.2023).

УДК 621.396

ОБЗОР ОСОБЕННОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ АНТЕНН ПРОВОДНОЙ СЕТКОЙ

А.Н. Гилева, студентка каф. ТОР;

А. Алхадж Хасан, м.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС»

*Научный руководитель Т.Р. Газизов, д.т.н., доцент, зав. каф. ТУ
г. Томск, ТУСУР, gileva2001@mail.ru*

Выполнен краткий обзор особенностей моделирования поверхностных антенн с использованием проводной сетки. Показана актуальность данного подхода при моделировании антенн и сформулирована база знаний, необходимая для проведения будущих исследований и оптимального использования преимуществ данного подхода при моделировании типовых антенн.

Ключевые слова: антенны, проводная сетка, метод моментов, численные методы.

Антенны являются важной частью радиоэлектронных устройств, и существует много видов антенн, каждая из которых имеет свои уникальные формы, размеры, области применения и ограничения. Несмотря на то, что оптимальное проектирование антенн является актуальной задачей в настоящее время, единой универсальной методологии для её решения не существует. Поэтому большую роль в этом играет моделирование, которое позволяет исследовать и оптимизировать характеристики и структуры антенн с целью повышения их эффективности.

Численные методы, которые используются в программных модулях для моделирования антенн, позволяют ученым значительно продвинуться в области их проектирования. Однако моделирование антенн требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому выбор численного метода, используемого при моделировании, сильно влияет на затраты. Существует много различных методов и подходов к моде-