

Международная академия наук высшей школы
Академия наук высшей школы Российской Федерации
Сибирская академия наук высшей школы
Бурятский, Красноярский, Кузбасский, Новосибирский,
Омский, Томский научные центры САН ВШ
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-26-2020)

26-я международная
научно-практическая конференция

24 ноября 2020 г.
г. Томск, Россия

ДОКЛАДЫ
(Материалы конференции)

Томск
Издательство ТУСУРа
2020

УДК 553.3/.9+316.344.3[(571.1/.5)(063)

ББК 20.1+65.04+72(253)

П77

Организационный комитет:

А.А. Шелупанов – президент ТУСУРа (председатель),

Т.Р. Газизов – профессор ТУСУРа (зам. председателя),

Ю.А. Шурыгин, А.М. Кориков, Г.П. Литвинцева,

М.Ю. Катаев, Ю.С. Саркисов

Отв. редактор – Е.В. Прокопчук

Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири
П77 (СИБРЕСУРС-26-2020) : доклады (материалы конференции)
26-й международной научно-практической конференции,
Томск, 24 ноября 2020 г. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та
систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 144 с.

ISBN 978-5-86889-

Представлены материалы, отражающие результаты научной деятельности вузов Сибирского региона по эффективному использованию и развитию территориальных ресурсов в интересах экономики России.

Для ученых, специалистов, преподавателей, инженеров, аспирантов и студентов вузов и научных учреждений как в России, так и за рубежом.

УДК 553.3/.9+316.344.3[(571.1/.5)(063)

ББК 20.1+65.04+72(253)

ISBN 978-5-86889-

© Сибирская академия наук
высшей школы, 2020

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Д. В. КЛЮКИН, магистрант каф. ТУ, ТУСУР, Томск
С. П. КУКСЕНКО, канд. техн. наук, доцент, каф. ТУ,
ТУСУР, Томск

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Представлен способ вычисления погонных параметров многопроводных линий передачи методом конечных элементов. Кратко описаны особенности вычисления и программной реализации, а также приведены некоторые результаты, подтверждающие корректность расчетов.

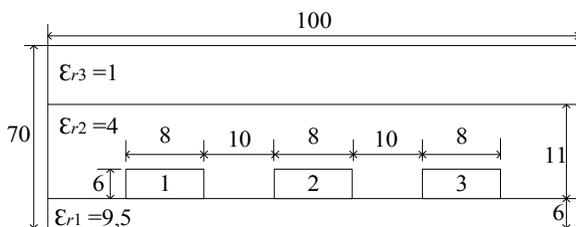
При проектировании печатных плат и кабелей одной из важных задач является контроль характеристик многопроводных линий передачи (МПЛП). Так, точное вычисление погонных параметров МПЛП позволяет разработчикам выполнить их оптимальное проектирование. Поэтому актуальна разработка собственного и доступного программного обеспечения, чтобы минимизировать финансовые затраты и способствовать импортонезависимости страны в такой важной отрасли, как радиоэлектроника. За основу разработки программного обеспечения для вычисления погонных параметров МПЛП взят метод конечных элементов (МКЭ) как один из наиболее универсальных и робастных численных методов.

МКЭ основан на разбиении анализируемой структуры на конечные элементы, каждый из которых имеет простую геометрию, как правило, в виде треугольника. Далее искомое решение (распределение потенциалов) аппроксимируется полиномиальными базисными функциями на элементе, коэффициенты которых определяются с помощью его узловых значений. Так, для каждого e -го элемента формируются уравнение $\mathbf{W}_e = 0,5\varepsilon_r\varepsilon_0\mathbf{\Phi}_e^T\mathbf{C}^{(e)}\mathbf{\Phi}_e$, где ε_r и ε_0 – диэлектрические относительная проницаемость и постоянная; \mathbf{W}_e – погонная энергия, запасенная в элементе; $\mathbf{\Phi}_e = [\Phi_{e1}, \Phi_{e2}, \Phi_{e3}]^T$ – матрица потенциалов в его внутренних узлах; $\mathbf{C}^{(e)}$ – матрица коэффициентов вида

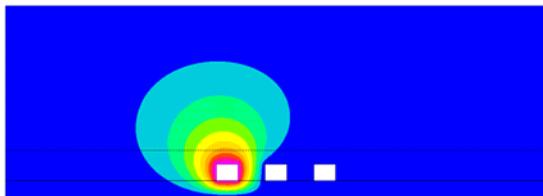
$$\mathbf{C}^{(e)} = \left[c_{11}^{(e)}, c_{12}^{(e)}, c_{13}^{(e)}, c_{21}^{(e)}, c_{22}^{(e)}, c_{23}^{(e)}, c_{31}^{(e)}, c_{32}^{(e)}, c_{33}^{(e)} \right]. \quad \text{Ансамблирование}$$

