



Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

 РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ

 РАДИОКОНСТРУКТОРСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ

 ФАКУЛЬТЕТ
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

 ФАКУЛЬТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

 ФАКУЛЬТЕТ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

 ГУМАНИТАРНЫЙ
ФАКУЛЬТЕТ

 ФАКУЛЬТЕТ
БЕЗОПАСНОСТИ

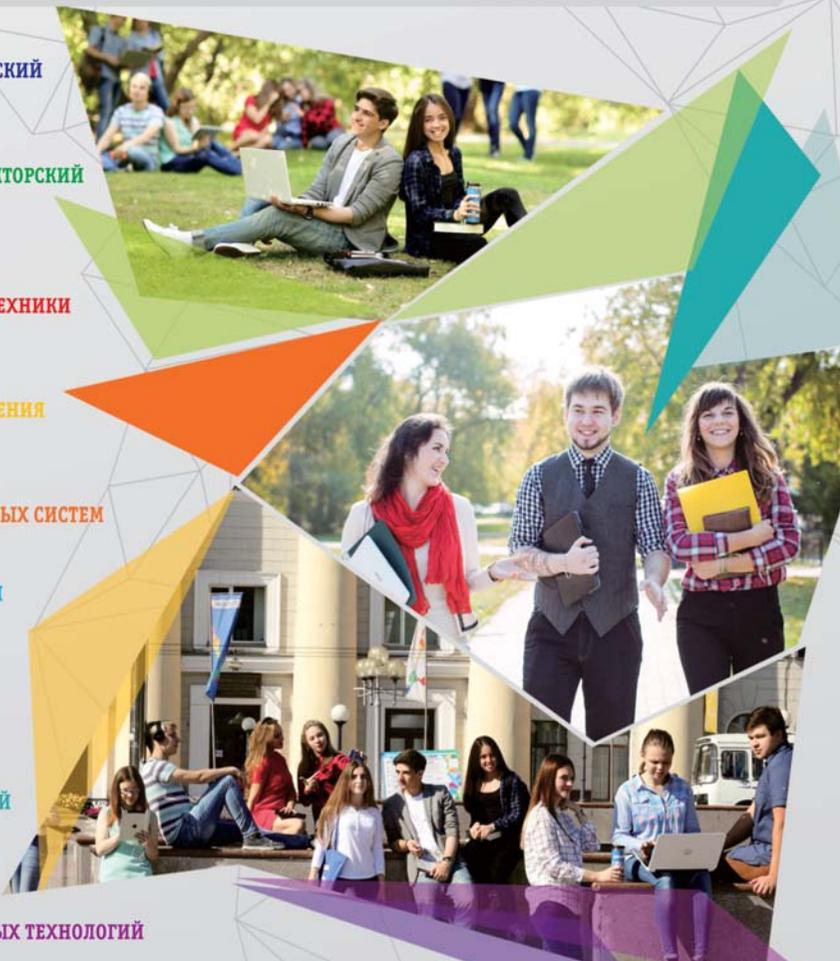
 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ

 ФАКУЛЬТЕТ
ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

 ЮРИДИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ

 ЗАОЧНЫЙ И ВЕЧЕРНИЙ
ФАКУЛЬТЕТ

 ФАКУЛЬТЕТ
ДИСТАНЦИОННОГО
ОБУЧЕНИЯ



**ВЫБИРАЯ БУДУЩЕЕ,
ВЫБИРАЙ TUSUR!**

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, каб. 129 E-mail: onir@main.tusur.ru
Телефон/Факс: (3822) 900-100 Сайт: <http://tusur.ru/>

Информационный центр абитуриента: magistrant.tusur.ru

Сборник избранных статей научной сессии TUSUPa



**ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**

«НАУЧНАЯ СЕССИЯ TUSUPa–2019»

г. Томск, 22–24 мая 2019 г.

