

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени В. Н. КАРАЗИНА

**ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
КОМБИНИРОВАННЫМИ ВИБРАТОРНО-ЩЕЛЕВЫМИ
СТРУКТУРАМИ**

Монография

Харьков – 2018

УДК 537.87+621.396.677

Ф 79

Научный редактор:

доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной и компьютерной радиофизики Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара **О. О. Дробахин**.

Рецензенты:

доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий отделом радиофизической интроскопии Института радиофизики и электроники имени А. Я. Усикова НАН Украины **С. А. Масалов**;
доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом физических основ диагностики материалов Физико-механического института имени Г. В. Карпенко НАН Украины **Д. Б. Куриляк**.

*Утверждено к печати решением Ученого совета
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина
(протокол № 6 от 24.04.2017 г.)*

Ф 79 **Формирование** электромагнитных полей комбинированными вибраторно-щелевыми структурами : монография / Бердник С. Л., Катрич В. А., Нестеренко М. В., Пенкин Ю. М. – Харьков : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2018. – 336 с.
ISBN 978-966-285-512-8

В монографии представлено решение комплекса внутренних и внешних задач электродинамики, связанных с развитием теории, построением математических моделей и разработкой строгих методов расчета основных характеристик комбинированных вибраторно-щелевых систем, а также с выяснением физических закономерностей и особенностей формирования электромагнитных полей такими структурами.

Книга предназначена для научных сотрудников и инженеров радиофизических и радиотехнических специальностей, а также для преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов высших учебных заведений.

Ил. 97, библ. 301.

Ф 79 **Формування** електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними структурами : монографія / Бердник С. Л., Катрич В. О., Нестеренко М. В., Пенкін Ю. М. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2018. – 336 с.
ISBN 978-966-285-512-8

У монографії наведено розв'язання комплексу внутрішніх і зовнішніх задач електродинаміки, пов'язаних із розвитком теорії, побудовою математичних моделей і розробкою строгих методів розрахунків основних характеристик комбінованих вібраторно-щілинних систем, а також із з'ясуванням фізичних закономірностей і особливостей формування електромагнітних полів такими структурами.

Книга призначена для наукових співробітників і інженерів радіофізичних і радіотехнічних спеціальностей, а також для викладачів, аспірантів і студентів старших курсів вищих навчальних закладів.

Іл. 97, бібл. 301.

УДК 537.87+621.396.677

ISBN 978-966-285-512-8

© Харьковский национальный университет
имени В. Н. Каразина, 2018
© Бердник С. Л., Катрич В. А., Нестеренко М. В.,
Пенкин Ю. М., 2018
© Правик М. В., макет обложки, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
PREFACE	8
ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОЛЕЙ В ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕМАХ С КООРДИНАТНЫМИ ГРАНИЦАМИ	15
1.1. Уравнения Гельмгольца в задачах электродинамики	15
1.2. Точные граничные условия для электромагнитных полей	18
1.3. Приближенные полевые граничные условия.....	20
1.3.1. Импедансные граничные условия и пределы их корректного применения.....	20
1.3.2. Поверхностные импедансы металлодиэлектрических структур.....	24
1.3.2.1. Реальные металлы	27
1.3.2.2. Шероховатые и гофрированные металлические экраны	33
1.3.2.3. Слоистые диэлектрические структуры.....	35
1.3.2.4. Тонкие диэлектрические частотно-селективные и киральные слои	39
1.3.2.5. Слоистые диэлектрики с металлическими включениями	43
1.3.2.6. Поверхностный импеданс электрически тонких вибраторов	44
1.3.2.7. Поверхностный импеданс слоя магнитодиэлектрика на металлической поверхности	48
1.4. Особенности применения теоремы единственности и принципа двойственности для областей с импедансными границами	59
1.4.1. Особенности применения теоремы единственности	59
1.4.2. Особенности применения принципа двойственности.....	62
1.5. Тензорные функции Грина векторного уравнения Гельмгольца для потенциалов Герца.....	64
1.5.1. Свойства тензорной функции Грина	64
1.5.2. Метод построения тензора Грина в системах ортогональных криволинейных координат	68
1.5.3. Тензор Грина для областей с цилиндрическими границами	70
2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ТОНКИХ ИМПЕДАНСНЫХ ВИБРАТОРОВ И УЗКИХ ЩЕЛЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕННО- ЧАСТОТНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ.....	73
2.1. Постановка задачи и исходные интегральные уравнения	73
2.1.1. Функция Грина как ядро интегрального уравнения	78
2.1.2. Интегральные уравнения для электрического и магнитного токов в тонких вибраторах и узких щелях	82
2.2. Методы решения интегральных уравнений для токов	87
2.2.1. Основы применения метода моментов	87