информации обо всех элементах даёт глобальную СЛАУ, решением которой являются значения потенциалов в свободных узлах. После этого определяется полная энергия структуры и с её помощью вычисляются погонные параметры МПЛП. При этом особую сложность имеет вычисление ёмкостной матрицы. Для МПЛП полная энергия считается несколько раз – по числу проводников в структуре, не считая опорного. Элементы на главной диагонали ёмкостной матрицы вычисляются как $c_{ii} = 2w_{ii}$, где энергия w_{ii} рассчитывается при задании на i -м проводнике потенциала 1 В и 0 В на остальных. Внедиагональные элементы вычисляются как $c_{ij} = w_{ij} - 0,5(c_{ii} + c_{jj})$, где энергия w_{ij} рассчитывается при задании потенциала 1 В на i -м и j -м проводниках.

Систематизированная из разных источников и описанная выше в общем виде математическая модель программно реализована и выполнен вычислительный эксперимент по ней для трех МПЛП. На рисунке 1,а приведено поперечное сечение МПЛП 1 (здесь и далее все размеры указаны в условных единицах).



а



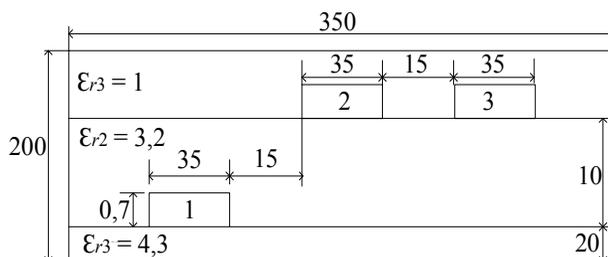
б

Рисунок 1 – МПЛП 1: а – поперечное сечение; б – распределение потенциалов при возбуждении проводника 1

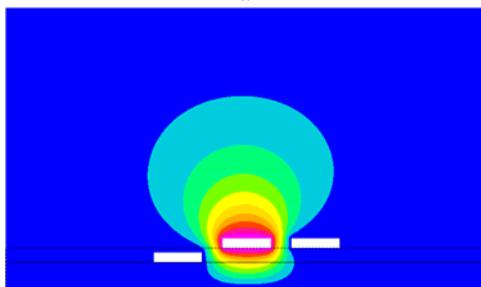
Распределение потенциала при возбуждении проводника 1 приведено на рисунке 1,б, а в таблицу 1 сведены элементы ёмкостной матрицы, полученные с помощью разработанной программы, программ FasterCap и FEMM [1]. Аналогичные результаты для МПЛП 2 (проводник 2) и МПЛП 3 (проводник 3) приведены на рисунках 2 и 3, а также в таблицах 2 и 3 (сравнение с результатами из [2]) соответственно.

Таблица 1 – Элементы ёмкостной матрицы МПЛП 1 (пФ/м)

Элементы	c_{11}	$c_{12}=c_{21}$	$c_{13}=c_{31}$	c_{22}	$c_{23}=c_{32}$	c_{33}
Из [1]	269,52	-34,86	-1,25	277,75	-34,86	269,52
Расчет FasterCap	262,55	-32,91	-2,30	271,15	-33,22	262,42
Расчет FEMM	271,19	-34,92	-0,61	280,09	-35,51	271,98
Расчет разработанной программой	274,26	-35,63	-0,97	282,76	-35,62	274,25



а

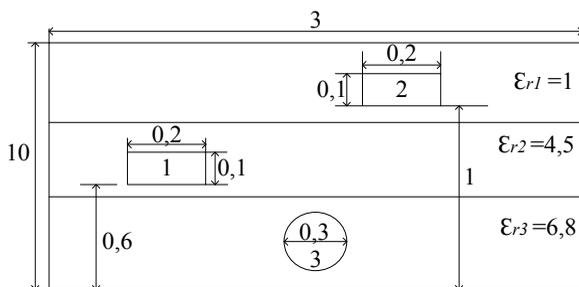


б

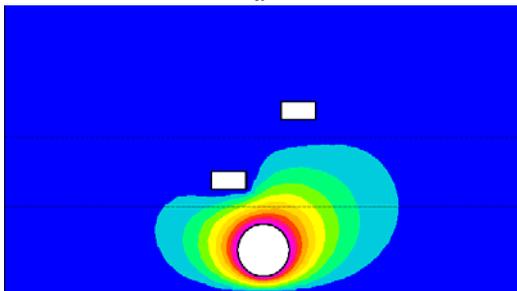
Рисунок 2 – МПЛП 2: а – поперечное сечение; б – распределение потенциалов при возбуждении проводника 2