(в двух частях)

ЧАСТЬ 1

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)»

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУРа

**по материалам
Международной научно-технической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР–2019»**

22–24 мая 2019 г., г. Томск

В двух частях

Часть 1

В-Спектр
2019

УДК 621.37/.39+681.518 (063)

ББК 32.84я431+32.988я431

С 23

С 23 Сборник избранных статей научной сессии ТУСУРа (Томск, 22–24 мая 2019 г.): в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – 320 с.

ISBN 978-5-91191-410-3

ISBN 978-5-91191-411-0 (Ч. 1)

Сборник включает избранные статьи по итогам Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Конференция посвящена различным аспектам разработки, исследования и практического применения радиотехнических, телевизионных и телекоммуникационных систем и устройств, сетей электро- и радиосвязи, вопросам проектирования и технологии радиоэлектронных средств, аудиовизуальной техники, бытовой радиоэлектронной аппаратуры, а также автоматизированных систем управления и проектирования. Рассматриваются проблемы электроники СВЧ- и акустооптоэлектроники, нанопотоники, физической, плазменной, квантовой, промышленной электроники, радиотехники, информационно-измерительных приборов и устройств, распределенных информационных технологий, вычислительного интеллекта, автоматизации технологических процессов, в частности, в системах управления и проектирования, информационной безопасности и защиты информации. Представлены статьи по математическому моделированию в технике, экономике и менеджменте, антикризисному управлению, правовым проблемам современной России, автоматизации управления в технике и образовании, а также работы, касающиеся социокультурных проблем современности, экологии, мониторинга окружающей среды и безопасности жизнедеятельности.

УДК 621.37/.39+681.518 (063)

ББК 32.84я431+32.988я431

ISBN 978-5-91191-410-3

ISBN 978-5-91191-411-0 (Ч. 1)

© Том. гос. ун-т систем управления
и радиоэлектроники, 2019

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО КОРПУСА МЕТОДОМ МАТРИЦЫ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

А.А. Иванов, магистрант

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

Приведен алгоритм вычисления эффективности экранирования прямоугольного корпуса с помощью двумерного метода матрицы линий передачи для режима TE_{m0} . Выполнены вычисления на примере корпуса размерами $300 \times 300 \times 300$ мм³ с апертурой 100×300 мм². Показано, что при числе итераций сопоставимом с количеством узлов сетки, на частотной зависимости отсутствуют нефизические всплески. Выполнено сравнение результатов с апробированной аналитической моделью.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, экранирование, эффективность экранирования, метод матриц линий передачи.

Экранирование корпусом широко используется при разработке радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) для обеспечения ее помехозащищенности. Для оценки эффективности экранирования (ЭЭ) корпусов применяются численные методы конечных разностей во временной области [1], моментов [2], матрицы линий передачи (МЛП) [3]. Подобные методы обеспечивают высокую точность результатов вычисления ЭЭ, поэтому их применение целесообразно для решения реальных задач проектирования. Коммерческие программные продукты, использующие численные методы, являются дорогостоящими и в этой связи недоступными для разработчиков. Целью данной работы является разработка алгоритма вычисления ЭЭ корпуса с апертурой двумерным методом МЛП.

Эквивалентная схема отрезка линии передачи для решения задачи в области пространства, ограниченного корпусом, представлена на рис. 1. Используя соотношения между величинами электромагнитного поля (уравнениями Максвелла) и уравнениями для цепи с сосредоточенными параметрами (рис. 1), напряженность поля E в точке наблюдения определяется через напряжение V_y в соответствующем узле [4]. При условии, что напряжение источника составляет 1 В, задача может быть сведена к итерационному вычислению напряжения V_y в соответствующем узле дискретной сетки в заданном пространстве.

Для вычислений необходим ввод частотного диапазона, числа узлов сетки, количества итераций, граничных условий, а также положения источника излучения и точки наблюдения P . Итерационный про-

цесс, основанный на принципе Гюйгенса в дискретной форме, выполняется n раз в соответствии с заданным числом n точек частотной зависимости ЭЭ. Характеристики источника могут быть заданы отношением δ размера ячейки l и длины волны λ . Соотношение δ используется для вычисления комплексного значения напряженности.