2.2.2. Приближенные аналитические методы решения интегральных уравнений для токов.....	91
2.2.2.1. Метод разложения искомой функции в ряд по степеням малого параметра	92
2.2.2.2. Метод последовательных итераций.....	95
2.2.2.3. Математические аспекты асимптотического метода усреднения	98
2.2.2.4. Особенности применения обобщенного метода наведенных ЭМДС для многоэлементных вибраторно-щелевых структур	102
2.3. Новые аспекты в развитии теории тонких импедансных вибраторов	103
2.3.1. Представление двух фундаментальных теорем теории вибраторов.....	104
2.3.2. Альтернативная форма для функции Грина электрического поля на вибраторе	107
2.3.3. Анализ решения задачи для вибратора над плоскостью	111
3. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ТОКОВ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ВИБРАТОРНЫХ И ЩЕЛЕВЫХ РАССЕЙВАТЕЛЯХ	120
3.1. Вибратор с переменным поверхностным импедансом в свободном пространстве.....	120
3.1.1. Решение уравнения для тока методом усреднения.....	120
3.1.2. Решение уравнения для тока обобщенным методом наведенных ЭДС	125
3.1.3. Обоснование выбора аппроксимирующих функций для тока	127
3.2. Вибратор с переменным поверхностным импедансом в прямоугольном волноводе	129
3.2.1. Решение уравнения для тока методом усреднения.....	129
3.2.2. Решение уравнения для тока обобщенным методом наведенных ЭДС	132
3.2.3. Численные и экспериментальные результаты.....	135
3.3. Система импедансных вибраторов в прямоугольном волноводе	138
3.3.1. Постановка задачи и решение системы уравнений для токов.....	138
3.3.2. Численные и экспериментальные результаты.....	141
3.4. Узкие щели в стенках прямоугольного волновода.....	146
3.4.1. Решение уравнения для тока методом усреднения.....	146
3.4.2. Симметричная поперечная щель в широкой стенке волновода	149
3.4.3. Продольная щель в широкой стенке волновода.....	152
4. КОМБИНИРОВАННЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ ВИБРАТОРНО-ЩЕЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ	156
4.1. Двухэлементная вибраторно-щелевая структура.....	156
4.1.1. Постановка задачи и решение уравнений для токов	156
4.1.2. Численные и экспериментальные результаты.....	161
4.2. Трехэлементная вибраторно-щелевая структура без взаимодействия между вибраторами и щелью.....	172

4.2.1. Постановка задачи и решение уравнений для токов	172
4.2.2. Численные и экспериментальные результаты.....	175
4.3. Трехэлементная вибраторно-щелевая структура в случае взаимодействия между вибраторами и щелью	180
4.3.1. Постановка задачи и решение уравнений для токов	180
4.3.2. Численные и экспериментальные результаты.....	183
5. ВИБРАТОРНО-ЩЕЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В ОБЛАСТИ СВЯЗИ СОЧЛЕНЕНИЙ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ.....	186
5.1. <i>E</i> -плоскостное сочленение равноразмерных волноводов с двухэлементной вибраторно-щелевой структурой	186
5.1.1. Постановка задачи и решение интегральных уравнений для токов .	186
5.1.2. Численные и экспериментальные результаты.....	191
5.2. <i>E</i> -плоскостное сочленение разноразмерных волноводов с двухэлементной вибраторно-щелевой структурой	199
5.2.1. Особенности постановки задачи.....	199
5.2.2. Численные и экспериментальные результаты.....	200
5.3. Энергетические характеристики Т-образного сочленения волноводов с трехэлементной вибраторно-щелевой структурой.....	206
5.3.1. Постановка задачи и решение интегральных уравнений для токов .	208
5.3.2. Численные и экспериментальные результаты.....	213
6. ВОЛНОВОДНЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ВИБРАТОРНО-ЩЕЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ	224
6.1. Постановка задачи и исходные уравнения в общем случае.....	224
6.2. Элемент Клэвина для общего случая.....	229
6.3. Вибраторно-щелевой излучатель на основе полого прямоугольного волновода.....	234
6.3.1. Численные и экспериментальные результаты.....	239
7. КОМБИНИРОВАННАЯ ВИБРАТОРНО-ЩЕЛЕВАЯ СТРУКТУРА В ПРОСТРАНСТВЕ ВНЕ ИДЕАЛЬНО ПРОВОДЯЩЕЙ СФЕРЫ	249
7.1. Одиночный резонансный щелевой излучатель на сфере.....	249
7.1.1. Постановка задачи и решение интегрального уравнения для тока...	251
7.1.2. Поля излучения щелевой сферической антенны	260
7.1.3. Численные и экспериментальные результаты.....	263
7.1.3.1. Сферическая антенна с идеально проводящими поверхностями.....	263
7.1.3.2. Сферическая антенна с импедансным торцом волноводной секции.....	266
7.1.3.3. Сферическая антенна с проходным резонатором в волноводном тракте	268
7.2. Радиальный импедансный вибратор на сфере.....	270
7.2.1. Постановка и решение задачи.....	270
7.2.2. Численные результаты.....	275
7.3. Комбинированная вибраторно-щелевая структура на сфере	278

7.3.1. Решение внешней электродинамической задачи	279
7.3.2. Решение системы уравнений для токов	280
7.3.3. Поля излучения вибраторно-щелевой структуры.....	281
7.3.4. Численные результаты	282
Приложение А. Тензорные функции Грина электродинамических объемов	285
Приложение Б. Представления функции Грина неограниченного пространства в ортогональных системах координат	294
Приложение В. Строгое решение уравнений поля для слоя магнитодиэлектрика на проводящей плоскости с линейным законом изменения диэлектрической проницаемости.....	297
Приложение Г. Доказательства теорем для тонких вибраторных излучателей.....	299
Приложение Д. Электромагнитные величины в системах единиц СГС и СИ.....	308
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРОВ	312
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	322