Таблица 2 – Элементы ёмкостной матрицы МПЛП 2 (пФ/м)

Элементы	c_{11}	$c_{12}=c_{21}$	$c_{13}=c_{31}$	c_{22}	$c_{23}=c_{32}$	c_{33}
Из [2]	142,10	-21,70	-0,90	93,50	-18,10	88,00
Расчет FasterCap	139,27	-20,11	-1,11	90,06	-16,60	80,20
Расчет FEMM	143,12	-21,84	-0,65	94,62	-18,14	89,08
Расчет разработанной программой	144,88	-22,64	-0,65	96,77	-19,13	90,74



a



б

Рисунок 3 – МПЛП 3: *a* – поперечное сечение; *б* – распределение потенциалов при возбуждении проводника 3

Таблица 3 – Элементы ёмкостной матрицы МПЛП 3 (пФ/м)

Элементы	c_{11}	$c_{12}=c_{21}$	$c_{13}=c_{31}$	c_{22}	$c_{23}=c_{32}$	c_{33}
Из [2]	128,30	-12,71	-71,84	34,86	-7,13	374,00
Расчет FEMM	144,26	-14,64	-76,62	40,76	-8,28	381,28
Расчет разработанной программой	131,28	-14,33	-72,80	38,19	-7,68	379,83

Из таблиц 1–3 видно, что полученные результаты в целом согласуются с результатами других разработчиков. При этом значения элементов ёмкостной матрицы для МПЛП 1 и МПЛП 2 при использовании МКЭ (разработанная программа, опубликованные данные и FEMM) между собой различаются меньше, чем при их сравнении с результатами, полученными методом моментов (FasterCap). Максимальные различия в результатах разработанной программы и FEMM составили: для МПЛП 1 – 59 % (c_{13}); для МПЛП 2 – 5,5 % (c_{23}); для МПЛП 3 – 9 % (c_{11}). Такое различие обусловлено особенностями построения сетки. Так, разработанная программа использует неравномерную сетку, а FEMM – равномерную. Различие с результатами из [1, 2] обусловлено отсутствием в них сведений об использованных сетках, что сильно затрудняет повторяемость результатов.

Таким образом, разработана программа для вычисления погонных параметров МПЛП методом конечных элементов. На примере трех МПЛП показана корректность программной реализации, тем не менее целесообразно более детальное её тестирование.

*Работа выполнена при поддержке проектов
Минобрнауки России № FEWM-2020-0041
и РФФИ № 20-37-70020.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Musa, S. M., Sadiku, M. N. O. Using finite element method to calculate capacitance, inductance, characteristic impedance of open microstrip lines // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2008. Vol. 50. P. 611–614.

2. Musa, S. M., Sadiku, M. N. O. Application of the finite element method in calculating the capacitance and inductance of multiconductor transmission lines // *IEEE Proceedings of SoutheastCon*. 2008. P. 300–304.

D. V. Klyukin, S. P. Kuksenko

Calculation of linear parameters of multiconductor transmission lines by the finite element method

This article describes the calculation of linear parameters of multiconductor transmission lines by the finite element method. The software implementation and results of its testing are presented.

yuhoo11@mail.ru, ksergp@tu.tusur.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Бакайтис В. И.</i> ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ СИБИРИ	5
<i>Московченко А. Д.</i> АТОМНАЯ И ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ АВТОТРОФНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МИРЕ	10
<i>Трубченинова И. А.</i> ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА КАЧЕСТВО ОБРАЗОВАНИЯ СТУДЕНТОВ ОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ	17

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 1. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