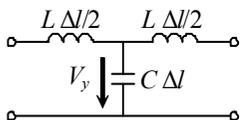


Рис. 1. Эквивалентная схема линии передачи (без потерь) для волнового уравнения

Так как скорость распространения волны в дискретной сетке МЛП составляет $1/\sqrt{2}$ скорости света c [4], то для определения ЭЭ на частоте f соотношение δ может быть вычислено как

$$\delta(f) = \frac{l \cdot f}{c\sqrt{2}}.$$

При условии режима возбуждения TE_{m0} корпус с апертурой во фронтальной стенке (рис. 2, а) может быть представлен в двумерном виде (рис. 2, б). Тогда высотой апертуры и корпуса можно пренебречь. Источник поля задается через напряжение в узлах сетки, лежащих непосредственно перед фронтальной стенкой корпуса (рис. 2, б). Граничные условия задаются в узлах сетки внутри цикла итерационного решения путем введения коэффициента отражения (для идеально проводящих стенок корпуса $\Gamma = -1$).

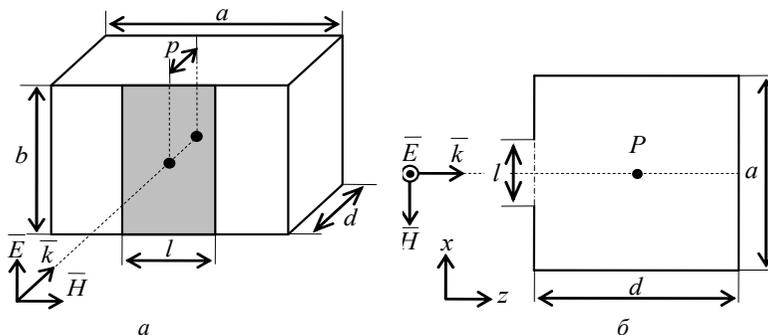


Рис. 2. Трехмерная (а) и двумерная (б) модели корпуса с апертурой во фронтальной стенке

Разработан алгоритм вычисления ЭЭ методом МЛП (рис. 3). Блок «задание начальных условий» включает в себя геометрию корпуса, которая используется при итерационном вычислении напряженности.

Алгоритм выполняется IT раз на каждом шаге частоты в соответствии с заданным числом итераций, однако может быть преобразован для остановки по требуемому условию.

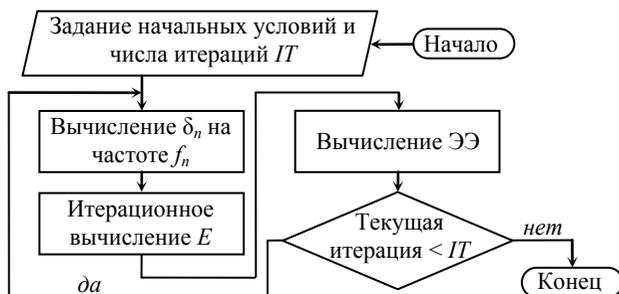


Рис. 3. Алгоритм вычисления ЭЭ методом МПП

Для тестирования выбрана модель корпуса $300 \times 300 \times 300$ мм³ с апертурой 100×300 мм² во фронтальной стенке и сетка размерностью 60×61 узлов. Вычисления выполнялись в частотном диапазоне 1 МГц – 1 ГГц (1000 точек) при увеличении числа итераций в точке наблюдения P в центре корпуса. Полученные частотные зависимости приведены на рис. 4.

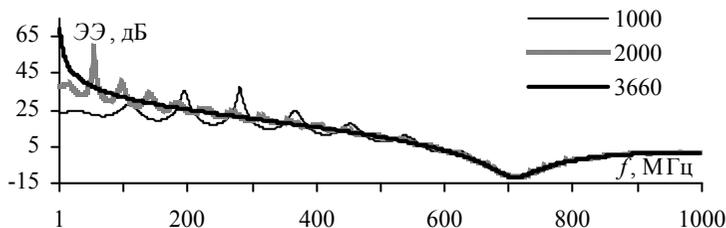


Рис. 4. Частотная зависимость ЭЭ корпусом при изменении числа итераций

Из рис. 4 видно, что при числе итераций 1000 и 2000 на частотной зависимости проявляются нефизические всплески. При увеличении числа итераций до значения, сопоставимого с количеством узлов сетки 3660, данные всплески исчезают. Дальнейшее увеличение числа итераций не приводит к изменению частотной зависимости, однако наблюдается существенное увеличение затрат времени на вычисления.

Выполнены аналогичные вычисления в диапазоне 1 МГц–1,5 ГГц (1500 точек) при числе итераций, равном 2000 для каждой частоты. Получена частотная зависимость ЭЭ (рис. 5), которая сравнивается с аналитической моделью [5]. Видно, что зависимости согласуются, а

отличие составляет не более 20 дБ на частотах выше 1 ГГц. При этом наблюдается расхождение в положении резонансных частот корпуса, что может быть обосновано сравнительно невысокой точностью аналитической модели [5].

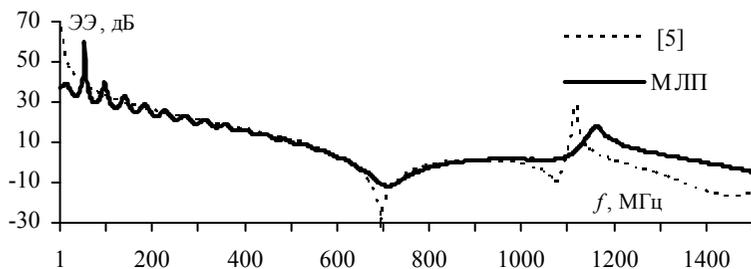


Рис. 5. Частотная зависимость ЭЭ в диапазоне 1–1500 МГц

Таким образом, выполнена разработка алгоритма вычисления ЭЭ прямоугольного корпуса методом ММП в двумерном виде. Сравнение полученных результатов с аналитической моделью [5] на примере корпуса с апертурой показало отличие не более 20 дБ на частотах выше 1 ГГц. Показано, что для получения корректной частотной зависимости ЭЭ число итераций должно соответствовать количеству узлов в заданной сетке. В этом случае нефизичные всплески исчезают.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jiao C. Subcell FDTD analysis of shielding effectiveness of a thin-walled enclosure with an aperture / C. Jiao, L. Liu, X. Cui // *IEEE Transactions on magnetics*. – 2006. – Vol. 42, № 4. – P. 1075–1078.
2. Araneo R. FastMoM analysis of the shielding effectiveness of rectangular enclosures with apertures, metal plates, and conducting objects / R. Araneo, G. Lovat // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 2009. – Vol. 51, № 2. – P. 274–283.
3. Nie B.L. Study of the shielding properties of enclosures with apertures at higher frequencies using the transmission line modeling method / B.L. Nie, P.A. Du // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 2011. – Vol. 53, № 1. – P. 73–81.
4. Sadiku M.N.O. Numerical techniques in electromagnetics with MATLAB: 3rd Edition. – CRC Press, 2009. – 710 p.
5. Shielding effectiveness of a rectangular enclosure with a rectangular aperture / M.P. Robinson, D.W.P. Thomas et al. // *Electronics letters*. – 1996. – Vol. 32, № 17. – P. 1559–1560.

<i>А.А. Колегов, А.В. Черникова, Д.В. Сарасеко, К.А. Денисенко</i> СЛОЖЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ С ПОМОЩЬЮ ОПТОВОЛОКОННЫХ СИГНАЛЬНЫХ ОБЪЕДИНИТЕЛЕЙ.....	216
<i>М.Н. Гаппарова, Н.А. Иванченко, А.С. Перин</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОГЕРЕНТНЫХ СВЕТЛЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СОЛИТОНОВ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ НИОБАТЕ ЛИТИЯ С УЧЕТОМ ВКЛАДА ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА.....	219

ПОДСЕКЦИЯ 2.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Председатель секции – Заболоцкий А.М., проф. каф. ТУ, д.т.н.;
зам. председателя – Куксенко С.П., доцент каф. ТУ, к.т.н.