<i>Алланина Л. М.</i> АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РОССИЙСКОЙ СИСТЕМЫ ПРАВА	23
<i>Жабина Н. А., Михалейко Б. А., Чихирева В. В.</i> ОСОБЕННОСТИ МЕЖПОПУЛЯЦИОННЫХ РИЗОСФЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В СИСТЕМЕ «РАСТЕНИЯ – ДОЖДЕВЫЕ ЧЕРВИ – МИКРООРГАНИЗМЫ»	26
<i>Картопольцев В. М., Сипкин В. В., Картопольцев А. В.</i> СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ – ЗАЛОГ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ	30
<i>Катаев М. Ю., Bulysheva L. A., ЛОСЕВА Н. В., LI DA XU</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАНИРОВАНИЯ ИСПОЛНЕНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ	35
<i>Катаев М. Ю., Bulyshev A. E.</i> ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ХВОЙНЫХ РАСТЕНИЙ	44
<i>Колева Г. Ю.</i> ВЫЖИВАНИЕ КАК ПОИСК ТВОРЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ	52
<i>Марков Н. Г., Маслов К. А., Токарева О. С.</i> СЕМАНТИЧЕСКАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ КРОН ДЕРЕВЬЕВ ПИХТЫ НА СНИМКАХ С БПЛА	56

<i>Мицель А. А., Алимханова А. Н.</i> ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ	61
<i>Саркисов Ю. С., Горленко Н. П.</i> ХИМИЯ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ	65
<i>Селезнева Е. В., Геращенко А. А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В АГРАРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	69
<i>Солдаткин В. С., Михальченко Т. С., Шардина А. О., Юлдашова Л.Ш.</i> ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ПОДГОТОВКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ ДИОДОВ	73
<i>Солдаткин В. С., Шнайдер Е. В., Стасенко Ю. И.</i> СВЕТСИГНАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕЧНОГО И МОРСКОГО ФЛОТА РФ С ФУНКЦИЕЙ РЕТРАНСЛЯЦИИ СИГНАЛОВ ДЛЯ СЕТИ ИНТЕРНЕТ	77
<i>Орлова В. В., Лобода Ю. О., Кочетков О. В., Глухарева С. В., Ноздреватых Д. О., Рекундаль О. И., Пикалова Л. Р.</i> МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВУЗА С ПРЕДПРИЯТИЯМИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТИ	81
Секция 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ	
<i>Иноземцев М. А.</i> ОБЗОР МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ АНТЕННЫХ УСТРОЙСТВ ГЕОРАДАРОВ	87
<i>Варзин Е. С., Суровцев Р. С., Носов А. В.</i> УМЕНЬШЕНИЕ ГАБАРИТОВ ЗАЩИТНОЙ МЕАНДРОВОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ	91
<i>Власова Н. О., Белоусов А. О.</i> ПОЛНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА В ЧЕТЫРЕХПРОВОДНЫХ МОДАЛЬНЫХ ФИЛЬТРАХ С КРУГОВОЙ СИММЕТРИЕЙ	97
<i>Квасников А. А., Куксенко С. П.</i> ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ СЛАУ ПРИ АНАЛИЗЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ МЕТОДОМ МОМЕНТОВ	103
<i>Клюкин Д. В., Куксенко С. П.</i> ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	107

<i>Максимов А. Е., Куксенко С. П.</i> АДАПТИВНЫЙ ИТЕРАЦИОННЫЙ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ МЕТОДОМ МОМЕНТОВ	112
<i>Ромашов И. П., Медведев А. В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРЯДКА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ЦЕПЕЙ ПОСЛЕ ОТКАЗОВ ТИПОВОЙ СТРУКТУРЫ С ТРЕХКРАТНЫМ МОДАЛЬНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ	117
<i>Сагиева И. Е.</i> МИКРОПОЛОСКОВАЯ ЛИНИЯ С ЗАЗЕМЛЕННЫМ ПРОВОДНИКОМ СВЕРХУ, ЗАЩИЩАЮЩАЯ ОТ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ	123
<i>Самойличенко М. А.</i> ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ АКТИВНОГО И ПАССИВНОГО ПРОВОДНИКОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИММЕТРИЧНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С ПАССИВНЫМ ПРОВОДНИКОМ В ВЫРЕЗЕ ОПОРНОЙ ПЛОСКОСТИ ...	127
<i>Хасан А. Алхадж, Газизов Т. Р.</i> ВЛИЯНИЕ СЕГМЕНТАЦИИ И СОГЛАСОВАНИЯ НА ТОК В СВЯЗАННЫХ ПРОВОДАХ	134

Научное издание
ПРИРОДНЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ СИБИРИ
(СИБРЕСУРС-26-2020)

26-я международная научно-практическая конференция
24 ноября 2020 г., г. Томск, Россия

ДОКЛАДЫ

Подписано в печать 00.12.2020. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 8,14. Тираж 80 экз. Заказ 000.

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники.
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. (3822) 533018.