<i>А.М. Артюшкина, А.В. Демаков</i> РАЗРАБОТКА КОАКСИАЛЬНОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	222
<i>К.В. Симонова, Д.С. Бодажков</i> ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КВЧ-ДИАПАЗОНА, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ.....	225
<i>Л.К. Болатова</i> АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА ДЛЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НЕРЕГУЛЯРНОЙ РАЗБАЛАНСИРОВАННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЛИНИИ В ВОЗДУХЕ.....	228
<i>Е.Б. Черникова</i> АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЛАГОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА.....	232
<i>Рустам Р. Газизов, М.Н. Калинина</i> ВЫЯВЛЕНИЕ ЭКСТРЕМУМОВ СИГНАЛА С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ В ДВУХВИТКОВОЙ МЕАНДРОВОЙ ЛИНИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ЕЕ ПРОВОДНИКАМИ.....	236
<i>Ш.В. Куулар, Р.Р. Хажибеков</i> РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВХОДНЫХ ЦЕПЕЙ ПИКОСЕКУНДНОГО ЛОКАТОРА.....	240
<i>Ш.В. Куулар, Р.Р. Хажибеков</i> СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ РЕАЛИЗАЦИИ ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ПИКОСЕКУНДНОГО ЛОКАТОРА.....	244
<i>Ч.Л. Хомушку</i> ВЫЯВЛЕНИЕ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЭКСТРЕМУМОВ СИГНАЛА В СИЛОВОЙ ШИНЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ.....	247

М.В. Храпцов ВЛИЯНИЕ КАСКАДИРОВАНИЯ ПОМЕХОЗАЩИТНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕПЕЙ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ.....	251
А.А. Иванов РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО КОРПУСА МЕТОДОМ МАТРИЦЫ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ.....	255
К.А. Бокова, А.А. Иванов ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОРПУСА МУЛЬТИПЛЕКСОРА FOX-515	259
С.Х. Карри, Р.С. Суровцев АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОДЛОЖКИ НА РАССЕЯНИЕ МОЩНОСТИ СИГНАЛА В МЕАНДРОВОЙ ЛИНИИ.....	262
А.А. Квасников ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ СИСТЕМЫ TALGAT	266
И.И. Николаев ВЛИЯНИЕ ДВОЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОЙ ШИНЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НА ЕЁ ПОГОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ	270
М.А. Самойличенко АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С ПАССИВНЫМ ПРОВОДНИКОМ В ОПОРНОЙ ПЛОСКОСТИ НА АМПЛИТУДУ ИМПУЛЬСОВ РАЗЛОЖЕНИЯ	273
Л.Т. Таалайбек, М.А. Ембергенов ПОИСК МАКСИМУМА НАПРЯЖЕНИЯ В СВЯЗАННОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ С ПОМОЩЬЮ ЭВОЛЮЦИОННЫХ СТРАТЕГИЙ.....	275
Е.С. Жечев ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЫЧЕК В ОПОРНОМ ПРОВОДНИКЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА.....	279

ПОДСЕКЦИЯ 2.7

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Председатель секции – Туев В.И., зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.;
зам. председателя – Вилисов А.А., проф. каф. РЭТЭМ, д.т.н.

А.А. Максименко, Е.С. Ганская, М.В. Андреева ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЗАПАСА СВЕТОДИОДНОГО ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА	282
Д.В. Кожокару, Е.С. Ганская, Е.С. Гайбович МЕТОДЫ ГЕРМЕТИЗАЦИИ СВЕТОДИОДОВ БЕЛОГО ЦВЕТА СВЕЧЕНИЯ	284